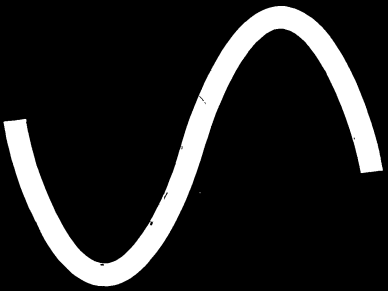
21.3
045

ЭЛЕКТРО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК



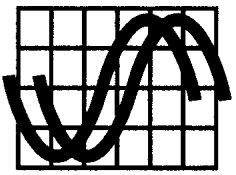
ИЗДАТЕЛЬСТВО МЭИ

Науч. фонд

62.3
Э45

ЭЛЕКТРО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК

В ЧЕТЫРЕХ ТОМАХ



ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ

профессоров Московского энергетического института (технического университета) В.Г.Герасимова, А.Ф.Дьякова, Н.Ф.Ильинского, В.А.Лабунцова, В.П.Морозкина, И.Н.Орлова, А.И.Попова (главный редактор), В.А.Строева

8-е ИЗДАНИЕ, ИСПРАВЛЕННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

4

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ



МОСКВА ИЗДАТЕЛЬСТВО МЭИ 2002

УДК [621.3 + 621.3.004.14] (035.5)
ББК 31.2я21
Э 45

Издание осуществлено при финансовой поддержке РАО «ЕЭС России»

527445

Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 4.

Э 45 Использование электрической энергии / Под общ ред профессоров МЭИ В Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). —8-е изд., испр. и доп. — М.: Издательство МЭИ, 2002. — 696 с.

ISBN 5-7046-0099-9
ISBN 5-7046-0751-9(Т. 4)

Приведены сведения по общим вопросам электропривода, компонентам его силового канала, микропроцессорным средствам управления, организации систем с элементами проектирования и примерами современных электроприводов, электротермическому оборудованию, оборудованию для электротехнологии, дуговой, электрошлаковой и контактной сварки, электрическому освещению, электрическому транспорту, электрооборудованию автомобилей и тракторов

Материал тома существенно обновлен в сравнении с предыдущим изданием (1988 г) особенно в части быстро меняющихся элементов и систем — преобразователей частоты, микропроцессорных средств, новых видов электротехнологий, освещения, электрооборудования

Для широкого круга инженеров-электриков и студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов

ББК 31.2я21
УДК [621.3 + 621.3.004.14] (035.5)
ISBN 5-7046-0099-9
ISBN 5-7046-0751-9(Т. 4)

© Авторы Т 4, 2002



СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 55. Электропривод — общие вопросы... 5
Раздел 56. Компоненты электропривода. Силовой канал ... 44
Раздел 57. Микропроцессорные средства управления ... 123
Раздел 58. Системы электропривода ... 180
Раздел 59. Элементы проектирования и примеры электроприводов ... 225
Раздел 60. Электротермическое и электротехнологическое оборудование ... 283
Раздел 61. Электрическое освещение ... 459
Раздел 62. Электрический транспорт ... 518
Раздел 63. Электрооборудование автомобилей и тракторов ... 634

ОТ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

Материалы четвертого тома подготовили:

Раздел 55. Электропривод — общие вопросы — канд. техн. наук, профессор В.В. Москаленко.

Раздел 56. Компоненты электропривода. Силовой канал — канд. техн. наук, проф. В.В. Москаленко, канд. техн. наук доц. Ю.М. Сафонов, канд. техн. наук доц. В.А. Анисимов, канд. техн. наук ст. научн. сотр. А.В. Кудрявцев, канд. техн. наук, доц. В.Н. Остриров, научн. сотр. Е.В. Бычкова, канд. техн. наук, доц. Ю.Д. Капунцов.

Раздел 57. Микропроцессорные средства управления электроприводами — канд. техн. наук, доц. Т.В. Ремизевич, канд. техн. наук, доц. В.Ф. Козаченко, докт. техн. наук, доц. М.Г. Бычков.

Раздел 58. Системы электропривода — канд. техн. наук, проф. В.А. Елисеев, докт. техн. наук, проф. О.И. Осипов, канд. техн. наук, доц. В.Г. Алферов, докт. техн. наук, проф. В.М. Терехов.

Раздел 59. Элементы проектирования и примеры электроприводов — канд. техн. наук, проф. В.В. Москаленко, канд. техн. наук, доц. Г.А. Ромашко, канд. техн. наук, ст. научн. сотр. Ю.И. Прудникова, канд. техн. наук, доц. А.Н. Ладыгин, докт. техн. наук, проф. Л.Б. Масандилов, канд. техн. наук, доц. В.Е. Платонова, докт. техн. наук, проф. Н.Ф. Ильинский, канд. техн. наук, доц. Н.В. Мельников.

Раздел 60. Электротермическое и электротехнологическое оборудование — канд. техн. наук, доц. Л.Г. Ткачев, канд. техн. наук, ст. научн. сотр. В.Д. Артемьев, докт. техн. наук А.Н. Попов, докт. техн. наук, проф. А.Б. Кувалдин, докт. техн. наук, проф. В.П. Рубцов, канд. техн. наук, ст. научн. сотр. В.А. Калистратов, канд. техн. наук, ст. научн. сотр. Р.В. Минеев, канд. техн. наук, доц. И.П. Кружекин, канд. техн. наук, доц. В.М. Качалов.

Раздел 61. Электрическое освещение — докт. техн. наук, проф. В.В. Трембач, докт. техн. наук, проф. А.Б. Матвеев, докт. техн. наук, проф. С.П. Решенов.

Раздел 62. Электрический транспорт — канд. техн. наук, доц. Т.А. Савина, канд. техн. наук, проф. М.А. Слепцов, канд. техн. наук, доц. Л.С. Байрыева, канд. техн. наук, доц. Г.П. Долаберидзе, докт. техн. наук, проф. В.А. Пречистский, докт. техн. наук, проф. В.Д. Тулупов.

Раздел 63. Электрооборудование автомобилей и тракторов — канд. техн. наук, доц. А.В. Акимов, канд. техн. наук, доц. С.В. Акимов.

Редактирование материалов четвертого тома осуществлено доктором техн. наук, профессором Н.Ф. ИЛЬИНСКИМ и канд. техн. наук, профессором С.К. КОЗЫРЕВЫМ.

Раздел 55

ЭЛЕКТРОПРИВОД — ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

СОДЕРЖАНИЕ

55 1 Основные величины — обозначения и единицы измерения 5
55 2 Определение понятия и классификация электропривода 5
55 3 Механика ЭП 7
55 4 Регулирование переменных ЭП Структуры ЭП 13
55 5 ЭП с двигателями постоянного тока 19
55 6 ЭП с асинхронными двигателями 26
55 7 ЭП с синхронными двигателями 34
55 8 Энергетика ЭП 38
Список литературы 42

55.1. ОСНОВНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ — ОБОЗНАЧЕНИЯ И ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ

В электроприводе (ЭП) применяются следующие обозначения и единицы измерения основных величин

P — мощность, Вт,
A — энергия, работа, Дж,
F — сила, Н,
M — момент, Н · м,
ω — угловая скорость, рад/с,
φ — угловой путь, угол поворота, рад,
ε — угловое ускорение, рад/с^2,
J — момент инерции, кг · м^2,
v — скорость поступательного движения, м/с,
l — длина, путь поступательного движения, м,
a — ускорение поступательного движения, м/с^2,
m — масса, кг,
t — время, с,
T — постоянная времени, с,
$U(E)$ — напряжение (ЭДС), В,
I — ток, А,
R — сопротивление активное, Ом,
X — сопротивление реактивное, Ом,
η — КПД,
$\cos\varphi$ — коэффициент мощности,
Φ — магнитный поток, Вб,
ψ — потокосцепление, Вб,
L — индуктивность, Гн,
C — емкость, Ф

55.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНЯТИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В соответствии с ГОСТ Р 50369—92 [55 6] «**электропривод** — это электромеханическая система, состоящая в общем случае из взаимодействующих преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения с внешними электрическими, механическими, управляющими и информационными системами, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочих машин и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса»

Структурная схема ЭП приведена на рис 55 1, где обозначено *ЭД* — электродвигатель, *ПЭ* — преобразователь электроэнергии, *МП* — механическая передача, *УУ* — управляющее устройство, *УИС* — устройство информационное и сопряжения, *СУ* — система управления ЭП, *РМ* — рабочая машина, *ИО* — исполнительный орган рабочей машины, *ИЭЭ* — источник электроэнергии, *ЭЭ* — электрическая энергия, *МЭ* — механическая энергия, $U_з$, $U_у$, $U_д$ — сигналы соответственно задания, управления и датчиков переменных и защит Назначение элементов ЭП состоит в следующем

Электродвигатель — электромеханический преобразователь, предназначенный для преобразования электрической энергии в механическую (иногда для обратного преобразования)

Преобразователь электроэнергии — электротехническое устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии одних параметров или показателей в электроэнергию других параметров или показателей

Механическая передача — механический преобразователь, предназначенный для передачи механической энергии от электродвигателя к исполнительному органу рабочей машины и согласования вида и скоростей их движения

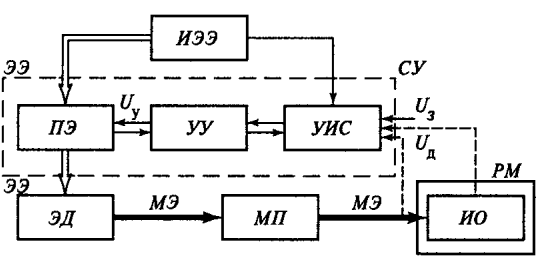


Рис. 55.1. Структурная схема электропривода

Управляющее устройство — устройство, предназначенное для формирования управляющих воздействий в ЭП.

Информационное устройство — устройство, предназначенное для получения, преобразования, хранения, распределения и выдачи информации о переменных ЭП, технологическом процессе и сопредельных системах для использования в системе управления ЭП и внешних информационных системах.

Устройство сопряжения — совокупность электрических и механических элементов, обеспечивающая взаимодействие ЭП с сопредельными системами и отдельных частей ЭП.

Система управления ЭП — совокупность управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения ЭП, предназначенная для управления электромеханическим преобразователем энергии с целью обеспечения заданного движения исполнительного органа рабочей машины.

Рабочая машина — машина, осуществляющая изменение формы, свойств, состояния и положения предметов труда.

Исполнительный орган рабочей машины — движущийся элемент рабочей машины, выполняющий технологическую операцию.

В табл. 55.1 приведены примеры элементов ЭП и исполнительных органов рабочих машин.

Таблица 55.1. **Реализация элементов ЭП**

Обозначение на рис. 55.1	Название	Возможные реализации
ЭД	Электродвигатель	Асинхронный, синхронный, постоянного тока с независимым, последовательным или смешанным возбуждением вращательного движения, вентильный, линейный, вибрационный, сферический, поворотный
ПЭ	Преобразователь	Электромашинный, управляемый выпрямитель, преобразователь частоты, регулятор напряжения, коммутатор напряжения
МП	Механическая передача	Цилиндрические и червячные редукторы, ременные и цепные передачи, электромагнитные муфты
УУ	Управляющее устройство	Релейные схемы управления, регуляторы, микропроцессорные средства управления
УИС	Устройство информационное и сопряжения	Устройства вычислительные и памяти, драйверы, интерфейсные средства
ИО	Исполнительный орган рабочей машины	Шпиндель токарного и фрезерного станка, валки прокатных станов, лента конвейера, кабина, скип или клеть подъемника, рабочее колесо насоса или вентилятора

Классификация ЭП осуществляется по нескольким признакам [55.6]:

1. По соотношению числа двигателей и исполнительных органов рабочих машин различают ЭП:

групповые, обеспечивающие движение исполнительного органа нескольких рабочих машин или движение нескольких исполнительных органов одной рабочей машины;

индивидуальные, обеспечивающие движение одного исполнительного органа одной рабочей машины;

взаимосвязанные, состоящие из двух или более двигателей или механически связанных между собой ЭП, при работе которых поддерживается заданное соотношение их скоростей, и (или) нагрузок, и (или) положения исполнительных органов рабочих машин. При наличии механической связи между ЭП взаимосвязанный ЭП называется многодвигательным, при наличии электрической связи — электрическим валом.

2. По характеристике движения исполнительных органов рабочих машин различают ЭП:

вращательного движения, обеспечивающие вращательное движение исполнительных органов рабочих машин;

поступательного движения, обеспечивающие поступательное движение исполнительных органов рабочих машин;

возвратно-поступательного движения, обеспечивающие возвратно-поступательное (вибрационное) движение исполнительных органов рабочих машин;

непрерывного движения, обеспечивающие непрерывное движение исполнительных органов рабочих машин;

дискретного движения, обеспечивающие дискретное перемещение исполнительных органов рабочих машин;

реверсивные, обеспечивающие движение исполнительных органов рабочих машин в любом из двух противоположных направлений;

нереверсивные, обеспечивающие движение исполнительных органов рабочих машин только в одном направлении;

многокоординатные, обеспечивающие движение исполнительных органов машин по двум или более пространственным координатам;

моментные, обеспечивающие заданный момент или усилие на исполнительных органах рабочих машин;

позиционные, обеспечивающие перемещение и установку исполнительных органов рабочих машин в заданное положение;

многоскоростные, обеспечивающие движение исполнительных органов рабочих машин с любой из двух или более фиксированных скоростей;

регулируемые, обеспечивающие управляемое изменение координат движения исполнительных органов рабочих машин;

нерегулируемые, не обеспечивающие управляемое изменение координат движения исполнительных органов рабочих машин;

согласованного движения, обеспечивающие согласованное движение двух или более исполнительных органов рабочих машин.

3. По характеристике и структуре системы управления различают ЭП:

неавтоматизированные, операции по управлению которыми выполняет оператор;

автоматизированные, все или часть операций управления которыми выполняют устройства управлеиия;

следящие, обеспечивающие перемещение исполнительных органов рабочих машин в соответствии с произвольно изменяющимся входным задающим сигналом;

с программным управлением, обеспечивающие перемещение исполнительных органов рабочих машин в соответствии с заданной программой;

адаптивный, автоматически избирающие структуру и (или) параметры своей системы управления при изменении возмущающих воздействий;

с регулированием энергетических показателей, обеспечивающие заданный закон изменения одного или нескольких энергетических показателей работы;

с разомкнутой (замкнутой) системой управления, в которых отсутствуют (имеются) обратные связи по регулируемым координатам или (и) по возмущающему воздействию.

4. По способу технической (аппаратной) реализации элементов различают ЭП:

постоянного (переменного) тока, содержащие двигатели постоянного (переменного) тока;

тиристорные (транзисторные), содержащие тиристорные (транзисторные) преобразователи электроэнергии;

по системе генератор—двигатель (по системе статический преобразователь—двигатель), в состав которых входят электромашинные (статические) преобразователи электроэнергии;

с релейно-контакторным (бесконтактным) управлением, система управления которыми реализована на основе релейно-контакторной (бесконтактной) аппаратуры;

с мехатронным модулем, объединяющим двигатель с электронными и электромеханическими компонентами управления, диагностики и защиты;

редукторные (безредукторные), механическая передача которых содержит (не содержит) редуктор;

маховичные, механическая передача которых содержит маховик;

дифференциальные, представляющие собой многодвигательные ЭП, в которых скорость и момент двигателей алгебраически суммируются с помощью механического дифференциала;

с тормозным устройством (управляемой муфтой), механическая передача которых содержит тормозное устройство (управляемую муфту).

55.3. МЕХАНИКА ЭП

В этом параграфе излагается материал, позволяющий выполнять анализ установившегося и неустановившегося (переходного) режимов механического движения элементов ЭП и исполнительных органов рабочих машин.

Уравнение движения ЭП. В механическом движении участвуют подвижная часть электродвигателя (ротор или якорь), элементы механической передачи и исполнительный орган рабочей машины. Движение любого элемента механической части ЭП или исполнительного органа рабочей машины описывается следующими уравнениями:

при поступательном движении

$$\sum F = m\,\mathrm{d}v/\mathrm{d}t + + v\,\mathrm{d}m/\mathrm{d}t;$$

при вращательном движении

$$\sum M = J\,\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t + + \omega\,\mathrm{d}J/\mathrm{d}t,$$

где $\sum F$ и $\sum M$ — соответственно совокупность сил и моментов, действующих на элемент; m и J — масса и момент инерции элемента; t — время; v — скорость поступательного движения; ω — угловая скорость.

Уравнения движения по своему характеру являются дифференциальными, поскольку содержат производные скорости, массы и момента инерции. В случае, когда масса и момент инерции элементов при движении не изменяются, уравнения движения упрощаются и принимают вид

$$\sum F = m\,\mathrm{d}v/\mathrm{d}t = ma; \quad \sum M = J\,\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t = J\varepsilon,$$

где $a = \mathrm{d}v/\mathrm{d}t$ и $\varepsilon = \mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t$ — соответственно ускорение при поступательном и вращательном движении.

Если $\sum F = 0$ или $\sum M = 0$, то $\mathrm{d}v/\mathrm{d}t = \mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t = 0$ и элемент движется с постоянной скоростью или находится в состоянии покоя. Такое движение называют установившимся.

При $\sum F > 0$ или $\sum M > 0$ элемент будет двигаться с ускорением, а при $\sum F < 0$ или $\sum M < 0$ — с замедлением.

Для анализа механического движения ЭП и исполнительных органов рабочих машин применяются расчетные схемы механической части ЭП и исполнительных органов рабочих машин, которые

получаются в результате выполнения операции приведения.

Расчетные схемы механической части ЭП. Операция приведения. Элементы механической части ЭП и исполнительные органы рабочих машин связаны между собой, поэтому, анализируя механическое движение того или иного элемента, необходимо учитывать влияние на него других механических элементов кинематической схемы ЭП. Это достигается соответствующим пересчетом входящих в уравнения движения сил, моментов, масс и моментов инерции к элементу, движение которого рассматривается. Такой расчет в теории ЭП получил название операции приведения, пересчитанные переменные и параметры называются приведенными, а сам элемент — элементом приведения.

Операцию приведения можно выполнять относительно любого элемента, движение которого подлежит рассмотрению. Обычно в качестве такого элемента приведения выбирают двигатель, являющийся источником механического движения. В результате выполнения операции приведения получают так называемую расчетную схему, вид которой определяется количеством учитываемых при приведении факторов.

В общем случае механическая часть ЭП представляет собой систему взаимосвязанных элементов конечной жесткости с распределенными или сосредоточенными массами, между которыми могут иметь место зазоры. Приведение масс и моментов инерции элементов, их упругости, сил и моментов, на них действующих, а также зазоров осуществляется на основе закона сохранения энергии.

Приведение моментов инерции и масс элементов к валу двигателя (элементу приведения) вращательного движения осуществляется по формулам:

при вращательном движении k-го элемента

$$J_{\text{пр}k} = J_k / \iota_k^2;$$

при поступательном движении i-го элемента

$$J_{\text{пр}\iota} = m_\iota \rho_\iota^2,$$

где J_k — момент инерции k-го элемента; m_ι — масса i-го элемента; $J_{\text{пр}}$ — их приведенные значения; i_k — передаточное число кинематической цепи между k-м элементом и валом двигателя; ρ_ι — радиус приведения кинематической цепи между ι-м элементом и валом двигателя.

Как следует из этих формул, для выполнения операции приведения следует моменты инерции вращающихся элементов разделить на квадрат передаточного числа, а массы поступательно движущихся элементов умножить на квадрат радиуса приведения кинематической схемы между этими элементами и валом двигателя (элементом приведения).

Приведение моментов и сил осуществляется для определения механической нагрузки двигателя, создаваемой исполнительным органом рабочей машины при выполнении им технологической операции, а также элементами механической части за счет действия сил трения и других факторов. Эта часть нагрузки обычно учитывается с помощью КПД механических элементов ЭП. Приведение сил и моментов, действующих на k-й вращающийся элемент и i-й поступательно движущийся элемент, или исполнительный орган рабочей машины к валу двигателя вращательного движения осуществляется по формулам:

при потоке энергии от двигателя к исполнительному органу рабочей машины

$$M_{\text{с}k} = M_k / (\eta_k i_k); \quad M_{\text{с}\iota} = F_\iota \rho_\iota / \eta_\iota;$$

при потоке энергии от исполнительного органа рабочей машины к двигателю

$$M_{\text{с}k} = M_k \eta_k / i_k; \quad M_{\text{с}\iota} = F_\iota \eta_\iota \rho_\iota,$$

где M_k — момент, действующий на k-й элемент механической части ЭП или исполнительный орган рабочей машины; F_ι — сила, действующая на i-й элемент или исполнительный орган рабочей машины; $M_{\text{с}k}$, $M_{\text{с}\iota}$ — приведенные их значения; η_k, η_ι — КПД кинематической цепи между элементами или исполнительным органом рабочей машины и валом двигателя.

Получаемый момент на валу двигателя называется моментом нагрузки, или моментом сопротивления, или статическим моментом.

Приведение коэффициента жесткости к валу двигателя i-го упругого поступательно движущегося элемента (стержня, каната, ремня) осуществляется по формуле

$$C_{\text{пр}\iota} = C_\iota \rho_\iota^2,$$

а k-го упругого вращающегося элемента (вала, оси) — по формуле

$$C_{\text{пр}k} = C_k / \iota_k^2,$$

где $C_k = J_k G_k / l_k$ и $C_\iota = S_\iota E_\iota / l_\iota$ — соответственно коэффициент жесткости k-го вращающегося, Н · м, и i-го поступательно движущегося, Н/м, упругого элемента; $C_{\text{пр}\iota}$, $C_{\text{пр}k}$ — приведенные их значения, Н · м; $J_k = \pi R_k^4 / 2$ — момент инерции поперечного сечения k-го элемента, м^4; G_k — модуль упругости кручения, Па; l_k — длина элемента, м; S_ι, E_ι, l_ι — соответственно площадь поперечного сечения i-го элемента, м^2, модуль упругости растяжения и сжатия, Па, длина ι-го элемента, м.

При параллельном соединении нескольких упругих элементов с коэффициентами жесткости C_1,

C_2, C_3, эквивалентная жесткость определяется по формуле

$$C_{экв} = C_1 + C_2 + C_3 + \quad ,$$

а при их последовательном соединении — по формуле

$$1/C_{экв} = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3 +$$

Податливостью упругого элемента e называют величину, обратную жесткости

$$e = 1/C$$

Приведение углового φ_0 и линейного δ_0 зазоров осуществляется по формулам

$$\varphi_{пр} = \varphi_0 i_0 \quad \text{или} \quad \varphi_{пр} - \delta_0 \rho_0,$$

где i_0, ρ_0 — соответственно передаточное число и радиус приведения кинематической цепи между валом двигателя и зазором, $\varphi_{пр}$ — приведенное значение зазора, рад

При использовании в ЭП двигателя поступательного движения (линейного двигателя) приведение осуществляется по тем же принципам

Одномассовая расчетная схема (жесткое приведенное механическое звено) получается после выполнения операции приведения в случае, когда все механические элементы ЭП и исполнительных органов рабочих машин принимаются абсолютно жесткими, а зазоры в кинематической схеме не учитываются Одномассовая расчетная схема приведена на рис 55 2, где M, M_c — соответственно момент двигателя и приведенный статический момент нагрузки, J — приведенный к валу двигателя момент инерции, ω — угловая скорость двигателя (в дальнейшем — скорость двигателя)

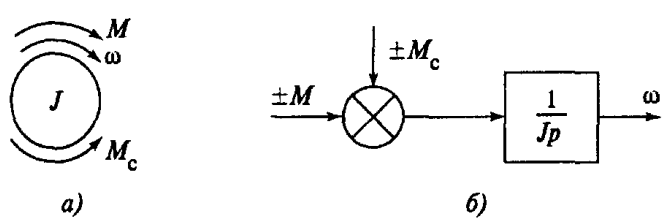


Рис. 55.2. Одномассовая расчетная схема:
а — условное изображение, *б* — структурная схема

В общем случае моменты двигателя M и нагрузки M_c могут иметь как положительные, так и отрицательные знаки и уравнение движения имеет вид

$$\pm M \pm M_c = J\,d\omega/dt$$

Если двигатель создает движущий момент, а исполнительные органы рабочих машин — момент сопротивления движению, тогда уравнение движения принимает следующий вид

$$M \quad M_c = J\,d\omega/dt$$

Левая часть этого уравнения, представляющая собой разность моментов двигателя и нагрузки и определяющая характер движения, в теории ЭП получила название динамического момента $M_{дин} = M - M_c$

Общее правило, по которому определяются знаки моментов, следующее При направлении передачи мощности от двигателя к исполнительному органу движущий момент двигателя должен иметь знак, совпадающий со знаком скорости, а в тормозном режиме момент двигателя должен иметь знак, противоположный знаку скорости Тормозные моменты нагрузки должны иметь знак, совпадающий со знаком скорости, а движущие активные нагрузки — знак, противоположный знаку скорости

Многомассовые расчетные схемы получаются при учете упругости элементов механической части ЭП и исполнительных органов рабочих машин, а также зазоров в кинематической схеме ЭП Движение элементов в многомассовых схемах является более сложным и многообразным, и для его анализа часто требуется применение вычислительной техники

Если в расчет принимается упругость только одного элемента, а зазоры при этом не учитываются, то выполнение операции приведения позволяет представить механическую часть ЭП в виде так называемой двухмассовой расчетной системы, изображенной на рис 55 3

В этой схеме упругий элемент с коэффициентом жесткости C соединяет две массы с моментами инерции J_1 и J_2 Первая из масс, которая включает массу движущейся части двигателя и жестко связанных с ним элементов кинематической схемы, имеет угловую скорость ω_1, а другая масса, которая включает в себя массу исполнительного органа и жестко связанных с ним элементов, — скорость ω_2 К пер-

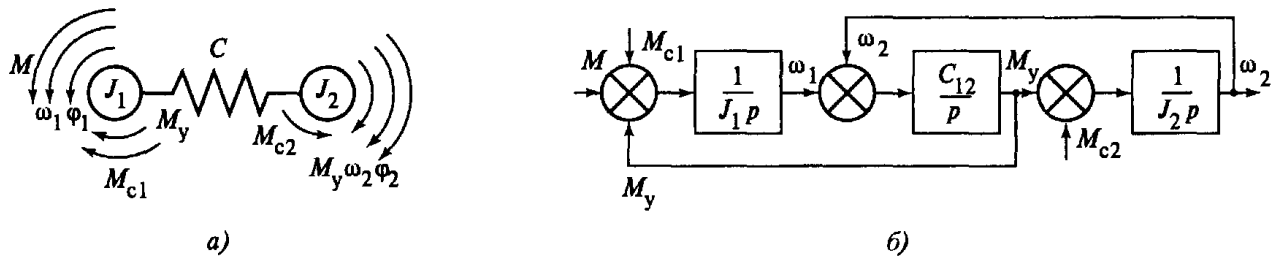


Рис. 55.3. Двухмассовая расчетная схема:
а — условное изображение, *б* — структурная схема

вой массе приложен момент двигателя M, упругий момент M_y и момент сопротивления M_{c1}, а ко второй — упругий момент и момент нагрузки M_{c2} Движение двухмассовой системы описывается совокупностью следующих уравнений

$$M - M_y - M_{c1} = J_1 \, d\omega_1 / dt,$$

$$M_y - M_{c2} = J_2 \, d\omega_2 / dt,$$

$$M_y = C(\varphi_1 - \varphi_2),$$

где φ_1, φ_2 — углы поворота соответственно первой и второй массы

При учете упругости двух и более элементов ЭП или исполнительных органов рабочих машин получаются многомассовые расчетные схемы Подробно движение в двух- и многомассовых схемах ЭП рассмотрено в [55 9, 55 10, 55 17]

Установившееся движение ЭП и его устойчивость Для одномассовой расчетной схемы рис 55 2 установившееся механическое движение ЭП соответствует равенству моментов двигателя и нагрузки, т е условию $M = M_c$ Проверка выполнения этого условия может производиться аналитически или с помощью так называемых механических характеристик двигателя и исполнительного органа рабочей машины

Механической характеристикой двигателя называется зависимость его угловой скорости от развиваемого момента $\omega(M)$ (двигатель вращательного движения) или линейной скорости от развиваемого усилия $v(F)$ (двигатель поступательного движения) Различают естественную и искусственную характеристики двигателей

Естественная характеристика двигателя (она у него единственная) соответствует основной (паспортной) схеме его включения и номинальным параметрам питающего напряжения Примеры естественных механических характеристик двигателей вращательного движения приведены на рис 55 4 На естественной характеристике располагается точка номинального (паспортного) режима двигателя с координатами $\omega_{ном}$, $M_{ном}$

Если двигатель включен не по паспортной схеме, или в его электрические цепи включены какие-либо дополнительные электротехнические элементы — резисторы, реакторы, конденсаторы, или же двигатель питается напряжением с неноминальными параметрами, то он будет иметь характеристики, называемые искусственными Таких характеристик у двигателя может быть сколь угодно много Поскольку эти характеристики получают с целью регулирования переменных (координат) двигателя — тока, момента, скорости, положения, то они иногда называются регулировочными Искусственные характеристики двигателя и способы их получения подробно рассматриваются далее

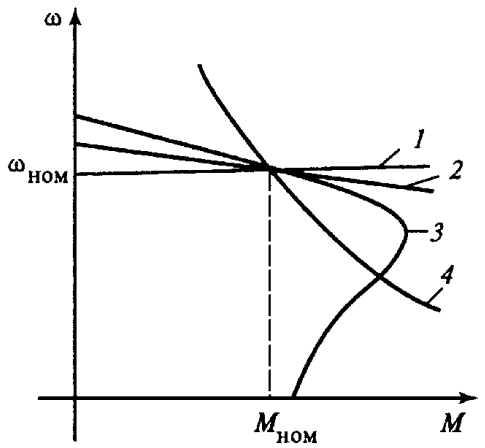


Рис. 55.4. Механические характеристики двигателей:

1—4 — соответственно синхронного, постоянного тока с независимым возбуждением, асинхронного и постоянного тока с последовательным возбуждением

Механической характеристикой исполнительного органа рабочей машины называется зависимость угловой скорости его движения от момента или усилия на нем, т е $\omega_{и.о}$ ($M_{и.о}$) при вращательном движении исполнительного органа рабочей машины или $v_{и.о}$ ($F_{и.о}$) при его поступательном движении В результате операции приведения эти характеристики преобразуются в зависимость вида $\omega(M_c)$, где ω — угловая скорость двигателя, а M_c — приведенный к его валу момент нагрузки (сопротивления) Примеры механических характеристик некоторых исполнительных органов приведены на рис 55 5 Отметим, что реальные механические характеристики исполнительных органов рабочих машин более сложны по своему виду и

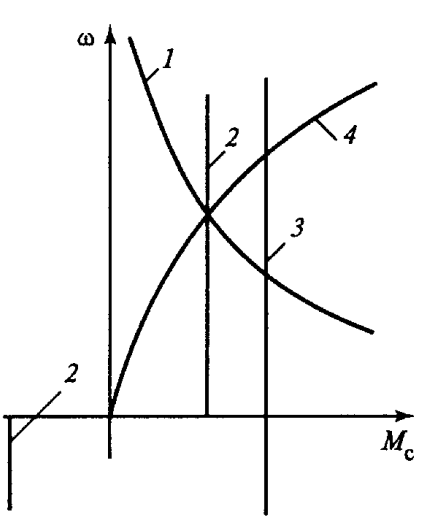


Рис. 55.5. Механические характеристики исполнительных органов рабочих машин:

1 — механизма главного движения металлообрабатывающего станка, *2* — транспортера, механизма подачи станков, *3* — грузоподъемного механизма, *4* — центробежных нагнетателей

обычно представляют собой сочетание показанных на рис 55 5 зависимостей

По характеру действия моменты нагрузки M_c делятся на активные и реактивные

Активный момент имеет постоянное, не зависящее от скорости направление действия Такие моменты создаются так называемыми потенциальными силами — силами притяжения Земли (характеристика *3* грузоподъемного механизма на рис 55 5), силами упругой деформации и т д

Реактивный момент, характеристика которого соответствует зависимости *2* на рис 55 5, создается в основном силами трения, он всегда противодействует движению и поэтому изменяет свой знак с изменением направления движения

Количественно механические характеристики двигателя и исполнительного органа оцениваются жесткостью, определяемой как

$$\beta = dM/d\omega \approx \Delta M/\Delta\omega$$

Используя этот показатель, можно оценивать характеристику *1* синхронного двигателя на рис 55 4 (горизонтальная линия) как абсолютно жесткую ($\beta = \infty$), характеристику асинхронного двигателя *3* — как имеющую переменную положительную и отрицательную жесткость, характеристику *3* грузоподъемных механизмов (см рис 55 5) — как имеющую нулевую жесткость ($\beta = 0$) и т д

Введенное понятие механических характеристик позволяет легко выполнять проверку условия установившегося движения и находить его скорость Для этого в одном и том же квадранте совмещаются характеристики двигателя и исполнительного органа рабочей машины, тогда точка пересечения этих характеристик, в которой моменты двигателя и исполнительного органа рабочей машины равны, и будет соответствовать движению с установившейся скоростью Этому значению скорости будет соответствовать установившийся момент двигателя и нагрузки

Аналитический способ применяется в тех случаях, когда механические характеристики двигателя и нагрузки заданы в виде уравнений Тогда совместное решение двух уравнений при условии $M = M_c$ дает искомое значение установившейся скорости Подстановка этого значения скорости в любое из двух уравнений механических характеристик дает значение установившегося момента

В зависимости от вида механических характеристик двигателя и исполнительного органа рабочей машины установившееся движение может быть устойчивым или неустойчивым Под устойчивостью понимается свойство системы двигатель—исполнительный орган поддерживать движение с установившейся скоростью при возможных небольших отклонениях от нее Устойчивость движения может быть определена с помощью механических

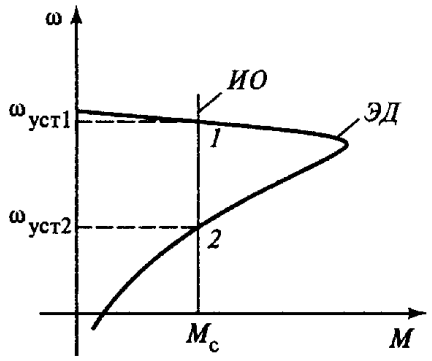


Рис. 55.6. К определению установившейся скорости и устойчивости движения

характеристик или с использованием понятия жесткости характеристик

На рис 55 6 для примера показаны характеристики электродвигателя *ЭД* и исполнительного органа *ИО* рабочей машины, при которых установившееся движение возможно как в точке *1* со скоростью $\omega_{уст1}$, так и в точке *2* с установившейся скоростью $\omega_{уст2}$ Выполняемый с помощью уравнения движения анализ показывает, что в точке *1* имеет место устойчивое движение, а в точке *2* — неустойчивое, так как при отклонениях скорости от $\omega_{уст1}$ система стремится восстановить эту скорость движения, а при отклонении от скорости $\omega_{уст2}$ нет

Проверка на устойчивость движения может быть выполнена аналитически с использованием понятия жесткости характеристик Движение будет устоичиво при выполнении условия

$$\beta - \beta_c < 0 \quad \text{или} \quad \beta < \beta_c,$$

где β и β_c — соответственно жесткость механических характеристик двигателя и исполнительного органа рабочей машины

Неустановившееся движение ЭП Неустановившееся движение ЭП имеет место, когда моменты двигателя и нагрузки отличаются, т е $M \neq M_c$ В этом случае динамический момент $M_{дин}$ не равен нулю и происходит увеличение или снижение скорости движения Наиболее типичными видами неустановившегося движения в ЭП являются пуск, торможение и реверс двигателя, его переход с одной скорости на другую в процессе ее регулирования или изменения нагрузки на валу

Неустановившееся движение соответствует переходу ЭП из установившегося движения с одними параметрами к установившемуся движению с другими параметрами По этой причине неустановившееся движение называют также переходным процессом, или переходным режимом ЭП

Целью рассмотрения неустановившегося механического движения является получение зависимостей механических переменных (координат) ЭП — моментов, скорости и угла поворота вала двига-

теля — от времени, а также переходные процессы в механической части ЭП, обусловленные инерционностью движущихся элементов Иногда такие процессы называются механическими

Искомые зависимости получаются решением (интегрированием) дифференциального уравнения механического движения, а также дифференциального уравнения $\omega = d\varphi / dt$, связывающего угол поворота φ вала двигателя и его скорость ω

Для решения этих уравнений должны быть известны (заданы) законы изменения моментов двигателя и нагрузки, массы и моменты инерции движущихся элементов и начальные значения переменных В общем случае моменты двигателя и нагрузки, а иногда и момент инерции могут являться функциями времени, скорости и положения исполнительного органа рабочей машины (угла поворота вала двигателя)

Из всего многообразия возможных переходных процессов далее рассматриваются переходные процессы в одномассовой расчетной схеме ЭП при постоянном динамическом моменте, при зависимости моментов двигателя и нагрузки ЭП от скорости или времени и постоянстве моментов инерции и массы движущихся элементов Другие возможные виды механических переходных процессов рассмотрены, например в [55 5, 55 10, 55 17]

Переходные процессы при постоянном динамическом моменте Решение уравнения движения в этом случае дает следующую зависимость скорости от времени

$$\omega = [(M - M_c)t / J] + \omega_{нач},$$

где $\omega_{нач}$ — начальное значение скорости, J — суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции

В рассматриваемом случае скорость линейно зависит от времени при $(M - M_c) > 0$ она увеличивается, а при $(M - M_c) < 0$ она снижается.

Время переходного процесса $t_{п\,п}$, за которое скорость изменится от некоторого начального $\omega_{нач}$ до конечного $\omega_{кон}$ уровня, определится из полученной формулы при подстановке в нее значений $t = t_{п\,п}$ и $\omega = \omega_{кон}$

$$t_{п\,п} = J(\omega_{кон} - \omega_{нач})/(M \quad M_c)$$

Неустановившееся движение при линейных механических характеристиках двигателя и исполнительного органа рабочей машины При линейных механических характеристиках двигателя и исполнительного органа рабочей машины динамический момент также линейно зависит от скорости Такие переходные процессы имеют место в ЭП с двигателями постоянного тока независимого возбуждения и другими двигателями, характеристики которых могут быть частично или полностью представлены (аппроксимированы) прямыми линиями

На рис 55 7, *а* показаны линейные механические характеристики *1* и *2* соответственно двигателя и исполнительного органа рабочей машины, которые соответствуют следующим уравнениям

$$M - M_к - \beta\omega,$$

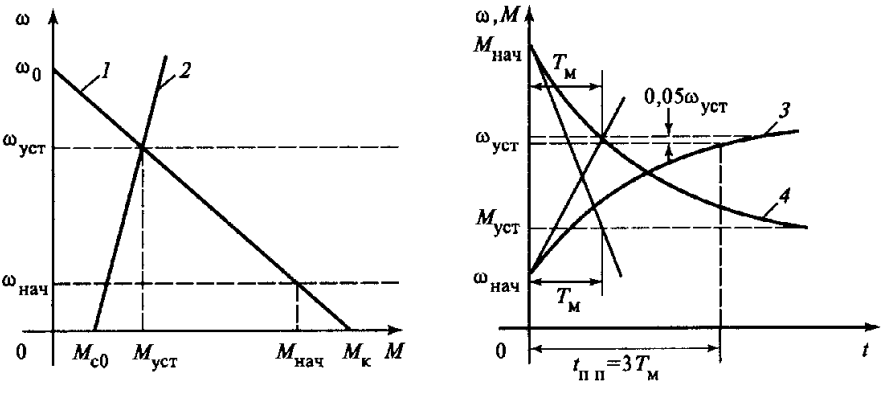
$$M_c = M_{c0} + \beta_c\omega,$$

где $M_к$ и M_{c0} — соответственно момент двигателя и исполнительного органа при нулевой скорости

Подстановка этих выражений в уравнение движения и последующее его решение дает следующую зависимость изменения скорости во времени

$$\omega(t) = (\omega_{нач} - \omega_{уст})e^{-t/T_м} + \omega_{уст},$$

где $T_м = J/(\beta + \beta_c)$ — электромеханическая постоянная времени, с, $\omega_{уст} = (M_к - M_{c0})/(\beta + \beta_c)$ — установившаяся скорость, соответствующая точке пересечения характеристик двигателя и исполнительного органа, рад/с



а) *б)*

Рис. 55.7. Линейные механические характеристики двигателя *1* и исполнительного органа *2* (*а*) и графики переходного процесса (*б*)

Момент двигателя в функции времени изменяется в соответствии со следующей зависимостью

$$M(t) = (M_{\text{нач}} - M_{\text{уст}})e^{t/T_{\text{м}}} + M_{\text{уст}}$$

Для распространенного в практике ЭП случая, когда $\beta_c = 0$ (характеристика исполнительного органа рабочей машины есть вертикальная прямая линия), входящие в выражения $M(t)$ и $\omega(t)$ параметры упрощаются и принимают вид

$$T_{\text{м}} = J/\beta = J\omega_0/M_{\text{к}}, \quad \omega_{\text{уст}} = (M_{\text{к}} - M_{\text{с}})/\beta$$

Время переходного процесса $t_{\text{п п}}$ за которое изменится скорость от некоторого начального уровня $\omega_{\text{нач}}$ до конечного $\omega_{\text{кон}}$ определяется по следующей формуле

$$t_{\text{п п}} = T_{\text{м}} \ln[(\omega_{\text{уст}} - \omega_{\text{нач}})/(\omega_{\text{уст}} - \omega_{\text{кон}})]$$

На рис 55 7, *б* показаны графики переходного процесса $\omega(t)$ кривая *3* и $M(t)$ — кривая *4* при увеличении скорости двигателя от $\omega_{\text{нач}}$ до $\omega_{\text{уст}}$ Теоретически при экспоненциальном виде переходных процессов время достижения установившегося уровня скорости или момента (т е время переходного процесса) является бесконечно большим В связи с этим в технических расчетах оперируют с так называемым практическим временем переходного процесса $t_{\text{п п}}$, принимаемым обычно равным трем постоянным времени $T_{\text{м}}$, т е $t_{\text{п п}} = 3T_{\text{м}}$, после которого скорость будет отличаться от своего установившегося значения менее чем на 5 %

Постоянная времени $T_{\text{м}}$ имеет определенный геометрический и физический смысл На графиках переходного процесса она равна отрезку, отсекаемому проведенной в точке $t = 0$ к кривой переходного процесса касательной на горизонтальной прямой, соответствующей установившемуся уровню скорости или момента Количественно $T_{\text{м}}$ равна времени разгона $t_{\text{р}}$ двигателя вхолостую ($M_{\text{с}} = 0$) из неподвижного состояния ($\omega_{\text{нач}} = 0$) до скорости идеального холостого хода $\omega_0 = \omega_{\text{уст}}$ под действием пускового момента $M_{\text{к}}$

Неустановившееся движение при произвольном динамическом моменте Переходные процессы этого вида имеют место, когда моменты двигателя и исполнительного органа рабочей машины являются различными, в том числе и нелинейными функциями скорости, времени или положения (пути) В зависимости от исходных данных и требуемой точности применяются следующие методы нахождения кривых переходного процесса

1 Линеаризация нелинейных механических характеристик двигателя и исполнительного органа рабочей машины Способ основан на представлении (аппроксимации) механических характеристик или их отдельных участков прямыми линиями В этом случае для построения кривых переходного процесса и расчета его продолжительности могут быть использованы полученные выше формулы

2 Точное интегрирование уравнения движения Этот способ может использоваться в тех случаях, когда моменты двигателя и исполнительного органа рабочей машины заданы аналитически (в виде формул) как функции скорости, положения или времени Нахождение зависимостей $\omega(t)$ и $M(t)$ осуществляется подстановкой этих зависимостей в уравнение движения и его решением

3 Методы численного интегрирования уравнения движения В случаях когда механические характеристики двигателя и исполнительного органа рабочей машины заданы графически или в виде таблиц, целесообразно применение численных методов интегрирования дифференциальных уравнений Наиболее простым из них является метод Эйлера, применение которого связано с заменой в уравнении движения дифференциалов переменных на их конечные приращения и его записью в следующем виде

$$\Delta t = J\Delta\omega/(M - M_{\text{с}})$$

Порядок расчета кривых $\omega(t)$ и $M(t)$ следующий Ось скорости разбивается на ряд интервалов (приращений) По механическим характеристикам на каждом таком интервале скорости определяют средние значения моментов двигателя и исполнительного органа По приведенной формуле для каждого интервала скорости рассчитывают соответствующий интервал времени Δt_i Сложением рассчитанных интервалов времени и соответствующих им интервалов скорости и значений момента получают искомые зависимости

4 Графоаналитические методы построения кривых переходного процесса Эти методы используются в случаях, когда механические характеристики заданы графически В теории ЭП разработано несколько таких методов (например, методы площадей и пропорций), в основе которых также лежит решение уравнения движения Подробно эти методы рассмотрены в [55 4, 55 5, 55 17]

55 4 РЕГУЛИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ ЭП СТРУКТУРЫ ЭП

Регулированием называется автоматическое поддержание постоянства или же изменение по требуемому закону переменных характеризую

щих процессы в ЭП и рабочей машине Регулирование переменных (координат) — скорости, ускорения или положения — требуется при управлении движением исполнительных органов многих рабочих машин, а для ряда рабочих машин бывает необходимым регулирование момента или усилия на исполнительном органе В настоящее время наиболее эффективно эти задачи решаются за счет регулирования соответствующих переменных электродвигателя Кроме того, при работе самого ЭП возникает необходимость в ограничении тепловых, механических и коммутационных нагрузок его элементов, что расширяет потребность в регулировании переменных

Отметим, что процесс регулирования переменных, под которыми подразумеваются любые механические, электрические, тепловые или магнитные переменные ЭП, всегда связан с целенаправленным получением тех или иных искусственных (регулировочных) характеристик двигателя

Регулирование скорости В общем случае регулирование скорости движения исполнительных органов может быть достигнуто воздействием или на механическую передачу, или на двигатель, или на то и другое одновременно

Первый способ, называемый механическим связан с изменением передаточного числа или радиуса приведения механической передачи Для его реализации могут быть использованы коробки передач (при ступенчатом регулировании), вариаторы, электромагнитные или гидравлические муфты (для плавного регулирования) Этот способ применяется ограниченно из за сложности автоматизации технологических процессов малого набора регулируемых механических передач указанного типа и невысокой надежности и экономичности их работы

Второй способ, получивший название электрического, предусматривает воздействие на двигатель при неизменных параметрах механической передачи Этот способ нашел основное применение в современном ЭП вследствие его широких регулировочных возможностей, простоты, экономичности и удобства использования в общей схеме автоматизации технологических процессов

Третий способ — комбинированный, сочетающий в себе первый и второй способы, находит ограниченное применение, в основном в ЭП станков

Для количественной оценки и сопоставления различных способов регулирования скорости используются следующие показатели

диапазон регулирования скорости Этот показатель характеризует пределы изменения средних значений максимальной $\omega_{ср\,max}$ и минимальной $\omega_{ср\,min}$ скорости достижимых при данном способе ее регулирования

$$D = \omega_{ср\,max} / \omega_{ср\,min},$$

стабильность скорости Этот показатель характеризует изменение скорости при возможных колебаниях момента нагрузки на валу двигателя и определяется жесткостью механических характеристик двигателя Чем она больше, тем стабильнее скорость при изменениях момента нагрузки и наоборот

плавность регулирования скорости Этот показатель определяется перепадом скорости при переходе с одной искусственной характеристики на другую Чем больше в заданном диапазоне регулирования скорости может быть получено искусственных характеристик тем плавнее будет происходить регулирование скорости,

направление регулирования скорости В зависимости от способа воздействия на двигатель и, следовательно, вида получаемых искусственных характеристик его скорость может увеличиваться или уменьшаться по сравнению с работой на естественной характеристике при данном моменте нагрузки В первом случае говорят о регулировании скорости вверх от основной, во втором о регулировании скорости вниз Можно сказать, что регулирование скорости вверх связано с получением искусственных механических характеристик, располагающихся выше естественной, а регулирование скорости вниз обеспечивается характеристиками располагающимися ниже естественной,

допустимая нагрузка двигателя При регулировании скорости двигатель работает на искусственных характеристиках при отличных от паспортных условиях Для сохранения нормативного нагрева двигателя, а значит, и расчетного срока его службы нагрузка двигателя (при расчетных условиях его охлаждения) может быть такой, при которой в двигателе протекает ток не выше номинального Именно такая нагрузка и называется допустимой Необходимо отметить, что для двигателей с самовентиляцией при снижении скорости охлаждение двигателя ухудшается и поэтому допустимый ток в якоре должен быть ниже номинального

Все способы регулирования скорости делятся по этому признаку на две группы, одна из которых характеризуется допустимой нагрузкой, равной номинальному моменту, а другая — номинальной мощностью двигателя При правильном выборе способа регулирования скорости, соответствующего характеру нагрузки, двигатель полностью используется по своим энергетическим возможностям во всем диапазоне изменения скорости

экономичность регулирования ско рости Обычно сопоставление вариантов регули руемого ЭП производится по капитальным затратам и эксплуатационным расходам, которые должны окупаться повышением производительности, качества продукции и надежности работы техноло гического оборудования и экономичности функционирования самого ЭП Если капитальные затраты на реализацию ЭП окупаются за счет сокращения расходов при его эксплуатации за заданный срок окупаемости, то такое техническое решение считается экономически обоснованным С этой же целью могут использоваться и другие технико-экономические показатели

Регулирование момента и тока При формировании заданного графика движения исполнительного органа рабочей машины часто бывает необходимо обеспечивать требуемое его ускорение или замедление, что реализуется за счет регулирования прикладываемого к исполнительному органу со стороны ЭП момента или усилия

Кроме того, в некоторых технологических процессах (прокатка металла, изготовление проводов и кабелей, бумажное и текстильное производства) требуется, чтобы на исполнительных органах создавалось необходимое натяжение в обрабатываемом материале или изделии Это обеспечивается также за счет регулирования создаваемого ЭП момента или усилия Также требуется ограничивать момент ЭП для предотвращения поломки элементов механической передачи и рабочей машины при внезапном стопорении движения исполнительного органа рабочей машины (например, при копании грунта, бурении скважин, заклинивании механической передачи и т д)

Регулирование (ограничение) тока и момента двигателей требуется также и для обеспечения нормальных условий работы самих двигателей Так, при пуске двигателей постоянного тока общего назначения по соображениям нормальной работы их коллекторно щеточного узла ток должен быть ограничен двух- или трехкратным его номинальным значением Необходимость ограничения тока возникает и в случае пуска мощных двигателей постоянного и переменного тока, когда большие пусковые токи двигателей могут привести к недопустимому снижению напряжения питающей сети

Основными показателями для оценки того или иного способа регулирования тока и момента являются точность и экономичность

Регулирование положения Для обеспечения технологических процессов ряда рабочих машин и механизмов требуется перемещение их исполнительных органов в заданную точку пространства или плоскости и их установка (фиксирование) там с заданной точностью К ним относятся роботы и манипуляторы, подъемно транспортные механизмы, клапаны задвижки, механизмы подач станков и ряд других Такое перемещение исполнительного органа рабочей машины из одной точки плоскости или пространства (позиции) в другую называется позиционированием и обеспечивается соответствующим регулированием положения вала двигателя

Основным показателем регулирования положения является точность позиционирования В тех случаях, когда не требуется высоких точности и качества движения, позиционирование обычно обеспечивается в разомкнутой системе ЭП с помощью путевых или конечных выключателей При необходимости обеспечения высоких точности позиционирования и качества движения формируется оптимальный график движения ЭП в замкнутой системе управления

Структуры электропривода при регулировании координат В зависимости от выполняемых функций, вида и количества регулируемых переменных (координат) и степени автоматизации технологических процессов ЭП делятся на *неавтоматизированные и автоматизированные* В неавтоматизированном ЭП операции управления выполняет с помощью простых средств человек (оператор)

В автоматизированном ЭП операции управления в соответствии с требованиями технологического процесса выполняются его системой управления, при этом сам ЭП может работать в общем комплексе автоматизированного производства Все автоматизированные ЭП делятся, в свою очередь, на *разомкнутые* и *замкнутые*

Работа разомкнутого ЭП характеризуется тем что все внешние возмущения влияют на его выходные переменные (координаты), в связи с чем такой ЭП не может обеспечить высокого качества их регулирования В то же время разомкнутые ЭП строятся по несложным схемам и поэтому просты в наладке и эксплуатации

Замкнутые структуры ЭП строятся по принципам компенсации внешнего возмущения (нагрузки ЭП), отклонения (обратной связи) или их сочетания Основным отличительным признаком функционирования замкнутых систем является полное или частичное устранение влияния внешнего возмущения на регулируемые переменные (координаты) ЭП, что обеспечивает более качественное управление движением исполнительного органа рабочей машины

Принцип компенсации возмущающего воздействия не нашел широкого применения в ЭП из за практической сложности реализации датчиков на-

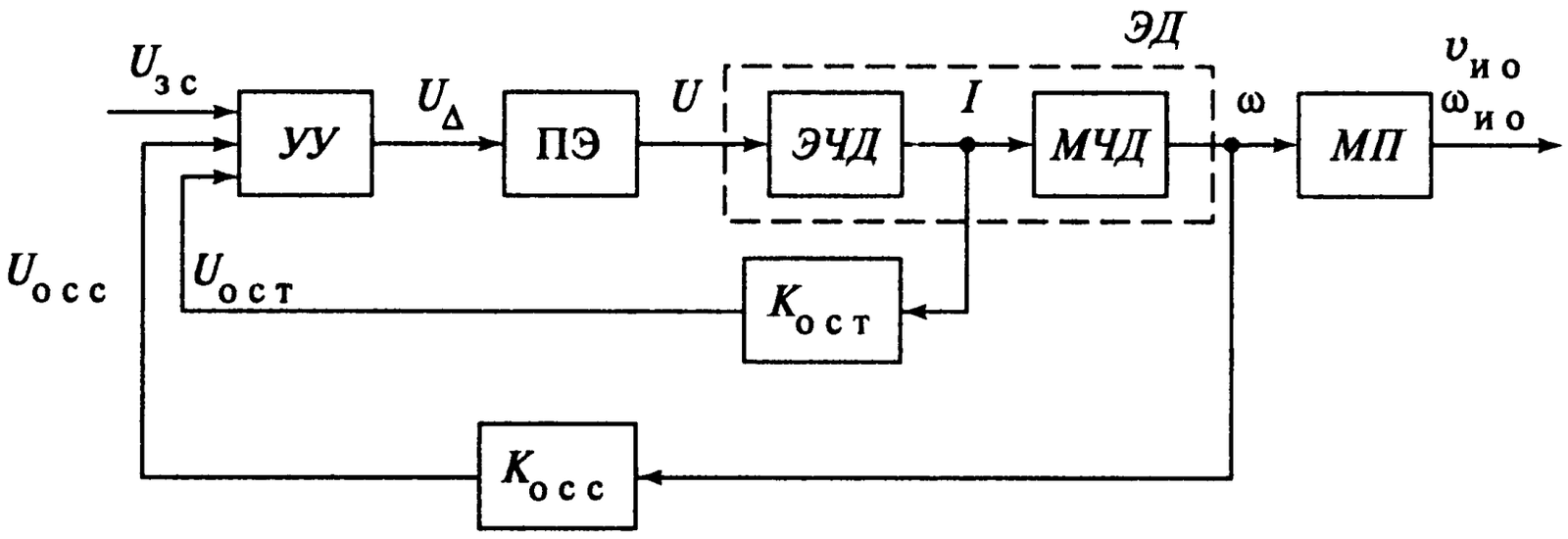


Рис. 55.8. Схема ЭП с общим усилителем

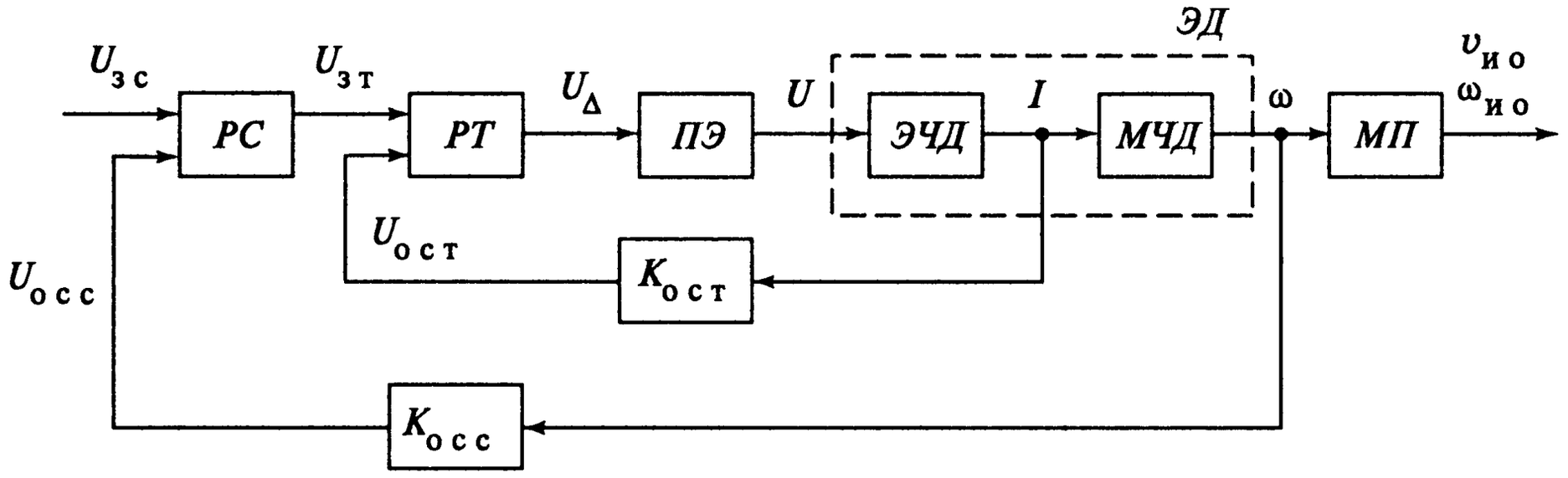


Рис. 55.9. Схема ЭП с подчиненным регулированием тока и скорости

грузки ЭП, в связи с чем наибольшее распространение в ЭП получили системы с обратными связями. В замкнутых ЭП применяются все возможные виды обратных связей: положительные и отрицательные, линейные и нелинейные, жесткие и гибкие, реализуемые по виду регулируемых переменных — скорости, току, положению и т д.

В замкнутых структурах ЭП часто осуществляется регулирование нескольких координат. В этих случаях замкнутые ЭП строятся по одной из следующих структурных схем.

Схема с общим усилителем при регулировании двух переменных — скорости и тока (момента) приведена на рис 55.8, где для удобства анализа электродвигатель *ЭД* представлен в виде двух частей· электрической *ЭЧД* и механической *МЧД* В этой схеме сигналы обратных связей по току $U_{ост}$ и скорости $U_{осс}$ подаются на вход управляющего устройства *УУ* вместе с задающим сигналом скорости $U_{зс}$, где алгебраически суммируются. Сигнал ошибки $U_Δ$ подается на вход преобразователя *ПЭ*, который с помощью напряжения U управляет электродвигателем *ЭД*. На схеме $K_{ост}$ и $K_{осс}$ — коэффициенты обратных связей соответственно по току и скорости.

В этой схеме за счет использования нелинейных обратных связей, называемых в теории ЭП отсечками, удается в некотором диапазоне изменения координат осуществлять их независимое регулирование.

Схема с подчиненным регулированием тока и скорости приведена на рис. 55 9 В ней регулирование каждой переменной осуществляется своими регуляторами — тока *РТ* и скорости *РС*, которые вместе с соответствующими обратными связями образуют замкнутые контуры Они располагаются таким образом, что входным, задающим сигналом для контура тока $U_{зт}$ является выходной сигнал внешнего по отношению к нему контура скорости Таким образом, внутренний контур тока подчинен внешнему контуру скорости — основной регулируемой переменной ЭП.

Основное достоинство такой схемы заключается в возможности оптимальной настройки регулирования каждой переменной, в силу чего она находит в настоящее время основное применение в ЭП как постоянного, так и переменного тока. Кроме того, подчинение контура тока контуру скорости позволяет простыми средствами осуществлять ограничение тока и момента, для чего необходимо лишь ограничить на соответствующем уровне сигнал на выходе регулятора скорости (он же сигнал задания уровня тока).

При необходимости регулировать положение исполнительного органа рабочей машины в схемы вводятся соответствующая обратная связь по положению и регулятор положения.

Подробно структуры ЭП с подчиненным регулированием координат, нашедших широкое применение в современном ЭП, рассмотрены в [55.9—55.11] и в последующих разделах справочника

В табл. 55.2 приведены виды и общая характеристика регулируемых ЭП постоянного и переменного тока

Таблица 55 2 **Регулируемые ЭП**

Тип двигателя	Способ регулирования	Характерные признаки	Техническая реализация	Возможные области применения
Двигатель постоянного тока	Изменение сопротивления цепи якоря	Простота схемы Невысокие точность и диапазон регулирования Сложность автоматизации процессов Дополнительные потери энергии	Добавочный резистор в цепи якоря	Ограничение тока и момента в переходных процессах Регулирование скорости вниз от основной
	Уменьшение магнитного потока	Отсутствие дополнительных потерь энергии	Резистор в цепи обмотки возбуждения Регулируемый источник питания обмотки возбуждения	Регулирование скорости вверх от основной
	Изменение напряжения на якоре	Высокое качество регулирования переменных в статике и динамике Широкие возможности автоматизации и оптимизации технологических процессов Возможность энергосбережения в динамических режимах	Управляемый выпрямитель Импульсный регулятор напряжения	Регулирование скорости, положения, тока и момента Регулирование усилия или момента
	Питание от источника тока, управление возбуждением	Возможность регулирования усилия или момента на исполнительном органе рабочей машины Отсутствие дополнительных потерь энергии	Преобразователь в режиме источника тока или со свойствами источника тока	Регулирование усилия или момента Регулирование скорости в замкнутой системе
Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором	Изменение сопротивления цепи статора	Простота схемы реализации Невысокая точность регулирования Сложность автоматизации Дополнительные потери энергии	Резистор Реактор	Ограничение тока и момента в переходных процессах
	Изменение напряжения на статоре	Относительная простота реализации Возможность квазичастотного регулирования скорости	Регулятор напряжения	Регулирование тока и момента в переходных процессах Повышение энергетических показателей ЭП при малых нагрузках
	Изменение частоты и напряжения на статоре	Высокое качество регулирования переменных в статике и динамике Отсутствие дополнительных потерь энергии в двигателе Широкие возможности автоматизации и оптимизации технологических процессов Возможность энергосбережения в динамических режимах работы ЭП Возможность энергосбережения в сфере технологии	Преобразователь частоты: электромашинный, полупроводниковый: с непосредственной связью; с промежуточным звеном постоянного тока с инверторами тока или напряжения	Регулирование скорости, положения, тока и момента Энергосбережение
	Изменение числа пар полюсов двигателя	Ступенчатое регулирование Возможность частичной рекуперации энергии при торможении	Переключение обмотки статора	Регулирование скорости
	Изменение сопротивления цепи ротора	Возможность повышения пускового момента до уровня максимального Дополнительные потери энергии Невысокая точность регулирования Возможность создания замкнутых структур при импульсном регулировании сопротивления	Добавочный резистор в цепи ротора	Регулирование тока, момента и скорости

Окончание табл 55.2

Тип двигателя	Способ регулирования	Характерные признаки	Техническая реализация	Возможные области применения
Асинхронный двигатель с фазным ротором	Изменение сопротивления цепи статора	Простота схемы реализации Сложность автоматизации Дополнительные потери энергии	Резистор в цепи статора	Ограничение тока и момента в переходных процессах
	Изменение напряжения на статоре	Относительная простота реализации Возможность квазичастотного регулирования скорости	Регулятор напряжения	Регулирование тока и момента в переходных процессах Повышение энергетических показателей ЭП при малых нагрузках
	Введение добавочной ЭДС в цепь ротора	Полезное использование потерь скольжения в цепи ротора Большая установленная мощность Небольшой диапазон регулирования скорости	Выпрямитель в цепи ротора и вспомогательные электрические машины или инвертор	Регулирование скорости в небольшом диапазоне
Синхронный двигатель общего назначения	Регулирование тока возбуждения	Возможность управления энергетическими показателями ЭП и системы электроснабжения	Регулируемый источник питания обмотки возбуждения	Компенсация реактивной мощности. Регулирование режимов системы электроснабжения
	Изменение частоты напряжения на статоре	Высокое качество регулирования скорости в статике и динамике Отсутствие дополнительных потерь энергии в двигателе Возможность автоматизации технологических процессов	Полупроводниковый преобразователь частоты: с непосредственной связью; с промежуточным звеном постоянного тока с инверторами тока или напряжения	Регулирование скорости Частотно-управляемый пуск двигателя
Шаговый двигатель	Изменение частоты импульсов напряжения на статоре	Возможность обеспечения точного позиционирования исполнительных органов рабочих машин Небольшая установленная мощность	Электронный коммутатор напряжения	Регулирование положения и скорости
Вентильный двигатель	Регулирование напряжения	Высокое качество регулирования переменных в статике и динамике Широкие возможности автоматизации и оптимизации технологических процессов Бесконтактное исполнение силовой части ЭП	Преобразователь частоты с управлением от датчика положения ротора	Регулирование скорости и положения
	Регулирование магнитного потока (при наличии обмотки возбуждения)	Отсутствие дополнительных потерь энергии	Регулируемые резистор или источник питания обмотки возбуждения	Регулирование скорости вверх от основной
Вентильно-индукторный двигатель	Регулирование напряжения, углов коммутации	Высокое качество и диапазон регулирования переменных Бесконтактное исполнение силовой части ЭП Повышенный пусковой момент Дешевый и надежный двигатель Возможность автоматизации технологических процессов	Электронный коммутатор	Регулирование скорости, положения и момента

55 5 ЭП С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В ЭП постоянного тока используются двигатели с независимым, последовательным и смешанным возбуждением, а также с возбуждением от постоянных магнитов

Схема включения и характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения в установившемся режиме Основная схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения представлена на рис 55 10, *а*, где приняты следующие обозначения I, $I_в$ — токи в цепях обмоток якоря и возбуждения OB, А, E — ЭДС якоря, В, ω и M — угловая скорость, рад/с, и момент, Н · м, двигателя, $R_я = r_{оя} + r_{дп} + r_{ко} + r_щ$ — сопротивление якоря, состоящее из сопротивлении обмоток якоря $r_{оя}$, добавочных полюсов $r_{дп}$, компенсационной обмотки $r_{ко}$ и щеточного контакта $r_щ$, Ом, $R_{ов}$ — сопротивление обмотки возбуждения, Ом, $L_я$ и $L_{ов}$ — индуктивности обмоток якоря и возбуждения, Гн На схеме показаны добавочные резисторы сопротивлением $R_д$ и $R_в$ в цепях обмоток якоря и возбуждения, а также источники питания обмоток якоря и возбуждения напряжениями соответственно U и $U_в$

Уравнения, описывающие работу двигателя в статическом режиме, имеют вид

$$U = E + IR,$$

$$E = \kappa\Phi\,\omega,$$

$$M = \kappa\Phi I,$$

где $R = R_я + R_д$ — полное сопротивление цепи якоря, Ом, Ф — магнитный поток, Вб, U — подводимое к якорю напряжение, В, $\kappa = pN/(2\pi a)$ — конструктивный коэффициент двигателя, p — число пар полюсов, N — число активных проводников обмотки якоря, a — число параллельных ветвей обмотки якоря

При допущениях, что электромагнитный момент двигателя равен моменту на его валу, а реакция якоря отсутствует, формула для его электромеханической характеристики, представляющей собой зависимость скорости от тока якоря $\omega(I)$, имеет вид

$$\omega = (U - IR)/(\kappa\Phi)$$

Формула для механической характеристики $\omega(M)$ имеет вид

$$\omega = U/(\kappa\Phi) - MR_д/(\kappa\Phi)^2$$

В соответствии с формулами электромеханическая и механическая характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения представляют собой линейные зависимости угловой скорости от тока и момента, показанные на рис 55 10, *б* для двух полярностей напряжения на якоре На рисунке электромеханическая и механическая характеристики совмещены, что справедливо в случае $\kappa\Phi$ – const Их характерными точками являются точка A холостого хода, в которой $\omega = \omega_0$, а $I = M = 0$, и точка B короткого замыкания, где $\omega = 0$, а $I = I_к$ и $M = M_к$ Режим короткого замыкания называется также пусковым режимом, поскольку является начальным при включении (пуске) двигателя

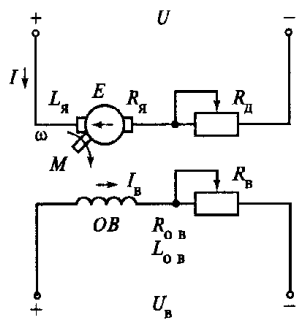
Уравнения характеристик можно представить в сокращенной форме записи

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega,$$

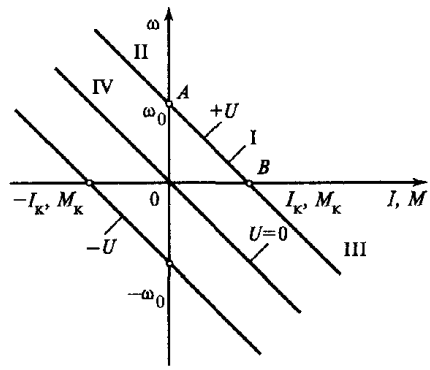
где $\omega_0 = U/(\kappa\Phi)$ — скорость идеального холостого хода двигателя, $\Delta\omega = IR/(\kappa\Phi) = MR/(\kappa\Phi)^2$ — перепад скорости относительно скорости идеального холостого хода

На рис 55 10, *б* показана также характеристика двигателя при $U = 0$, соответствующая уравнениям

$$\omega = -IR/(\kappa\Phi) = -MR/(\kappa\Phi)^2$$



а



б

Рис 55.10 Схема включения (*а*) и характеристики (*б*) двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Схема, в которой двигатель имеет такую характеристику, приведена на рис 55 11 и носит название схемы генератора, работающего на автономную нагрузку $R_д$, или схемы динамического торможения

Энергетический режим работы двигателя постоянного тока независимого возбуждения определяется взаимным направлением ЭДС E и тока I, а также момента M и скорости ω При одинаковых направлениях скорости и момента и разных направлениях тока и ЭДС имеет место двигательный режим работы, а при противоположных направлениях скорости и момента и одинаковых направлениях ЭДС и тока — генераторный Граничными между двигательным и генераторным являются режимы холостого хода и короткого замыкания, в которых одна из электрических и механических переменных равна нулю. При холостом ходе нулю равны ток и момент, а при коротком замыкании — ЭДС и скорость

Режим холостого хода имеет место в точке A на характеристике рис. 55.10, *б*. В этом режиме $I = 0$, $E = U = к\Phi\omega_0$, $M = 0$, $\omega - \omega_0$

Двигательный режим соответствует участку I в диапазоне скорости $0 < \omega < \omega_0$, т.е в первом квадранте, где ω и M совпадают по направлению. В этом режиме $E < U$, ток $I = (U - E)/R$ совпадает по направлению с напряжением U и не совпадает с ЭДС

Генераторный режим работы параллельно с сетью, или торможение с рекуперацией энергии в сеть, имеет место на участке II характеристики На этом участке $\omega > \omega_0$, поэтому ЭДС больше напряжения сети, ток и момент изменяют свои направления на противоположные

Режим короткого замыкания возникает при $\omega = 0$ и $E = 0$. В этом режиме $I = I_к = U/R$.

Режим генератора при его последовательном соединении с сетью, или торможение противовключением, наступает при $\omega < 0$ (участок III характеристики) За счет изменения направления скорости ЭДС также меняет свою полярность. Ток в якоре совпадает по направлению с напряжением и ЭДС и определяется их суммарным действием, т е $I = (U + E)/R$

Режим автономного генератора или динамическое торможение (характеристика IV) возникает при включении двигателя по схеме рис 55 11 Ток в якоре протекает под действием ЭДС и совпадает с ней по направлению.

Таким образом, торможение ЭП реализуется при трех разновидностях генераторного режима двигателя

Эффективность электромеханического преобразования энергии двигателя оценивается коэффициентом полезного действия (КПД), который определяется отношением механической мощности на

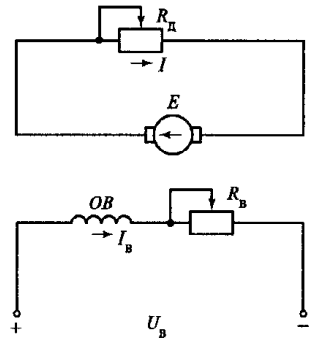


Рис. 55.11. Схема динамического торможения двигателя постоянного тока независимого возбуждения

его валу $P_{мех} = M\omega$ к потребляемой из сети электрической мощности $P_{эл} = UI + U_в I_в$:

$$\eta = P_{мех} / P_{эл} = P_{мех} / (P_{мех} + \Delta P),$$

где ΔP — полные потери мощности в двигателе.

Формулы для электромеханической и механической характеристик позволяют назвать основные способы получения искусственных характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения, используемые для регулирования переменных ЭП. К ним относятся изменение сопротивления добавочного резистора в цепи якоря $R_д$, магнитного потока Ф и подводимого к якорю напряжения U

Регулирование переменных двигателя постоянного тока независимого возбуждения с помощью резисторов в цепи якоря Этот способ применяется для регулирования (ограничения) тока и момента двигателя в переходных процессах и регулирования скорости и характеризуется простой схемой реализации (см рис 55 10, *а*) и невысокими показателями регулирования

Семейство искусственных реостатных характеристик при сопротивлениях добавочного резистора $R_{д1} > R_{д2} > R_{д3}$ приведено на рис. 55.12. В силу

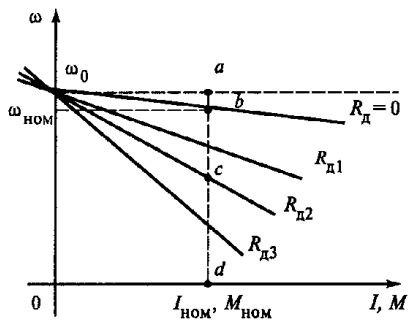


Рис. 55.12. Механические (электромеханические) характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при различных сопротивлениях добавочного резистора в цепи якоря

постоянства магнитного потока электромеханические и механические характеристики подобны и изображены на одном рисунке

Расчет регулировочных резисторов в цепи якоря для получения требуемой искусственной механической или электромеханической характеристики может быть проведен несколькими методами В качестве исходных данных должны быть известны естественная электромеханическая или механическая характеристика двигателя, его паспортные данные и координаты одной точки требуемой искусственной характеристики ($\omega_и, I_и$) или ($\omega_и, M_и$)

Метод пропорции Расчетная формула этого метода имеет вид

$$R_д = R_я(\Delta\omega_и / \Delta\omega_е - 1),$$

где $\Delta\omega_и$, $\Delta\omega_е$ – соответственно перепады скорости при токе $I_и$ или моменте $M_и$ на желаемой искусственной и естественной характеристиках

Метод отрезков При использовании этого метода перепады скорости определяются в виде отрезков прямой (см рис 55 12) с абсциссой $I_{ном}$ или $M_{ном}$ Тогда для определения, например, сопротивления резистора $R_{д2}$ расчетная формула имеет вид

$$R_{д2} = R_{ном}\, bc / ad,$$

где $R_{ном} = U_{ном} / I_{ном}$ — номинальное сопротивление двигателя

Этот метод позволяет при необходимости по известной естественной характеристике двигателя найти сопротивление его якорной цепи

$$R_я = R_{ном}\, ab / ad$$

Собственное сопротивление якоря $R_я$ может быть также определено по каталогам и справочной литературе, где приводятся обобщенные зависимости относительного сопротивления якоря $R_я^* = R_я / R_{ном}$ от мощности $P_{ном}$, экспериментально путем непосредственного измерения сопротивления между щетками двигателя, по приближенной формуле для номинальных паспортных данных

$$R_я \approx 0{,}5U_{ном}(1 - \eta_{ном})/I_{ном} - 0{,}5R_{ном}(1 - \eta_{ном}),$$

где $\eta_{ном}$ — номинальный КПД двигателя

Совокупность искусственных характеристик, используемых при пуске двигателя, называется пусковой диаграммой (рис 55 13, *а*) При ее расчете и построении заданными параметрами являются допустимый ток $I_{доп}$ или момент $M_{доп}$, момент нагрузки $M_с$, пределы изменения тока (момента) или число искусственных характеристик m, соответствующее количеству ступеней пускового резистора Число ступеней m добавочного резистора связано с пределами изменения тока в якоре $I_1 = I_{доп}$ и током переключения I_2 следующим соотношением

$$m = \lg(I_2 / I_1) / \lg(I_1 R_я / U)$$

Рассмотрим в качестве примера порядок построения этой диаграммы, если заданы $I_{доп}$, $M_с$ и число характеристик $m = 2$

Строится естественная характеристика *1* двигателя (см рис 55 13, *а*) Проводится вертикальная линия, соответствующая абсциссе $I_1 = I_{доп}$ или $M_1 = M_{доп}$ Через точки *a* и *b* с координатами (ω_0, 0) и (0, I_1) проводится искусственная характеристика *3*, соответствующая включению в цепь якоря обеих ступеней пускового резистора $R_{д1}$ и $R_{д2}$ (см рис 55 13, *а*, *б*) Определяется ток переключения по приближенному соотношению $I_2 = (1{,}1 - 1{,}2)I_с$ и проводится вертикальная линия, соответствующая этому току Через точку пересечения этой линии с характеристикой *3* проводим горизонтальную линию до ее пересечения в точке *d* с вертикалью, имеющей абсциссу I_1 Через точки *a* и *d* проводится искусственная характеристика *2*, а через точку *e* — еще одна горизонталь до пересечения ее в точке *f* с естественной характеристикой *1*

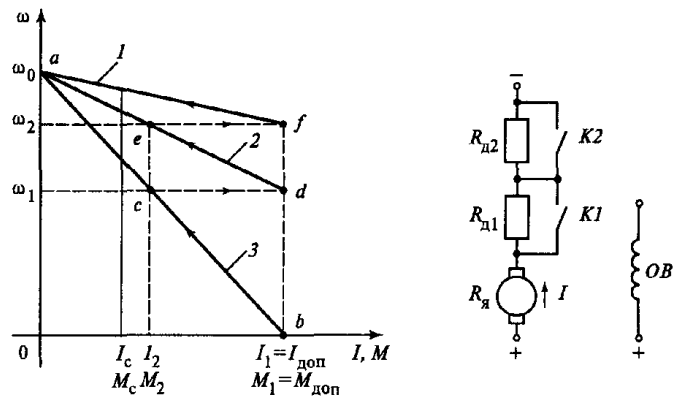


Рис. 55.13. Пусковая диаграмма двигателя постоянного тока независимого возбуждения (*а*) и схема включения пусковых резисторов (*б*)

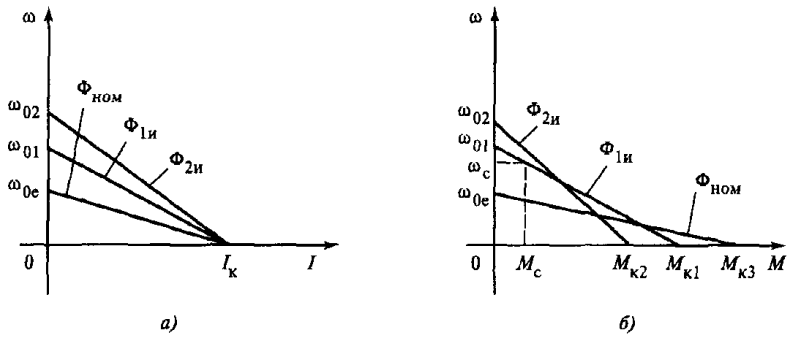


Рис. 55.14. Характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при уменьшении магнитного потока:

а — электромеханические, *б* — механические

Для точного попадания точек *c*, *d*, *e*, *f* на вертикали в абсциссами I_1 и I_2 производится подбор значения тока I_2

Пуск двигателя начинается по характеристике *3*. При скорости ω_1, когда ток снизится до значения I_2, с помощью ключа *K1* закорачивается резистор с сопротивлением $R_{д1}$ (рис. 55 13, *б*) и двигатель переходит на характеристику *2*, по которой продолжает свой разбег. При скорости ω_2 с помощью ключа *K2* закорачивается резистор с сопротивлением $R_{д2}$ и двигатель выходит на естественную характеристику *1*

Регулирование скорости изменением магнитного потока. Магнитный поток при использовании этого способа обычно уменьшается по сравнению с номинальным за счет снижения тока возбуждения Регулирование тока в цепи возбуждения может осуществляться или с помощью добавочного резистора $R_в$ (рис. 55 10, *а*), или изменением напряжения $U_в$ источника питания обмотки возбуждения

Электромеханические характеристики при различных значениях магнитного потока $\Phi_{ном} > \Phi_{1и} > \Phi_{2и}$ представлены на рис 55 14, *а*, а механические — на рис 55 14, *б*. Относительный магнитный поток двигателя $\Phi^*_{1и} = \Phi_{1и}/\Phi_{ном}$, при котором механическая характеристика пройдет через заданную точку с координатами (ω_c, M_c), определяется по формуле

$$\Phi^*_{1и} = (1 + \sqrt{1 - 4M_c^*\omega_c^* R_я^*(1 - R_я^*)}/2\omega_c^* \times \times (1 - R_я^*).$$

Отиосительный ток возбуждения $I^*_{в1} = I_{в1}/I_{в\,ном}$, соответствующии этому потоку, находится по кривой намагничиваиия рис 55.15, после чего может быть иайдсно его абсолютное значение $I_{в1}$

Регулирование переменных ЭП с двигателем постоянного тока и независимым возбуждением путем изменения напряжения на якоре. Система преобразователь—двигатель. Данный способ используется для регулирования любых переменных

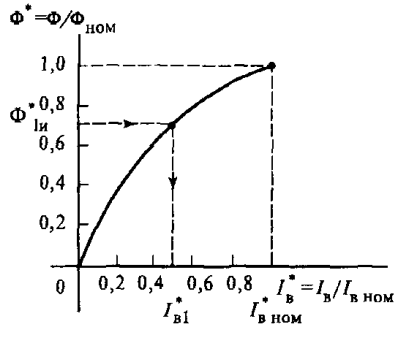


Рис. 55.15. Кривая намагничивания двигателя постоянного тока

ЭП при высоких требованиях к показателям его качества.

Реализация этого способа предусматрнвает питание якоря двигателя от преобразователя, значение выходного напряжения которого регулируется, а при необходимости может изменяться и его полярность Такая схема получила названиие системы преобразователь—двигатель (П—Д). В случае питания ЭП от сети переменного тока прсобразователем служит управляемый выпрямитель (УВ).

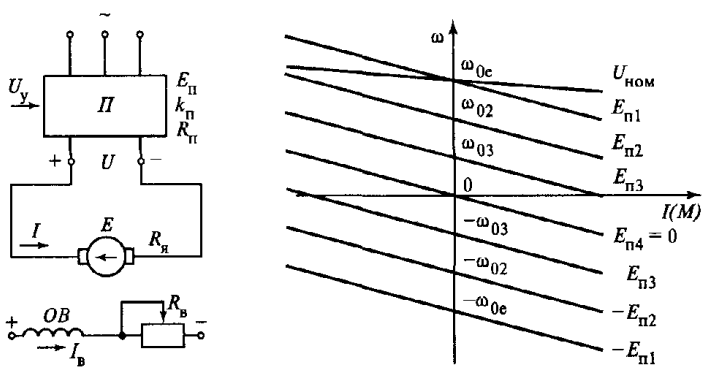
Схема системы преобразователь—двигатель показаиа на рис 55 16, *а*, где $E_п$, $R_п$, $k_п = E_п/U_у$ — соответственно ЭДС преобразователя, его внутреннее сопротивление и коэффициент усиления, $U_у$ — входной сигнал управлсния

Формулы для электромеханической и механической характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением в этой схеме записываются так

$$\omega = E_п/(\kappa\Phi) - I(R_я + R_п)/(\kappa\Phi) = = E_п/(\kappa\Phi) - M(R_я + R_п)/(\kappa\Phi)^2,$$

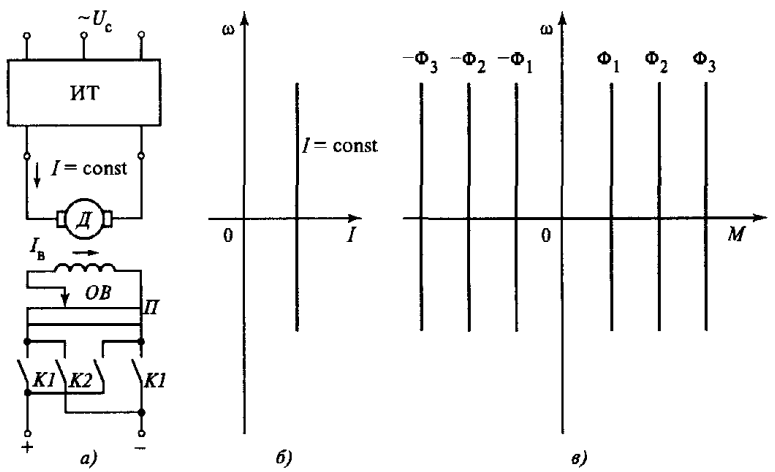
а соответствующие им характеристики показаны на рис 55 16, *б*

Система П—Д чаще всего выполняется в виде системы электромашинный преобразователь—двигатель (система генератор—двигатель) или системы тиристорный преобразователь—двига-



а) *б)*

Рис. 55.16. Схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения (*а*) и его характеристики (*б*) при регулировании напряжения на якоре



а) *б)* *в)*

Рис. 55.17. Система источник тока—двигатель:

а — схема, *б*, *в* — электромеханическая и механическая характеристики

тель (система ТП—Д) Во втором случае среднее значение ЭДС тиристорного (вентильного) преобразователя от угла управления тиристорами α определяется как

$$E_{ср} = E_{max} m \sin(\pi/m) \cos\alpha/\pi = E_{ср0} \cos\alpha,$$

где m — число фаз, E_{max} — амплитудное значение ЭДС преобразователя, $E_{ср0}$ — ЭДС преобразователя при $\alpha = 0$

Эквивалентное внутреннее сопротивление преобразователя выражается формулой

$$R_п = [X_т m/(2\pi)] + R_т + R_L,$$

где $X_т$, $R_г$ — соответственно приведенные ко вторичной обмотке индуктивное сопротивление рассеяния и активное сопротивление обмоток трансформатора, R_L — активное сопротивление сглаживающего реактора L

Приведенные на рис 55 16, *б* характеристики для $E_{п1} > E_{п2} > E_{п3} > E_{п4}$ соответствуют системе генератор—двигатель Особенности механических характеристик двигателя при его питании от вентильного преобразователя, определяемые режимом прерывистого тока и способами управления комплектами реверсивного преобразователя, подробно рассмотрены в [55 9, 55 11, 55 17]

В ЭП находят применение преобразователи со свойствами источника тока Схема такой системы, получившей название источник тока двигатель (ИТ—Д), показана на рис. 55.17, *а*. Так как подаваемый в якорь ток постоянен (I = const), то электромеханическая характеристика двигателя будет представлять собой вертикальную прямую линию (рис 55 17, *б*)

Семейство механических характеристик при различных токах возбуждения, а значит при различных магнитных потоках $Φ_3 > Φ_2 > Φ_1$, двигателя приведено на рис 55 17, *в* Подобные характеристики придают ЭП свойства источника момента, управляемого по цепи возбуждения Управление значением и направлением тока возбуждения $I_в$ может осуществляться (см рис 55 17, *а*) с помощью потенциометра *П* и ключей *K1* и *K2* или при питании *ОВ* от регулируемого источника напряжения Использование в этой схеме обратной связи по скорости позволяет получить горизонтальные участки механи-

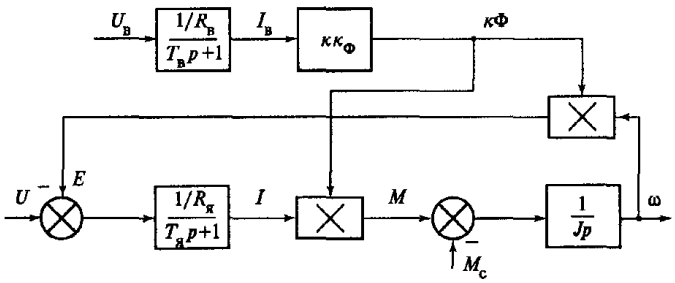


Рис. 55.18. Структурная схема двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

ческих характеристик, что позволяет осуществлять в этой схеме и регулирование скорости. Подробно система ИТ—Д рассмотрена в [55.8].

Для ЭП ряда подъемно-транспортных машин и механизмов с целью получения пониженных (посадочных) скоростей движения их исполнительных органов применяется шунтирование якоря двигателя постоянного тока с независимым возбуждением [55.4, 55.16].

В связи с развитием полупроводниковой техники в ЭП с двигателями постоянного тока с независимым возбуждением получили распространение также способы регулирования переменных ЭП за счет импульсного изменения напряжения, магнитного потока или сопротивления резистора в якорной цепи. При импульсном регулировании с помощью управляемых полупроводниковых устройств возможно создание замкнутых структур ЭП для более качественного регулирования переменных и в ряде случаев повышение надежности работы ЭП. Подробно схемы включения двигателя и получаемые характеристики при импульсном регулировании переменных рассмотрены в [55.16, 55.17].

Переходные процессы в ЭП с двигателем постоянного тока с независимым возбуждением являются в общем случае электромеханическими и определяются механической инерцией элементов ЭП и электромагнитной инерцией (индуктивностью) цепей обмоток якоря и возбуждения. При анализе переходных процессов применяется структурная схема двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (рис. 55.18), соответствующая его математической модели в динамике (на схеме использованы те же обозначения параметров и переменных, что и для схемы рис. 55.10, *а*, а через $к_Ф$ обозначен коэффициент связи магнитного потока Ф и тока возбуждения $I_в$). Используя эту схему в качестве основы и дополняя ее соответствующим образом, можно выполнить анализ конкретных видов переходных процессов: при подаче управляющих воздействий (напряжений) на цепи обмоток якоря и возбуждения и возмущений по нагрузке, при учете упругостей элементов механической части ЭП, а также в замкнутых структурах ЭП.

В частности, при ступенчатой подаче напряжения на якорь и постоянном магнитном потоке схема позволяет получить следующее исходное дифференциальное уравнение для изменения скорости двигателя:

$$T_я T_м \mathrm{d}^2\omega/\mathrm{d}t^2 + T_м \mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t + \omega = \omega_с,$$

где $T_я = L_я/R_я$ — электромагнитная постоянная цепи якоря, с; $\omega_с$ — скорость, соответствующая моменту нагрузки $M_с$.

Корни соответствующего ему характеристического уравнения имеют вид

$$p_{1,2} = -1/(2T_я) \pm \sqrt{1/(4T_я^2 - 1/(T_я T_м))}.$$

При $T_м > 4T_я$ корни характеристического уравнения вещественные и переходные процессы имеют апериодический характер, при $T_м < 4T_я$ корни являются комплексными и процессы имеют колебательный характер. Переходные процессы этого вида характерны для ЭП с релейно-контакторными схемами управления и подробно рассмотрены в [55.9, 55.10, 55.17].

Переходные процессы при изменении во времени напряжения на якоре характерны для системы преобразователь—двигатель. Особенность переходных процессов в системе генератор—двигатель обусловлена индуктивностью его обмотки возбуждения, с помощью которой и осуществляется регулирование напряжения на якоре двигателя. Подробно анализ переходных процессов в этой системе и способы их формирования (форсирования) рассмотрены в [55.11, 55.15, 55.17].

Переходные процессы в разомкнутой структуре ЭП при использовании безынерционного (полупроводникового) преобразователя и линейном изменении напряжения на якоре описываются следующим дифференциальным уравнением для скорости:

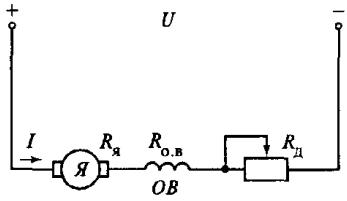
$$T_я T_м \mathrm{d}^2\omega/\mathrm{d}t^2 + T_м \mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t + \omega = \omega_0(t) - M_с/|\beta| = \omega_с(t) = a + bt,$$

где a и b могут иметь любые значения и знак.

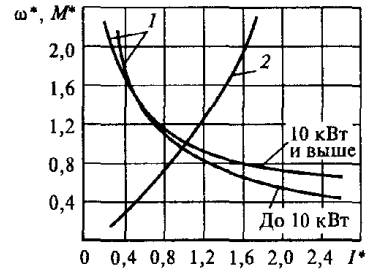
Решение этого уравнения имеет вид:

$$\omega = (\omega_{нач} - a + bT_м)\mathrm{e}^{-t/T_м} + a - bT_м + bt,$$

где $\omega_{нач}$ — начальное значение скорости.



а)



б)

Рис. 55.19. Схема включения (*а*) и универсальные характеристики (*б*) двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Изменение в переходных процессах подводимого к двигателю напряжения может осуществляться путем использования задатчика интенсивности. Задавая с его помощью различные законы изменения напряжения (значения *a* и *b*), можно формировать различные графики скорости в переходных процессах. Подробно переходные процессы этого вида рассмотрены в [55.9—55.11, 55.16].

Переходные процессы при регулировании тока возбуждения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением определяются электромагнитной инерционностью цепи возбуждения и в связи с этим описываются дифференциальным уравнением третьего порядка. Дополнительная сложность анализа переходных процессов этого типа связана с нелинейностью кривой намагничивания. Переходные процессы этого типа рассмотрены в [55.9, 55.10, 55.17].

Анализ переходных процессов в замкнутых структурах ЭП и их формирование рассматривается в последующих разделах настоящего справочника.

ЭП с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения. Основная схема включения двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением приведена на рис. 55.19, *а*. Основной особенностью этих двигателей является включение обмотки возбуждения *ОВ* с сопротивлением $R_{о.в}$ последовательно с обмоткой якоря *Я* сопротивлением $R_я$, вследствие чего ток якоря *I* одновременно является и током возбуждения и определяет магнитный поток двигателя. На схеме показан также добавочный резистор с сопротивлением $R_д$.

Электромеханические и механические характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением описываются теми же формулами, что и двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, в которых магнитный поток и ток якоря (возбуждения) связаны между собой кривой намагничивания (см. рис. 55.15). Естественные характеристики конкретного двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением строятся с помощью универсальных характеристик, приведенных на рис. 55.19, *б*. Они представляют собой зависимости относительной скорости $\omega^* = \omega/\omega_{ном}$ (кривые *1*) и момента $M^* = M/M_{ном}$ (кривая *2*) от относительного тока $I^* = I/I_{ном}$. Для получения характеристик с большей точностью зависимость $\omega^*(I^*)$ представлена двумя кривыми — для двигателей мощностью до и выше 10 кВт.

Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением в основной схеме включения рис. 55.19, *а* может работать во всех энергетических режимах, кроме режимов холостого хода и генераторного параллельно с сетью (рекуперативного торможения), так как отсутствуют участки характеристик во втором квадранте. Кроме того, двигатель может работать генератором независимо от сети постоянного тока с независимым возбуждением или самовозбуждением (режим динамического торможения).

Регулирование переменных двигателя в соответствии с выражениями для его характеристик может осуществляться с помощью добавочных резисторов в цепи якоря, изменением магнитного потока двигателя и подводимого к нему напряжения. Подробно способы регулирования переменных и торможения двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением рассмотрены в [55.9, 55.16, 55.17].

ЭП с двигателем постоянного тока смешанного возбуждения. Двигатель этого типа имеет две обмотки возбуждения — независимую *НОВ* и последовательную *ПОВ*, включаемую последовательно с обмоткой якоря (рис. 55.20, *а*). Вследствие этого этот двигатель имеет характеристики и свойства, присущие двигателю постоянного тока как с независимым, так и с последовательным возбуждением. Электромеханическая и механическая характеристики двигателя выражаются такими же формулами, а для практических расчетов используются универсальные характеристики двигателя, которые приведены на рис. 55.20, *б*. Они представляют собой зависимости относительных скорости $\omega^* = \omega/\omega_{ном}$ (кривая *1*) и момента $M^* = M/M_{ном}$ (кривая *2*) от относительного тока якоря $I^* = I/I_{ном}$.

Двигатель может работать во всех возможных энергетических режимах, регулирование переменных ЭП с этим двигателем может осуществляться изменением напряжения, магнитного потока и сопротивления добавочного резистора в цепи якоря.

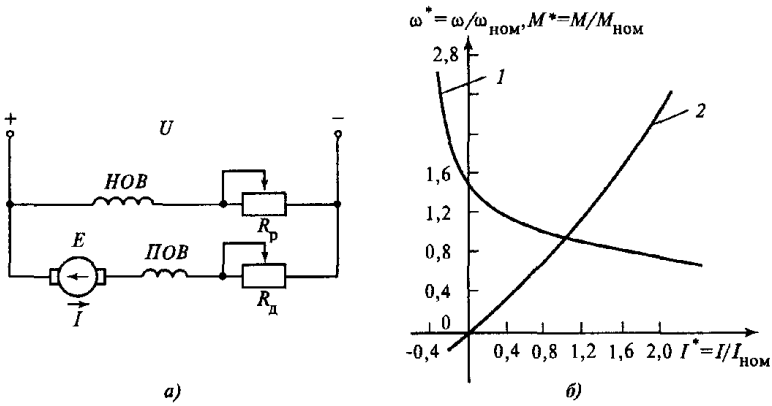


Рис. 55.20. Схема включения (*а*) и универсальные характеристики (*б*) двигателя постоянного тока смешанного возбуждения

55 6 ЭП С АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

ЭП с асинхронными двигателями являются самым массовым видом привода в промышленности, коммуиальном и сельском хозяйстве Такое положение определяется простотой их изготовления и эксплуатации, невысокими массой, габаритами и стоимостью

Схема включения трехфазного асинхронного двигателя с фазным и короткозамкнутым ротогами приведена соответственно на рис 55 21, *а* и *б*, а на рис 55 22 представлена используемая в последующем изложении упрощенная Г образная схема замещеиия На схемах приняты следующие обозначения $U_1, U_ф$ — действующее значение линейного и фазного напряжения сети, $I_1, I_μ, I'_2$ — действующие значения фазных токов статора, намагничивания и приведенный ротора, X_1, X'_2 индуктивные сопротивления от потоков рассеяния фазы обмотки статора и приведенное фазы ротора, $X_μ$ — индуктивное сопротивление контура намагничивания, $R_c, R_{1д}, R_1 = R_c + R_{1д}$ — активные фазные сопротивления обмотки статора, добавочного резистора и суммарные фазы статора, $R'_р, R'_{2д}, R'_2 = R'_р + R'_{2д}$ — активные приведенные к обмоткс статора фазные сопротивлсния обмотки ротора, добавочного резистора и суммарное фазы ротора, $s - (\omega_0 - \omega)/\omega_0$ — скольжеиие двигателя, $\omega_0 = 2\pi f_1/p$ — угловая скорость магнитного поля (скорость идеального холостого хода), f_1 — частота питающего напряжения, p — число пар полюсов Штрихи на рис 55 22 обозначают приведенные значения параметров и переменных ротора, а точки отражают комплексный характер переменных

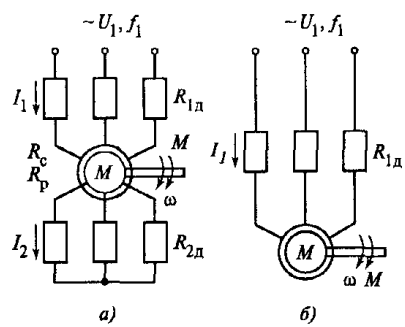


Рис. 55.21. Схема включеиия асинхронного двигателя с фазным (*а*) и короткозамкнутым (*б*) ротором

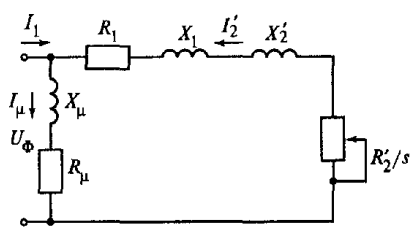


Рис. 55.22. Г-образная схема замещения асинхронного двигателя

Приведение переменных и параметров цепи ротора осуществляется с помощью коэффициента трансформации асинхронного двигателя по ЭДС

$$n = E_1/E_{2к} \approx 0{,}95U_{ф\,ном}/E_{2к},$$

где E_1 и $E_{2к}$ — фазные ЭДС статора и ротора при неподвижном роторе, $U_{ф\,ном}$ — фазное номинальное напряжение сети

Расчетные формулы для приведенных значении ЭДС, тока и сопротивлений ротора имеют вид

$$E'_2 = E_2 n = E_1, \quad I'_2 = I_2/n \quad R'_2 = R_2 n^2,$$

$$X'_2 - X_2 n^2,$$

где штрихом обозначены приведенные значения

Как видно из схемы рис 55 22, ЭДС статора рав на приведенной ЭДС ротора, а ток намагничивания

I_μ, определяющий магнитный поток двигателя, протекает под действием напряжения U_ϕ по отдельной цепи, состоящей из резисторов контура намагничивания X_μ и R_μ и представляют собой векторную сумму токов статора и приведенного роторного

Электромеханическая характеристика $I_2'(s)$ асинхронного двигателя описывается выражением, получаемым непосредственно из схемы рис 55 22

$$I_2' = U_\phi / \sqrt{(R_1 + R_2'/s)^2 + X_к^2},$$

где $X_к = X_1 + X_2'$ — индуктивное сопротивление короткого замыкания

В отличие от двигателей постоянного тока электромеханическая характеристика асинхронного двигателя представляется в виде зависимости тока ротора от скольжения, что является особенностью этого вида двигателя В этом случае аналитическое выражение для характеристики имеет компактную форму записи и более удобно для анализа и вычислений, а переход к зависимости вида $\omega(I_2')$ осуществляется с помощью формулы для скольжения

$$\omega = \omega_0 (1 - s)$$

Электромеханическая характеристика показана на рис 55 23, при этом по вертикальной оси указаны соответствующие скорость и скольжение асинхронного двигателя, а $I_{2к}'$, $I_{2\infty}'$ и I_{2max}' обозначают токи короткого замыкания, ассимптотический и максимальный, имеющий место при $s_1 = R_2'/R_1$

Механическая характеристика асинхронного двигателя описывается формулой

$$M = 2M_{кр}(1 + as_{кр})/(s_{кр}/s + s/s_{кр} + 2as_{кр}),$$

где $a = R_1/R_2'$, $M_{кр} = 3U_\phi^2 / \left[2\omega_0\left(R_1 \pm \sqrt{R_1 + X_к^2}\right)\right]$,

$s_{кр} = \pm R_2'/\sqrt{R_1^2 + X_к^2}$, причем знак «+» в этих выражениях относится к области положительного скольжения $s > 0$ (двигательный режим), а знак

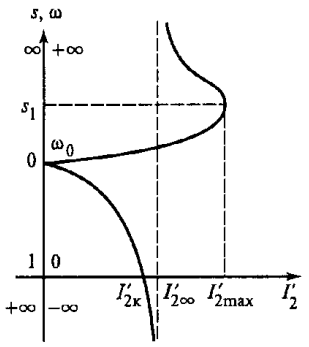


Рис. 55.23. Электромеханическая характеристика асинхронного двигателя

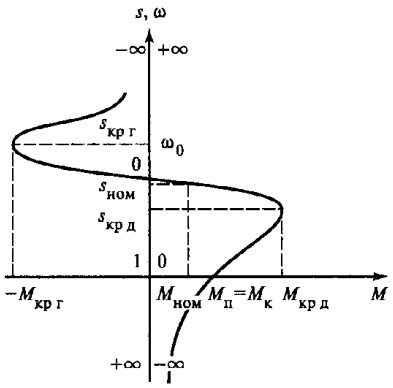


Рис. 55.24. Механическая характеристика асинхронного двигателя

«–» — к $s < 0$ (генераторный режим) Значения момента $M_{кр}$ и скольжения $s_{кр}$, соответствующие точкам экстремума момента асинхронного двигателя, получили название критических

Механическая характеристика асинхронного двигателя приведена на рис 55 24 При изменении порядка чередования двух фаз питающего напряжения асинхронный двигатель имеет аналогичную механическую характеристику, которая располагается симметрично относительно начала координат

Если положить $a = 0$, то формула для механической характеристики упрощается и принимает вид

$$M = 2M_{кр}/(s/s_{кр} + s_{кр}/s)$$

Из этой формулы может быть найдено соотношение, связывающее критическое и номинальное скольжение

$$s_{кр} = s_{ном}\left(\lambda_м \pm \sqrt{\lambda_м^2 - 1}\right),$$

которое может использоваться для определения $s_{кр}$ по каталожным (паспортным) данным асинхронного двигателя

Дальнейшее упрощение может быть выполнено для области малых скольжении, в которой ввиду малости можно пренебречь отношением $s/s_{кр}$ В этом случае выражение для механической характеристики принимает вид

$$M = 2M_{кр}s/s_{кр}$$

Полученная формула описывает так называемый рабочий, близкий к линейному, участок характеристики двигателя, на котором находится точка номинального режима с координатами $M_{ном}$, $\omega_{ном}$, $s_{ном}$

Асинхронный двигатель может работать во всех возможных энергетических режимах, которые определяются значением и знаком скольжения, а именно (см рис 55 24) $s = 0$, $\omega = \omega_0$ — режим идеального холостого хода, $s = 1$, $\omega = 0$ — режим короткого замыкания, $0 < s < 1$, $0 < \omega < \omega_0$ — двигательный ре

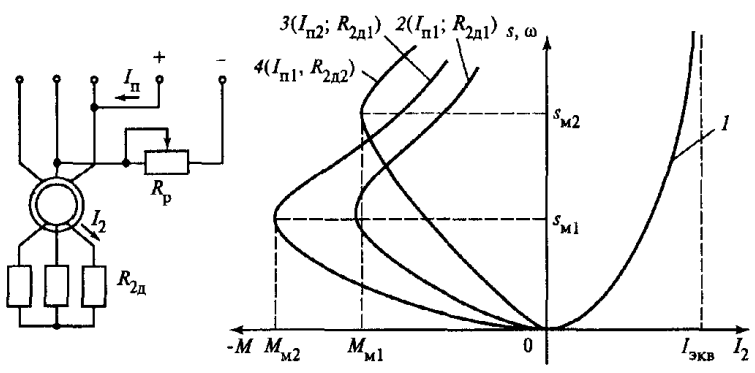


Рис. 55.25. Схема (*а*) и характеристики (*б*) асинхронного двигателя при динамическом торможении

жим, $s < 0$, $\omega > \omega_0$ — генераторный режим параллельно с сетью (рекуперативное торможение), $s > 1$, $\omega < 0$ — генераторный режим последовательно с сетью (торможение противовключением).

Кроме того, асинхронный двигатель может работать в генераторном режиме независимо от сети переменного тока, который называется также режимом динамического торможения. В этом режиме обмотка статора двигателя отключается от сети переменного тока и подключается к источнику постоянного тока, а цепь ротора замыкается накоротко или на добавочные резисторы На рис. 55 25, *а* приведена схема включения, а на рис 55 25, *б* — электромеханическая (кривая *1*) и механические (кривые *2—4*) характеристики асинхронного двигателя в режиме динамического торможения

Механические характеристики приведены для различных токов статора $I_п$, который может регулироваться реостатом с сопротивлением $R_р$, и добавочных резисторов ротора $R_{2д}$ характеристики *2* и *4* соответствуют току $I_{п1}$, а характеристика *3* — току $I_{п2} > I_{п1}$; характеристики *2* и *3* соответствуют резистору $R_{2д1}$, а характеристика *4* — резистору $R_{2д2} > R_{2д1}$ Как видно, увеличение тока $I_п$ и сопротивления добавочного резистора $R_{2д}$ приводит к увеличению соответственно максимального момента асинхронного двигателя $M_м$ и к росту скольжения $s_м$, при котором имеет место этот момент Отметим, что скольжение асинхронного двигателя в режиме динамического торможения определяется формулой $s = \omega / \omega_0$

Подробно свойства и характеристики асинхронного двигателя в режиме динамического торможения рассмотрены в [55.5, 55.10, 55.17].

Способы регулирования переменных асинхронного ЭП следуют из формул для электромеханической и механической характеристик асинхронного двигателя Регулирование (ограничение) токов в роторе и статоре и момента в переходных режимах может быть обеспечено изменением подводимого к двигателю напряжения, а также включением добавочных резисторов в цепи статора и ротора

Регулирование скорости может осуществляться изменением уровня и частоты подводимого к двигателю напряжения, включением в цепи статора и ротора добавочных резисторов, изменением числа пар полюсов асинхронного двигателя, а также с помощью специальных схем включения асинхронного двигателя с фазным ротором — каскадных и электрического вала

Регулирование (ограничение) тока и момента в переходных процессах с помощью добавочных резисторов в цепи статора В случае, когда включение добавочного резистора во все три фазы статора (симметричная схема) должно обеспечить заданную кратность пускового тока $\alpha = I_{1к и} / I_{1к е}$ или момента $\mu = M_{п и} / M_{п е}$, где $I_{1к и}$, $I_{1к е}$ и $M_{п и}$, $M_{п е}$ — соответственно пусковые токи и моменты асинхронного двигателя при включении добавочного резистора и без него, расчет сопротивления добавочного резистора в соответствии с методикой [55.4] проводится соответственно по следующим формулам.

$$R_{1д} = \sqrt{(z_к / \alpha)^2 - X_к^2} - R_к =$$

$$= \sqrt{z_к^2 / \mu - X_к^2} - R_к,$$

где $z_к = U_{1ф} / I_{1к е}$ — полное сопротивление короткого замыкания асинхронного двигателя, $R_к$ – $= z_к \cos\varphi_п$, $X_к = \sqrt{z_к^2 - R_к^2}$ — соответственно активное и реактивное сопротивление короткого замыкания; $\cos\varphi_п$ — коэффициент мощности асинхронного двигателя в момент его пуска

На рис. 55.26 приведены усредненные зависимости коэффициента мощности асинхронных двигателей от их номинальной мощности $P_{ном}$ в режиме короткого замыкания (пуска), рассчитанные по паспортным данным двигателей серий МТК (кривая *1*) и 4А (кривая *2*) для различной номи-

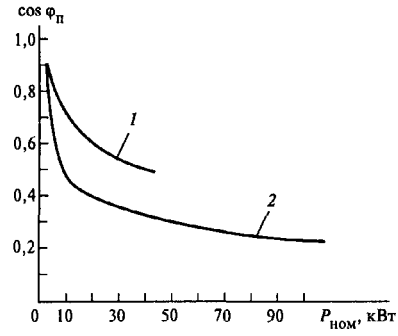


Рис. 55.26. Зависимости коэффициента мощности асинхронного двигателя в режиме короткого замыкания от номинальной мощности

нальной частоты вращения. Приближенно для серии двигателей 4А с короткозамкнутым ротором можно принять $\cos\varphi_{п} = 0{,}3$—$0{,}5$, а для асинхронного двигателя крапово-металлургической серии MTF и MTH — $\cos\varphi_{п} = 0{,}6$—$0{,}7$.

В [55.4] приведены также метод расчета добавочного резистора, включаемого для ограничения тока или момента в одну фазу статора (несимметричная схема), и формулы для расчета добавочных индуктивных резисторов (реакторов).

Включение добавочных резисторов в цепь ротора асинхронного двигателя с фазным ротором применяется для регулирования как тока и момента, так и его скорости. Искусственные электромеханические характеристики при $R_{2д} = \text{var}$ имеют вид, показанный на рис. 55.27, *а*. Расчет сопротивления добавочных резисторов, ограничивающих токи и момент асинхронного двигателя до заданных пределов, может быть проведен по рассмотренной выше методике [55.4].

Искусственные механические характеристики асинхронного двигателя при $R_{2д} = \text{var}$ (кривые *2* и *3*) показаны на рис. 55.27, *б*. Расчет сопротивления добавочного резистора может быть выполнен несколькими способами, при этом естественная механическая характеристика предполагается известной (рассчитана или снята экспериментально), а требуемая искусственная характеристика задана точкой с координатами $\omega_{и}$, $M_{и}$.

Формула для расчета сопротивления добавочного резистора в цепи ротора повторяет приведенную выше формулу для расчета добавочного резистора в цепи якоря двигателя постоянного тока (см. рис. 55.12) с заменой перепада скорости $\Delta\omega$ на скольжение s. Так, сопротивление резистора $R_{2д2}$ для получения характеристики *3* может быть найдено по формуле:

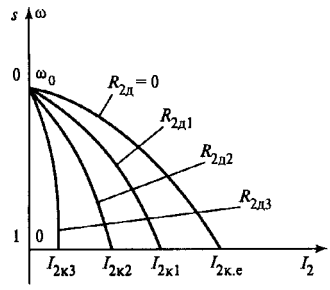
$$R_{2д2} = R_{р}(s_{и}/s_{с} - 1),$$

где $s_{с}$, $s_{и}$ — скольжение двигателя соответственно на естественной и искусственной характеристиках, соответствующее моменту $M_{и}$; $R_{р}$ — сопротивление фазы обмотки ротора асинхронного двигателя.

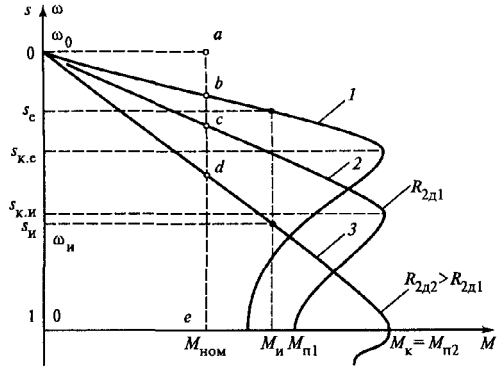
При отсутствии данных о значении сопротивления обмотки ротора $R_{р}$ оно может быть найдено по следующей приближенной формуле, использующей паспортные данные асинхронного двигателя — ЭДС $E_{2к}$, номинальное скольжение $s_{ном}$ и ток ротора $I_{2ном}$:

$$R_{р} = E_{2к}s_{ном}/\sqrt{3}\ I_{2ном}.$$

Для расчета сопротивления добавочного резистора может быть использован также метод отрезков, который подробно рассмотрен применительно



а)



б)

Рис. 55.27. Электромеханические (*а*) и механические (*б*) характеристики асинхронного двигателя при включении дополнительных резисторов в цепь ротора

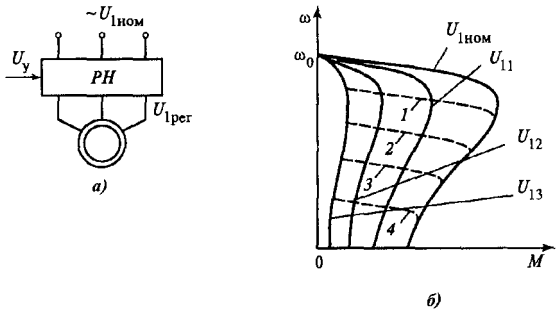


Рис. 55.28. Схема включения (*а*) и механические характеристики (*б*) асинхронного двигателя при регулировании напряжения на статоре

к двигателю постоянного тока независимого возбуждения По аналогии с этим двигателем проводится и расчет резисторов в цепи ротора, обеспечивающих заданную пусковую диаграмму двигателя в предположении, что рабочий участок механических характеристик асинхронного двигателя близок к линейному При построении пусковой диаграммы асинхронного двигателя момент M_1 (см рис 55 13) обычно принимается не более $0{,}9M_к$, а момент M_2 должен составлять (1 1—1,2)$M_с$ Число характеристик (ступеней) пусковой диаграммы m и значения моментов M_1 и M_2 связаны следующим соотношением

$$m - \lg(1/(s_{ном}\,M_1))/\lg(M_1/M_2)$$

Регулирование переменных изменением напряжения осуществляется с помощью регулятора напряжения *РН* (рис 55 28, *а*), включенного между сетью переменного тока со стандартным напряжением $U_{1ном}$ и статором асинхронного двигателя, выходное напряжение которого $U_{1рег}$ изменяется с помощью сигнала управления $U_у$ при постоянной частоте сети

Получаемые искусственные электромеханические характеристики двигателя повторяют реостатные характеристики (см рис 55 27, *а*), что позволяет использовать их для ограничения его тока в переходных режимах Регуляторы напряжения этого назначения получили название «мягких» пускателей или, «мягких» стартеров, и подробно рассмотрены далее

Искусственные механические характеристики при различных напряжениях на статоре двигателя приведены на рис 55 28, *б* Они малопригодны для регулирования скорости и могут использоваться для формирования (ограничения) момента двигателя в переходных процессах

При использовании обратной связи по скорости могут быть получены жесткие участки характеристик (штриховые линии *1*—*4* на рис 55 28, *б*), что позволяет осуществлять регулирование скорости в этой системе Необходимо отметить, что регулирование скорости этим способом сопровождается выделением в цепи ротора значительных потерь мощности (потерь скольжения), является вследствие этого неэкономичным и требует увеличения мощности двигателя

Кроме регулирования переменных двигателя полупроводниковые *РН* позволяют осуществить изменение направления вращения (реверс) двигателя, выполнять функции регулятора экономичности при малых нагрузках ЭП, обеспечивать эффективное электрическое торможение асинхронного двигателя Эти и другие применения *РН* подробнее рассматриваются в последующих разделах этого справочника

Регулирование скорости асинхронного двигателя изменением частоты питающего напряжения осуществляется с помощью преобразователя частоты *ПЧ* (рис 55 29, *а*), на вход которого пода

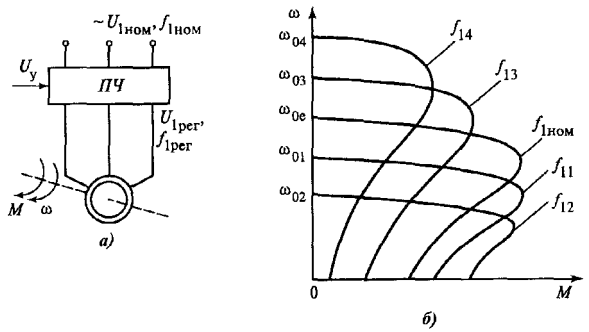


Рис 55 29 Схема включения (*а*) и механические характеристики (*б*) при регулировании частоты напряжения на статоре

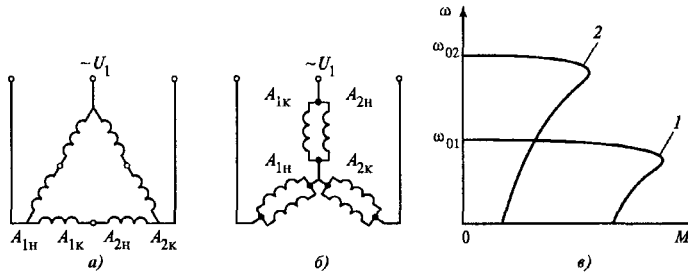


Рис. 55.30. Схемы соединения обмотки статора в треугольник (*а*), двойную звезду (*б*) и механические характеристики асинхронного двигателя при этих схемах (*в*):

1 — для схемы соединения в треугольник, *2* — для схемы соединения в двойную звезду

ется стандартное напряжение сети $U_{1\,ном}$ промышленной частоты $f_{1\,ном}$, а с его выхода снимается переменное напряжение $U_{1\,рег}$ регулируемой частотой $f_{1\,рег}$. Для обеспечения высоких энергетических показателей работы асинхронного двигателя частота и напряжение на выходе *ПЧ* должны находиться между собой в определенных соотношениях. При постоянном моменте нагрузки M_c = const напряжение на статоре должно регулироваться пропорционально его частоте по закону U_1/f_1 – const, для вентиляторного характера момента нагрузки это соотношение имеет вид U_1/f_1^2 – const, а при моменте нагрузки, обратно пропорциональном скорости, оно запишется в виде $U_1/\sqrt{f_1}$ = const.

При регулировании частоты скорость идеального холостого хода асинхронного двигателя изменяется пропорционально частоте напряжения, а критический момент $M_{кр}$ при выполнении соотношения U_1/f_1 = const и пренебрежении активным сопротивлением цепи статора остается неизменным.

Механические характеристики двигателя для различных частот $f_{14} > f_{13} > f_{1\,ном} > f_{11} > f_{12}$ показаны на рис. 55.29, *б*. Данный способ, обеспечивающий качественное и экономичное регулирование скорости асинхронного двигателя в статическом и динамическом режимах, подробнее рассмотрен в последующих разделах справочника.

Регулирование скорости асинхронного двигателя изменением числа пар полюсов может быть реализовано использованием специальных двигателей, получивших название многоскоростных. Статорная обмотка (одна или несколько) этих двигателей состоит из двух одинаковых секций (полуобмоток), за счет разных схем соединения которых может быть изменено число пар полюсов магнитного поля двигателя, что позволяет изменять частоту вращения магнитного поля и тем самым регулировать скорость двигателя. Ротор многоскоростных двигателей выполняется короткозамкнутым.

Так как число пар полюсов асинхронного двигателя может принимать только дискретные значения, то и его скорость этим способом может регулироваться лишь ступенчато. На практике применяются две схемы переключения статорной обмотки многоскоростных двигателей: с треугольника на двойную звезду и со звезды на двойную звезду.

Схема треугольник—двойная звезда показана на рис. 55.30, *а*, *б*, а соответствующие ей механические характеристики приведены на рис. 55.30, *в*. Схема звезда—двойная звезда показана на рис. 55.31, *а*, а соответствующие ей механические характеристики приведены на рис. 55.31, *б* (схема двойной звезды на рис. 55.31 не показана).

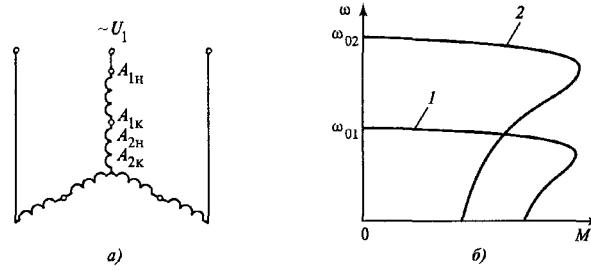


Рис. 55.31. Схема соединения обмотки статора в звезду (*а*) и механические характеристики асинхронного двигателя при схемах соединения обмотки в звезду и двойную звезду (*б*):

1 — для схемы соединения в звезду, *2* — для схемы соединения в двойную звезду

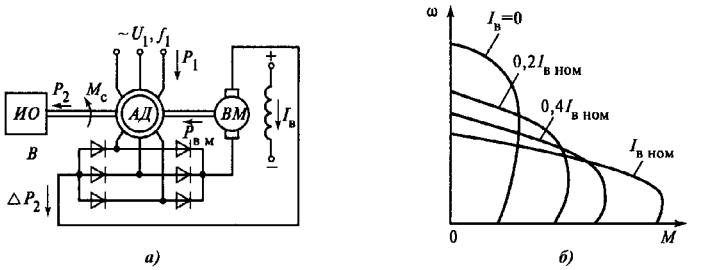


Рис. 55.32. Схемы (*а*) и механические характеристики (*б*) электромеханического каскада

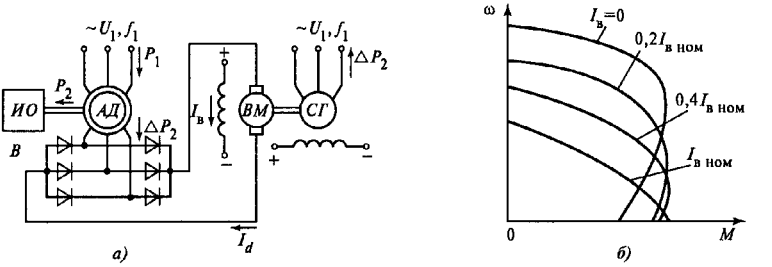


Рис. 55.33 Схемы (*а*) и механические характеристики (*б*) электрического каскада

Схему переключения звезда—двойная звезда целесообразно применять при постоянном моменте M_c нагрузки, а схему треугольник—двойная звезда — при постоянной мощности нагрузки

Регулирование скорости асинхронного двигателя в каскадных схемах его включения Для полезного использования энергии потерь скольжения в цепи ротора асинхронного двигателя с фазным ротором при регулировании его скорости используются каскадные схемы включения По способу использования этой энергии различают электромеханический машинно вентильный каскад и электрический каскад

В электромеханическом машинно вентильном каскаде (рис 55 32, *а*) обмотка ротора асинхронного двигателя *АД*, приводящего в движение исполнительный орган *ИО* рабочей машины, подключается к трехфазному неуправляемому полупроводниковому выпрямителю *В* К выводам выпрямителя присоединен якорь вспомогательной машины *ВМ* постоянного тока, который механически соединен с ротором асинхронного двигателя *АД* В результате мощность потерь скольжения ΔP_2 за вычетом потерь в цепи ротора отдается рабочей машине

Регулирование скорости ЭП осуществляется изменением тока возбуждения $I_в$ вспомогательной машины, механические характеристики ЭП при разных ее токах возбуждения приведены на рис 55 32, *б*

В электрическом каскаде (рис 55 33, *а*) вспомогательная машина *ВМ* не имеет механической связи с *АД*, а соединена одним валом с синхронным генератором *СГ*, подключенным к сети переменного тока За счет этого энергия потерь скольжения с помощью генератора отдается в сеть

Механические характеристики электромеханического каскада для разных значений токов $I_в$ вспомогательной машины показаны на рис 55 33, *б*

В схеме асинхронного вентильного каскада (рис 55 34) электромашинный агрегат вспомогательная машина—генератор заменен на статический преобразователь частоты, состоящий из трансформатора *Тр* и инвертора *И* В этой схеме к обмотке ротора асинхронного двигателя подклю-

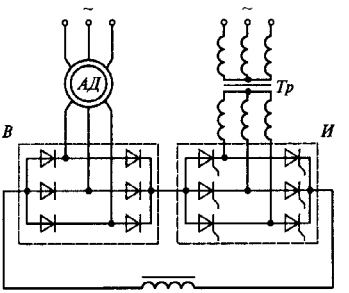


Рис 55 34 Схема асинхронного вентильного каскада

чен неуправляемый выпрямитель *В*, инвертор *И*, а также реактор *L*, который служит для сглаживания пульсации выпрямленного тока. Асинхронный ЭП по схеме рис. 55.34 получил название асинхронного вентильного каскада.

Импульсный способ регулирования переменных ЭП с асинхронным двигателем предусматривает периодическое (импульсное) изменение сопротивления добавочных резисторов в цепях обмоток двигателя или питающего напряжения с помощью полупроводниковых устройств (ключей). Получаемые характеристики аналогичны характеристикам, рассмотренным выше при непрерывном (аналоговом) изменении этих факторов и рассматриваются в [55.15].

Использование полупроводниковых устройств управления позволяет также создавать замкнутые структуры ЭП для более качественного регулирования переменных.

Торможение асинхронного двигателя. При питании двигателя от сети переменного тока может быть осуществлено торможение противовключением и рекуперативное торможение.

Торможение противовключением осуществляется изменением чередования на статоре двух фаз питающего двигатель напряжения. Для ограничения тока (момента) двигателя при этом производится, как правило, включение добавочных резисторов в цепь ротора или статора.

Другой путь перевода асинхронного двигателя в режим торможения противовключением может быть использован при активном характере момента нагрузки, например в грузоподъемных механизмах при так называемом тормозном спуске груза. Для этого двигатель включается на подъем с большим сопротивлением добавочного резистора в цепи ротора, но вследствие превышения моментом нагрузки пускового момента двигателя и его активного характера груз будет опускаться, а двигатель при этом будет работать в режиме торможения противовключением.

Рекуперативное торможение является наиболее экономичным видом торможения асинхронного двигателя и осуществляется в том случае, когда скорость ротора двигателя превышает синхронную и он работает в генераторном режиме параллельно с сетью. Такой режим возникает, например, при переходе двухскоростного асинхронного двигателя с высокой скорости на низкую.

Этот же вид торможения может быть реализован в системе преобразователь частоты— асинхронный двигатель. Для этого осуществляется уменьшение частоты выходного напряжения преобразователя частоты, а тем самым и синхронной скорости ω_0. В силу механической инерции текущая скорость асинхронного двигателя ω будет изменяться медленнее, чем частота вращения магнитного поля ω_0 и будет ее превышать. За счет этого и возникает режим торможения с отдачей энергии в сеть. Отметим, что преобразователь частоты по своему устройству должен быть способен при этом передать энергию от двигателя в сеть.

Рекуперативное торможение также может быть реализовано в ЭП грузоподъемных механизмов при спуске грузов, для чего двигатель включается в направлении спуска груза.

Динамическое торможение осуществляется по схеме рис. 55.25, *а*. Обмотка ротора асинхронного двигателя при этом может быть закорочена накоротко или в ее цепь включается добавочный резистор. Характер торможения определяется значением подаваемого в статор постоянного тока $I_п$ и сопротивлением добавочного резистора $R_{2д}$. Более подробно динамическое торможение двигателя рассмотрено в [55.4, 55.5, 55.9, 55.14].

Торможение асинхронного двигателя при самовозбуждении осуществляется за счет энергии незатухшего поля. На практике применение нашли так называемые конденсаторное и магнитное торможение.

При конденсаторном торможении к статору асинхронного двигателя постоянно (глухое подключение) или с помощью дополнительного контактора подключаются конденсаторы, будучи при этом соединенными в схему треугольника или звезды. Интенсивность торможения определяется емкостью используемых конденсаторов.

Магнитное торможение реализуется после отключения статора двигателя от сети и замыкания с помощью ключей (обычно полупроводниковых) его выводов накоротко. За счет запасенной в двигателе электромагнитной энергии осуществляется возбуждение двигателя и на его валу создается тормозной момент.

Переходные процессы в асинхронном ЭП и их формирование. В общем случае в асинхронном ЭП протекают электромеханические переходные процессы, определяемые электромагнитной инерционностью обмоток двигателя и механической инерцией элементов ЭП и исполнительного органа рабочей машины.

В результате электромагнитных переходных процессов возникающие при пуске, реверсе и торможении асинхронного двигателя переходные токи в обмотках статора и ротора и определяемый ими электромагнитный момент изменяются по сложным колебательным зависимостям. При этом мгновенные значения момента двигателя могут в несколько раз превосходить моменты по статической механической характеристике, что обусловливает повышенные динамические нагрузки на элементы механической передачи ЭП и исполнительные органы рабочих машин. Характер электромагнитных

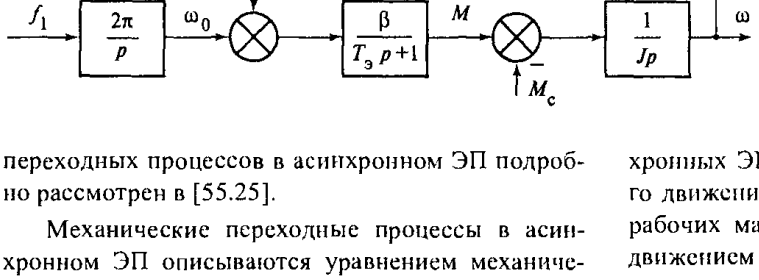


Рис. 55.35. Линеаризованная структурная схема асинхронного двигателя

переходных процессов в асинхронном ЭП подробно рассмотрен в [55.25].

Механические переходные процессы в асинхронном ЭП описываются уравнением механического движения, в котором момент двигателя определяется формулой статической характеристики (при упрощенном анализе) или в виде переходного электромагнитного момента [55.25]. При упрощенном анализе переходных процессов может быть использована структурная схема линеаризованного асинхронного двигателя, показанная на рис. 55.35, на которой приняты следующие обозначения: $\beta = 2M_{кр}/(\omega_0 s_{кр})$ — модуль жесткости линеаризованной механической характеристики; $T_э = 1/(\omega_0 s_{кр})$ — электромагнитная постоянная времени двигателя.

Формирование качественных переходных процессов может быть реализовано в системе преобразователь частоты—асинхронный двигатель с помощью задатчика интенсивности и в замкнутой структуре ЭП. Снижение амплитуды токов и моментов в переходных процессах может быть достигнуто использованием тиристорных регуляторов напряжения (ТРН) за счет изменения скорости нарастания подводимого к асинхронному двигателю напряжения или при определенной последовательности подключения его статорных обмоток. Подробнее формирование переходных процессов в асинхронном ЭП рассмотрено в [55.15].

ЭП с однофазным асинхронным двигателем применяется в случаях, когда источником электроэнергии является однофазная сеть переменного тока. Разновидностью однофазных асинхронных двигателей являются так называемые исполнительные двигатели, которые применяются в различных устройствах автоматического управления и характеризуются возможностью широкого регулирования скорости.

Однофазные асинхронные двигатели имеют на статоре две обмотки — основную (рабочую) и пусковую, которая используется для обеспечения его пуска (иногда пусковая обмотка является второй рабочей обмоткой). Для получения вращающегося магнитного поля пусковая обмотка укладывается на статоре двигателя со смещением ее оси на 90° по отношению к оси рабочей обмотки, а сдвиг токов обеспечивается включением в ее цепь дополнительного фазосдвигающего элемента, обычно конденсатора. Подробнее свойства и характеристики ЭП с однофазным АД рассмотрены в [55.16].

Понятие об ЭП с линейным асинхронным двигателем. В подавляющем большинстве асинхронных ЭП применяется двигатель вращательного движения. При его использовании для привода рабочих машин и механизмов с поступательным движением исполнительных органов (механизмы подач станков и передвижения мостовых кранов, кузнечно-прессовые машины, транспортеры, задвижки и т.д.) требуется применение механических передач для преобразования вращающего движения вала двигателя в поступательное. К их числу относятся кривошипно-шатунный механизм, передачи шестерня—рейка, винт—гайка и ряд других механических передач. При использовании для таких рабочих машин асинхронных двигателей поступательного движения (линейных двигателей) в ряде случаев можно отказаться от применения механической передачи и тем самым повысить технические и экономические показатели работы ЭП и технологического оборудования. Некоторые сведения о линейных асинхронных двигателях и примеры их применения приведены в [55.15].

55.7. ЭП С СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Схема включения трехфазного синхронного двигателя обычного исполнения приведена на рис. 55.36, *а*. Статор синхронного двигателя *СД* выполняется аналогично статору асинхронного двигателя и имеет трехфазную обмотку, подключаемую к сети переменного тока. Ротор *СД* имеет обмотки возбуждения и пусковую в виде беличьей клетки, предназначенную для пуска синхронного двигателя. Конструктивно ротор синхронного двигателя может быть выполнен явнополюсным и неявнополюсным в виде цилиндра. В качестве источника для питания обмотки возбуждения *СД* используется отдельный генератор постоянного тока (возбудитель) *В*. Ток $I_{в.в}$ обмотки возбуждения возбудителя *ОВВ* может регулироваться с помощью добавочного резистора $R_в$. В современном ЭП с синхронными двигателями в качестве возбудителей применяются и тиристорные управляемые выпрямители (тиристорные возбудители). В регулируемом ЭП ротор синхронных двигателей может выполняться в виде постоянных магнитов или быть пассивным.

Рабочая механическая характеристика синхронного двигателя $\omega(M)$ (рис. 55.36, *б*) представляет собой горизонтальную линию с ординатой $\omega_0 = 2\pi f_1/p$. Эта характеристика имеет место до некоторого максимального момента M_{max}, превы-



Рис. 55.36. Схема включения (*а*), рабочая (*б*) и пусковые (*в*) механические характеристики синхронного двигателя

шение которого приведет к выпадению синхронного двигателя из синхронизма. Этот момент определяется угловой характеристикой синхронного двигателя, которая для неявнополюсного синхронного двигателя при пренебрежении активным сопротивлением статора имеет вид:

$$M = 3U_{\phi}E\sin\theta/(\omega_0 X_1) = M_{max}\sin\theta,$$

где U_{ϕ} — фазное значение напряжения сети; E — ЭДС в обмотке статора синхронного двигателя; X_1 — индуктивное сопротивление фазы обмотки синхронного двигателя; ω_0 — угловая скорость магнитного поля; θ — угол сдвига между векторами ЭДС статора E и фазного напряжения сети U_{ϕ}.

Номинальное значение угла $\theta_{ном}$ составляет обычно 25—30°, ему соответствует номинальный момент $M_{ном}$. При таком значении $\theta_{ном}$ кратность максимального момента составляет $\lambda_м = M_{max}/M_{ном} = 2—2{,}5$.

Пуск синхронного двигателя имеет ряд особенностей по сравнению с другими типами двигателей. Пуск синхронного двигателя обычной конструкции выполняется с помощью пусковой обмотки, которая обеспечивает (см. рис. 55.36, *в*) пусковую механическую характеристику *1* с повышенным входным $M_{в1}$ и пониженным пусковым $M_{п1}$ моментами или характеристику *2* с обратным соотношением этих моментов. При этом пуск может происходить с постоянно подключенной обмоткой возбуждения или с ее подключением перед синхронизацией синхронного двигателя с сетью. Первый способ применяется при более легких условиях пуска синхронного двигателя.

В зависимости от соотношения мощностей питающей сети и синхронного двигателя его пуск может происходить с ограничением пускового тока или без ограничения. Для ограничения пускового тока применяются добавочные активные или реактивные резисторы (реакторы), автотрансформаторы и в последние годы тиристорные «мягкие» пускатели. Схемы силовой части таких ЭП рассмотрены в [55.15].

При питании синхронного двигателя от преобразователя частоты может быть реализован частотный пуск, который осуществляется плавным увеличением частоты питающего напряжения.

Торможение синхронного двигателя при необходимости осуществляется по схеме динамического торможения. Для этого обмотка статора отключается от сети переменного тока и замыкается на добавочный резистор или накоротко, а обмотка возбуждения остается подключенной к источнику питания. Торможение противовключением используется редко, так как перевод синхронного двигателя в этот режим сопровождается значительными бросками тока и момента, требует токоограничения и применения сложных схем управления.

Синхронный двигатель как компенсатор реактивной мощности. Возможность работы синхронного двигателя в качестве источника (компенсатора) реактивной мощности иллюстрируют так называемые U-образные характеристики (рис. 55.37). Они представляют собой зависимости тока статора двигателя I_1 и его cos φ от тока $I_в$ возбуждения при U_{ϕ} = const, f_1 = const и P_1 = const. Зависимости

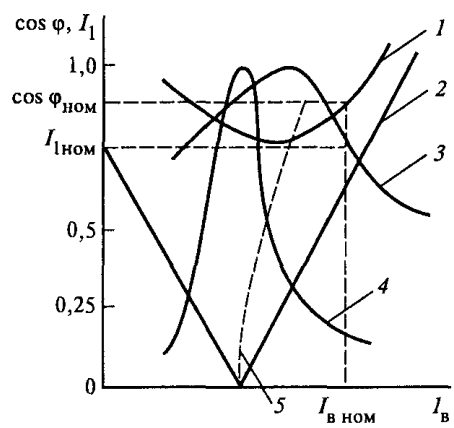


Рис. 55.37. U-образные характеристики синхронного двигателя

$I_1(I_в)$ имеют минимум, которому соответствует максимум коэффициента мощности $\cos\varphi = 1$.

На рис. 55.37 показаны зависимости $I_1(I_в)$ в виде кривых *1*, *2* и зависимости $\cos\varphi(I_в)$ в виде кривых *3*, *4* при двух уровнях механической нагрузки синхронного двигателя: номинальной $P_{ном}$ (кривые *1* и *3*) и его холостом ходе (*2* и *4*). Область характеристик справа от штриховой линии *5* соответствует работе синхронного двигателя с опережающим $\cos\varphi$, слева от нее — с отстающим, на самой линии $\cos\varphi = 1$. Отметим, что синхронный двигатель без механической нагрузки на валу носит название компенсатора реактивной мощности и часто используется в этой функции в системах электроснабжения.

Регулирование тока возбуждения позволяет не только использовать синхронный двигатель как компенсатор реактивной мощности в системе электроснабжения, но и обеспечивать с его помощью другие необходимые режимы синхронного ЭП и питающей сети, к которым относятся повышение устойчивости работы синхронного двигателя при колебаниях механической нагрузки; поддержание нормального напряжения в узле системы энергоснабжения, к которому присоединен двигатель; обеспечение минимума потерь энергии в синхронном двигателе или системе энергоснабжения; регулирование $\cos\varphi$ двигателя или в узле подключения его к системе энергоснабжения. Как правило, эти режимы обеспечиваются с помощью схем автоматического регулирования возбуждения (АРВ) синхронного двигателя.

Переходные процессы в ЭП с синхронным двигателем отличаются большим разнообразием и сложностью. Они возникают при пуске и торможении (останове) двигателя, при синхронизации его с сетью, увеличении (набросе) и снижении (сбросе) механической нагрузки синхронного двигателя, регулировании его тока возбуждения, изменении напряжения питающей сети, вызываемом в том числе и короткими замыканиями в электрических сетях и линиях электропередачи.

В общем случае переходные процессы в синхронном ЭП являются электромеханическими, описываются уравнениями Парка—Горева и имеют, как правило, колебательный характер. Анализ некоторых видов переходных процессов проведен в [55.10, 55.11].

Регулирование переменных в ЭП с синхронным двигателем. Основной областью применения синхронных двигателей до недавнего времени были нерегулируемые по скорости ЭП большой мощности. Появление статических преобразователей частоты определило практические возможности создания регулируемых синхронных ЭП по системе преобразователь частоты—синхронный двигатель [55.3]. Регулирование переменных осуществляется чаще всего в структурах ЭП с вентильным двигателем, вентильно-индукторного ЭП и ЭП с шаговыми двигателями.

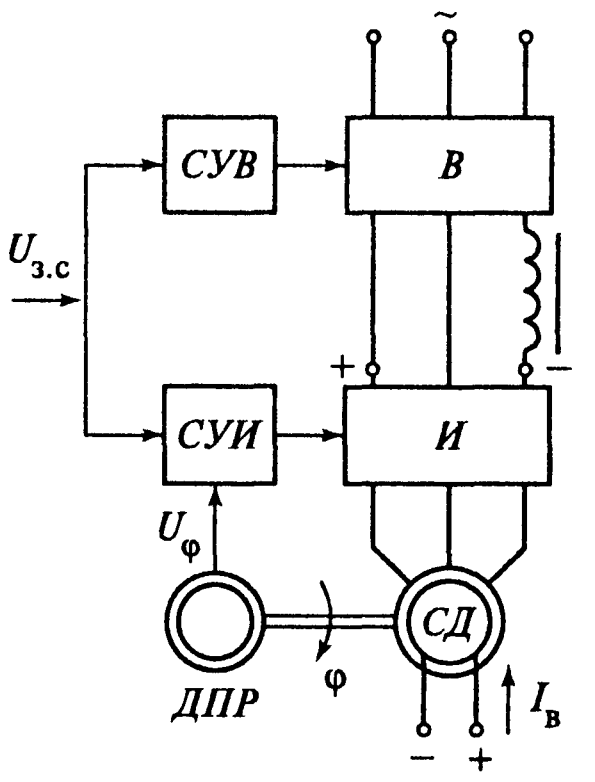


Рис. 55.38. Схема вентильного двигателя

ЭП с вентильным двигателем. Вентильный двигатель представляет собой систему (рис. 55.38), состоящую из синхронного двигателя *СД*, датчика положения его ротора *ДПР* и преобразователя частоты, включающего в себя выпрямитель *В* и инвертор *И* со своими системами управления *СУВ* и *СУИ*. Преобразователь частоты вместе с *ДПР* выполняют роль коллектора двигателя постоянного тока, поэтому вентильный двигатель иногда называется бесконтактным (бесколлекторным) двигателем постоянного тока. Синхронные двигатели могут иметь электромагнитное возбуждение, как это показано на рис. 55.38, или возбуждение от постоянных магнитов. Мощность вентильных двигателей достигает 20 МВт и более, а диапазон частоты вращения лежит в пределах от 10 до 18 000 об/мин. На рис. 55.38 $U_{з\,с}$, U_φ — соответственно сигналы задания скорости и положения ротора.

Подробно свойства, характеристики и технические данные вентильных двигателей рассмотрены в [55.11, 55.14, 55.29].

ЭП с шаговыми двигателями. Исполнительные органы некоторых рабочих машин и механизмов должны совершать дозированные перемещения с фиксацией своего положения в конце движения. В ЭП таких машин и механизмов успешно применяются шаговые двигатели различных типов, образующие основу дискретного ЭП. Широкое распространение дискретного ЭП определяется еще и тем обстоятельством, что он естественным образом сочетается с цифровыми управляющими машинами, программными устройствами и микропроцессорами, которые все шире применяются во всех отраслях техники. Например, дискретный ЭП используется для металлообрабатывающих станков с числовым программным управлением (ЧПУ), роботов и манипуля-

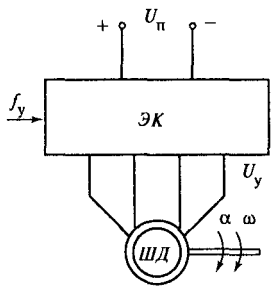


Рис. 55.39. Схема ЭП с шаговым двигателем

торов, в гибком автоматизированном производстве, в электронной и часовой промышленности.

Шаговый двигатель по принципу своего действия является синхронным двигателем, в котором магнитное поле перемещается (вращается) не непрерывно, а дискретно, шагами. Это достигается (рис. 55.39) за счет импульсного возбуждения обмоток шагового двигателя *ШД* с помощью электронного коммутатора *ЭК*, который преобразует одноканальную последовательность управляющих импульсов $f_у$ в многофазную систему напряжений $U_у$, прикладываемых к обмоткам (фазам) шагового двигателя.

Угловое перемещение α шагового двигателя определяется выражением:

$$\alpha = 2\pi / (pn),$$

где p — число пар полюсов ротора; n — число переключений (тактов) в цикле, равное числу фаз шагового двигателя при симметричной и удвоенному числу фаз при несимметричной коммутации.

Каждому импульсу соответствует одно переключение обмотки шагового двигателя (один такт коммутации) и один шаг ротора; суммарный угол поворота шагового двигателя пропорционален числу импульсов, а его скорость — частоте коммутации обмоток $f_к$:

$$\omega = \alpha f_к.$$

Современные шаговые двигатели разнообразны по своему конструктивному исполнению. В зависимости от числа фаз и устройства магнитной системы шаговые двигатели бывают однофазными, двухфазными и многофазными с активным или пассивным ротором.

Активный ротор выполняется из постоянных магнитов или снабжается обмоткой возбуждения. Шаговые двигатели с ротором из постоянных магнитов получили название магнитоэлектрических.

При необходимости получения небольших единичных перемещений ротора и в то же время больших частот используются шаговые двигатели с пассивным ротором, которые делятся на реактивные и индукторные. Статор и ротор реактивного шагового двигателя имеют явно выраженные полюсы, называемые обычно зубцами. На зубцах статора размещаются обмотки возбуждения, питаемые от электронного коммутатора. Ротор выполнен из ферромагнитного материала и не имеет обмоток возбуждения, вследствие чего и назван пассивным.

Развитие дискретного ЭП привело к созданию специальных видов шаговых двигателей: линейных, волновых, с малоинерционным и катящимся роторами, двухкоординатных линейно-поворотных, суммирующих на своем валу вращательное и поступательное движение, и многокоординатных, осуществляющих перемещение исполнительных органов по трем координатам в пространстве. Двигатели такого рода, отличающиеся высокой точностью позиционирования и скоростью, используются в приводах манипуляторов, роботов и автоматических линиях станков.

Подробно свойства и характеристики ЭП с шаговыми двигателями рассмотрены в [55.7, 55.15, 55.29].

Вентильно-индукторный электропривод. Структурная схема силовой части вентильно-индукторного электропривода в случае питания его от трехфазной сети переменного тока представлена на рис. 55.40, *а*. В ее состав входят индукторный двигатель *ИД*, электронный коммутатор *К*, выпрямитель *В*, датчик положения *ДП* ротора двигателя и система управления *СУ*. Особенность вентильно-индукторного электропривода состоит в применении индукторного двигателя с неодинаковым количеством зубцов статора и зубцов ротора (обычно в пределах 4—12). На рисунке в качестве примера показан трехфазный двигатель, имеющий шесть зубцов статора и четыре зубца на роторе.

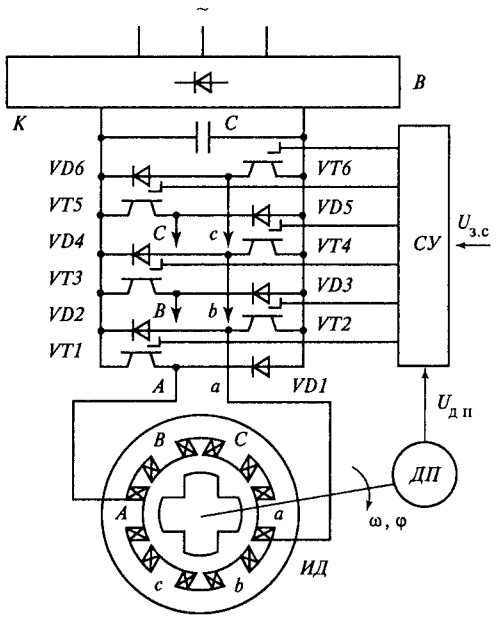
На полюсах статора ИД расположены обмотки начала и концы которых обозначены *А—а*, *В—b*, *С—с*, подключенные к электронному коммутатору, выполняемому обычно на силовых транзисторах. В схеме рис. 55.40, *а* в качестве управляемых ключей коммутатора используются силовые биполярные транзисторы *VT1—VT6* с изолированным затвором типа IGBT. Управление ключами осуществляет схема управления *СУ*, обеспечивающая подачу на них импульсов управления с необходимыми последовательностью и частотой, которые определяются сигналами задания скорости $U_{з.с}$ и датчика положения $U_{д.п}$.

Угловая скорость ротора определяется следующей формулой:

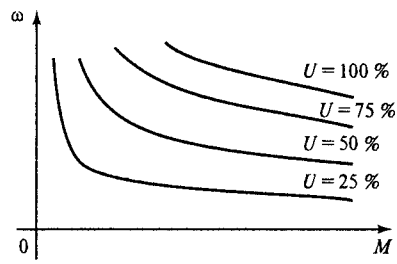
$$\omega = 2\pi f_к / (mn),$$

где $f_к$ — частота коммутации обмоток; m — число фаз двигателя; n — число зубцов ротора.

Механические характеристики в разомкнутой структуре вентильно-индукторного электропривода при различных напряжениях питания двигателя U в процентах от номинального показаны на рис. 55.40, *б*. При помощи различных обратных связей могут быть сформированы характеристики,



а)



б)

Рис. 55.40. Схема (*а*) и механические характеристики (*б*) вентильно-индукторного ЭП

обеспечивающие регулирование координат ЭП требуемого качества. В вентильно-индукторном электроприводе может быть реализован и тормозной режим работы, осуществляемый путем выбора моментов включения и отключения обмоток двигателя.

Показанные на схеме рис. 55.40, *а* диоды *VD1*—*VD6* служат для обеспечения возможности циркуляции электромагнитной мощности в ЭП при отключении силовых транзисторов, а конденсатор *C* играет роль фильтра на выходе выпрямителя. Подробнее этот тип ЭП рассмотрен в [55.19].

55.8. ЭНЕРГЕТИКА ЭП

Оценка эффективности и качества электромеханического преобразования энергии ЭП осуществляется с помощью энергетических показателей, к числу которых относятся коэффициент полезного действия (КПД), коэффициент мощности $\cos\varphi$, потери мощности ΔP и энергии ΔA. Иногда к этим показателям относят потребляемые из сети и полезные мощность и энергию.

В общем случае потери мощности и энергии в ЭП складываются из потерь в электродвигателе, механической передаче, силовом преобразователе и системе управления (см. рис. 55.1). Основную долю потерь в ЭП составляют потери в электродвигателе.

Потери мощности и энергии в установившемся режиме работы. *Потери мощности* ΔP в электродвигателе обычно представляют суммой двух составляющих — постоянных K и переменных V потерь:

$$\Delta P = K + V.$$

К постоянным относят потери мощности, не зависящие от нагрузки двигателя, — потери в стали магнитопровода, механические потери от трения в подшипниках и вентиляционные потери. Для двигателей постоянного тока с независимым возбуждением и синхронного к постоянным потерям обычно относят и потери в обмотках возбуждения.

К переменным относят потери, которые выделяются в обмотках двигателей при протекании по ним токов и зависят тем самым от механической нагрузки ЭП. Переменные потери мощности в двигателе могут быть в общем случае определены через электрические или механические данные.

Для двигателя постоянного тока переменные потери мощности V при расчете через электрические данные определяются по формуле:

$$V = I^2 R,$$

где I, R — соответственно ток и сопротивление цепи двигателя, по которым протекает этот ток.

Для трехфазных асинхронных двигателей

$$V = V_1 + V_2 = 3I_1^2 R_1 + 3(I_2')^2 R_2',$$

где V_1, V_2 — потери мощности соответственно в цепях обмоток статора и ротора. При использовании Г-образной схемы замещения (см. рис. 55.22),

когда по резистору R_1 протекает ток I_2', потери в статоре составляют

$$V_1 = 3(I_2')^2 R_1 = 3(I_2')^2 R_1 R_2'/R_2' = V_2 R_1/R_2',$$

а полные переменные потери

$$V = 3(I_2')^2 (R_1 + R_2') = V_2(1 + R_1/R_2').$$

Для синхронных двигателей

$$V_1 = 3I_1^2 R_1.$$

Переменные потери мощности, выделяющиеся в якоре двигателя постоянного тока и роторе асинхронного двигателя, могут быть также определены через механические переменные и параметры:

$$V = V_2 = M\omega_0 \delta = M\omega_0 s,$$

где $\delta = s = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$ — относительная скорость двигателя постоянного тока или скольжение асинхронного двигателя.

Переменные потери в статоре асинхронного двигателя в этом случае составят

$$V_1 = V_2 R_1/R_2' = M\omega_0 s R_1/R_2'.$$

Полные переменные потери в асинхронном двигателе

$$V = V_1 + V_2 = M\omega_0 s(1 + R_1/R_2').$$

Постоянные потери мощности

$$K = \Delta P_{\text{ном}} - V_{\text{ном}}.$$

Полные потери мощности в номинальном режиме $\Delta P_{\text{ном}}$, входящие в эту формулу, определяются по номинальным КПД $\eta_{\text{ном}}$ и мощности двигателя $P_{\text{ном}}$:

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}(1 - \eta_{\text{ном}})/\eta_{\text{ном}}.$$

Эти же потери для асинхронного и синхронного двигателей могут быть найдены и из соотношения

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{1\,\text{ном}} - P_{\text{ном}} = 3U_\phi I_{1\,\text{ном}} \cos\varphi_{\text{ном}} - P_{\text{ном}}.$$

Формулы для расчета потерь при регулировании скорости различными способами приведены в [55.5, 55.17].

Потери энергии. За время работы $t_{\text{р}}$ двигателя с постоянной нагрузкой полные потери энергии, обусловленные потерями K и V, составят:

$$\Delta A = \Delta P t_{\text{р}}.$$

При работе двигателя с циклически изменяющейся нагрузкой полные потери энергии за весь цикл составят

$$\Delta A = \int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P(t)\,\mathrm{d}t \approx \sum_{i=1}^{m} \Delta P_i t_i,$$

где $\Delta P_i, t_i$ — потери мощности и время работы на i-м участке цикла; m — число отдельных участков цикла; $\sum_{i=1}^{m} t_i = t_{\text{ц}}$ — время цикла.

Потери мощности и энергии в преобразователе. При использовании для управления двигателями полупроводниковых преобразователей эти потери складываются из потерь в полупроводниковых элементах, трансформаторах, сглаживающих и уравнительных реакторах, фильтрах и элементах устройств искусственной коммутации. Потери в полупроводниковых элементах преобразователей обычно относительно малы (несколько процентов от номинальной мощности).

При расчете потерь в трансформаторах и реакторах берется сопротивление их обмоток или используется эквивалентное сопротивление преобразователя.

При использовании электромашинных преобразователей потери в них определяются рассмотренными в этом параграфе способами.

Потери мощности в системе управления. Эти потери обычно не превышают нескольких десятков ватт и принимаются во внимание только при выполнении точных энергетических расчетов.

Потери мощности в механической передаче. Эти потери определяются главным образом трением ее движущихся частей и зависят от передаваемого момента.

Потери в механической передаче обычно оцениваются с помощью КПД, значение которого для разных ее видов и нагрузок приводится в разд. 56 настоящего справочника.

Потери мощности и энергии в переходных режимах. В общем случае потери энергии за время $t_{\text{п.п}}$ переходного процесса могут быть определены с помощью следующего выражения:

$$\Delta A = \int_0^{t_{\text{п.п}}} \Delta P\,\mathrm{d}t = \int_0^{t_{\text{п.п}}} K\,\mathrm{d}t + \int_0^{t_{\text{п.п}}} V\,\mathrm{d}t = \Delta A_K + \Delta A_V,$$

где ΔA_K и ΔA_V — потери энергии, обусловленные соответственно постоянными и переменными потерями мощности.

Потери энергии ΔA_K, определяются постоянными потерями мощности K и временем переходного процесса $t_{\text{п.п}}$:

$$\Delta A_K = K t_{\text{п.п}}.$$

Потери энергии ΔA_V могут быть найдены с использованием графика тока в переходном процессе $i^2(t)$ и сопротивления:

$$\Delta A_V = \int_0^{t_{\text{п.п}}} i^2(t) R\,\mathrm{d}t.$$

Более удобным является определение потерь ΔA_V через механические переменные и параметры. В этом случае при работе ЭП без нагрузки ($M_c = 0$) потери энергии в якоре двигателя постоянного тока и роторе асинхронного двигателя определяются формулой

$$\Delta A_{20} = J\omega_0^2(s_{нач}^2 - s_{кон}^2)/2,$$

где J — суммарный момент ЭП; ω_0 — скорость идеального холостого хода двигателя; $s_{нач}$ и $s_{кон}$ — соответственно начальное и конечное значение скольжения двигателя.

При пуске вхолостую $\Delta A_{20}^{п} = J\omega_0^2/2$, при динамическом торможении потери энергии равны потерям при пуске $\Delta A_{20}^{п} = \Delta A_{20}^{т}$, а при торможении противовключением они составляют:

$$\Delta A_{20}^{т.п} = 3J\omega_0^2/2.$$

При реверсе потери энергии равны сумме потерь при торможении противовключением и пуске:

$$\Delta A_{20}^{р} = 4J\omega_0^2/2.$$

Полные потери энергии в асинхронном двигателе при его работе вхолостую составят

$$\Delta A_{V0} = \Delta A_{10} + \Delta A_{20} =$$

$$= J\omega_0^2(1 + R_1/R_2')(s_{нач}^2 - s_{кон}^2)/2.$$

Потери энергии при работе ЭП с нагрузкой ($M_c \neq 0$) могут быть рассчитаны по следующей приближенной формуле:

$$\Delta A_н = \Delta A_0 M_{ср}/(M_{ср} \pm M_c),$$

где ΔA_0 — потери энергии при работе двигателя вхолостую; знак «–» соответствует пуску, а знак «+» — торможению двигателя; $M_{ср}$ — средний, неизменный за время переходного процесса, момент двигателя.

Более точные методы расчета потерь энергии при работе ЭП под нагрузкой рассмотрены в [55.5, 55.15, 55.17].

Снижение потерь электроэнергии в переходных процессах ЭП может быть осуществлено следующими способами:

1. Уменьшением момента инерции ЭП. Это может быть достигнуто: 1) использованием малоинерционных двигателей, имеющих пониженный момент инерции якоря (двигатели с повышенным отношением длины якоря к его диаметру, двигатели с полым или дисковым якорем); 2) рациональным конструированием механической передачи путем выбора оптимального передаточного числа редуктора, рациональных размеров и форм элементов механической передачи; 3) заменой одного двигателя двумя, имеющими половинную номинальную мощность заменяемого двигателя.

2. Регулированием в переходных процессах скорости идеального холостого хода. Это возможно в системе управляемый преобразователь — двигатель и при использовании в ЭП многоскоростного асинхронного двигателя. Расчетные формулы для определения потерь энергии для этих случаев содержатся в [55.10, 55.15, 55.17].

Коэффициент полезного действия ЭП. КПД силового канала ЭП как электромеханической системы определяется произведением КПД силового преобразователя $\eta_{п.э}$, электродвигателя η и механической передачи $\eta_{м.п}$:

$$\eta_{эп} = \eta_{п.э}\,\eta\,\eta_{м.п}.$$

Наиболее значимым в этом выражении является КПД двигателя. При работе ЭП в некотором цикле с различными скоростями или нагрузками на валу как в установившемся, так и в переходном режиме КПД двигателя определяется выражением

$$\eta_ц = A_{пол}/A_{потр} = A_{пол}/(A_{пол} + \Delta A) =$$

$$= \sum_1^n P_{пол\,i}\,t_i \Big/ \left(\sum_1^n P_{пол\,i}\,t_i + \sum_1^n \Delta P_i\,t_i\right),$$

где $A_{пол}$, $A_{потр}$ — полезная механическая и потребляемая электрическая энергии; ΔA — потери энергии; $P_{пол\,i}$ — полезная (механическая) мощность на i-м участке цикла; ΔP_i — потери мощности на i-м участке цикла; n — число участков работы ЭП. Рассчитанный по этому выражению КПД называют цикловым, или средневзвешенным.

Если ЭП работает в установившемся режиме, то эта формула упрощается и принимает вид:

$$\eta = P_{пол}/(P_{пол} + \Delta P).$$

КПД работающего двигателя зависит от развиваемой им механической мощности на валу, что иллюстрирует рис. 55.41. По мере увеличения нагрузки P он растет, достигая максимального значения η_{max} при мощности, несколько меньшей номинальной.

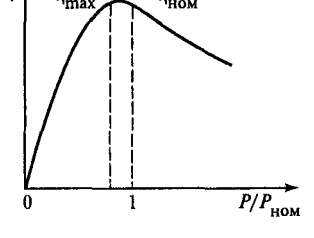


Рис. 55.41. График зависимости КПД от кратности нагрузки двигателя

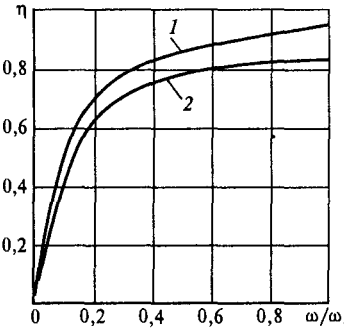


Рис. 55.42. Зависимости КПД от относительной скорости системы преобразователь—двигатель

На рис. 55.42 показаны зависимости КПД от относительной скорости двигателя ω/ω_0 систем ЭП управляемый выпрямитель—двигатель постоянного тока (кривая *1*) и генератор—двигатель (кривая *2*) [55.11].

Способы повышения КПД двигателей могут быть следующими: ограничение времени работы двигателя на холостом ходу; замена малозагруженного двигателя на двигатель меньшей мощности; снижение подводимого напряжения при малых нагрузках для асинхронного двигателя, уменьшение потерь энергии в переходных режимах.

Коэффициент мощности ЭП. ЭП, подключаемые к сети переменного тока, потребляют из нее активную P и реактивную Q мощности. Если ЭП работает в цикле при различных нагрузках или скоростях в установившемся и переходном режимах, то он как потребитель реактивной энергии характеризуется средневзвешенным или цикловым коэффициентом мощности, который определяется отношением потребленной активной энергии за цикл A_a к полной энергии $A_п$ в соответствии с формулой:

$$\cos\varphi_ц = A_a / A_п = \sum_{i=1}^{n} P_i t_i \Big/ \sum_{1}^{n} S_i t_i ,$$

где $S_t = \sqrt{P_i^2 + Q_i^2}$ — полная мощность.

При работе ЭП в установившемся режиме эта формула упрощается и принимает вид:

$$\cos\varphi = P/S = P/\sqrt{P^2 + Q^2} .$$

Коэффициент мощности асинхронного двигателя рассчитывается для установившегося режима его работы с помощью следующих формул:

$$P_1 = P_{мех} + \Delta P;$$

$$Q = 3I_μ^2 X_μ + 3I_1^2 X_1 + 3(I_2')^2 X_2' .$$

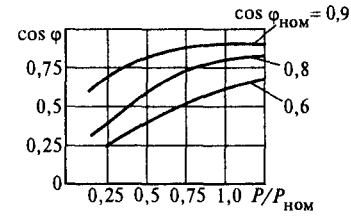


Рис. 55.43. Зависимости коэффициента мощности асинхронных двигателей серии 4А от кратности нагрузки

Для Г-образной схемы замещения (см. рис. 55.22) двигателя при $R_μ \approx 0$ и $I_μ = U_ф / X_μ$ последнее выражение можно записать так:

$$Q = 3U_ф I_μ + 3(I_2')^2 X_к =$$

$$= 3U_ф I_μ + M\omega_0 s X_к / R_2' .$$

Коэффициент мощности асинхронного двигателя зависит от его нагрузки. Зависимость $\cos\varphi$ от кратности механической нагрузки $P/P_{ном}$ для двигателей серии 4А при различных уровнях номинальных коэффициентов $\cos\varphi_{ном}$ приведена на рис. 55.43.

Повышение $\cos\varphi$ асинхронных двигателей достигается заменой малозагруженных двигателей; ограничением времени работы двигателей на холостом ходу; понижением напряжения питания двигателей, работающих с малой или переменной нагрузкой, что может быть осуществлено с помощью регулятора напряжения или, где это возможно, переключением обмоток статора со схемы треугольника на звезду.

Коэффициент мощности системы управляемый выпрямитель—двигатель постоянного тока определяется углом сдвига φ_1 первой гармоники сети тока относительно напряжения сети и коэффициентом искажения ν этого же тока

$$\cos\varphi = \nu \cos\varphi_1 ,$$

где $\cos\varphi_1 \approx \cos(\alpha + \gamma/2)$; $\nu = I_1 / I$ — коэффициент искажения; I — действующее значение потребляемого из сети тока; I_1 — действующее значение первой гармоники этого тока; α, γ — соответственно угол управления и коммутации вентилей.

При регулировании скорости коэффициент мощности может быть оценен с помощью следующего приближенного выражения:

$$\cos\varphi_p \approx \cos\alpha = E_d / E_{d\max} = \omega_0 / \omega_{0e} ,$$

где E_d — ЭДС преобразователя; ω_0, ω_{0e} — соответственно скорости идеального холостого хода, соответствующие E_d и $E_{d\max}$.

На рис. 55.44 приведены зависимости $\cos\varphi$ от относительной скорости двигателя ω/ω_0 систем

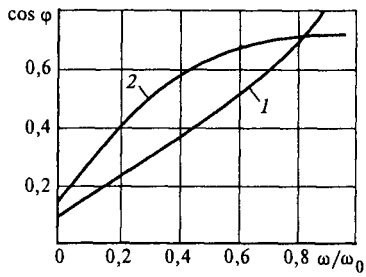


Рис. 55.44. Зависимости коэффициента мощности от относительной скорости системы преобразователь—двигатель

ЭП управляемый выпрямитель –двигатель постоянного тока (кривая *1*) и генератор— двигатель (кривая *2*) [55 11]

Повышение коэффициента мощности и уменьшение несинусоидальности напряжения сети в этой системе может быть достигнуто за счет применения фильтрокомпенсирующих, фильтросимметрирующих и традиционных компенсирующих устройств, а также путем использования специальных законов управления преобразователем и способов коммутации его вентилей

Энергосбережение средствами электропривода Эффективное использование энергии является одной из важнейших современных проблем народного хозяйства Ее решение позволит снизить расход энергетических и материальных ресурсов при производстве промышленной и сельскохозяйственной продукции, уменьшить большие непроизводительные расходы государства и населения в сфере жилищно-коммунального хозяйства, улучшить экологическую обстановку в стране Важную роль в решении этой проблемы играет ЭП, который является основным потребителем электрической энергии

В общем случае энергосбережение может осуществляться как в самом ЭП, так и в обслуживаемых им технологических процессах, где используется вырабатываемая им механическая энергия

Энергосбережение в ЭП должно осуществляться как на стадии его проектирования и конструирования, так и при эксплуатации *При проектировании ЭП* основные методы энергосбережения состоят в следующем

1 Обоснованный расчет требуемой мощности двигателя исполнительного органа рабочей машины или производственного механизма с учетом всех условий его работы Процедура расчета мощности и выбора двигателя рассмотрена в разд 59 настоящего справочника

2 Выбор компонент ЭП, характеризующихся минимальными потерями энергии при работе

3 Выбор способов и технических средств регулирования координат ЭП, при использовании которых потери мощности и энергии минимальны

При эксплуатации работающих ЭП энергосбережение может быть достигнуто за счет правильного технического обслуживания и проведения мероприятий по их модернизации

1 Техническое обслуживание ЭП должно проводиться персоналом в соответствии с правилами устройства и эксплуатации электроустановок с обязательными периодическими осмотрами и профилактическими мероприятиями по элементам ЭП – смазкой подшипников и других движущихся механических частей, очисткой коллекторов, контактных колец двигателей и контактов электрической аппаратуры, затяжку болтовых электрических соединении и т д

2 Модернизация ЭП Выше были названы основные технические мероприятия, позволяющие повысить энергетические показатели ЭП при их эксплуатации Это — замена малозагруженных двигателей, ограничение или полное исключение их работы на холостом ходу, снижение напряжения на статоре асинхронных двигателеи при малых нагрузках, компенсация реактивной мощности и т д

Эффективным средством энергосбережения является переход от нерегулируемого ЭП к регулируемому за счет использования полупроводниковых силовых преобразователей в структурах ЭП Это позволяет осуществлять энергосбережение как в самом ЭП, так и в сфере обслуживаемых ими технологических процессов Примерами в этом отношении могут служить применение в качестве экономайзеров регуляторов напряжения в асинхронном ЭП при малых нагрузках и преобразователей частоты для регулирования производительности различных нагнетателей Подробнее эти и другие возможности энергосбережения рассмотрены в последующих разделах справочника

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

55 1 **Анализ** и синтез систем управления электроприводов постоянного тока / Под ред В А Елисеева М Моск энерг ин-т, 1984

55 2 **Беляев А.В.** Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ Л Энергоатомиздат, 1988

55 3 **Вейнгер А.М.** Регулируемый синхронный электропривод М Энергоатомиздат, 1985

55 4 **Вешеневский С.Н.** Характеристики двигателеи в электроприводе М Энергия, 1977

55 5 **Голован А.Т.** Основы электропривода М Госэнергоиздат, 1959

55 6 **ГОСТ 50369—92** Электроприводы Термины и определения / Госстандарт России

55 7 **Дискретный** электропривод с шаговыми двигателями / Под ред М Г Чиликина М Энергия, 1971

55 8 **Ильинский Н.Ф.** Электроприводы постоянного тока с управляемым моментом М Энергоиздат, 1981

55 9 **Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф.** Общий курс электропривода Учебн для вузов М Энергоатомиздат, 1992

55 10 **Ключев В.И.** Теория электропривода М Энергоатомиздат, 1998

55 11 **Ковчин С.А., Сабинин Ю.А.** Основы электропривода СПб Энергоатомиздат, 1994

55 12 **Комплектные** тиристорные электроприводы Справочник / И Х Евзеров, А С Горобец, Б И Мошкович и др , Под ред В М Перельмутера М Энергоатомиздат, 1988

55 13 **Мартолин Ш.М.** Дифференциальный электропривод М Энергия, 1975

55 14 **Михалев А.С., Миловзоров В.П.** Следящие системы с бесколлекторными двигателями постоянного тока М Энергия, 1979

55 15 **Москаленко В.В.** Автоматизированный электропривод М Энергоатомиздат, 1986

55 16 **Москаленко В.В.** Электрический привод Учебн для техникумов М Высшая школа, 1991

55 17 **Основы** автоматизированного электропривода / М Г Чишкин, М М Соколов, В М Терехов, А В Шинянский М Энергия, 1974

55 18 **Применение** микропроцессорных систем в энергетике и радиоэлектронике / А Н Дорошенко, Ю Н Евланов, Л А Ильяшенко, В К Раков, Ю А Щеглов, Под ред В А Мясникова и А А Дерюгина М Моск энерг ин-т, 1986

55 19 **Садовский Л.А., Виноградов В.Л.** Электродвигатели с переменным магнитным сопротивлением для регулируемого электропривода // Электротехника 2000 № 2 С 54—59

55 20 **Справочник** по автоматизированному электроприводу / Под ред В А Елисеева и А В Шинянского М Энергоатомиздат, 1983

55 21 **Терехов В.М.** Элементы автоматизированного электропривода М Энергоатомиздат, 1987

55 22 **Транзисторный** электропривод на базе синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов для станков и промышленных роботов / А Д Поздеев В В Горчаков, Н В Донской и др // Электротехника 1988 № 2 С 10 14

55 23 **Чиликин М.Г., Сандлер А.С.** Общий курс электропривода М Энергоиздат, 1981

55 24 **Шепфельд Р., Хабигер Э.** Автоматизированные электроприводы Пер с нем / Под ред Ю А Борцова Л Энергоатомиздат Ленингр отд-ние 1985

55 25 **Электромагнитные** переходные процессы в асинхронном электроприводе / М М Соколов, Л П Петров, Л Б Масандилов, В А Ладензон М Энергия, 1971

55 26 **Электрические** и электронные аппараты Учебн для вузов / Под ред Ю К Розанова М Энергоатомиздат, 1998

55 27 **Электроприводы** постоянного и переменного тока с улучшенными динамическими и энергетическими показателями // Труды МЭИ 1982 Вып 570

55 28 **Электротехнический** справочник Использование электрической энергии Т 3 Кн 2 / Под общ ред И Н Орлова и др —7-е изд М Энергоатомиздат, 1988

55 29 **Электротехнический** справочник В 4 т Т 2 Электротехнические изделия и устройства / Под общ ред профессора МЭИ В Г Герасимова и др —8-е изд М Изд-во МЭИ, 1998

55 30 **Энергосберегающие** технические решения в электроприводе / Под ред А О Горнова М Изд-во МЭИ, 1991

55 31 **Энергосберегающая** технология электроснабжения народного хозяйства / Под ред В А Веникова Кн 2 Н Ф Ильинский, Ю В Рожанковский, А О Горнов Энергосбережение в электроприводе М Высшая школа, 1989

55 32 **Яуре А.Г., Певзнер Е.М.** Крановый электропривод Справочник М Энергоатомиздат, 1988

Раздел 56

КОМПОНЕНТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА. СИЛОВОЙ КАНАЛ

СОДЕРЖАНИЕ

56 1 Электрические двигатели общего назначения Обзор 44
56 2 Механические передачи 49
56 3 Тиристорные преобразователи постоянного тока 51
56 4 Тиристорные регуляторы напряжения Система тиристорный регулятор напряжения — асинхронный двигатель 60
Характеристики системы ТРН—АД (61) Энергетические характеристики ТРН—АД (61) Обобщенная структура и режимы работы системы ТРН—АД (63) Технические данные ТРН (64) Особенности применения системы ТРН—АД на примере некоторых механизмов (64)
56 5 Преобразователи частоты 69
Типы преобразователей частоты (69) Пример реализации частотно-управляемого ЭП с использованием ПЧ с АИН (78) Расчет преобразователя частоты общего назначения (80) Технические характеристики преобразователей частоты (86)
56 6 Датчики 108
Аналоговые датчики (108) Дискретные датчики (119)
Список литературы 122

56.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ. ОБЗОР

Двигатели постоянного тока. В электроприводе (ЭП) используются двигатели постоянного тока с независимым (ДПТНВ), последовательным (ДПТПВ) и смешанным (ДПТСВ) возбуждением, а также с возбуждением от постоянных магнитов, которые по своим характеристикам близки к ДПТНВ В табл 56 1 содержатся перечень и общая характеристика некоторых серий двигателей постоянного тока

Двигатели серии 2П по сравнению с серией П имеют более длительный срок службы, пониженный уровень вибрации и шума, улучшенные динамические показатели и унифицированные в соответствии с рекомендациями МЭК установочные и присоединительные размеры Эти двигатели ориентированы на работу в регулируемых ЭП с питанием от тиристорных преобразователей и могут иметь встроенный датчик скорости (буква Г в обозначении двигателя)

По способам охлаждения и защиты от окружающей среды двигатели серии 2П подразделяются на защищенные с самовентиляцией (обозначение Н) и с независимои вентиляцией от постороннего вентилятора (обозначение Ф), закрытые с естественным охлаждением (обозначение Б) и с наружным обдувом от постороннего вентилятора (обозначение О)

Для замены двигателей серии П 12—22-го габаритов разработаны серии П2 и МП с высотой осей вращения от 355 мм, диапазонами мощности от 3150 до 12 500 кВт и частоты вращения от 32 до 500 об/мин

Совершенствование двигателеи постоянного тока привело к разработке новой серии 4П на напряжения 110 и 220 В с частотами вращения от 750 до 3000 об/мин и номинальными моментами от 2,3 до 15 000 Н · м с улучшенными по сравнению с двигателями серии 2П удельными энергетическими показателями, динамическими и виброакустическими своиствами По ряду конструктивных особенностей двигатели этой серии унифицированы с асинхронными двигателями серий 4А и АИ

На рис 56 1 приведены усредненные зависимости относительного сопротивления цепи якоря $R_{я*} - R_я / R_{ном}$ от номинальнои мощности двигателеи серии П и 2П На рис 56 2 — усредненные зависимости номинального КПД от номинальной мощности двигателей серий П, 2П и 4П На рис 56 3 — усредненные зависимости электромеханической постоянной времени $T_м$ от номинальной мощности двигателей серий П и 2П

Для ЭП ряда рабочих машин и механизмов выпускаются специальные двигатели серии ДПТНВ Для ЭП металлорежущих станков кроме двигателей серий 2П и 4П применяются двигатели серии ПБСТ и ПГТ (с гладким якорем), а также высокомоментные двигатели серий ПБВ, ДК1 и ДК2 с возбуждением от постоянных магнитов

Для крановых механизмов выпускается серия двигателей Д, исполнение которых максимально учитывает условия их работы и предъявляемые к ним требования В составе этой серии выпускаются двигатели как с независимым, так и с последовательным возбуждением Для крапово-металлургических ЭП применяются также двигатели с незави-

Таблица 56.1. **Двигатели постоянного тока**

Серия	Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин	Номинальное напряжение, В	Краткая характеристика
4П	0,18—250	750—3000	110, 220, 440	Общего назначения, для замены двигателей серии 2П
2П	0,37—200	600—3000	110, 220, 340, 440	Общего назначения, для замены двигателей серии П 1—11-го габаритов
П2	3150—12 500	32—500	440, 750, 930	Закрытые, с независимым возбуждением и принудительной вентиляцией, для замены двигателей серии П 12—22-го габаритов
П (1—11-го габаритов)	0,2—200	600—3000	110, 220, 440	Общего назначения и специальные
П (12—22-го габаритов)	100—6300	100—1500	220—1000	То же
Д	2,5—185 при ПВ = 100 %	410—1460	220, 440	С повышенными пусковыми моментами и широким диапазоном регулирования скорости, для привода крановых, металлургических и других механизмов
ПБВ	0,75—5,5	1000	60—110	Закрытые, с возбуждением от постоянных магнитов, для привода станков с ЧПУ
ПГ, ПГТ	0,9—1	3000	60—220	Закрытые, с естественным охлаждением (ПГ, ПГТ), защищенные, с принудительной вентиляцией (остальные), реверсивные, общего назначения
ПС, ПСТ	0,12—0,75	3000	110, 220	
ПБС, ПБСТ	0,4—11,3	3000	110, 220, 340, 440	
ДПМ	2,8—60 при ПВ = 25 %	675—1700	110, 220	Водозащищенные, с естественным охлаждением и широким диапазоном регулирования скорости, для судовых механизмов
МП	1000—6300	32/80—63/80	440, 930	Закрытые, с принудительной вентиляцией, для привода прокатных станов
МПС	45 630 11 500	50/100 63/80 750/1000	220 600 930	Специальные двигатели для металлургической промышленности
2МП	2000—12 600	50/100—300/500	930	Закрытые, с принудительной вентиляцией, двухъякорные, для привода прокатных станов
МИ	0,1—0,37	1000, 2000, 3000	60, 110	Закрытые (водозащищенные), для работы в системах автоматики

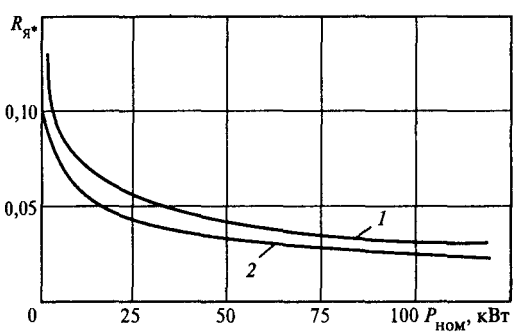


Рис. 56.1. Усредненная зависимость относительного сопротивления цепи якоря $R_{я*} = R_я/R_{ном}$ от номинальной мощности двигателей серий П (кривая *1*) и 2П (кривая *2*)

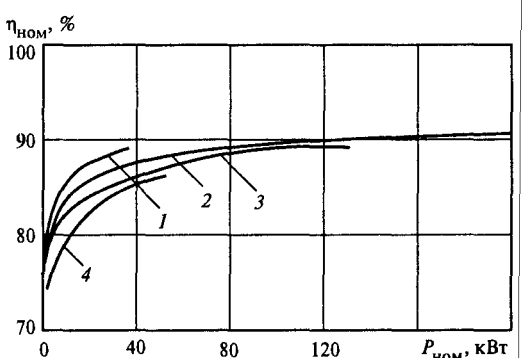


Рис. 56.2. Усредненные зависимости номинального КПД двигателей серий П, 2П и 4П от номинальной мощности:

1 — 2ПН, $\omega_{ном}$ = 314 рад/с; *2* — П, $\omega_{ном}$ = 314, 157, 105 рад/с; *3* — 2ПН, $\omega_{ном}$ = 157, 105 рад/с; *4* — 4П, $\omega_{ном}$ = 110 рад/с

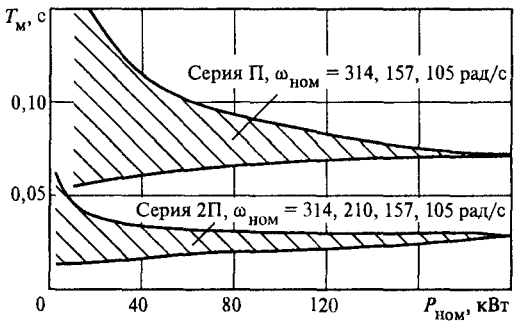


Рис. 56.3. Усредненные зависимости электромеханической постоянной времени $T_м$ двигателей серий П и 2П от номинальной мощности

симым, последовательным и смешанным возбуждением серии ДП.

Специальные ДПТ выпускаются и для металлургического производства (например, прокатные двигатели серий НП и ПП), текстильной промышленности и ряда других отраслей народного хозяйства.

Асинхронные трехфазные двигатели. В табл. 56.2 указаны некоторые серии и общие характеристики асинхронных двигателей (АД).

В общепромышленную серию 4А входят асинхронные двигатели мощностью от 0,06 до 400 кВт и с высотой осей вращения от 50 до 355 мм, которые выпускаются в самых различных модификациях и конструктивных исполнениях: с повышенны-

Таблица 56.2. **Асинхронные двигатели**

Серия (высота оси вращения)	Номинальная мощность, кВт	Синхронная частота вращения, об/мин	Номинальное напряжение, В	Исполнение, область применения
Двигатели с короткозамкнутым ротором общего назначения				
RA (71—280 мм)	0,37—100	750, 1000, 1500, 3000	220/380	Защищенные и закрытые, обдуваемые, широкого применения
6А (315 мм)	90—200	750, 1000, 1500, 3000	220/380 380/660	Закрытые, обдуваемые, широкого применения
5А (5АН) (71—335 мм)	0,37—400	750, 1000, 1500, 3000	220/380 380/660	Защищенные и закрытые, обдуваемые, широкого применения
АИР (50—355 мм)	0,09—315	750, 1000, 1500, 3000	220,380 380/660 220,380,660	Открытые, защищенные, закрытые, обдуваемые, продуваемые, широкого применения
4А (50—355 мм)	0,06—400	500, 600, 750, 1000, 1500, 3000	220/380 380/660 220,380	Защищенные и закрытые, обдуваемые, широкого применения
4АР	15—45	750, 1000, 1500	380/660 220/380	Закрытые, обдуваемые, с повышенным пусковым моментом
4АС	0,3—63 при ПВ = 40 %	750, 1000, 1500, 3000	220,380 380/660	Закрытые, обдуваемые, с повышенным скольжением
ДАЗО	315—2000	500, 600, 750, 1000, 1500	6000, 10 000	Закрытые, обдуваемые
АН-2 (15—17-й габариты)	500—2000	370, 500, 600, 750, 1000	6000	Защищенные, для нерегулируемых по скорости электроприводов
АТД2, АТД4	500—8000	3000	6000	Для привода быстроходных механизмов
Крапово-металлургические двигатели				
МТКF	1,4—22 при ПВ = 40 %	750, 1000	380/220 500	С повышенными перегрузочной способностью и пусковыми моментами, для привода крановых механизмов
МТКН	3—37 при ПВ = 40 %	750, 1000	380/220 500	То же, для приводов металлургического производства
Двигатели с фазным ротором				
4АНК, 4АК	5,5—400	750, 1000, 1500	220/380, 380/660	Защищенные (4АНК) или закрытые (4АК), общего назначения
5АНК	45—400	600, 750, 1000, 1500	220/380, 380/660	Защищенные или закрытые, общего назначения
АКП	55—125	1000, 1500	220/380, 380/660	Защищенные, для привода прессов, для закрытых помещений
АКН2 (15—19-й габариты	315—2000	250, 300, 375, 500, 600, 750, 1000	6000	Для привода механизмов с частыми или тяжелыми условиями пуска
МТF МТН	1,4—30 3—118	600, 750, 1000	220/380, 240/415, 400, 500	Защищенные, с независимой вентиляцией, для привода крановых механизмов (МТF) и механизмов металлургического производства (МТН)

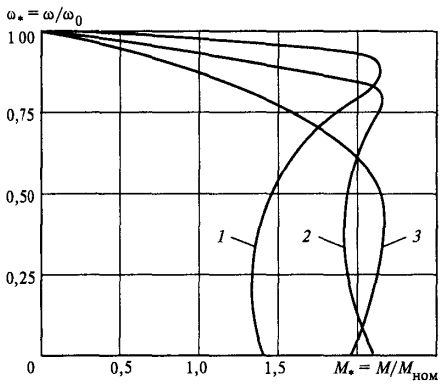


Рис. 56.4. Механические характеристики модификаций асинхронных короткозамкнутых двигателей:

1 — обычного исполнения, *2* — с повышенным пусковым моментом, *3* — с повышенным скольжением

ми пусковым моментом и скольжением, с фазным ротором, встраиваемые, малошумные, со встроенной температурной защитой, с электромагнитным тормозом, с подшипниками скольжения, химостойкие Асинхронные двигатели различаются также по климатическому исполнению и категории размещения

На рис 56 4 приведены механические характеристики модификаций АД с короткозамкнутым ротором обычного исполнения (кривая *1*), с повышенным пусковым моментом (кривая *2*) и повышенным скольжением (кривая *3*)

Асинхронные двигатели с фазным ротором имеют обозначение 4АК и 4АНК и выпускаются мощностью от 5,5 до 400 кВт

Серия двигателей АИ (асинхронные Интерэлектро) соответствует рекомендациям МЭК, выпускаются мощностью от 0,09 до 315 кВт и имеют модификации с фазным ротором, с повышенными скольжением и пусковым моментом, частотно-управляемые, двухскоростные, однофазные, на частоту 60 Гц Асинхронные двигатели этой серии выпускаются в варианте АИР по нормам DIN для внутренних поставок и в варианте АИС по нормам CENELEC для экспортных поставок

Владимирским электромоторным заводом (ВЭМЗ) и Московским электромеханическим заводом им Владимира Ильича (ЗВИ) выпускаются АД серии 5А мощностью до 315 кВт, которые полностью взаимозаменяемы с соответствующими типами АД серий 4А и АИР Выпуск АД серии 6А с высотой оси вращения 315 мм и мощностью 90—200 кВт также освоен ЗВИ

Ярославский электромеханический завод (ЯЭМЗ) разработал и освоил выпуск серии двигателей RA (российский асинхронный) в диапазоне мощностей от 0,37 до 100 кВт

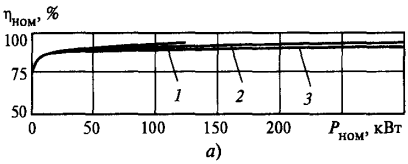
На рис 56 5, *а*, *б* приведены зависимости номинального КПД от номинальной мощности АД соответственно серий А2, 4А и серий RA, АИ и 5А

На рис 56 6, *а*, *б* приведены зависимости номинального коэффициента мощности от номинальной мощности АД соответственно серий А2, 4А и серий RA, АИ и 5А

На рис 56 7, *а*, *б* приведены зависимости электромеханической постоянной времени $T_м = J\omega_0/M_п$ от номинальной мощности АД соответственно серий А2, 4А и серий RA и АИ

Для комплектации ЭП большой мощности выпускаются АД серий АН-2 (мощностью до 2000 кВт), АВ (мощностью до 8000 кВт), ДАЗО (мощностью до 1250 кВт) и др

Для ЭП крановых механизмов производятся специальные АД серии MTF (с фазным ротором) и MTKF (с короткозамкнутым ротором), а для рабочих машин и механизмов металлургического производства — серии MTH (с фазным ротором) и MTKH (с короткозамкнутым ротором) В составе этих серий выпускаются и многоскоростные АД Двигатели указанных серий отличаются повышенной механической прочностью, большими пусковыми моментами при сравнительно небольших пусковых токах, хорошими динамическими показа-



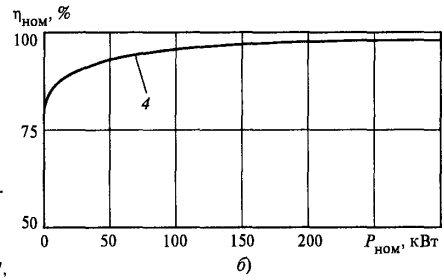
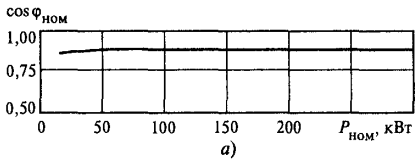
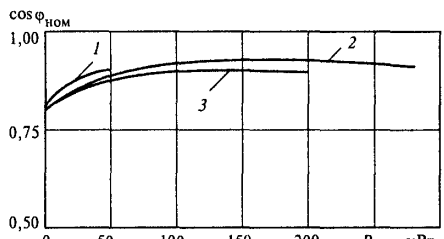


Рис. 56.5. Зависимость номинального КПД двигателей серий А2 и 4А (*а*) и серий RA, АИ и 5А (*б*) от номинальной мощности $P_{ном}$:

1 — А2, ω_0 = 314, 157, 105 рад/с, *2* — 4А, ω_0 = 157, 105 рад/с, *3* — 4А, ω_0 = 314 рад/с, *4* — RA, АИ и А5, ω_0 = 157 рад/с



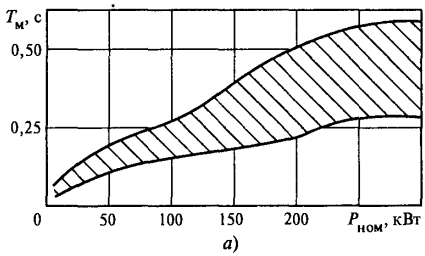
а)



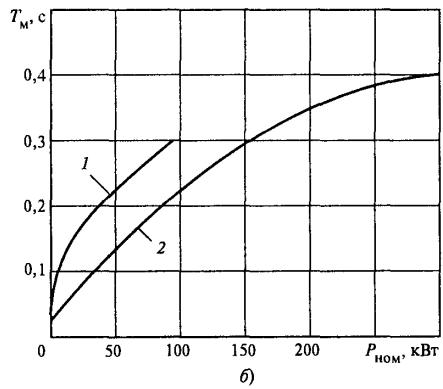
б)

Рис. 56.6. Зависимость номинального коэффициента мощности cosφ двигателей серий А2 и 4А (*а*) и серий RA, АИ и 5А (*б*) от номинальной мощности $P_{ном}$:

1 — RA; *2* — АИ; *3* — 5А, ω_0 = 157 рад/с



а)



б)

Рис. 56.7. Пределы изменения электромеханической постоянной времени $T_м$ двигателей серий А2 и 4А (*а*) и серий RA и АИ (*б*) в функции номинальной мощности $P_{ном}$:

1 — ω_0 = 314 рад/с, *2* — ω_0 = 157 рад/с

телями. Крановые и металлургические АД новой серии 4МТ отличаются улучшенными технико-экономическими показателями работы, расширенной шкалой мощностей, более высоким уровнем стандартизации.

Электротехническая промышленность выпускает также АД серий В и ВР для работы во взрывоопасных и пожароопасных средах.

Синхронные двигатели. Электротехническая промышленность выпускает несколько серий синхронных двигателей (СД) различного назначения, данные по некоторым сериям приведены в табл. 56.3.

Для общего применения выпускаются двигатели серий СД2 и СДЗ мощностью от 132 до 1000 кВт, СДН2 и СДН3-2 мощностью от 315 до 4000 кВт с напряжением питания 380 и 6000 В. Номинальный КПД этих СД лежит в пределах от 91 % при мощности 132 кВт до 97 % при мощности 4000 кВт.

В приводе вертикальных насосов используются двигатели ВДС и ВДС2 мощностью от 4000 до 12 500 кВт и ВСДН мощностью от 630 до 3200 кВт. Промышленность изготовляет и СД во взрывозащищенном исполнении серий СДКП2 (315—630 кВт) и СТДП (630—12 500 кВт). Кроме того, выпускаются СД, предназначенные для привода быстроходных механизмов (серия СТД), мельниц (СДМЗ и СДСЭ), поршневых компрессоров (СДКП2).

Вентильные двигатели серии ВД мощностью 15 —200 кВт предназначены для ЭП главного движения станков с ЧПУ. Они выполняются на номинальную частоту вращения от 500 до 1500 об/мин и имеют номинальные КПД в пределах от 79 до 92,5 %.

Вентильные двигатели серии ВД мощностью от 200 до 3150 кВт предназначены для работы в регулируемых ЭП буровых установок, насосов, вентиляторов, шахтных подъемников и других рабочих машин. Они выпускаются на частоты вращения от 100 до 1000 об/мин и имеют при номинальной скорости КПД равный 90 % и коэффициент мощности 0,9.

Для привода исполнительных органов роботов, манипуляторов и станков выпускаются вентильные двигатели серий ДВУ, 2ДВУ и 3ДВУ, имеющих диапазон номинальных моментов 0,05—170 Н·м и частоты вращения 2000—6000 об/мин. Для комплектации комплектных ЭП типа ЭПБ2 и ЭАМ выпускаются вентильные двигатели типа 2ДВМ с возбуждением от постоянных магнитов из редкоземельных элементов.

Более подробные сведения об электрических машинах содержатся в [56.1—56.3].

Таблица 56 3 **Синхронные двигатели**

Тип	Номинальная мощность, МВт	Синхронная частота вращения, об/мин	Номинальное напряжение, кВ	Краткая характеристика
СД2	0,132—1,0	500, 600, 750, 1000, 1500	0,38, 6	Горизонтальные, защищенные, с самовентиляцией, с тиристорным возбуждением, общего назначения
СДН2, СДН3-2	0,315—4,0	300, 375, 500, 600, 750, 1000	6	Горизонтальные, на стояковых подшипниках, открытые (СДН-2) и закрытые (СДН3-2), с тиристорным возбуждением общего назначения
СД3	0,16—1,0	500, 600, 750, 1000, 1500	0,38, 6	Горизонтальные, закрытые, с принудительной вентиляцией с электромашинной системой возбуждения, общего назначения
БСДК, БСДКП	0,2	500	0,38	Открытые, с самовентиляцией (БСДК) и взрывозащищенные с принудительной вентиляцией (БСДКП), с бесщеточной системой возбуждения, для привода компрессоров
ВДС, ВДС2	4,0—12,5	187,5, 214, 250, 300, 333, 375	6, 10	Вертикальные, подвесные, с водяными воздухоохладителями, с вентильным или электромашинным возбуждением, для привода вертикальных гидравлических насосов
ВСДН (СДВ)	0,63—3,2	375, 500, 600, 750	6	Подвесные, защищенные, с самовентиляцией по разомкнутому циклу, со статической вентильной системой возбуждения, для приводов вертикальных гидравлических насосов
ДСЗ (21-го габарита)	12,5—22	375	6, 10	Закрытые, с самовентиляцией по замкнутому циклу, с вентильной системой возбуждения, для привода агрегатов прокатного стана
СДКП2	0,315—0,63	375, 500, 600	3, 6	Защищенные, с тиристорным возбуждением, для привода поршневых компрессоров
СДМЗ	0,315—5,0	300, 375, 500, 600	3, 6, 10	Взрывозащищенные, продуваемые
СДСЭ	0,63—3,2	100, 150	6	Закрытые, с принудительной вентиляцией по замкнутому циклу, с тиристорным возбуждением, для привода мельниц
МС213, МС325	0,63—19,5, 3,2—10,9	300, 375, 500, 750	6, 10, 10,5	Горизонтальные, на стояковых подшипниках, закрытые, с принудительной вентиляцией, для прокатного оборудования
СДСП	0,86—2,0	250, 300, 375	6	Взрывозащищенные, для привода поршневых компрессоров
СДЭ-2	0,5—2,5	1000	6, 10	Защищенные, с самовентиляцией, с тиристорным возбуждением, для привода экскаваторных агрегатов
СТД	0,63—5,0	3000	6, 10	Закрытые, для работы в невзрывоопасной среде, с бесщеточной системой возбуждения, для привода быстроходных механизмов
СТДП	0,63—12,5	3000	6, 10	Взрывозащищенные, продуваемые
СДЗ-2	0,25—1,0	600, 750, 1000, 1500	6	Закрытые, с самовентиляцией, с тиристорным возбуждением, для привода дисковых мельниц

56.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕДАЧИ

В качестве механических передач в ЭП используются различные редукторы, передачи винт—гайка, кривошипно-шатунные механизмы, ременные, цепные, фрикционные передачи и т д Основные данные редукторов общего назначения приведены в табл 56 4

В табл 56 5 приведены данные мотор-редукторов серии МЦ

Ниже приведены ориентировочные значения КПД ряда механических передач при их номинальной нагрузке

Цилиндрическая передача	
со шлифованными прямыми зубьями	0,99
с нарезными прямыми зубьями	0,98
с необработанными прямыми зубьями	0,96
с косыми зубьями	0,975
с шевронными зубьями	0,985
Коническая зубчатая передача	0,975
Червячная передача	0,6 – 0,8
Ременная передача	0,94 0,96
Клиноременная передача	0,8—0,98
Цепная передача	0,98
Фрикционная передача	0,7– 0,8
Цапфы опор	
с плохой смазкой	0,94
с хорошей смазкой	0,97
с кольцевой смазкой	0,98
с шариковым подшипником	0,99
Блоки	0,96—0,97
Полиспасты	0,92—0,98
Барабан цепной	0,97

При частичной нагрузке КПД передачи может быть приближенно определен по кривым рис 56 8, где $k_з = M_с/M_{с\ расч}$ — коэффициент загрузки передачи по моменту

Таблица 56.4. **Редукторы общего назначения**

Тип	Виды редукторов	Мощность быстроходного вала, кВт	Крутящий момент тихоходного вала, Н · м	Передаточное число	Скорость быстроходного вала, рад/с	КПД
ЦУ	Цилиндрические одноступенчатые горизонтальные	—	250—4000	2—6,3	—	0,98
Ц2У	Цилиндрические двухступенчатые горизонтальные	—	250—4000	8—40	—	0,97
Ц2У-Н, Ц2Н	То же с зацеплением Новикова	—	7000—50 000	8—50	52—157	0,97
Ц3У	Цилиндрические трехступенчатые горизонтальные	—	1000—4000	45—200	—	0,96
Ч	Червячные одноступенчатые универсальные	—	85—2000	8—80	52—157	0,41—0,94
Ч2	Червячные двухступенчатые универсальные	—	1300—2800	100—6300	157	0,16—0,75
РЦ1-150А	Цилиндрические одноступенчатые горизонтальные	2,8—51	—	1,83—6,61	63—157	0,97
РЦД-400	Цилиндрические двухступенчатые горизонтальные	6,4—39,7	—	10—40	73,5—157	0,96
РМ	Цилиндрические двухступенчатые горизонтальные	2,6—106	—	8,23—48,57	63—157	0,96
КЦ1	Коническо-цилиндрические двухступенчатые	1,2—146	—	6,3—27,5	63—157	0,94
КЦ2	То же трехступенчатые	0,7—146	—	28,3—182	63—157	0,91
ВК	Цилиндрические трехступенчатые вертикальные	1—13,6	—	19,7—109,6	63—105	0,91

Таблица 56.5. **Мотор-редукторы серии МЦ**

Тип	Частота вращения выходного вала, об/мин	Момент на выходном валу, Н · м	Данные электродвигателя		
			Тип	Мощность, кВт	Синхронная частота вращения, об/мин
МЦ-63	224—450	53—66	4А100	1,5—3	750—1500
МЦ-80	224—450	101—124	4А112	3—5,5	750—1500
МЦ-100	224—450	210—264	4А132	5,5—11	750—1500
МЦ-125	224—450	390—491	4А160	11—18,5	1000—1500

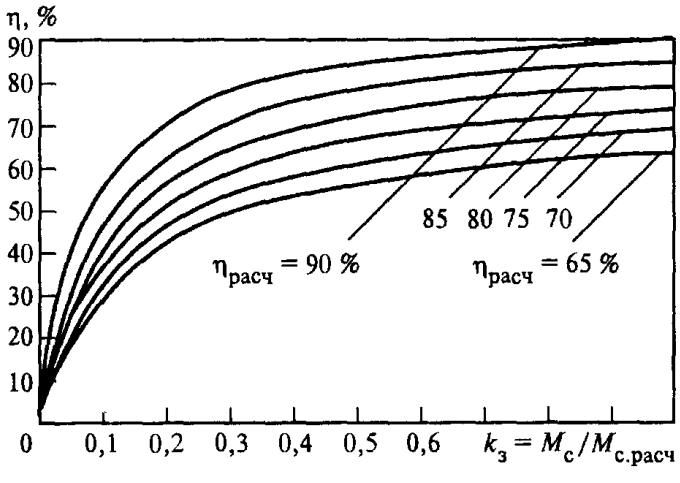


Рис. 56.8. Зависимость КПД зубчатых передач от коэффициента загрузки по моменту

Кривые рис. 56.9 позволяют определить КПД червячной передачи в зависимости от угла подъема нарезки α.

При расчетах момента сопротивления ряда исполнительных органов рабочих машин необходимо располагать коэффициентами трения скольжения и качения, значения которых приведены ниже:

Коэффициент трения скольжения

Подшипники скольжения	0,07—0,1
Шариковые и роликовые подшипники	0,005—0,01
Подшипники из древпластмасс	0,01—0,02
Бандажи по рельсам	0,15—0,2

Коэффициент трения качения, см

Необработанные колеса по рельсам	0,1
Обработанные колеса по рельсам	0,05

Более подробные сведения о механических передачах содержатся в [56.4, 56.5].

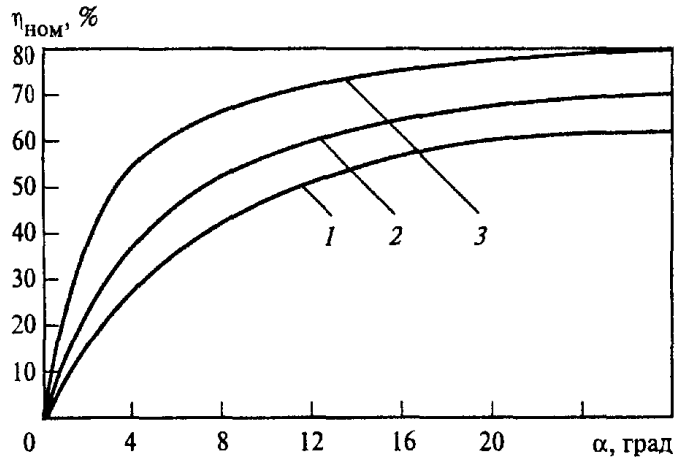


Рис. 56.9. Зависимость КПД червячной передачи от угла подъема нарезки α:

1 — червяк и колеса чугунные необработанные смазанные, *2* — фрезерованный стальной червяк по бронзе; *3* — тщательно выполненная конструкция в масляной ванне

56.3. ТИРИСТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электропривод постоянного тока с питанием двигателя постоянного тока от тиристорного преобразователя (ТП), несмотря на общую тенденцию перехода к регулируемому ЭП переменного тока, будет и в дальнейшем находить свое место на рынке ЭП, особенно там, где он имеет преимущество. Часто комплект из двигателя постоянного тока и ТП имеет преимущество в стоимости перед другими комплектами, имеющими аналогичные показатели регулирования.

Ниже приводятся основные технические данные ТП, представленных на российском рынке. Более подробную информацию о них можно получить в фирмах-изготовителях. Теоретические аспекты работы ТП изложены в [56.1].

Основными техническими данными ТП, необходимыми для их выбора, являются: номинальная мощность $P_{ном}$; номинальный ток $I_{ном}$; номинальное напряжение $U_{ном}$; схема выпрямления.

При выборе ТП представляет интерес его перегрузочная способность по току. ГОСТ 18142—80 определяет следующие классы перегрузки:

7 — перегрузка 75 % в течение 60 с;

8 — перегрузка 100 % в течение 15 с;

9 — перегрузка 125 % в течение 10 с.

Многие изготовители указывают и другие значения перегрузок, например с учетом снижения номинальных значений в установившемся режиме.

При выборе ТП следует также обращать внимание на особенности конструктивного решения и массогабаритные показатели, возможность работы в специфических условиях, например на высоте 1000 м и более или при температуре 45 °С и более.

При выборе ТП его показатели должны быть согласованы с номинальными данными электродвигателя.

Тиристорный преобразователь с завышенным выходным напряжением имеет более низкие энергетические показатели ($\cos\varphi$), а выбор ТП с недостаточным напряжением приводит к снижению производительности машины, ухудшению динамических показателей (недостаточно форсировок). При выборе ТП по напряжению следует учитывать необходимость обеспечения максимальной скорости при максимально допустимом токе, требуемые форсировки в динамике, а также предусматривать запас, учитывающий возможные снижения напряжения сети. При расчете необходимого выходного напряжения ТП следует также учитывать увеличение сопротивления якорной цепи двигателя, которое в общем случае равно:

$$R_{я\Sigma} = R_{я\,д} + R_{д.п} + R_{щ} + R_{с.р} + nR_{т} + n\,\frac{mX_{т}}{2\pi},$$

где $R_{я\,д}$ и $R_{д.п}$ — сопротивление якоря и дополнительных полюсов двигателя в нагретом состоянии; $R_{щ}$ — сопротивление щеток, принимаемое равным примерно $2/I_{ном}$; $R_{с.р}$ — сопротивление сглаживающего реактора; $R_{т}$ и $X_{т}$ — активное и индуктивное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное к цепи выпрямленного тока, определяемое по данным опыта короткого замыкания трансформатора:

$$R_{т} = \frac{\Delta P_{к}}{m_{т} I_{1\,ном}^{2} k_{т}^{2}},$$

$$X_{т} = \sqrt{Z_{т}^{2} - R_{т}^{2}},$$

$$Z_{т} = \frac{U_{к}(\%)\,U_{1\,ф\,ном}}{100 I_{ном} k_{т}^{2}},$$

$\Delta P_{к}$ — мощность, потребляемая трансформатором в режиме короткого замыкания; $I_{1\,ном}$ — номинальный ток первичной обмотки трансформатора; $m_{т}$ — число фаз трансформатора; $k_{т}$ — коэффициент трансформации; $U_{к}$ — напряжение короткого замыкания трансформатора, %, $U_{1\,ф.ном}$ — номинальное напряжение первичной обмотки трансформатора; n — число обмоток трансформатора, одновременно обтекаемых током (зависит от схемы выпрямления).

Выбор ТП с номинальным током, значительно превышающим номинальный ток двигателя, приводит к удорожанию установки, необоснованному увеличению массогабаритных показателей, а также к завышению токов короткого замыкания, что при аварии приводит к более тяжким последствиям. Выбор ТП с заниженным номинальным током приводит к периодическому выгоранию тиристоров, в лучшем случае к частому срабатыванию максимально-токовой защиты или защиты от превыше-

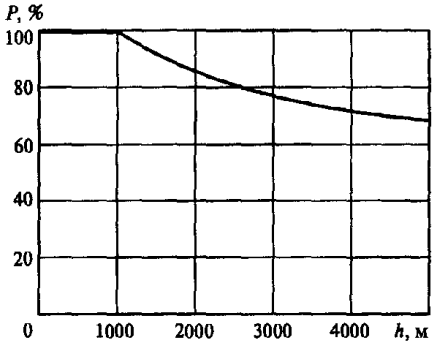


Рис. 56.10. Зависимость мощности ТП от высоты его установки

ния температуры, а также к снижению динамических показателей (быстродействия).

С ростом температуры окружающей среды у ТП, особенно у ТП с естественным охлаждением, необходимо снижать номинальную нагрузку. В тех случаях, когда завод-изготовитель не дает рекомендаций по снижению нагрузки, можно пользоваться приближенными рекомендациями: при температуре окружающей среды $T_{o.c}$ = 50 °С нагрузку снижают примерно на 6 %, при $T_{o.c}$ = 55 °С — на 11 % и при $T_{o.c}$ = 60 °С — на 18 %.

При установке ТП на высоте 1000 м и более над уровнем моря нагрузку также рекомендуется снижать. Примерный характер снижения нагрузки P, %, в зависимости от высоты установки ТП h показан на рис. 56.10.

ОАО «Уралэлектротяжмаш» выпускает комплектные ТП серии КТЭ. Обозначение ТП имеет вид:

$$\text{КТЭ-}\frac{X1^1}{X1^2}\text{/X2X3-X4X5X6-X7-X8-X9УХЛ4},$$

где X1 — номинальный ток, А:

$X1^1$ — группы «Вперед»,

$X1^2$ — группы «Назад»;

X2 — номинальное напряжение, В;

X3 — исполнение:

М — модернизированный (до 1000 А, 750 В),

Е — с усиленной изоляцией, с естественным охлаждением,

В — с усиленной изоляцией, со встроенным вентилятором;

X4 — исполнение КТЭ по числу питаемых двигателей:

0 — возбудитель,

1 — однодвигательный,

2 — двухдвигательный;

X5 — режим работы:

1 — нереверсивный,

2 — реверсивный;

X6 — связь с питающей сетью:

Р — реакторная,

Т — трансформаторная (Т2 — для 12-пульсной схемы),

Н — непосредственная;

X7 — обозначение примененной системы автоматического регулирования:

04 — однозонная система регулирования скорости,

05 — однозонная система регулирования положения,

08 — двухзонная система регулирования скорости;

X8 — встроенные устройства:

К — контактор линейный,

Д — устройство динамического торможения,

М — устройство питания электромагнита механического тормоза,

Т — устройство питания обмотки возбуждения тахогенератора;

X9 — количество КТЭ в одном шкафу;

УХЛ4—климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ15150—79.

Обозначения X4—X9 не влияют на параметры силовой части ТП, они требуются при заказе комплектного ЭП.

В табл. 56.6 указаны паспортные данные ТП серии КТЭ и тиристорных агрегатов серии ТВ4 (расшифровка параметров аналогична вышеприведенной для КТЭ).

ГНПО «ХЭМЗ» выпускает ТП серии ЭКТ. Обозначение ТП имеет вид:

ЭКТ-X1/X2-X3X4X5X6-УХЛ4,

где X1 — номинальный выпрямленный ток, А;

X2 — номинальное выпрямленное напряжение, В;

X3 — исполнение силовой части электропривода:

1 — однодвигательный,

2 — однодвигательный с линейным контактором,

3 — однодвигательный с динамическим торможением,

4 — однодвигательный с линейным контактором и динамическим торможением,

5 — двухдвигательный с линейным контактором,

6 — двухдвигательный с линейным контактором и динамическим торможением;

X4 — режим работы и связь с сетью:

1 — нереверсивный с реактором,

2 — нереверсивный с трансформатором,

3 — реверсивный с реактором,

4 — реверсивный с трансформатором,

5 — реверсивный с реверсом поля;

Таблица 56.6. **Технические данные преобразователей ОАО «Уралэлектротяжмаш»**

Тип преобразователя[*1]	Номинальный постоянный ток, А	Предельный постоянный ток, А	Постоянное напряжение, В	Масса[*2], кг
КТЭ-10/220 (440)	10	20	220, 440	430
КТЭ-25/220 (440)	25	50	220, 440	580
КТЭ-50/220 (440)	50	100	220, 440	580
КТЭ-100/220 (440)	100	200	220, 440	580
КТЭ-200/220 (440)	200	400	220, 440	780/730
КТЭ-320/220 (440)	320	640	220, 440	1800/1400
КТЭ-500/220 (440)	500	1000	220, 440	1800/1450
КТЭ-630/220 (440)	630	1260	220, 440	1800
КТЭ-800/220 (440; 600; 750; 930)	800	1600	220, 440, 600, 750, 930	1400
КТЭ-1000/220 (440; 600;750; 930)	1000	2000	220, 440, 600, 750, 930	1400
КТЭ-1600/220 (440; 600; 750; 930)	1600	3200	220, 440, 600, 750, 930	1400
КТЭ-2000/440 (600; 750; 930)	2000	4000	440, 600, 750, 930	1420
КТЭ-2500/600 (750; 930)	2500	5000	600, 750, 930	1420
КТЭ-3150/600 (750; 930)	3150	6300	600, 750, 930	1420
КТЭ-5000/600 (750; 930)	5000	10 000	600, 750, 930	2400
КТЭ-5000/2500/600 (750; 930)	5000[*3]/2500[*4]	10 000[*3]/5000[*4]	600, 750, 930	2400
КТЭ-6300/600 (750; 930)	6300	12 600	600, 750, 930	2400
КТЭ-6300/3150/600 (750; 930)	6300[*3]/3150[*4]	12 600[*3]/6300[*4]	600, 750, 930	2400
КТЭ-10000/750 (930)	10 000	20 000	750, 930	4500
КТЭ-10000/5000/750 (930)	10 000[*3]/5000[*4]	20 000[*3]/10 000[*4]	750, 930	4500
ТВР4-10000/1050 (825; 660)	10 000	22 500	1050, 825, 660	3790
ТВ4-10000/1050 (825; 660)	10 000	22 500	1050, 825, 660	3500
ТВР4-6300/1050 (825; 660)	6300	14 175	1050, 825, 660	3500
ТВ4-6300/1050 (825; 660)	6300	14 175	1050, 825, 660	2860
ТВР4-5000/1050 (825; 660)	5000	11 250	1050, 825, 660	3500
ТВ4-5000/1050 (825; 660)	5000	11 250	1050, 825, 660	2860
ТВР4-3150/1050 (825; 660)	3150	7087	1050, 825, 660	1860
ТВ4-3150/1050 (825; 660)	3150	7087	1050, 825, 660	1670
ТВР4-2500/1050 (825; 660)	2500	5625	1050, 825, 660	1860
ТВ4-2500/1050 (825; 660)	2500	5625	1050, 825, 660	1670

[*1] В скобках указаны возможные значения номинального напряжения, В.

[*2] Масса ТП приведена с учетом массы шкафов без трансформаторно-реакторного оборудования.

[*3] Ток в комплекте «Вперед».

[*4] Ток в комплекте «Назад».

X5 — *исполнение* по способу задания скорости:

1 — ступенчатое,

2 — плавное;

X6 — способ охлаждения:

0 - естественное,

1 — принудительное индивидуальное,

2 — принудительное групповое.

Преобразователи выпускаются на токи от 25 до 4000 А и напряжения от 220 до 930 В. Допустимые нагрузки в соответствии с ГОСТ 18142—80.

Саранское ОАО «Электровыпрямитель» выпускает ТП серий ТЕ, ТЕР, ТП, ТПР, предназначенные для питания якорных цепей электродвигателей постоянного тока. Основные технические данные этих ТП приведены в табл. 56.7.

Таблица 56.7 **Технические данные преобразователей ОАО «Электровыпрямитель»**

Тип агрегата	Напряжение питания, В	Номинальное выпрямленное напряжение, В	Номинальный выпрямленный ток, А	Максимальный выпрямленный ток, А	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
ТЕ4-63/230Н-1-2УХЛ4 (нереверсивный)	220	230	63	141	500 × 400 × 1200	80
ТЕ4-63/460Н-2-2УХЛ4 (нереверсивный)	380	460	63	141	500 × 400 × 1200	80
ТЕ4-100/230Н-1-2УХЛ4 (нереверсивный)	220	230	100	225	500 × 400 × 1200	80
ТЕ4-100/460Н-2-2УХЛ4 (нереверсивный)	380	460	100	225	500 × 400 × 1200	80
ТП4-160/230Н-1-2УХЛ4 (нереверсивный)	220	230	160	360	500 × 400 × 1200	95
ТП4-160/460Н-2-2УХЛ4 (нереверсивный)	380	460	160	360	500 × 400 × 1200	95
ТП4-200/230Н-1-2УХЛ4 (нереверсивный)	220	230	200	450	500 × 400 × 1200	95
ТП4-200/460Н-2-2УХЛ4 (нереверсивный)	380	460	200	450	500 × 400 × 1200	95
ТП4-320/230Н-1-2УХЛ4 (нереверсивный)	220	230	320	720	600 × 600 × 1800	235
ТП4-320/460Н-2-2УХЛ4 (нереверсивный)	380	460	320	720	600 × 600 × 1800	235
ТП4-500/230Н-1-2УХЛ4 (нереверсивный)	220	230	500	1125	600 × 600 × 1800	245
ТП4-500/460Н-2-2УХЛ4 (нереверсивный)	380	460	500	1125	600 × 600 × 1800	245
ТЕР4-63/230Н-1-2УХЛ (реверсивный)	220	230	63	141	500 × 400 × 1400	90
ТЕР4-63/460Н-2-2УХЛ (реверсивный)	380	460	63	141	500 × 400 × 1400	90
ТЕР4-100/230Н-1-2УХЛ (реверсивный)	220	230	100	225	500 × 400 × 1400	90
ТЕР4-100/460Н-2-2УХЛ (реверсивный)	380	460	100	225	500 × 400 × 1400	90
ТПР4-160/230Н-1-2УХЛ (реверсивный)	220	230	160	360	500 × 400 × 1400	105
ТПР4-160/460Н-2-2УХЛ (реверсивный)	380	460	160	360	500 × 400 × 1400	105
ТПР4-200/230Н-1-2УХЛ (реверсивный)	220	230	200	450	500 × 400 × 1400	105
ТПР4-200/460Н-2-2УХЛ (реверсивный)	380	460	200	450	500 × 400 × 1400	105

Фирма «Siemens» выпускает серию ТП постоянного тока типа SIMOREG DC-Master 6RA70.

Обозначение ТП имеет вид:

6RA70X1X2-X3X4X5X6X7-X8,

где X1X2 определяет номинальный ток и систему охлаждения в соответствии с табл. 56.8.

Значениям X1X2 от 0 до 45 соответствует естественное охлаждение, а значениям от 50 до 95 — принудительное.

X3 определяет тип силового элемента и страну-производителя этого элемента.

X4 задает выходное напряжение ТП в соответствии с табл. 56.9.

Таблица 56.8 **Данные для определения номинального тока и системы охлаждения преобразователя SIMOREG DC-Master 6RA70**

X1X2	00	01	02	03	04	05	06	07
Ток, А		3,6 4,1	4,1 4,65	4,65 5,25	5,25– 6,0	6,0– 6,8	6,8—7,75	7,75– 8,8

X1X2	08	10	11	12	13	14	15
Ток, А	8,8—10	10—11,5	11,5 –13	13– 14,5	14,5— 16,5	16,5—19	19—21,5

X1X2	16	17	18	20	21	22	23
Ток, А	21,5 24,5	24,5 28	28 –31,5	31,5 – 36	36—41	41—46,5	46,5—52,5

X1X2	24	25	26	27	28	30	31
Ток, А	52,5—60	60—68	68—77,5	77,5—88	88—100	100—115	115—130

X1X2	32	33	34	35	36	37	38
Ток, А	130—145	145— 165	165—190	190—215	215—245	245— 280	280—315

X1X2	60	61	62	63	64	65	66	67
Ток, А	31,5—36	36—41	41—46,5	46,5—52,5	52,5—60	60—68	68—77,5	77,5—88

X1X2	68	70	71	72	73	74	75
Ток, А	88—100	100—115	115 –130	130—145	145—165	165—190	190—215

X1X2	76	77	78	80	81	82	83
Ток, А	215—245	245—280	280— 315	315 –360	360—410	410 465	465 525

X1X2	84	85	86	87	88	90	91
Ток, А	525—600	600—680	680 –775	775—880	880—1000	1000—1150	1150—1300

X1X2	92	93	94	95
Ток, А	1300—1450	1450—1650	1650—1900	1900 2150

Таблица 56.9

X4	B	D	F	G	H	K	L
$U_{ном}$, В	230	400	440	500—575	660	690—750	830

X5 определяет схему выпрямления в соответствии с табл. 56.10

X6 определяет способ регулирования

1 — аналоговое, нереверсивное,

2 — цифровое, нереверсивное,

6 — цифровое, реверсивное,

7 — аналоговое, нереверсивное

X7 определяет возможность регулирования потока машины

1 — без регулирования поля,

2 — с регулированием поля

X8 определяет наличие дополнительных опций

0 — без опции,

1 — с опциями

Технические данные ТП фирмы «Siemens» приведены в табл. 56.11

Для каждого конкретного ТП фирма «Siemens» приводит зависимости допустимой перегрузки по току от времени

Фирма «ABB Industry Oy» предлагает ТП серии DCS. Обозначение ТП имеет вид

DCS50xB0000-y1,

где DCS50 — обозначение серии,

x — количество мостов в преобразователе.

1 — нереверсивный преобразователь,

2 — реверсивный,

0000 — значение выпрямленного тока, А,

y — класс напряжения

4 — U = 400В, 5 — U = 500 В, 6 — U = = 600 В, 7 — U = 690 В, 8 — U = 790 В, 9 — U = 1000 В

Таблица 56.10

X5	D	K	S	V
Схема	Нереверсивный однофазный мост	Реверсивный однофазный мост	Нереверсивный трехфазный мост	Реверсивный трехфазный мост

Таблица 56.11. **Технические данные преобразователей фирмы «Siemens»**

Тип преобразователя	Номинальное напряжение питания, В	Номинальный входной ток, А	Номинальное выпрямленное напряжение, В	Номинальный выпрямленный ток, А	Номинальная мощность, кВт	Масса, кг
6RA7018-6DS22	400	25	485	30	14,5	11
6RA7025-6DS22	400	50	485	60	29	14
6RA7028-6DS22	400	75	485	90	44	16
6RA7031-6DS22	400	104	485	125	61	16
6RA7025-6GS22	575	50	690	60	41	14
6RA7031-6GS22	575	104	690	125	86	16
6RA7075-6DS22	400	175	485	210	102	16
6RA7078-6DS22	400	233	485	280	136	17
6RA7081-6DS22	400	332	485	400	194	30
6RA7085-6DS22	400	498	485	600	291	30
6RA7087-6DS22	400	705	485	850	412	40
6RA7091-6DS22	400	995	485	1200	582	80
6RA7075-6GS22	575	175	690	210	145	16
6RA7081-6GS22	575	332	690	400	276	30
6RA7085-6GS22	575	498	690	600	414	30
6RA7087-6GS22	575	663	690	800	552	40
6RA7090-6GS22	575	829	690	1000	690	80
6RA7086-6KS22	690	597	830	720	598	40
6RA7088-6KS22	690	788	830	950	789	80
6RA7088-6LS22	830	746	1000	900	900	80
6RA7093-4DS22	400	1326	485	1600	776	125
6RA7095-4DS22	400	1658	485	2000	970	125
6RA7093-4GS22	575	1326	690	1600	1104	125
6RA7095-4GS22	575	1658	690	2000	1380	125
6RA7093-4KS22	690	1244	830	1500	1245	125
6RA7095-4KS22	690	1658	830	2000	1660	125
6RA7093-4LS22	830	1244	1000	1500	1500	125
6RA7095-4LS22	830	1575	1000	1900	1900	125
6RA7013-6DV62	400	13	420	15	6,3	11
6RA7018-6DV62	400	25	420	30	12,6	11
6RA7025-6DV62	400	50	420	60	25	14
6RA7028-6DV62	400	75	420	90	38	14
6RA7031-6DV62	400	104	420	125	52,5	16
6RA7025-6GV62	575	50	600	60	36	14
6RA7031-6GV62	575	104	600	125	75	16
6RA7075-6DV62	400	175	420	210	88	16
6RA7078-6DV62	400	233	420	280	118	17
6RA7081-6DV62	400	332	420	400	168	30
6RA7085-6DV62	400	498	420	600	252	30
6RA7087-6DV62	400	705	420	850	357	45
6RA7091-6DV62	400	995	420	1200	504	85
6RA7075-6GV62	575	175	600	210	126	16
6RA7081-6GV62	575	332	600	400	240	30
6RA7085-6GV62	575	498	600	600	360	30
6RA7087-6GV62	575	705	600	850	510	45
6RA7090-6GV62	575	912	600	1100	660	85

Окончание табл. 56.11

Тип преобразователя	Номинальное напряжение питания, В	Номинальный входной ток, А	Номинальное выпрямленное напряжение, В	Номинальный выпрямленный ток, А	Номинальная мощность, кВт	Масса, кг
6RA7086-6KV62	690	630	725	760	551	45
6RA7090-6KV62	690	829	725	1000	725	85
6RA7088-6LV62	830	788	875	950	831	85
6RA7093-4DV62	400	1326	420	1600	672	145
6RA7095-4DV62	400	1658	420	2000	840	145
6RA7093-4GV62	575	1326	600	1600	960	145
6RA7095-4GV62	575	1658	600	2000	1200	145
6RA7093-4KV62	690	1244	725	1500	1088	145
6RA7095-4KV62	690	1658	725	2000	1450	145
6RA7093-4LV62	830	1244	875	1500	1313	145
6RA7095-4LV62	830	1575	875	1900	1663	145

Основные технические данные этих преобразователей приведены в табл. 56.12.

Указанная в табл. 56.12 перегрузка означает, что ТП может работать с нагрузкой I_{max1} в течение 1 мин при условии, что в установившемся режиме в течение 15 мин нагрузку ТП необходимо снижать до значения $I_{уст1}$ (рис. 56.11).

Наиболее многочисленную группу специализированных ТП составляют ТП, предназначенные для ЭП станков и роботов. К ним относятся ТП серии ЭПУ, ЭТУ3601, ЭТ3—ЭТ6, «Кемрон» (производство Болгарии), «Мезоматик» (производство Чехии) и др.

Обозначение ТП серии ЭПУ имеет вид

ЭПУ1М-Х1-Х2Х3Х4Х5УХЛ4,

где Э — электропривод, П — постоянного тока, У — унифицированный, 1 — номер разработки, М — модифицированный,

Х1 — исполнение по реверсу

1 — нереверсивный,

2 — реверсивный,

Х2 — двузначное число, обозначающее ток, А

34 — 25 А, 37 — 50 А, 39 — 80 А, 40 — 100 А, 43 — 200 А, 46 — 400 А, 48 — 630 А,

Х3 — выпрямленное напряжение

1 — 115 В, 2 — 230 В, 4 — 460 В,

Х4 — напряжение питающей сети

4 — 220 В, 7 — 380 В, 8 — 400 В, 9 — 415 В,

Х5 — функциональная характеристика

П — для ЭП подач станков и роботов, перегрузка по току $\frac{I_{max}}{I_{ном}} \le 6$, диапазон регулирования $D \le 10\,000$: 1,

Д — для ЭП главного движения станков, имеет систему двухзонного регулирования скорости при перегрузке по току $\frac{I_{max}}{I_{ном}} \le 2$, диапазон регулирования $D \le 1000$: 1,

Е — для ЭП главного движения станков, однозонное регулирование, перегрузка по току $\frac{I_{max}}{I_{ном}} \le 2$, диапазон регулирования $D \le 20$: 1, с обратной связью по ЭДС,

М — для ЭП главного движения станков, однозонное регулирование, перегрузка по току $\frac{I_{max}}{I_{ном}} \le 2$, диапазон регулирования $D \le 1000$: 1, с обратной связью по скорости.

Преобразователи питаются от сети с напряжением 220, 380, 400, 415 В и частотой 50 Гц, при этом силовая часть подключается к сети через силовой трансформатор или сетевой (токоограничивающий или коммутационный) реактор.

Преобразователи на токи до 100 А выполнены на оптотиристорных и тиристорных модулях, свыше 100 А — на таблеточных тиристорах.

Габаритные размеры и масса блоков управления, входящих в состав серии ЭПУ1М приведены ниже:

Ток блока, А	Исполнение	Габаритные размеры (ширина × высота × × глубина), мм	Масса, кг
25	П	163 × 290 × 245	7
25	Д, Е, М	163 × 350 × 245	10
50	П	242 × 268 × 270	12
50	Д, Е, М	242 × 268 × 270	12,5
80	—	242 × 480 × 340	33
100	П	242 × 327 × 270	14
100	Д, Е, М	242 × 327 × 270	14,5
200	П, Д, Е, М	242 × 500 × 340	35
400	Д, Е, М	400 × 560 × 360	50
630	Д, Е, М	400 × 1000 × 370	80

Таблица 56.12 **Технические данные преобразователей фирмы «ABB Industry Oy»**

Тип преобразователя	Ток сети, А	Постоянный ток, А	Мощность, кВт	Перегрузка, А		Габаритные размеры, мм	Масса, кг
				$I_{уст1}$	I_{max1}		
DCS501B0025-41	20	25	12	24	36	420 × 273 × 195	7,1
DCS501B0025-51	20	25	15	24	36	420 × 273 × 195	7,1
DCS501B0050-41	41	50	23	44	66	420 × 273 × 195	7,2
DCS501B0050-51	41	50	29	44	66	420 × 273 × 195	7,2
DCS501B0075-41	61	75	35	60	90	420 × 273 × 195	7,6
DCS501B0075-51	61	75	44	60	90	420 × 273 × 195	7,6
DCS501B0100-41	82	100	47	71	107	469 × 273 × 228	11,5
DCS501B0100-51	82	100	58	71	107	469 × 273 × 228	11,5
DCS501B0110-61	82	100	70	—	—	469 × 273 × 228	11,5
DCS501B0140-41	102	125	58	94	141	469 × 273 × 228	11,5
DCS501B0200-41	147	180	84	133	200	505 × 273 × 361	22,3
DCS501B0200-51	147	180	104	133	200	505 × 273 × 361	22,3
DCS501B0250-41	184	225	105	158	237	505 × 273 × 361	22,3
DCS501B0250-51	184	225	131	158	237	505 × 273 × 361	22,3
DCS501B0350-41	257	315	146	240	360	505 × 273 × 361	22,8
DCS501B0350-51	257	315	183	240	360	505 × 273 × 361	22,8
DCS501B0450-41	330	405	188	317	476	505 × 273 × 361	28,9
DCS501B0450-51	330	405	235	317	476	505 × 273 × 361	28,9
DCS501B0700-41	571	700	326	556	834	652 × 273 × 384	57
DCS501B0700-51	571	700	406	556	834	652 × 273 × 384	57
DCS501B0900-41	734	900	419	684	1026	1493 × 548 × 447	150
DCS501B0900-51	734	900	522	684	1026	1493 × 548 × 447	150
DCS501B01200-41	979	1200	558	888	1332	1493 × 548 × 447	150
DCS501B01200-51	979	1200	696	888	1332	1493 × 548 × 447	150
DCS501B01500-41	1224	1500	698	1200	1800	1493 × 548 × 447	150
DCS501B01500-51	1224	1500	870	1200	1800	1493 × 548 × 447	150
DCS501B02000-41	1632	2000	930	1479	2219	1493 × 548 × 447	150
DCS501B02000-51	1632	2000	1160	1479	2219	1493 × 548 × 447	150
DCS502B0025-41	20	25	10	24	36	420 × 273 × 195	7,1
DCS502B0025-51	20	25	13	24	36	420 × 273 × 195	7,1
DCS502B0050-41	41	50	21	44	66	420 × 273 × 195	7,2
DCS502B0050-51	41	50	26	44	66	420 × 273 × 195	7,2
DCS502B0075-41	61	75	31	60	90	420 × 273 × 195	7,6
DCS502B0075-51	61	75	39	60	90	420 × 273 × 195	7,6
DCS502B0100-41	82	100	42	71	107	469 × 273 × 228	11,5
DCS502B0100-51	82	100	52	71	107	469 × 273 × 228	11,5
DCS502B0200-41	163	200	83	149	224	505 × 273 × 361	22,3
DCS502B0200-51	163	200	104	149	224	505 × 273 × 361	22,3
DCS502B0250-41	204	250	104	177	266	505 × 273 × 361	22,3
DCS502B0250-51	204	250	130	177	266	505 × 273 × 361	22,3
DCS502B0350-41	286	350	145	267	401	505 × 273 × 361	22,8
DCS502B0350-51	286	350	182	267	401	505 × 273 × 361	22,8
DCS502B0450-41	367	450	187	352	528	505 × 273 × 361	28,9
DCS502B0450-51	367	450	234	352	528	505 × 273 × 361	28,9
DCS502B0700-41	571	700	291	556	834	652 × 273 × 384	57
DCS502B0700-51	571	700	364	556	834	652 × 273 × 384	57
DCS502B0900-41	734	900	374	684	1026	1493 × 548 × 447	150
DCS502B0900-51	734	900	468	684	1026	1493 × 548 × 447	150
DCS502B1200-41	979	1200	498	888	1332	1493 × 548 × 447	150
DCS502B1200-51	979	1200	624	888	1332	1493 × 548 × 447	150
DCS502B1500-41	1224	1500	623	1200	1800	1493 × 548 × 447	150
DCS502B1500-51	1224	1500	780	1200	1800	1493 × 548 × 447	150
DCS502B2000-41	1632	2000	830	1479	2219	1493 × 548 × 447	150
DCS502B2000-51	1632	2000	1040	1479	2219	1493 × 548 × 447	150

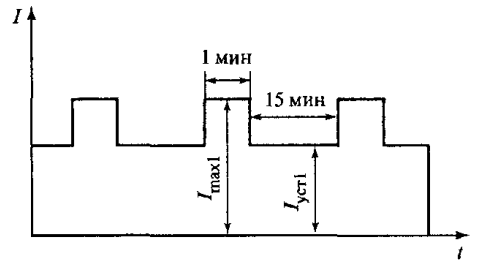


Рис 56 11 Определение перегрузки по току

В настоящее время разрабатываются ТП типа ЭПУ3, которые должны будут заменить ЭПУ1, преобразователи рассчитаны на те же токи и напряжения, но за счет применения современной элементной базы имеют меньшие габаритные размеры и массу

АООТ «Рудоавтоматика» (г Железногорск) выпускает ТП серии ПТЭМ Обозначение ТП серии ПТЭМ имеет вид

ПТЭМ-2Р-Х1Х2,

где ПТЭМ-2Р означает преобразователь тиристорный экскаваторный моноблочный, с трехфазной нулевой реверсивной схемой и раздельным управлением анодной и катодной группами тиристоров,

Х1 — габаритные размеры ТП (табл 56 13)

Х2 — модификация основного типоисполнения (определяется силовым элементом)

Основные технические данные этих преобразователей приведены в табл 56 13

Для обеспечения непрерывности тока двигателя в широком диапазоне изменения нагрузки в якорную цепь включают сглаживающий реактор В инженерной практике требуемую индуктивность якорной цепи рассчитывают по формуле

$$L_{\Sigma} \geq \frac{\sqrt{2}\ U_{d1}}{nm\omega I_{min}},$$

где U_{d1} — действующее значение первой гармоники выпрямленного напряжения, для упрощения расчетов можно принимать для 3-пульсных схем выпрямления $U_{d1} = 0{,}5E_{d0}$, для 6 пульсных — $U_{d1} = 0{,}25E_{d0}$, для 12-пульсных схем выпрямления $U_{d1} = 0{,}125E_{d0}$, E_{d0} — максимальное выпрямленное напряжение, I_{min} — минимальный ток нагрузки, nm — число пульсов выпрямленного напряжения ω — угловая частота сети

Необходимая индуктивность сглаживающего реактора

$$L_{ср} = L_{\Sigma} - L_{т} - L_{д},$$

где $L_{т}$ — индуктивность трансформатора приведенная к цепи постоянного тока,

$$L_{т} = \frac{U_{к} U_{1ном}}{I_{1ном}\omega k_{т}^{2}},$$

$U_{к}$ — напряжение короткого замыкания трансформатора, $U_{1ном}$ — номинальное фазное напряжение первичной обмотки трансформатора, $I_{1ном}$ — номинальный ток фазы трансформатора $k_{т}$ — коэффициент трансформации, $L_{д}$ — индуктивность якоря и дополнительных полюсов двигателя

$$L_{д} = \frac{\gamma U_{ном}}{p_{п}\omega_{ном} I_{ном}},$$

$\gamma = 0{,}6$ для некомпенсированных двигателей, $\gamma = 0{,}25$ для компенсированных двигателей, $U_{ном}$ — номинальное напряжение двигателя, $I_{ном}$ — номинальный ток двигателя, $\omega_{ном}$ — номинальная скорость двигателя, $p_{п}$ — число пар полюсов

По номинальному току двигателя и рассчитанной индуктивности $L_{ср}$ выбирают сглаживающий реактор Каталожные данные реакторов приведены в [56 1]

Таблица 56 13 **Технические данные преобразователей ПТЭМ-2Р**

Тип преобразователя	Напряжение сети U_1 В	Выпрямленное напряжение U_d, В	Мощность кВт	Габаритные размеры мм	Масса кг
ПТЭМ-2Р-11	380	220	8	80 × 230 × 350	7
ПТЭМ 2Р 21	380	220	16	110 × 230 × 350	10
ПТЭМ-2Р-31	380	220	24	240 × 230 × 320	17
ПТЭМ-2Р-41	380	220	48	370 × 230 × 320	24
ПТЭМ 2Р 22	380	220	32	110 × 230 × 350	10
ПТЭМ 2Р-32	380	220	48	240 × 230 × 320	17
ПТЭМ 2Р-42	380	220	96	370 × 230 × 320	24
ПТЭМ 2Р 43	660	380	160	370 × 230 × 320	24
ПТЭМ 2Р-53	660	380	250	470 × 230 × 320	26

56.4. ТИРИСТОРНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ. СИСТЕМА ТИРИСТОРНЫЙ РЕГУЛЯТОР НАПРЯЖЕНИЯ — АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Тиристорные регуляторы напряжения (ТРН) применяются в массовом асинхронном ЭП. Такие системы используют лишь одну управляемую координату асинхронного двигателя (АД) — напряжение — при постоянной частоте питания и, следовательно, постоянной скорости идеального холостого хода $\omega_0 = 2\pi f_1 / p$. Это положение определяет повышенные потери в АД на регулировочных характеристиках при любых сочетаниях текущих значений скорости ω и момента M по сравнению с частотно-управляемым ЭП, так как тепловые потери и нагрев АД пропорциональны скольжению $s = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$.

Системы ТРН—АД широко используются в массовом асинхронном электроприводе для управления специальными пускотормозными режимами, кратковременного снижения скорости, энергосбережения при заметных недогрузках привода, когда статический момент $M_c < 0{,}4M_{ном}$.

В разомкнутых и замкнутых структурах система ТРН—АД эффективна для реализации специальных режимов: квазичастотного регулирования скорости, позиционирования привода, импульсного форсирования пускового момента АД, реверсирования скорости, реализации различных видов торможения и выполнения диагностических и сервисных функций [56.6].

Силовые схемы нереверсивных ТРН, отличающихся количеством и способом соединения тиристоров (или симисторов), приведены на рис. 56.12 [56.7—56.9].

Для обеспечения реверса АД применяют дополнительный комплект полупроводниковых приборов, меняющий чередование двух фаз АД, или реверсирующий контактор. Для получения режима динамического торможения в зоне высоких скоростей включают тиристоры, шунтирующие обмотки АД (штриховая линия на рис. 56.12).

Улучшенными технико-экономическими показателями обладают ТРН с гибридной структурой силовой части. Такая система содержит традиционный ТРН, который конструктивно объединен с низковольтным силовым малогабаритным контактором (рис. 56.13). Такое решение обеспечивает эффективное использование как ТРН, так и контактора; в продолжительных режимах при $U_{ср} = U_{ср.ном}$ тиристоры шунтируются контактором, что существенно уменьшает потери в устройстве и позволяет снизить его габаритные размеры.

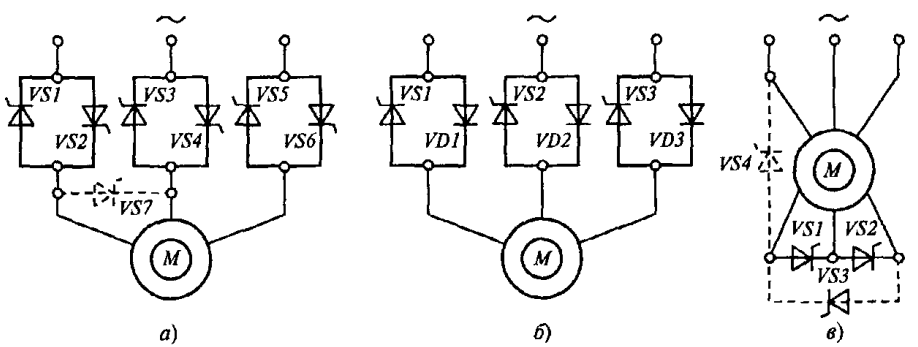


Рис. 56.12. Основные схемы симметричных ТРН:
а — ТРН-6Т; *б* — ТРН-3Т3Д; *в* — ТРН-3Т

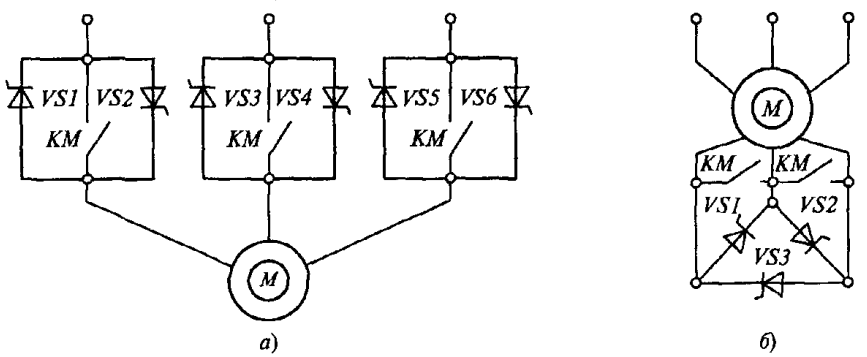


Рис. 56.13. Силовые схемы гибридных ТРН

ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ ТРН—АД

Вид механических характеристик ЭП зависит от приложенного к статорным обмоткам АД переменного напряжения (рис. 56.14).

Напряжение в системе ТРН—АД зависит от значений угла включения тиристора α, отсчитываемого от начала полуволны фазного напряжения, и угла сдвига фаз напряжения и тока в обмотке статора АД φ (при условии $\alpha > \varphi$). Фазные токи и напряжения имеют несинусоидальный прерывистый характер [56.7, 56.8]. На рис. 56.15, *а* и *б* показаны диаграммы напряжений и токов в нагрузке силовой части трехфазного регулятора ТРН-6Т (см. рис. 56.12, *а*) при активно-индуктивном характере нагрузки. Режиму одноразовой коммутации тока за полупериод при чередовании числа проводящих фаз 3—2—3 соответствует рис. 56.15, *а*, а двухразовой коммутации тока за полупериод при чередовании числа фаз 2—0—2 — рис. 56.15, *б*.

Представление электрических цепей АД пассивной активно-индуктивной нагрузкой не учитывает влияния ЭДС взаимоиндукции и ЭДС вращения на угол φ. Не учитывается также непостоянство активных и индуктивных сопротивлений АД при изменении скольжения, нагрузки на валу АД, поэтому такое описание является приближенным. Действительно, при управлении ТРН с синхронизацией по напряжению, когда угол включения тиристоров α отсчитывается от начала полуволны фазного напряжения, возникает внутренняя положительная обратная связь. Она обусловлена зависимостью напряжения на выходе ТРН от разности углов $\alpha - \varphi$. Наличие внутренней положительной обратной связи приводит к автоколебаниям момента и скорости на валу АД как в замкнутых, так и в разомкнутых системах ТРН—АД.

Расчетные зависимости первой гармонической составляющей напряжения на выходе ТРН от фазового угла нагрузки φ при фиксированных углах α приведены на рис. 56.16, *а* [56.7, 56.8].

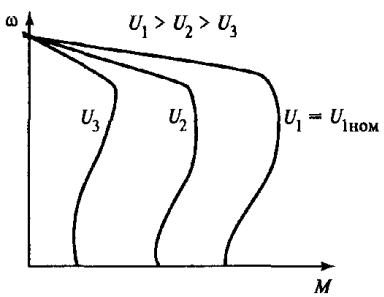


Рис. 56.14. Механические характеристики в системе ТРН-АД

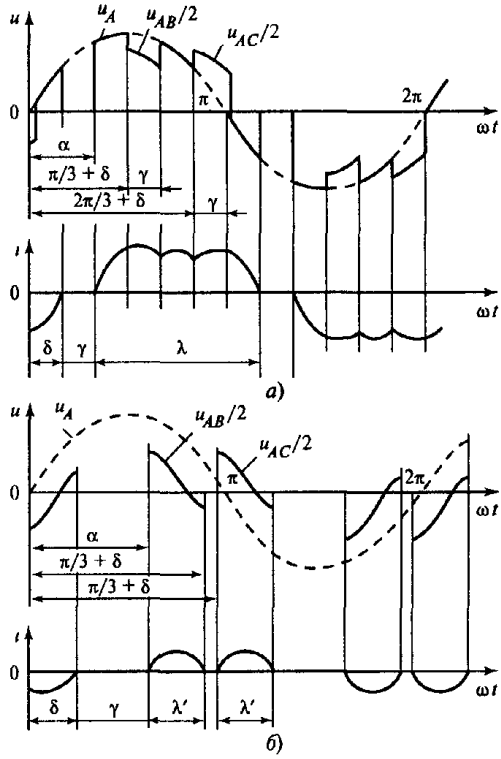


Рис. 56.15. Диаграммы напряжений и токов системы ТРН-6Т (*RL*-нагрузка).

α — угол включения тиристора δ — угол выключения тиристора γ — угол бестоковой паузы λ — угол проводимости тиристора, $\varphi = \omega L_{ном}/R_{ном}$ — угол эквивалентный фазовому сдвигу первых гармоник тока и напряжений *а* — в режиме 3—2—3 *б* — в режиме 2—0—2

При управлении ТРН с синхронизацией по току отсчет момента включения тиристоров γ производится от момента достижения нулевого значения тока в предыдущем периоде. Указанная выше внутренняя обратная связь в зоне малых скольжений носит отрицательный характер, колебания момента и скорости в разомкнутой системе отсутствуют. Зависимости первой гармонической составляющей напряжения на выходе ТРН от угла φ при фиксированных углах бестоковой нагрузки γ показаны на рис. 56.16, *б*.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРН—АД

Основные энергетические показатели системы ТРН—АД коэффициент мощности $\cos\varphi$, КПД, полные потери — зависят от режима работы ЭП и при их определении необходимо учитывать несинусоидальность напряжения и тока. Первая гармоника тока определяет момент двигателя, а нагрев

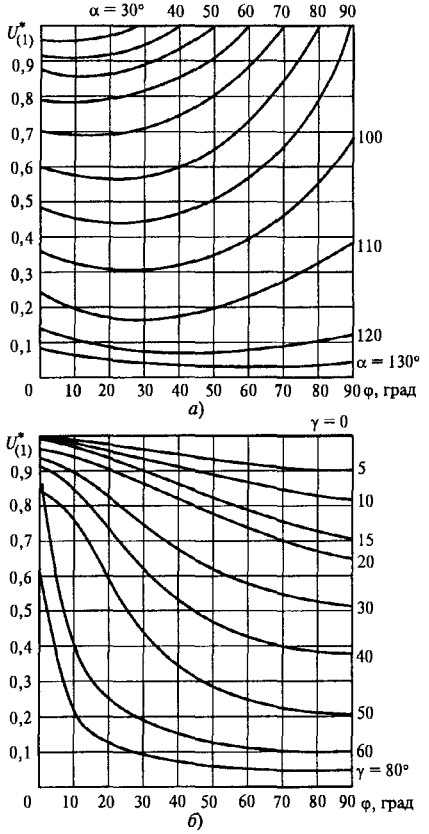


Рис. 56.16. Расчетные зависимости первой гармоники напряжения ТРН от фазового угла нагрузки:
а — при фиксированных α, *б* — при фиксированных γ

двигателя зависит от действующего значения несинусоидального тока, среднее значение тока определяет нагрузку силовых полупроводниковых приборов ТРН Параметры силовых полупроводниковых приборов и гармонический состав напряжения, прикладываемого к двигателю, зависят от схемы силового канала ТРН В табл 56 14 приведены данные для выбора силовых элементов схем, представленных на рис. 56 12, а также характеристики гармонического состава Энергетические показатели для различных схем отличаются несущественно Значения коэффициента перегрузки $K_{пр}$, КПД и коэффициента мощности лежат соответственно в пределах $K_{пр}$ = 1,02—1,08, КПД — 97—98 %, cos φ = 0,8—0,92 Коэффициент перегрузки, предТаблица 56 14 **Данные для выбора полупроводниковых приборов**

Схема ТРН	Среднее значение тока через прибор	Максимальное обратное напряжение на приборе	Гармонический состав токов и напряжений
6Т	$0{,}45I_{действ}$	$\sqrt{2}\,U_{ср}$	Все нечетные гармоники кроме кратных 3
3Т3Д	$0{,}45I_{действ}$	$\sqrt{2}\,U_{ср}$	Все гармоники, кроме кратных 3
3Т	$0{,}675I_{действ}$	$\sqrt{2}\,U_{л}$	Все гармоники, кроме кратных 3

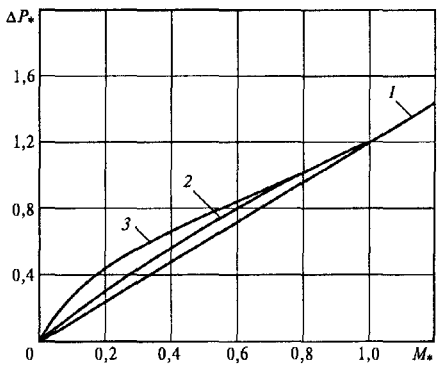


Рис. 56.17. График зависимости электрических потерь в двигателе от момента нагрузки в системе ТРН—АД:
1 — при питании АД от источника синусоидального напряжения, *2* — от ТРН 6Т, *3* — от ТРН-3Т3Д и 3Т

ставляющий собой отношение действующего значения полного несинусоидального тока к действующему значению его первой гармонической составляющей, учитывает дополнительные потери от высших гармоник тока, обусловливающих дополнительный нагрев АД [56 7, 56 8]

На рис 56 17 для примера приведены расчетные графики зависимости относительных электрических потерь от момента нагрузки АД (MTF111 6) при разных силовых схемах ТРН [56 7]

Пятая гармоника оказывает основное влияние на увеличение потерь в схеме ТРН-6Т, четные гармоники (вторая и четвертая) — в схемах ТРН-3Т3Д и 3Т Методика выбора АД по условиям нагрева при питании от ТРН и произвольной случайной нагрузке изложена в [56 10]

ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРА И РЕЖИМЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТРН—АД

Выбор рациональной структуры ЭП зависит от технических требований к регулированию момента и скорости, условий эксплуатации, экономических и массогабаритных показателей, вариантов конструктивного исполнения, стоимости эксплуатации. Поэтому для продолжительных повторно-кратковременных и кратковременных режимов работы рациональные структуры систем ЭП могут отличаться сложностью, составом аппаратной и элементной базы [56.7—56.9]. Наиболее простые системы ТРН—АД выполняются для обеспечения плавного пуска и торможения ЭП при невысоких требованиях к стабильности диаграммы пуска и торможения. Используются простые аппаратные средства, выполненные на базе цифровых или цифроаналоговых интегральных микросхем среднего уровня интеграции [56.10].

При высоких требованиях к точности и сложном характере изменения регулируемых переменных, так же как при работе в составе многоуровневых систем управления технологических комплексов, системы ТРН—АД выполняются с использованием современных средств микропроцессорного управления. При этом одновременно могут выдвигаться требования обеспечения сложных диаграмм скорости при пуске и торможении, позиционирования, комплекса электрических и механических защит и блокировок, возможности перенастройки уровней регулируемых переменных при наладке и т.д.

На рис. 56.18 приведена структурная схема обобщенной системы ТРН—АД. Конкретная структура ЭП может быть получена на основе обобщенной путем выделения требуемых элементов и связей, ее составляющих.

В обобщенную структуру ТРН—АД на рис. 56.18 входят: силовая часть *СЧ*, состоящая из силовых тиристорных блоков *VS*, в общем случае шунтируемых силовыми контакторами *КМ*, источник вторичного питания *ИП*, датчики напряжения *ДН* на входе и выходе *СЧ*, датчики тока *ДТ*, датчики температуры силовых элементов, обмоток АД — *ДΘ*, при необходимости датчик скорости *ДС*, датчик положения *ДП* и электромагнитный тормоз *ЭМТ*. Система управления содержит усилители мощности сигналов управления *УМ* питания катушки контактора *КМ*, сигналов цепей управления *VS*, катушек *ЭМТ* с оптронной развязкой *ОР*.

Сигналы на *УМ* поступают от блока логики *БЛ*, определяющего очередность срабатывания силовых приборов и аппаратов.

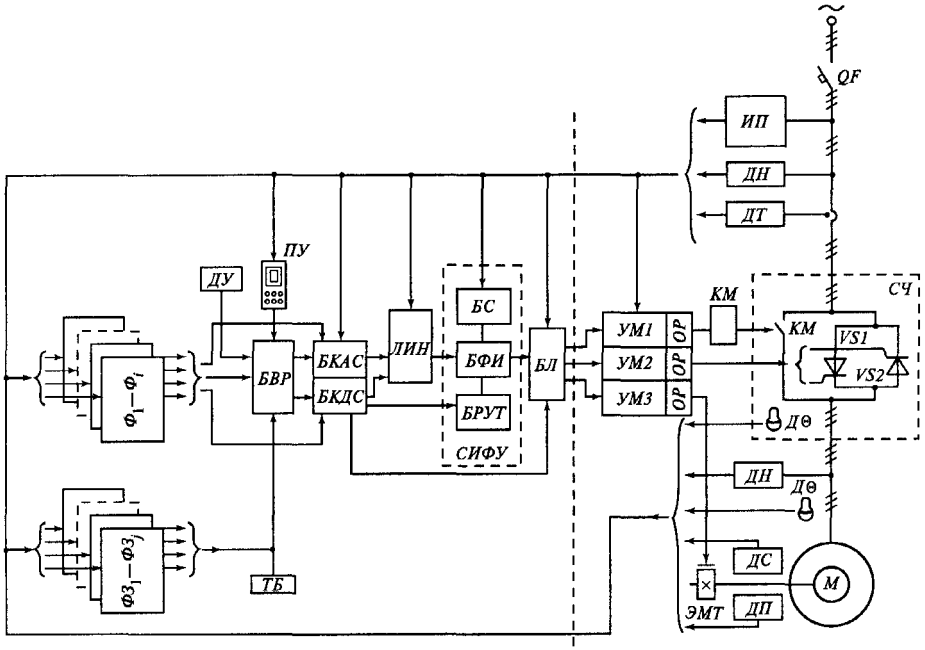


Рис. 56.18. Обобщенная структурная схема системы ТРН—АД

Система импульсно-фазового управления (СИФУ) с блоком комбинированной синхронизации *БС* (по напряжению U и по току I) совместно с блоком формирования импульсов *БФИ* и блоком раздельного управления тиристорами в фазах *БРУТ* позволяют обеспечить при малых нагрузках устойчивую работу в разомкнутой системе ЭП. В специальных режимах эта структура позволяет реализовать кратковременное снижение скорости при квазичастотном управлении, форсирование пускового момента, вращения вала АД в прямом и обратном направлении на пониженных скоростях.

Для получения линейной зависимости выходного напряжения ТРН от входного сигнала система управления может содержать блок линеаризации *ЛИН*, существенно упрощающий синтез внешних по отношению к СИФУ обратных связей в замкнутой системе ЭП.

Блоки коммутации аналоговых *БКАС* и дискретных сигналов *БКДС* по командам от блока выбора режимов *БВР* формируют последовательность импульсов для элементов управления СИФУ. Блок *БВР* управляет очередностью исполнения команд (сигналов) функциональных блоков $Ф_1$—$Ф_i$, блоков защит $ФЗ_1$—$ФЗ_j$, технологических блокировок *ТБ*, команд с пульта управления *ПУ* или дистанционного управления *ДУ*. Выделенная штриховой линией левая часть системы управления ТРН может быть выполнена с использованием микропроцессорной техники. Варианты построения таких систем изложены в [56.9, 56.12].

Рассматриваемая обобщенная структура системы ТРН—АД позволяет реализовать формирование следующих режимов работы и выполнение различных видов защит.

Варианты пусковых режимов:

пуск с уменьшением угла управления по экспоненте;

пуск с уменьшением угла управления по линейному закону;

пуск с постоянным углом управления;

пуск с форсировкой изменений угла управления (бустерный пуск);

пуск с ограничением пускового тока в замкнутой по току статора системе;

пуск с ограничением переходного момента;

пуск с увеличением пусковых моментов при трогании.

Варианты установившихся режимов работы:

работа с шунтирующим контактором;

работа с постоянным углом управления;

работа с оптимизацией одного из энергетических показателей, минимизация энергопотребления;

режим симметрирования токов по фазам;

кратковременная работа на пониженных скоростях в квазичастотном режиме;

работа с U = const в замкнутой по напряжению системе.

Варианты режимов торможения:

торможение с самовыбегом;

торможение с увеличением угла управления по экспоненте;

торможение с увеличением угла управления по линейному закону;

динамическое торможение.

Возможные виды защит системы и механизма:

максимально-токовая;

времятоковая;

от обрыва фаз;

от перекоса фаз;

от неправильного чередования фаз;

от превышения или снижения напряжения;

от утечек тока на корпус ТРН и АД;

от превышения температуры нагрева силовых элементов ТРН и АД;

от потери питания контроллера;

от механической перегрузки;

защита по технологическим параметрам.

Виды индикации и диагностики:

индикация режимов «Готов», «Работа», «Отключено»;

индикация текущих значений токов и напряжений;

предупредительная сигнализация;

аварийная сигнализация вида неисправности;

фиксирование трех последних причин отключения.

Функциональные возможности систем ТРН—АД изложены в [56.7—56.9, 56.13—56.15].

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ТРН

Технические данные ТРН, выпускаемых серийно некоторыми отечественными и зарубежными фирмами, приведены в табл. 56.15— 56.23.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ ТРН АД НА ПРИМЕРЕ НЕКОТОРЫХ МЕХАНИЗМОВ

Рассмотрим особенности применения системы ТРН—АД и примеры повышения производительности технологического оборудования и энергетических показателей ЭП при модернизации ЭП некоторых машин и механизмов общего назначения.

Таблица 56.15 **Технические данные ТРН серии ПБН и ПБР производства АООТ «Электропривод» (г. Москва) и ГПО «УМЗ» (г. Ульяновск)**

Модель*	Мощность АД, кВт	Номинальный ток нагрузки, А	Исполнение	Габаритные размеры $H \times L \times B$, мм	Масса, кг
4	2	4	IP44	160 × 150 × 150	1,5
10	4	10	IP44	170 × 200 × 110	4,5
25	7,5– 11	25	IP44	190 × 180 × 265	7,5
40	18,5	40	IP44	170 × 275 × 170	12,5
63	30	63	IP00	215 × 255 × 360	17,5
100	45	100	IP00	360 × 265 × 560	29
160	100	160	IP00	180 × 530 × 680	34

* Напряжение 3 × 220, 380,440 В, частота 50 Гц, исполнение IP00 по требованию

Таблица 56.16 **Технические данные ТРН серии ИРБИ-61 производства фирмы «ИРБИС» (г. Новосибирск)**

Модель*	Мощность АД, кВт	Номинальный ток нагрузки, А	Исполнение	Габаритные размеры $H \times L \times B$, мм	Масса, кг
110	110	200	IP20	500 × 300 × 590	47
200	200	400	IP20	600 × 400 × 590	65
315	315	555	IP20	600 × 400 × 590	65

* Напряжение 3 × 380 В, частота 50 Гц, исполнение IP00 по требованию

Таблица 56.17 **Технические данные ТРН серии КЭП производства АО «ЗВИ» (г. Москва)**

Модель*	Мощность АД, кВт	Номинальный ток нагрузки, А	Исполнение	Габаритные размеры $H \times L \times B$, мм	Масса, кг
МРМ М	45—250	До 450	IP31,00	588 × 542 × 317** 380 × 145 × 217***	42** 12***
УПТ-2	45—250	До 450	IP54	660 × 235 × 815	55
БУ АЭК	45—350	До 600	IP54,00	555 × 230 × 700	50

* Напряжение 3 × 380 В, частота 50 (60) Гц

** Силовой блок

*** Блок управления

Таблица 56.18 **Технические данные ТРН серии УПР1 производства ОАО «ЧЭАЗ» (г. Чебоксары)**

Модель*	Мощность АД, кВт	Номинальный ток нагрузки, А	Исполнение	Габаритные размеры $H \times L \times B$, мм	Масса, кг
1	7,5	25	IP00	242 × 268 × 280	17
2	30	63	IP00	242 × 480 × 370	47
3	100	160	IP00	242 × 500 × 360	60
4	200	400	IP00	400 × 1000 × 370	65

* Напряжение 3 × 380 В, частота 50 (60) Гц

Таблица 56.19 **Технические данные ТРН серии MSE производства фирмы «Emotron AB» (Швеция)**

Модель*	Рекомендуемая мощность АД, кВт, при напряжении, В			Номинальный ток нагрузки, А	Исполнение**	Габаритные размеры $H \times L \times B$, мм
	3 × 230	3 × 400	3 × 500			
017	4	7,5	11	17	IP21	325 × 211 × 220
030	7,5	15	18,5	30	IP21	325 × 211 × 220
045	11	22	30	45	IP21	325 × 211 × 220
060	15	30	37	60	IP21	424 × 211 × 220
075	18,5	37	45	75	IP21	424 × 211 × 220
085	22	45	55	85	IP21	424 × 211 × 220
110	30	55	75	110	IP21	525 × 211 × 220
145	37	75	90	145	IP21	525 × 211 × 220
170	45	90	110	170	IP20	447 × 484 × 244
210	60	110	132	210	IP20	447 × 484 × 244
250	75	132	160	250	IP20	447 × 484 × 244
310	90	160	200	310	IP20	532 × 547 × 278
370	110	200	250	370	IP20	532 × 547 × 278
450	132	250	315	450	IP20	532 × 547 × 278
570	160	315	400	570	IP20	687 × 640 × 302
710	200	400	500	710	IP20	687 × 640 × 302
835	250	450	600	835	IP20	687 × 640 × 302

* Частота 50(60) Гц. Напряжение двигателя 3 × (200—440) В или 3 × (440—500) В. Версии MSE-XXX — стандартная, MSI -XXX-CL — с ограничением тока, MSF XXX CL T — с ограничением тока и защитой двигателя. Напряжение управления 100— 120, 200—240 или 380—500 В.

** Исполнение IP00 по требованию.

Таблица 56.20 **Технические данные ТРН серии NN производства фирмы «Neidger» (Израиль)**

Модель*	Рекомендуемая мощность АД, кВт	Номинальный ток нагрузки, А	Исполнение**	Габаритные размеры $H \times I \times B$, мм	Масса, кг
0	4—11	9—22	IP00	230 × 158 × 125	5,3
1	15—45	30—85	IP00	290 × 265 × 180	10
2	55—90	100—170	IP00	400 × 300 × 170	16
3	110—160	205—300	IP00	500 × 400 × 200	21
4	200—315	350—520	IP00	600 × 500 × 250	28
5	325—375	550—650	IP00	600 × 560 × 320	35
6	450—2000	45—200	IP20	2200 × 700 × 800	400
7	2250—5000	230—500	IP20	2200 × 1400 × 1000	650
8	750—3350	45—200	IP20	2200 × 1000 × 800	500
9	3750—8300	230—500	IP20	2200 × 1400 × 1000	800

* Частота 50 (60) Гц, модели 0—5 3 × 380, 400 В, 3 × 220, 240 В, 3 × 460, 500 В, 3 × 575, 600 В, модели 6 и 7 3 × 6600 В, модели 8 и 9 3 × 11 000 В.

** Для моделей 0—5 исполнение IP65 по требованию.

Таблица 56.21. **Технические данные ТРН серий ATS-23, «Альтистарт 3» производства фирмы «Telemecanique» (Франция)**

Модель*	Рекомендуемая мощность АД, кВт	Номинальный ток нагрузки, А	Исполнение	Габаритные размеры $H \times L \times B$, мм	Масса, кг
V70	1,8—4	7	IP20	205 × 171 × 142	3
D12	3—7,5	12	IP20	260 × 171 × 162	3,1
D16	4—10	16	IP20	330 × 171 × 162	4,1
D30	7,5—18,5	30	IP20	330 × 171 × 162	4,4
D44	11—30	44	IP20	330 × 240 × 180	6,9
D72	18,5—45	72	IP20	330 × 240 × 250	9,4
C10	30—75	105	IP20	380 × 240 × 250	10,2
C14	40—100	140	IP20	685 × 388 × 269	44
C24	75—160	245	IP20	685 × 388 × 269	44
C41	132—295	410	IP10	928 × 401 × 353	59
C58	180—425	585	IP10	928 × 401 × 353	65
C82	250—600	820	IP10	1030 × 766 × 353	115
M12	355—800	1200	IP10	1030 × 766 × 353	127

* Напряжение 3 × 220 (240) В, 3 × 380 (415) В, 3 × 440 (480, 500) В; частота 50 (60) Гц.

Таблица 56.22. **Технические данные ТРН серии QC производства фирмы «GE Power Controls» (Бельгия)**

Модель*	Рекомендуемая мощность АД, кВт, при напряжении, В			Номинальный ток нагрузки, А	Габаритные размеры $H \times L \times B$, мм	Масса, кг
	220/240	380/415	440			
1FDP	3	5,5	7,5	14	200 × 170 × 175	4,3
1GDP	4	7,5	7,5	17	200 × 170 × 175	4,3
1HDP	5,5	11	11	22	200 × 170 × 175	4,6
1IDP	7,5	15	18,5	32	250 × 170 × 175	4,6
1JDP	13	22	22	48	320 × 219 × 236	12,5
1KDP	15	30	37	63	320 × 219 × 238	12,5
1LDP	20	37	37	72	350 × 219 × 274	17,0
1MDP	30	55	55	105	350 × 219 × 274	17,0
1NDP	40	75	90	156	190 × 310 × 305	45,0
1QDP	63	110	132	240	490 × 510 × 305	45,0
1RDP	90	160	200	315	540 × 550 × 317	55,0
1SDP	110	200	220	370	540 × 550 × 317	55,0
1TDP	150	250	250	475	685 × 590 × 317	80,0
1VDP	200	315	400	610	850 × 790 × 402	105,0
1VDP	250	450	530	850	850 × 790 × 402	120,0
1XDP	355	600	670	1075	1000 × 810 × 407	150,0

* Частота 45—65 Гц; степень защиты IP00; у каждой модели имеются модификации на 480 и 500 В.

Таблица 56.23. **Технические данные ТРН серии «Electronic Motor Starters SIKOSTART 3RW10...» производства фирмы «Siemens» (Германия)**

Модель*	Рекомендуемая мощность АД, кВт	Номинальный ток нагрузки, А	Габаритные размеры $H \times L \times B$, мм (исполнение IP00)**	Масса, кг
...21-OAA01	2,2	5,5	300 × 266 × 182	7
...25-OAA01	7,5	16	300 × 266 × 182	7
...28-OAA01	18,5	37	300 × 266 × 224	10,5
...31-OAA01	30	63	300 × 266 × 224	10,5
...32-OAB01	37	70	275 × 335 × 220	9
...34-OAB01	55	100	335 × 335 × 220	13
...35-OAB01	75	135	335 × 550 × 320	30
...38-OAB01	132	235	335 × 550 × 320	40
...41-OAB01	200	355	570 × 705 × 405	90
...44-OAB01	355	620	570 × 705 × 405	90
...45-OAB01	400	700	570 × 705 × 405	90

* Напряжение 3 × 400, 500, 660 В, частота 50 (60) Гц.

** Возможно исполнение IP20, IP54.

Шаровая мельница. Шаровая мельница предназначена для получения формовочной массы, например при изготовлении керамической плитки. Приводной АД с короткозамкнутым ротором управляется релейно-контакторными аппаратами.

При загрузке и выгрузке продукта необходимо относительно точно позиционировать угловое положение барабана мельницы для того, чтобы приемные и выходные люки совпадали с подающим и приемным бункерами. До модернизации эта операция позиционирования производилась вручную в «толчковом» режиме, для чего оператору приходилось осуществлять до 10 «толчков» включения АД в прямом и обратном направлениях.

После длительной остановки мельницы находящаяся в ней масса спекается и прилипает к днищу, вследствие чего значительно возрастает момент трогания при пуске. Запустить мельницу в этом случае удается лишь в режиме «раскачки» путем многократного включения и отключения АД в строго определенные моменты времени. Тяжелые пусковые режимы ЭП шаровых мельниц являются причиной быстрого выхода из строя АД, механических и передаточных устройств и релейно-контакторной аппаратуры.

Модернизация ЭП с использованием системы ТРН—АД позволяет увеличить момент АД при трогании, вращать его в прямом и обратном направлениях при пониженной скорости и ограничивать ток статора в пусковых режимах. В результате применения такого регулятора позиционирование барабана мельницы стало возможным за одно включение, обеспечен ее гарантированный запуск при спекании формовочной массы, в 2 раза снижены пусковые токи, устранено проскальзывание ременных передач, приводящее к ускоренному выходу их из строя. Приводной двигатель 4АМ225М6У2 (380 В, 37 кВт, 980 об/мин).

Вентиляторы установок кондиционирования. Особенностью механизмов вентиляторов является большой момент инерции вращающихся частей по сравнению с собственным моментом инерции приводного двигателя. По этой причине возникают затяжные пусковые режимы (от нескольких до десятков секунд), характеризующиеся повышенными динамическими усилиями в механических передачах и значительным шумом, связанными с резонансными явлениями из-за упругих деформаций и проскальзывания клиноременных передач. В рассматриваемых установках пусковые режимы настолько неблагоприятны, что при нескольких пусках подряд двигатели выходят из строя из-за перегрева статорных обмоток. Неблагоприятные условия эксплуатации создаются и из-за повышенного напряжения на питающей линии в ночное время, вследствие чего существенно увеличиваются потери в двигателе и его нагрев.

Применение системы ТРН—АД для этих установок обеспечивает стабилизацию напряжения, подводимого к статору, в соответствии со специальным законом изменения напряжения управления регулятора при пусках вентилятора. В результате уменьшается нагрев АД в рабочем режиме, полностью устраняются резонансные явления, снижаются вибрация и шум при пусках, увеличивается, примерно в 3 раза число допустимых пусков подряд, сокращается число АД, выходящих из строя. Приводные АД установок 4А225М8У3 (380 В, 30 кВт, 745 об/мин), 4А250S4У3 (380 В, 75кВт, 1480 об/мин).

Вентилятор градирни. Градирня используется для охлаждения технологической воды на предприятиях химического и других производств. Дви-

гатель вентилятора установлен вертикально внутри полой башни градирни, колесо осевого вентилятора расположено непосредственно на валу двигателя. Основная проблема, возникающая при эксплуатации таких установок, связана с наличием влажной агрессивной окружающей среды. После длительной остановки обмотки двигателя увлажняются, вследствие чего падает сопротивление изоляции и при последующем включении обмотка повреждается. Ремонт двигателя связан со значительными материальными затратами, так как необходимо демонтировать и повторно установить электродвигатель вместе с вентилятором массой 10 т на высоту 25 м.

Для удобства эксплуатации желательны режимы медленного вращения вентилятора в обратную сторону (для устранения наледи со стен башни) и стопорения его колеса, вращающегося за счет естественной тяги (для осмотра и смазки подшипников).

Применение системы ТРН—АД обеспечивает режимы: ограничения тока при пуске; постоянного прогрева обмоток АД при неработающем вентиляторе; вращения вентилятора в обратном направлении при малой скорости; стопорения колеса вентилятора; контроля сопротивления изоляции обмоток АД с пульта оператора.

Применение системы ТРН—АД позволяет устранить частые пробои изоляции обмоток, существенно сократить (в 5—6 раз) паузы при повторных пусках вентилятора и улучшить условия проведения профилактических работ. Приводной двигатель ВАС015-23-34У1 (380 В, 75 кВт, 178 об/мин).

Свайные вибропогружатели. Свайные вибропогружатели создают вибрационные усилия за счет вращения эксцентрически расположенных относительно вала массивных тел. При отключении двигателя эти тела за счет неуравновешенной силы тяжести поворачиваются в крайнее нижнее положение, которое является наиболее неблагоприятным при запуске установки. Поэтому для привода вибропогружателей часто используются АД с фазным ротором и реостатным управлением, обеспечивающим увеличение пускового момента. Из-за сильных вибраций срок службы таких АД не превышает нескольких десятков часов. Замена АД с фазным ротором асинхронными короткозамкнутыми, возможна лишь при увеличении их пускового момента и одновременном ограничении пускового тока. Последнее условие вызвано соизмеримостью мощностей источника питания (трансформатора или дизель-генераторной установки) и АД и, как правило, длинной кабельной линией, с чем связано существенное падение напряжения на АД.

Использование специального алгоритма управления системой ТРН—АД позволяет производить пуск АД с короткозамкнутым ротором с предварительной форсировкой магнитного потока и, следовательно, с увеличенным пусковым моментом АД. При этом пусковой момент может быть увеличен в 2,5 раза при одновременном уменьшении действующего значения тока статора в 2 раза по сравнению с пусковыми токами обычной схемы подключения АД к сети с номинальным напряжением. Приводные двигатели АИ355S4У3 (380 В, 132 кВт, 1485 об/мин), АИ35SM4У3 (380 В, 200 кВт, 1485 об/мин).

Штамповочные прессы. Штамповочные прессы работают с переменной нагрузкой, при которой интервалы времени нагружения (когда штамп выдавливает деталь) чередуются с паузами, когда происходит смена заготовок и маховик накапливает энергию для следующего удара. Наличие маховика, сглаживающего пульсации нагрузки на валу двигателя, обусловливает затяжной пусковой режим двигателя пресса. Для ограничения пусковых токов обычно используют переключение обмоток двигателя со звезды на треугольник.

При штамповании мелких деталей и при больших паузах для смены деталей пресс работает с неполной средней (за цикл) нагрузкой, поэтому его энергетические показатели (КПД, коэффициент мощности) оказываются ниже соответствующих номинальных значений.

Применение регулятора ТРН с системой автоматического регулирования напряжения на статоре АД в функции его загрузки позволяет сократить непроизводительный расход активной и реактивной энергии.

Сокращение потребления активной энергии составляет 5 %, реактивной — 50 %. Кроме того, применение ТРН позволяет осуществлять пуски с ограничением по току вместо переключения обмоток статора. Приводные двигатели прессов 4А132М4У3 (380 В, 11 кВт, 1450 об/мин), АК2-82-4 (380 В, 30 кВт, 735 об/мин).

Приведенные примеры лишь выборочно иллюстрируют разнообразные возможности ТРН. Во всех перечисленных примерах удается сформировать требуемые режимы работы, а также устранить или снизить электрические, механические, тепловые нагрузки питающих электрических сетей, двигателя, механической части передач и технологических установок.

56.5. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ

ТИПЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Преобразователь частоты (ПЧ) в ЭП является силовым регулятором, вход которого подключен к питающей сети с нерегулируемыми значениями напряжения U_1 и частоты f_1, а на выходе обеспечиваются регулируемые значения напряжения U_2 (или

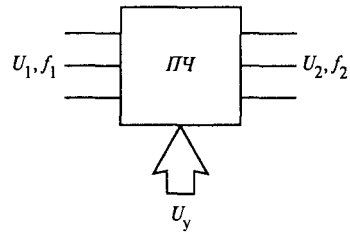


Рис. 56.19. Преобразователь частоты в ЭП

тока I_2) и частоты f_2 в зависимости от задания и управляющих сигналов U_y (рис. 56.19).

Применение ПЧ в ЭП обеспечивает наиболее экономичные способы регулирования скорости и момента электродвигателей переменного тока. В зависимости от типа электропривода ПЧ может быть включен между питающей сетью и статорной обмоткой двигателя (частотно-управляемый ЭП), как это показано на рис. 56.20, или между роторной обмоткой и питающей сетью (например, в ЭП с машиной двойного питания, показанном на рис. 56.21). Такое включение обычно позволяет уменьшить установленную мощность ПЧ, но требует применения электродвигателя с фазным ротором.

Поведение и свойства электродвигателей переменного тока при питании от источника напряжения регулируемой частоты достаточно подробно были известны уже в 60-е годы прошлого века [56.16, 56.17], но практического применения частотно-управляемые ЭП в то время не получили из-за отсутствия элементной базы для разработки статических ПЧ.

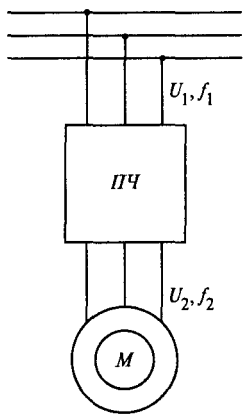


Рис. 56.20. Включение ПЧ в статорную обмотку двигателя

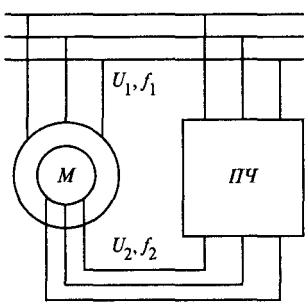


Рис. 56.21. Включение ПЧ в роторную обмотку двигателя

Исключением были высокоскоростные частотно-управляемые ЭП, выполненные на высокочастотных короткозамкнутых АД и электромеханических ПЧ.

Электромеханические преобразователи частоты. Классический вариант электромеханического ПЧ, выполненного на двух синхронных машинах *M1* и *M2* и двух машинах постоянного тока *M3* и *M4* показан на рис. 56.22, *а*. Электромашинный агрегат *M1*, *M3* (агрегат постоянной скорости $\omega_1 = \text{const}$) является источником напряжения постоянного тока, значение и полярность которого задаются током возбуждения I_3, и которое определяет скорость ω_2 агрегатов *M2*, *M4*, т.е. частоту f_2 и напряжение U_2 на выходе ПЧ. Ток возбуждения I_2 машины *M2* регулируется в небольших пределах для получения желаемых законов частотного управления.

Отметим две основные особенности работы ПЧ в системе ЭП переменного тока.

возможность работы электродвигателя во всех четырех квадрантах электромеханических характеристик (реверсивность ПЧ);

наличие в системе ЭП источника реактивной энергии, обеспечивающего работу электродвигателя при коэффициенте мощности не равном единице, что в общем случае характерно для электродвигателей переменного тока.

На рис. 56.22, *б* и *в* показаны диаграммы активной и реактивной мощности ЭП с электромеханическим ПЧ для двигательного режима (рис. 56.22, *б*) и генераторного режима (рис. 56.22, *в*) электродвигателя *M*.

В первом случае машины *M1* и *M4* работают в двигательном режиме, *M2* и *M3* — в генераторном. Во втором — *M1* и *M4* работают генераторами, *M2* и *M3* — двигателями. Реактивная энергия в обоих случаях циркулирует между сетью и машиной *M1* и между машинами *M2* и *M*.

Переход в генераторный режим электродвигателя *M* возможен при активном моменте на его валу или при выполнении генераторного частотного торможения.

При активном моменте на валу электродвигателя *M* угловая скорость ω_2 увеличивается, возрастает ЭДС машины *M4*, ток в якорной цепи меняет направление ($I_г$ на рис. 56.22, *а*), и в соответствии с диаграммой, показанной на рис. 56.22, *в*, избыточная активная мощность P_1 автоматически передается в питающую сеть.

Для выполнения генераторного частотного торможения уменьшают ток возбуждения I_3 и далее регулируют его в функции угловой скорости ω двигателя *M* (обычно поддерживается постоянным его абсолютное скольжение в генераторной области).

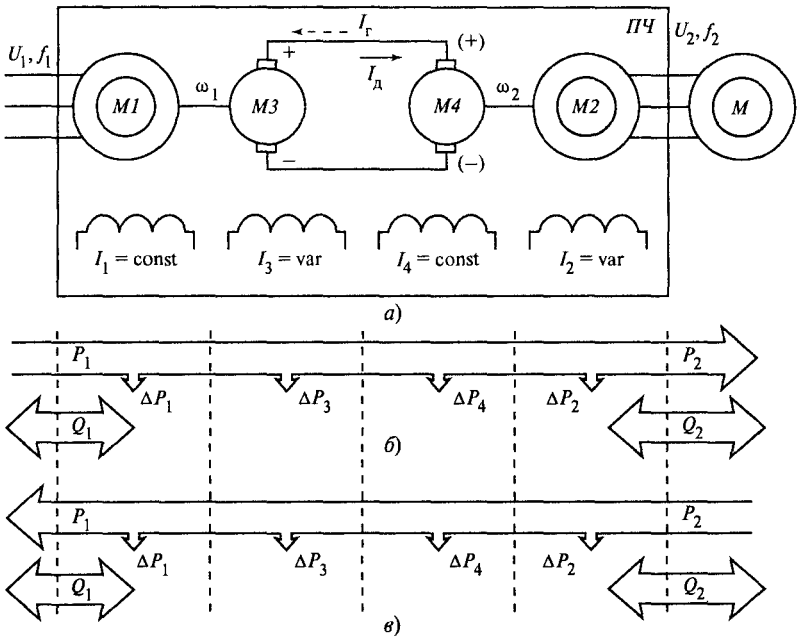


Рис. 56.22. Электромеханический ПЧ:

а — структура силовой части *б* — диаграмма мощности для двигательного режима *в* — диаграмма мощности для генераторного режима

Режимы работы машин ПЧ соответствуют при этом также рис 56 22, *в*

Находят применение и варианты электромеханического ПЧ Так для регулирования мощных высокоскоростных электродвигателей в нереверсивных ЭП применяется электромеханический ПЧ, в котором вместо агрегатов *M1*, *M3* используется регулируемый ТП постоянного напряжения В маломощных станочных высокоскоростных ЭП используется нерегулируемый электромеханический ПЧ, в котором машины *M1* и *M3* отсутствуют, двигатель *M4* — асинхронный короткозамкнутый, питается непосредственно от сети, а в качестве генератора *M2* применен индукционный генератор

Основные достоинства электромеханического ПЧ

синусоидальное выходное напряжение,

естественная реверсивность ЭП,

устойчивость работы ПЧ в режимах перегрузки и аварийных режимах двигателя *M*,

простота обслуживания

Вместе с тем очевидны недостатки электромеханического ПЧ

плохие массогабаритные показатели,

большая инерционность контура регулирования частоты f_2 и напряжения U_2

высокий уровень шума,

значительные потери, вызванные 4 кратным преобразованием энергии

Статические преобразователи частоты. Указанные недостатки практически отсутствуют у статических ПЧ, выполненных на ключевых электронных элементах тиристорах, запираемых тиристорах и силовых транзисторах (биполярных биполярных с изолированным затвором и полевых) Использование ключевого режима приводит к тому, что выходное напряжение U_2 у всех без исключения видов статических ПЧ несинусоидально и кроме основной (первой) гармоники содержит обычно целый спектр высших гармонических составляющих, а в некоторых ПЧ еще и низкочастотные субгармонические составляющие Ток, потребляемый из сети статическими ПЧ, также несинусоидален и может вызывать искажения напряжения питающей сети Эти обстоятельства приходится обычно учитывать при выборе типа статического ПЧ

Принципы построения статических ПЧ для регулируемого ЭП известны достаточно давно [56 18—56 23] В настоящее время в зависимости от мощности и технологических требований к ЭП используется один из трех типов статических ПЧ [56 24, 56 25]

непосредственный ПЧ,

двухзвенный ПЧ с автономным инвертором напряжения,

двухзвенный ПЧ с автономным инвертором тока

Непосредственный преобразователь частоты (НПЧ) в минимальной конфигурации содержит m_2 (по числу фаз двигателя) отдельных реверсивных преобразователей постоянного тока, управление которыми осуществляется переменным модулирующим напряжением. Форма, частота и амплитуда модулирующего напряжения определяют форму гладкой составляющей, частоту f_2 и амплитуду напряжения U_2 на выходе НПЧ. Регулирование выходного напряжения характеризуют коэффициентом модуляции μ, который изменяется в пределах от 0 до 1 и является, по существу, относительной амплитудой модулирующего напряжения. Напряжения управления отдельными фазами НПЧ имеют одинаковые амплитуду и частоту, но сдвинуты одно относительно другого на угол $2\pi/m_2$. На рис. 56.23 показана схема бестрансформаторного трехфазного НПЧ, в котором использованы мостовые реверсивные преобразователи постоянного тока, а фазы двигателя U_{2A}, U_{2B}, U_{2C} разъединены, чтобы избежать межфазных коротких замыканий.

Управление группами тиристоров, как и в реверсивных преобразователях постоянного тока, может быть совместным или раздельным. В первом случае для ограничения уравнительных токов используются реакторы L, как это показано на рис. 56.23. При раздельном управлении эти реакторы не ставятся, но используются датчики нуля тока (датчики состояния тиристоров).

В тиристорных НПЧ, как правило, используется естественная коммутация. При этом выходное напряжение U_2 имеет периодический характер при частоте f_2 только для дискретных ее значений [56.19]:

$$f_2 = m_1 f_1/(m_1 + k),$$

где k — целые числа ($1 \le k < \infty$); m_1 — число фаз питания НПЧ. В табл. 56.24 приведены значения этих частот для $m_1 = 3, 6, 12$, $f_1 = 50$ Гц и $k = 1$—10.

При промежуточных значениях выходной частоты f_2, при которых k не является целым числом, в напряжении U_2 появляются низкочастотные субгармоники, влияние которых тем больше, чем ближе значения частот f_2 и f_1. Появление низкочастотных субгармоник в напряжении питания электродвигателя приводит к колебаниям электромагнитного момента. Поэтому выходные частоты НПЧ в диапазоне, соответствующем $k < 3$, обычно не являются рабочими. Так, для НПЧ, выполненного по схеме, показанной на рис. 56.23, максимальная выходная частота $f_{2\max} \approx 25$ Гц.

Амплитуды и частоты высших гармоник в выходном напряжении НПЧ зависят от числа фаз питающего напряжения m_1, выходной частоты f_2, выходного напряжения (коэффициента модуляции μ) и коэффициента мощности нагрузки НПЧ [56.24]. Влияние выходной частоты f_2 и числа фаз питаю-

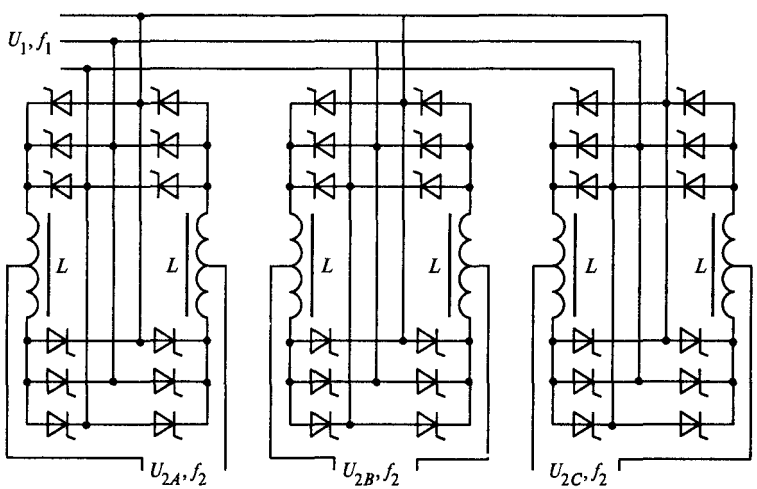


Рис. 56.23. Трехфазный мостовой НПЧ

Таблица 56.24. **Значения частот f_2, Гц, выходного напряжения НПЧ, не содержащего субгармоник**

m_1	k									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	37,5	30	25	21,4	18,75	16,7	15	13,6	12,5	11,5
6	42,8	37,5	33,3	30	27,3	25	23	21,4	20	18,75
12	46,2	42,8	40	37,5	35,3	33,3	31,6	30	28,6	27,3

щей сети m_1 на гармонический состав выходного напряжения НПЧ можно оценить, воспользовавшись уравнениями [56.24]:

$$\nu = km_1(f_1/f_2 - 1) \pm 1, \qquad (56.1)$$

$$U_\nu = 1/(km_1 \pm 1), \qquad (56.2)$$

где $\nu = f_\nu / f_2$ — номер гармонической составляющей (относительная частота); $U_\nu = U_{\nu m}/U_{21m}$ — относительная амплитуда ν-й гармоники; U_{21m} — амплитуда первой гармоники выходного напряжения; $k = 1—\infty$ — целочисленные коэффициенты гармоник.

Уравнения (56.1) и (56.2) соответствуют работе НПЧ на индуктивную нагрузку при коэффициенте модуляции $\mu = 1$.

В табл. 56.25 приведены рассчитанные по уравнениям (56.1) и (56.2.) относительные амплитуды, номера и абсолютные частоты высших гармоник выходного напряжения НПЧ при $m_1 = 3$ для значений частот $f_2 = 25$, 16,7 и 12,5 Гц.

Из табл. 56.25 следует, что в НПЧ увеличение выходной частоты приводит к уменьшению частоты высокочастотных гармонических составляющих в напряжении U_2. При $m_1 = 3$ и выходной частоте $f_2 = 25$ Гц спектр гармоник включает в себя рабочие частоты двигателя. Амплитуды высших гармоник напряжения не зависят от выходной частоты НПЧ и через коэффициент k связаны только с номером гармоники (56.2). Близость частот высших гармоник и рабочих частот искажает форму тока и вызывает пульсации момента регулируемого электродвигателя.

Влияние увеличения числа фаз питания НПЧ на гармонический состав выходного напряжения иллюстрируется данными, приведенными в табл. 56.26, в которой для выходной частоты $f_2 = 25$ Гц приведены расчетные значения относительных амплитуд, номеров и абсолютных частот высших гармоник для $m_1 = 6$ и $m_1 = 12$.

Таблица 56.25. **Высокочастотные гармоники напряжения НПЧ при $m_1 = 3$**

k	U_ν	$f_2 = 25$ Гц		$f_2 = 16{,}7$ Гц		$f_2 = 12{,}5$ Гц	
		ν	f_ν, Гц	ν	f_ν, Гц	ν	f_ν, Гц
1	0,5	2	50	5	83	8	100
1	0,25	4	100	7	116	10	125
2	0,2	5	125	11	183	17	212
2	0,14	7	175	13	217	19	237
3	0,125	8	200	17	283	26	325
3	0,1	10	250	19	317	28	350
4	0,09	11	275	23	383	35	437
4	0,077	13	325	25	417	37	463

Таблица 56.26. **Высокочастотные гармоники напряжения НПЧ при $f_2 = 25$ Гц, $m_1 = 6$ и $m_1 = 12$**

k	$m_1 = 6$			$m_1 = 12$		
	ν	U_ν	f_ν	ν	U_ν	f_ν
1	5	0,2	125	11	0,09	275
1	7	0,14	175	13	0,077	325
2	11	0,09	275	23	0,043	575
2	13	0,077	325	25	0,038	625
3	17	0,059	425	35	0,029	875
3	19	0,052	475	37	0,027	925

Увеличение числа фаз питающего напряжения до $m_1 = 6$ существенно сдвигает спектр высших гармоник в сторону увеличения частот и одновременно уменьшает их амплитуды. Увеличение числа фаз до $m_1 = 12$ уменьшает амплитуды высших гармоник напряжения настолько, что их влияние на работу электродвигателя можно не учитывать.

Из табл. 56.24—56.26 следует, что увеличение числа фаз питания всегда улучшает гармонический состав выходного напряжения НПЧ, уменьшая содержание в нем и высокочастотных гармоник, и низкочастотных субгармоник. Но достигается это путем увеличения числа тиристорных групп, которые питаются от дополнительных обмоток трансформатора или от нескольких отдельных трансформаторов, что приводит к еще большему усложнению силовой схемы НПЧ. Различные варианты силовых схем НПЧ и их особенности подробно рассмотрены в [56.19, 56.26].

Энергетические характеристики и влияние на питающую сеть НПЧ с естественной коммутацией фактически определены свойствами реверсивных ТП постоянного тока. В качестве иллюстрации на рис. 56.24 приведены зависимости составляющих потребляемой из сети мощности от коэффициента модуляции напряжения μ и фазового угла φ_{21} по первой гармонике на частоте f_2 для идеализированного трехфазного мостового НПЧ (отношение частот $f_1/f_2 > 10$; тиристоры рассматриваются как идеальные ключи; управление тиристорными группами — раздельное) [56.24]. Составляющие первичной мощности показаны в относительных величинах: $S_* = S_1/S_2$; $Q_* = Q_1/S_2$; $P_* = P_1/S_2$, где S_2 — полная мощность на выходе НПЧ. Из рис. 56.24 следует, что при изменении μ и φ_{21} величина S_* меняется незначительно, поэтому изменение коэффициента мощности НПЧ ($k_м = P_*/S_*$) практически идентично изменению потребляемой активной мощности P_*, т.е. коэффициент мощности НПЧ уменьшается как при уменьшении выходного напряжения (уменьшении μ), так и при увеличении φ_{21} (уменьшении $\cos\varphi_{21}$).

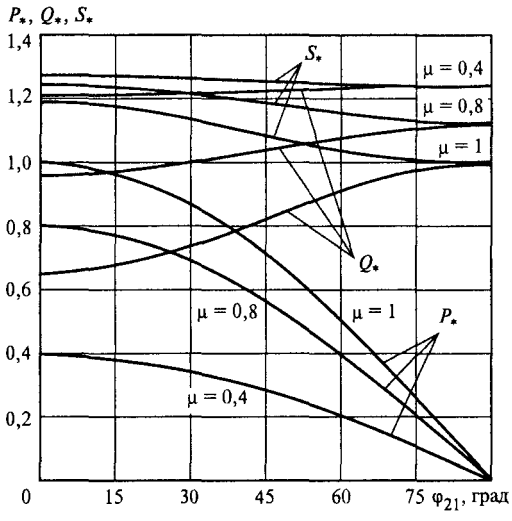


Рис. 56.24. Энергетические характеристики трехфазного НПЧ

Некоторого увеличения коэффициента мощности можно достигнуть, применив последовательное включение тиристорных групп в каждой фазе, управление которыми осуществляется с фазовым сдвигом. Но это еще более усложняет схему НПЧ.

Принципиально вопрос увеличения коэффициента мощности НПЧ решается, если отказаться от естественной коммутации тока и использовать принудительную коммутацию. Такое решение одновременно снимает ограничение по максимальной выходной частоте $f_{2\max}$. Гармонический состав выходного напряжения и выходного тока НПЧ с принудительной коммутацией исследован, например в [56.27]. Трудности технической реализации этих схем вызваны прежде всего отсутствием удобного для применения в них полупроводникового ключевого элемента. При использовании в НПЧ с принудительной коммутацией биполярных транзисторов с изолированным затвором в модульном исполнении (IGBT-модулей) применяется встречно-последовательное включение транзисторных модулей (иногда такие ПЧ называют матричными). При этом между сетью и двигателем всегда оказываются последовательно включенные два транзистора и два диода, падение напряжения на которых примерно втрое больше, чем на двух тиристорах в схеме НПЧ с естественной коммутацией, что пропорционально увеличивает статические потери в ПЧ и ухудшает массогабаритные показатели. В результате НПЧ с принудительной коммутацией пока не имеют широкого применения и при общей оценке свойств статических ПЧ здесь не рассматриваются.

Основные достоинства НПЧ с естественной коммутацией

полная реверсивность;

свободный обмен реактивной энергией между сетью и двигателем,

однократное преобразование энергии (минимальное число вентилей, одновременно включенных между сетью и двигателем).

Недостатки НПЧ с естественной коммутацией.

ограничение выходной частоты по верхнему пределу,

низкий коэффициент мощности;

сложность силовой схемы, особенно при $m_1 > 3$

Двухзвенный ПЧ с автономным инвертором напряжения состоит из трех основных элементов: выпрямителя (В), автономного инвертора напряжения (АИН) и промежуточного контура постоянного тока, включающего конденсатор C, который является источником реактивной мощности для двигателя (рис. 56 25). В ПЧ этого типа происходит двукратное преобразование электрической энергии сначала переменное напряжение с частотой f_1 выпрямляется, а затем постоянное напряжение U_d преобразуется (инвертируется) АИН в переменное с заданной амплитудой первой гармоники U_{21m} и частотой f_2. В качестве ключевых элементов в АИН в настоящее время практически всегда используются транзисторы. На рис. 56.26 показана

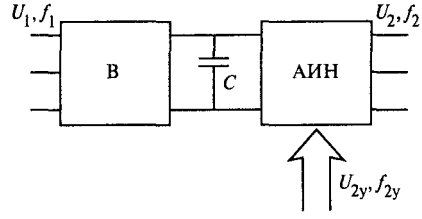


Рис. 56.25. Двухзвенный ПЧ с АИН

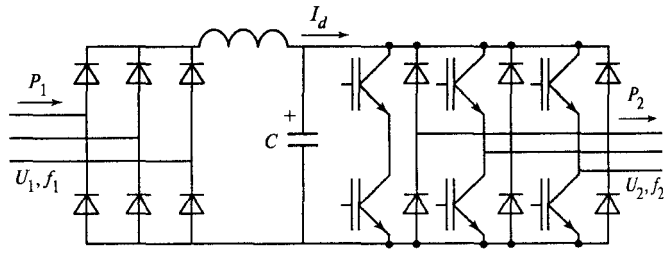


Рис. 56.26. Транзисторный АИН

схема ПЧ, в котором АИН выполнен на биполярных транзисторах с изолированным затвором. Здесь показаны только основные силовые элементы ПЧ, необходимые для процесса преобразования.

Принципы инвертирования напряжения АИН хорошо известны [56.1, 56.18, 56.22, 56.24, 56.25]. В каждой фазе АИН всегда открыт один из двух ключевых элементов, и потенциал фазы на выходе АИН всегда равен потенциалу положительной или отрицательной шины на входе АИН. Таким образом, амплитуда линейного напряжения на выходе АИН всегда равна входному напряжению $U_{2m} = U_d$. Частота выходного напряжения однозначно определена частотой переключения транзисторов и для ЭП не имеет ограничения сверху, так как у мощных современных транзисторов достигает значения $f_{max} =$ = 20—40 кГц, поэтому в ПЧ с АИН для формирования выходного напряжения с заданными частотой f_2 и амплитудой первой гармоники U_{21m} исключительное применение находит способ широтно-импульсной модуляции (ШИМ) напряжения с постоянной частотой коммутации [56.23, 56.24] или с переменной частотой коммутации в системах прямого цифрового управления моментом [56.28, 56.29].

Частота, форма и амплитуда модулирующего напряжения при ШИМ определяют форму гладкой составляющей напряжения на выходе АИН, амплитуду первой гармоники U_{21m} и ее частоту f_2. Для получения синусоидальной гладкой составляющей выходного напряжения форма модулирующего напряжения может быть также синусоидальной. Но линейное напряжение на выходе АИН с ШИМ в бестрансформаторной схеме при этом равно (первая гармоника):

$$U_{21} = \sqrt{3}\, U_1 \mu / 2,$$

т.е. даже при $\mu = 1$ $U_{21} \approx 0{,}87 U_1$, и двигатель ЭП не может быть использован в номинальном режиме. Поэтому модулирующее напряжение $u_м$ обычно имеет форму, соответствующую уравнению:

$$u_м = \mu(\sin\omega_2 t + 0{,}13 \sin 3\omega_2 t)/0{,}87.$$

На рис. 56.27 модулирующее напряжение показано для трех значений коэффициента модуляции $\mu = 0{,}1$; 0,5; 1,0. Линейное напряжение (первая гармоника) на выходе ПЧ в этом случае при $\mu = 1$ равно сетевому напряжению на входе $U_{21} = U_1$. А благодаря трехпроводной системе подсоединения двигателя к ПЧ третья гармоника отсутствует и в линейном, и в фазном напряжении.

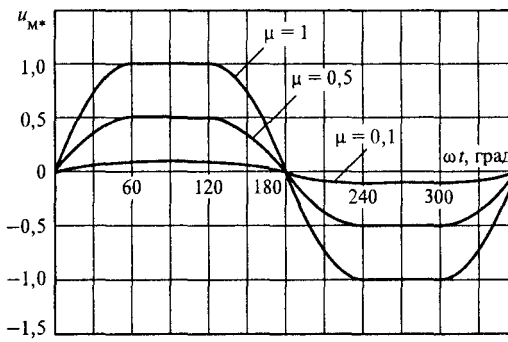


Рис. 56.27. Модулирующее напряжение транзисторного АИН

Формы линейного напряжения и линейного тока при работе ПЧ с АИН на нагрузку с отстающим коэффициентом мощности приведены на рис. 56.28. При регулировании частоты f_2 и напряжения u_2 изменяется скважность импульсов, частота которых равна частоте переключения $f_к$ (коммутации) транзисторов в АИН, а их амплитуда остается постоянной и равной U_d. Гармонический состав выходного напряжения при его регулировании от нуля до максимального значения ($\mu = 0$—1) соответствует графикам, показанным на рис. 56.29, где $f_к$ — частота переключения (коммутации) транзисторов в АИН; $f_{к*} = f_к / f_2$ — ее относительное значение; $\nu = f_\nu / f_2$ — относительные частоты гармонических составляющих; $U_{\nu m*} = U_{\nu m} / U_{21m}$ — относительные амплитуды гармонических составляющих по отношению к максимальной амплитуде ($\mu = 1$) первой гармоники [56.24]. Частота коммутации транзисторов $f_к$ выбирается обычно равной 3—6 кГц, так как с ее увеличением растут потери в АИН, а с уменьшением — в двигателе, и для значений выходной частоты $f_2 < 60$ Гц относительная частота коммутации $f_{к*} > 50$.

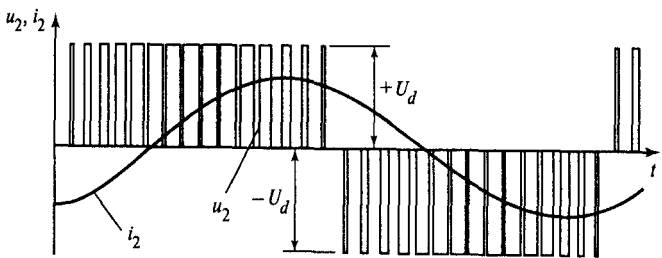


Рис. 56.28. Линейные напряжение и ток на выходе ПЧ с АИН

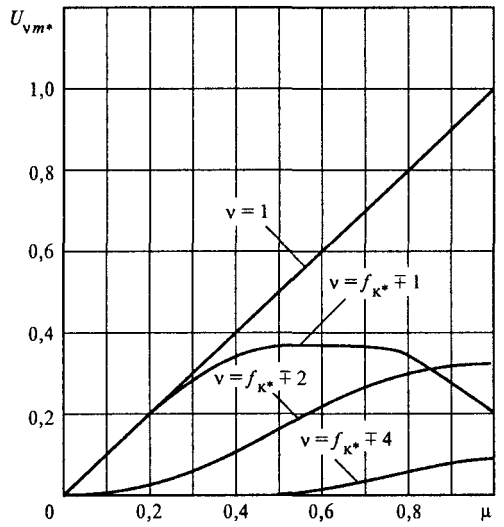


Рис. 56.29. Гармонический состав выходного напряжения ПЧ с АИН

Характерные особенности спектра выходного напряжения ПЧ с АИН:

амплитуда первой гармоники напряжения при изменении коэффициента модуляции (μ = 0—1) линейно возрастает от нуля до максимального значения (U_{1m*} = 0—1);

наибольшие амплитуды имеют гармонические составляющие напряжения, частоты которых практически равны частоте коммутации транзисторов в АИН;

гармонические составляющие низкочастотной области спектра (ν = 5, 7, 11 ...) пренебрежимо малы.

Гармонические составляющие напряжения столь высоких частот из-за фильтрации индуктивностями рассеяния обмоток двигателя не создают больших гармонических составляющих в выходном токе АИН, и его форма близка к синусоидальной даже при отсутствии фильтров на выходе ПЧ (см. рис. 56.28). Однако такие фильтры используются для уменьшения скорости изменения напряжения на обмотке двигателя в момент переключения транзисторов (чаще при мощности двигателя 50 кВт и более) и для уменьшения перенапряжений на выходе ПЧ при работе на длинный соединительный кабель (30 м и более)

В ПЧ с АИН невозможен обмен реактивной энергией двигателя с питающей сетью, и реактивная составляющая тока двигателя циркулирует в контуре электродвигатель — АИН — входной конденсатор C, наличие которого вместе с диодами, шунтирующими в обратном направлении транзисторы АИН, является обязательным для схемы инвертора напряжения

Схема ПЧ с АИН, показанная на рис. 56.26, — нереверсивная из-за нереверсивности выпрямителя. При возникновении режима генераторного торможения избыточная энергия идет на заряд конденсатора C, напряжение на котором нарастает лавинообразно, и для предотвращения аварии используется защита, контролирующая это напряжение Возможны схемные решения [56.24] с использованием диодно-тиристорного или тиристорного реверсивного выпрямителя. Но в промышленных установках такие схемы применяются очень редко Если же в системе ЭП может возникать необходимость экстренного торможения, то используется схема ПЧ с дополнительным транзистором и тормозным резистором, который устанавливается вне корпуса ПЧ (рис. 56.30, *а*). Управление транзистором, включающим тормозной резистор, может быть организовано автономно от управления АИН с контролем абсолютного значения напряжения U_d (рис. 56 30, *б*), где $U_{вкл}$ и $U_{откл}$ — уровни срабатывания порогового элемента, управляющего тормозным транзистором, $t_{вкл}$ и $t_{откл}$ — соответственно время его включенного и отключенного состояний

Коэффициент мощности ПЧ с АИН благодаря нерегулируемому выпрямителю на входе близок

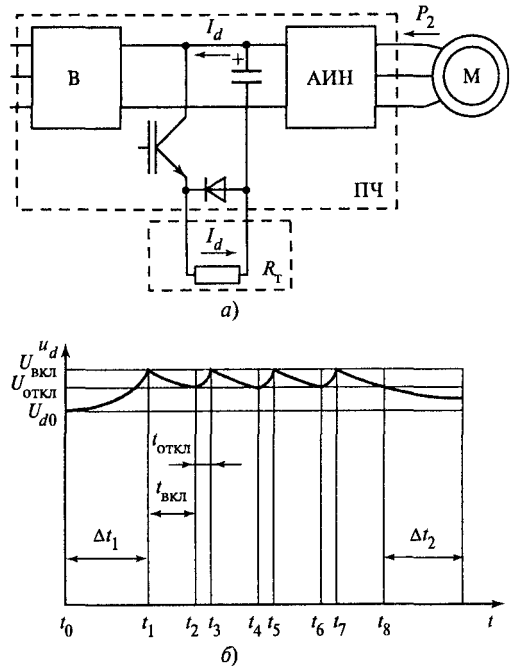


Рис. 56.30. Процесс торможения в ЭП, выполненном на основе ПЧ с АИН:

а — включение тормозного резистора в ПЧ с АИН, *б* — входное напряжение АИН при релейном управлении тормозным транзистором

к единице $k_м = 0{,}92—0{,}96$. Во время работы из сети потребляется в основном активная мощность нагрузки ЭП и мощность потерь в ПЧ и в электродвигателе. Поэтому входной ток уменьшается при уменьшении выходной частоты и выходного напряжения и равен:

$$I_1 \approx \mu I_2 \cos\varphi_{21}/\eta,$$

где η — КПД ПЧ.

Основные достоинства ПЧ с АИН:

широкий диапазон выходных частот (от 0 до 1000 Гц и более);

возможность формирования необходимой кривой тока (обычно синусоидальной);

простота силовой схемы ПЧ.

Недостатки ПЧ с АИН:

нереверсивность при выполнении по основной схеме;

большая скорость изменения напряжения на обмотке двигателя.

Двухзвенный ПЧ с автономным инвертором тока состоит из управляемого выпрямителя (УВ), автономного инвертора тока (АИТ), сглаживающего реактора L и конденсаторов C, являющихся источником реактивной энергии для двигателя (рис. 56.31). В качестве силовых ключей в АИТ используются тиристоры: однооперационные или запираемые. В первом случае конденсаторы одновременно являются коммутирующими элементами (рис. 56.32). Здесь тиристорная группа *T1—T6* — рабочая, тиристорная группа *T7—T12* — коммутирующая. В АИТ, выполненном на запираемых тиристорах, конденсаторы включены на его выходе (рис. 56.33).

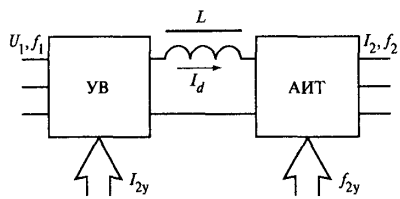


Рис. 56.31. Двухзвенный ПЧ с АИТ

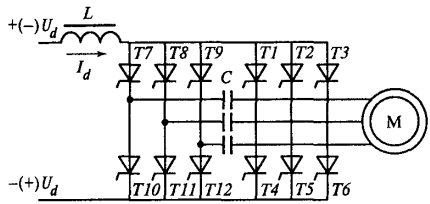


Рис. 56.32. Автономный инвертор тока, выполненный на тиристорах

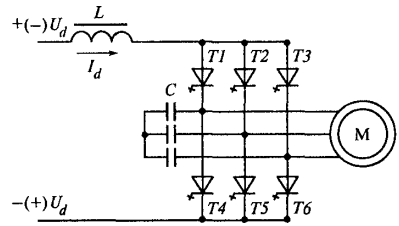


Рис. 56.33. Автономный инвертор тока, выполненный на запираемых тиристорах

В АИТ используется междуфазовая коммутация, при которой одновременно открыты два тиристора: один в анодной группе и один в катодной. Время открытого состояния каждого тиристора равно $T_2/3 = 1/3f_2$. При такой коммутации токи в АИТ соответствуют токам, показанным на рис. 56.34: входной ток при постоянном задании (I_{2y} = const) — постоянный (I_d = const), выходной ток представляет собой импульсы практически прямоугольной формы, амплитуда которых всегда равна входному току $I_{2m} = I_d$. Управляемый выпрямитель в ПЧ с АИТ работает в режиме быстродействующего регулируемого источника тока, от управляющего напряжения которого зависит ток I_d.

Форма тока на выходе АИТ не зависит от частоты f_2, поэтому его гармонический состав, если пренебречь коммутационными интервалами, можно определить по уравнению:

$$i_2 = 1{,}11 I_d (\sin\omega_2 t - 0{,}2\sin 5\omega_2 t + 0{,}14\sin 7\omega_2 t - \ldots),$$

где $\omega_2 = 2\pi f_2$.

Наличие в токе гармоник низкочастотной части спектра вызывает пульсации момента двигателя с частотой $6f_2$ и на низких частотах колебания скорости. Гармонический состав тока улучшается при увеличении длительности коммутационных интервалов, что достигается путем увеличения емкости коммутирующих конденсаторов или конденсаторов на выходе АИТ. Одновременно это уменьшает

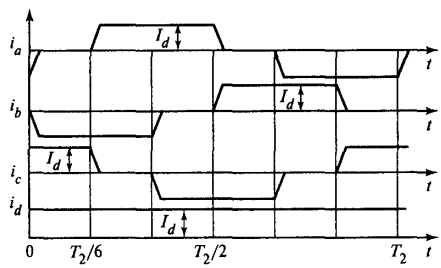


Рис. 56.34. Токи на входе и выходе АИТ

амплитуду коммутационных импульсов напряжения на обмотке двигателя и на элементах АИТ, но приводит к ограничению выходной частоты по верхнему пределу (обычно $f_{2\max} < 100$ Гц) и к ухудшению массогабаритных и стоимостных показателей ПЧ.

Аппаратная симметричность ПЧ с АИТ по отношению к промежуточному контуру постоянного тока (реактору L) обеспечивает его полную реверсивность. При работе двигателя в первом или третьем квадрантах электромеханической характеристики (двигательный режим) полярность напряжения U_d соответствует показанной на рис. 56.32 и 56.33 без скобок (УВ работает в режиме выпрямления, АИТ — в режиме инвертирования). Если двигатель работает в генераторном режиме (второй или четвертый квадранты электромеханической характеристики), то система управления переводит УВ в инверторный режим ($\alpha > \pi/2$), а АИТ — в выпрямительный и напряжение U_d меняет полярность (показана в скобках на рис. 56.32 и 56.33). Изменение полярности напряжения U_d при неизменном направлении тока I_d обеспечивает передачу энергии в питающую сеть. Реактор L обеспечивает режим непрерывного тока, поэтому в ПЧ с АИТ $I_1 \approx I_2$, т.е. входной ток зависит только от выходного тока.

Коэффициент мощности ПЧ с АИТ определяется в основном углом регулирования УВ и меняется в широких пределах.

Преобразователь частоты с АИТ является практически идеальным источником переменного тока с регулируемыми амплитудой и частотой, что делает невозможной работу его в разомкнутой системе ЭП, но обеспечивает возможность прямого управления током двигателя и упрощает синтез частотно-токовых систем управления [56.24]. Так как момент коммутации тока определен системой управления, т.е. АИТ задает не только частоту, но и фазу выходного тока, ПЧ с АИТ удобны для синтеза векторных систем управления.

Основные достоинства ПЧ с АИТ:

полная реверсивность;

достаточно близкая к синусоидальной форма выходного напряжения;

устойчивость к аварийным режимам двигателя.

Недостатки ПЧ с АИТ:

ограниченность диапазона регулирования частоты;

невозможность работы в режиме холостого хода преобразователя;

значительные масса, габаритные размеры и стоимость пассивных элементов (реактора и конденсаторов).

Таблица 56.27. **Условия применения статических ПЧ**

Параметры электропривода	НПЧ	ПЧ с АИН	ПЧ с АИТ
Мощность двигателя:			
100 кВт и менее	–	+	–
0,1—1 МВт	+	+	+
1,0 МВт и более	+	–	+
Частота на выходе ПЧ:			
$f_2 < 50$ Гц	+	+	+
$f_2 = 50$—100 Гц	–	+	+
$f_2 > 100$ Гц	–	+	–
Диапазон регулирования:			
$D < 10{:}1$	+	+	+
$D = 10{:}1$—100.1	+	+	–
$D > 100{:}1$	–	+	–
Режим генераторного торможения	+	–	+
Многодвигательный электропривод	–	+	–

Особенности применения в электроприводе статических ПЧ различных типов. Все рассмотренные типы статических ПЧ находят применение в современных системах управляемого ЭП переменного тока. В табл. 56.27 приведено примерное распределение применения статических ПЧ в зависимости от технологических требований к параметрам ЭП. Указанный в табл. 56.27 диапазон регулирования D подразумевает рабочий диапазон угловых скоростей, в котором обеспечивается выполнение технологических требований по жесткости механических характеристик, перегрузке и т.п.

ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО ЭП С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЧ С АИН

Электрическая функциональная схема ЭП с серийным ПЧ типа АРДН (автоматический регулятор для насосов) приведена на рис. 56.35.

В ПЧ применена наиболее распространенная для управления короткозамкнутым АД схема ПЧ с АИН и ШИМ напряжения на выходе, неуправляемым выпрямителем на входе силовой части схемы и микропроцессорным управлением. При питании от сети 380 В наиболее рациональным является применение в инверторе полупроводниковых приборов нового поколения — биполярных транзисторов с изолированным затвором IGBT.

Основные элементы, входящие в эту схему (рис. 56.35):

UZ — неуправляемый выпрямитель; L_0, C_0 — фильтр; RT — термистор, ограничивающий ток за-

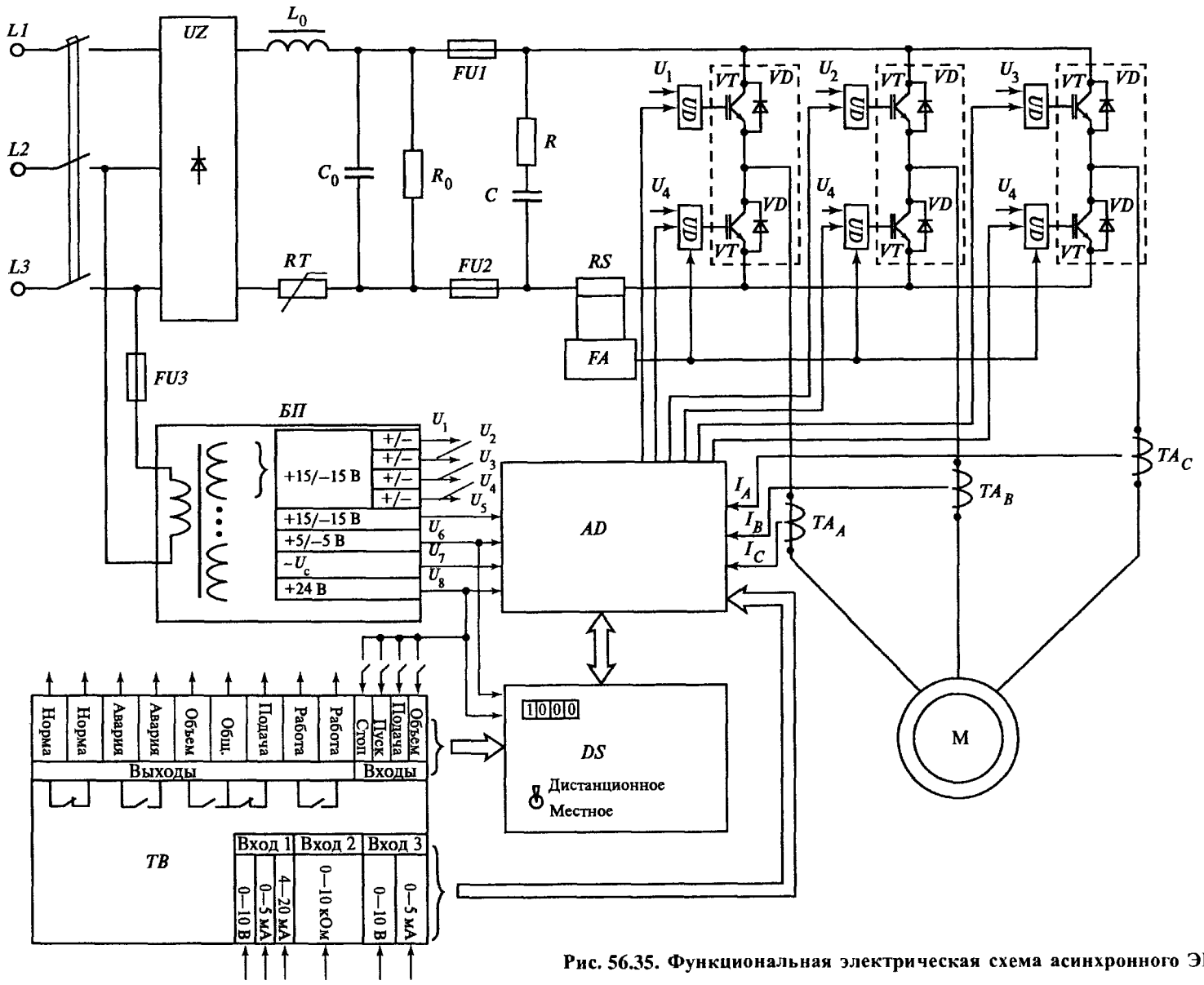


Рис. 56.35. Функциональная электрическая схема асинхронного ЭП с ПЧ

ряда конденсатора C_0; R_0 — разрядное сопротивление для конденсатора C_0; *FU1*, *FU2*, *FU3* — предохранители; *R*, *C* — цепь защиты (снаббер) от перенапряжений на транзисторах IGBT; *RS* — датчик тока для организации защиты (*FA*) от сквозных и недопустимых токов перегрузки через IGBT; *VT*—*VD* — трехфазный инвертор на IGBT с обратным диодным мостом.

Основные блоки в системе управления:

блок питания *БП*, состоящий из восьми гальванически развязанных источников постоянного напряжения;

микроконтроллер *AD* на базе сигнального процессора 1899ВЕ1;

плата индикации *DS* с переключателем способа управления: местное или дистанционное;

блок сопряжения *TB* для работы с внешними сигналами или командами;

согласующие усилители *UD* — драйверы IGBT.

Электропривод работает следующим образом.

При подаче напряжения 380 В на силовой вход ПЧ в звене постоянного тока происходит процесс заряда конденсатора фильтра C_0, который определяется значениями *RT*, L_0, C_0. Одновременно с этим в информационную часть схемы подается питание (напряжения U_1—U_8). В процессе выдержки времени на установление напряжений стабилизированных источников питания U_1—U_4 аппаратная защита *FA* блокирует открывание ключей инвертора и происходит запуск программы управления процессором по аппаратно формируемой команде «Рестарт».

Выполняется инициализация. Производится запись начальных условий в ячейки ОЗУ процессора и определяется способ управления — местное или дистанционное. Если с датчиков тока фаз двигателя TA_A, TA_B, TA_C, аппаратной защиты *FA*, напряжения сети U_c, а также от всех каналов вторичного источника питания поступает информация о нормальных параметрах, то ЭП готов к работе и на цифровой индикатор выводятся нули, светится светоизлучающий диод «Подача». В противном случае загорается светоизлучающий диод «Авария» и на цифровом индикаторе появляется код срабатывания той или иной защиты.

Для управления двигателем процессор формирует систему трехфазных синусоидальных напряжений, изменяемых по частоте и амплитуде, и передает их в модулятор, в котором синусоидальные сигналы управления фазами — «стойками» инвертора, состоящими из последовательно включенных ключей IGBT, преобразуются в дискретные команды включения и отключения транзисторов классическим методом центрированной синусоидальной ШИМ [56.31]. Несущая частота ШИМ составляет от 5 до 15 кГц. Одновременное замыкание двух ключей в «стойке» инвертора блокируется, для учета реального времени запирания транзисторов в процесс переключения вводится «мертвое» время, составляющее единицы микросекунд, в течение которого оба ключа разомкнуты.

Микропроцессор 1899ВЕ1 позволяет реализовать только скалярное управление координатами двигателя. Структура системы автоматического управления технологическим объектом, в которую включен данный ПЧ, может быть самой разнообразной – от разомкнутой системы до замкнутой обратными связями по нескольким сигналам. Алгоритм управления также зависит от требований технологического объекта. Структура и алгоритм могут быть перепрограммированы.

Силовая часть ПЧ неизменна и пригодна для других способов управления координатами электродвигателя с применением более совершенных микропроцессорных средств.

РАСЧЕТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Методика расчета приведена для ПЧ с АИН (см. рис. 56.35), выполненного с использованием гибридных модулей, состоящих из ключей IGBT и обратных диодов FWD, смонтированных в одном корпусе на общей теплоотводящей пластине.

Расчет инвертора. Максимальный ток через ключи инвертора определяется из выражения:

$$I_{c\,max} = \frac{P_{ном} k_1 \sqrt{2}\ k_2}{\eta_{ном} \cos\varphi \sqrt{3}\ U_л}, \qquad (56.3)$$

где $P_{ном}$ — номинальная мощность двигателя, Вт; k_1 = 1,2—1,5 — коэффициент допустимой кратковременной перегрузки по току, необходимой для обеспечения динамики ЭП; k_2 = 1,1—1,2 — коэффициент допустимой мгновенной пульсации тока, $\eta_{ном}$ — номинальный КПД двигателя; $U_л$ — линейное напряжение двигателя, В.

Ключи IGBT выбираются с постоянным (номинальным) током коллектора $I_c \geq I_{c\,max}$.

Расчет потерь в инверторе при ШИМ формировании синусоидального тока на выходе заключается в определении составляющих потерь IGBT

в проводящем состоянии и при коммутации, а также потерь обратного диода.

Потери в IGBT в проводящем состоянии [56.31]

$$P_{SS} = I_{cp} U_{ce(sat)} \left(\frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \cos 0 \right), \quad (56.4)$$

где $I_{cp} = I_{c\max} / k_1$ — максимальная амплитуда тока на входе инвертора, А; $D = t_p / T \approx 0{,}95$ — максимальная скважность; $\cos\theta \approx \cos\varphi$ — коэффициент мощности; $U_{ce(sat)}$ — прямое падение напряжения на IGBT в насыщенном состоянии при I_{cp} и T_j = = 125 °С (типовое значение $U_{ce(sat)}$ = 2,1—2,2 В).

Потери IGBT при коммутации

$$P_{SW} = \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \frac{(I_{cp} U_{cc})(t_{c(on)} + t_{c(off)}) f_{sw}}{2}, \quad (56.5)$$

где $t_{c(on)}$, $t_{c(off)}$ — продолжительность переходных процессов по цепи коллектора IGBT на открывание $t_{c(on)}$ и закрывание $t_{c(off)}$ транзистора, с (типовое значение $t_{c(on)}$ = 0,3—0,4 мкс; $t_{c(off)}$ = 0,6—0,7 мкс); U_{cc} — напряжение на коллекторе IGBT, В (коммутируемое напряжение, равное напряжению звена постоянного тока для системы АИН—ШИМ); f_{sw} — частота коммутаций ключей, Гц (частота ШИМ), обычно от 5000 до 15 000 Гц.

Суммарные потери IGBT

$$P_Q - P_{SS} + P_{SW}. \quad (56.6)$$

Потери диода в проводящем состоянии

$$P_{DS} = I_{ep} U_{ec} \left(\frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \cos\theta \right), \quad (56.7)$$

где $I_{ep} \approx I_{cp}$ — максимальная амплитуда тока через обратный диод, А; U_e — прямое падение напряжения на диоде (в проводящем состоянии) при I_{ep}, В.

Потери при восстановлении запирающих свойств диода

$$P_{DR} = \frac{1}{8} (I_{rr} U_{cc} t_{rr} f_{sw}), \quad (56.8)$$

где I_{rr} — амплитуда обратного тока через диод, А ($I_{rr} \approx I_{cp}$); t_{rr} — продолжительность импульса обратного тока, с (типовое значение 0,2 мкс).

Суммарные потери диода

$$P_D = P_{DS} + P_{DR}. \quad (56.9)$$

Результирующие потери в IGBT с обратным диодом:

$$P_T = P_Q + P_D = P_{SS} + P_{SW} + P_{DS} + P_{DR}. \quad (56.10)$$

Найденные результирующие потери являются основой для теплового расчета инвертора, в ходе которого определяются тип и геометрические размеры необходимого охладителя, а также проверяется тепловой режим работы кристаллов IGBT и обратного диода.

Максимально допустимое переходное сопротивление охладитель—окружающая среда $R_{th(f\text{-}a)}$, °С/Вт, в расчете на пару IGBT/FWD (транзистор/обратный диод)

$$R_{th(f\text{-}a)} \le \frac{T_c - T_a}{P_T} - R_{th(c\text{-}f)}, \quad (56.11)$$

где T_a = 45—50 °С — температура охлаждающего воздуха; T_c = 90—110 °С – температура теплопроводящей пластины; P_T — суммарная мощность, Вт, рассеиваемая одной парой IGBT/FWD; $R_{th(c\text{-}f)}$ — термическое переходное сопротивление корпус—поверхность теплопроводящей пластины модуля в расчете на одну пару IGBT/FWD, °С/Вт.

Температура кристалла IGBT, °С, определяется по формуле

$$T_{ja} = T_c + P_Q R_{th(j\text{-}c)q}, \quad (56.12)$$

где $R_{th(j\text{-}c)q}$ — термическое переходное сопротивление кристалл—корпус для IGBT части модуля, °С/Вт. При этом должно выполняться условие $T_{ja} < 125$ °С.

Температура кристалла обратного диода FWD, °С,

$$T_{jd} = T_c + P_D R_{th(j\text{-}c)d}, \quad (56.13)$$

где $R_{th(j\text{-}c)d}$ — термическое переходное сопротивление кристалл—корпус для FWD части модуля, °С/Вт.

Должно выполняться условие $T_{jd} < 125$ °С.

Если $T_{jd} \ge 125$ °С или опасно приближается к этой максимально допустимой температуре кристалла, то нужно улучшить теплоотдачу за счет использования охладителя с меньшим значением сопротивления $R_{th(f\text{-}a)}$, т.е. задавшись меньшей температурой корпуса T_c.

Расчет выпрямителя. Среднее выпрямленное напряжение

$$U_d = k_{с.н} U_л, \quad (56.14)$$

где $k_{с.н}$ — коэффициент схемы для номинальной нагрузки; $k_{с.н}$ = 1,35 для мостовой трехфазной схемы; $k_{с.н}$ = 0,9 для мостовой однофазной схемы.

Максимальное значение среднего выпрямленного тока

$$I_{dm} = \frac{\sqrt{3}\left(\frac{I_{c\max}}{\sqrt{2}}\right) U_{л} \cos\varphi + nP_T}{U_d}, \quad (56.15)$$

где n — количество пар IGBT/FWD в инверторе.

Максимальный рабочий ток диода

$$I_{\nu m} = k_{cc} I_{dm}, \quad (56.16)$$

где k_{cc} = 1,045 для мостовой трехфазной схемы при оптимальных параметрах Г-образного LC-фильтра, установленного на выходе выпрямителя; k_{cc} = 1,57 для мостовой однофазной схемы.

Максимальное обратное напряжение диода (для мостовых схем)

$$U_{\nu m} = k_{з.н}\sqrt{2}\ U_{л} k_{с.н} k_{с} + \Delta U_n, \quad (56.17)$$

где $k_{с} \geq 1{,}1$ — коэффициент допустимого повышения напряжения сети; $k_{з.н} \geq 1{,}15$ — коэффициент запаса по напряжению; $\Delta U_n \approx$ 100—150 В — запас на коммутационные выбросы напряжения в звене постоянного тока.

Диоды выбираются по постоянному рабочему току (не менее $I_{\nu m}$) и по классу напряжения (не менее $U_{\nu m}/100$).

Расчет потерь в выпрямителе для установившегося режима работы ЭП ($I_d = I_{dm}/k_1$):

$$P_{DV} = m_{\nu} k_{cs}\left(U_j + R_{on}\frac{I_{dm}}{k_1}\right)\frac{I_{dm}}{k_1}, \quad (56.18)$$

где k_{cs} = 0,577 для мостовой трехфазной схемы; k_{cs} = 0,785 для мостовой однофазной схемы; R_{on} — динамическое сопротивление полупроводникового прибора в проводящем состоянии, Ом; U_j — прямое падение напряжения, В, на полупроводниковом приборе при токе 50 мА ($U_j + R_{on} I_{dm}/k_1 \leq 1$ В для диода или 1,3 В для тиристора); m_{ν} — число полупроводниковых приборов в схеме.

Тепловой расчет параметров охладителя выпрямителя следует проводить аналогично приведенному выше расчету для инвертора.

Максимально допустимое переходное сопротивление охладитель—окружающая среда в расчете на выпрямитель

$$R_{th(f\text{-}a)} \leq \frac{T_c - T_a}{P_{DV}} - R_{th(c\text{-}f)}, \quad (56.19)$$

где $R_{th(c\text{-}f)}$ — термическое переходное сопротивление корпус—поверхность теплопроводящей пластины модуля, °С/Вт.

Если не все полупроводниковые приборы моста размещены в одном модуле, то необходимо P_{DV} привести к числу приборов, расположенных в одном корпусе.

Температура кристалла

$$T_{jDV} = T_c + \frac{P_{DV}}{n_D} R_{th(j\text{-}c)DV}, \quad (56.20)$$

где $R_{th(c\text{-}f)DV}$ — термическое переходное сопротивление кристалл—корпус для одного полупроводникового прибора модуля, °С/Вт; n_D — количество полупроводниковых приборов в модуле.

Необходимо, чтобы выполнялось условие: $T_{jDV} < 140$ °С.

Расчет параметров охладителя. Расчет параметров охладителя проводится в соответствии с рекомендациями, изложенными в [56.32].

Предварительно определяется требуемое суммарное переходное тепловое сопротивление охладитель—окружающая среда в расчете на суммарную мощность, выделяемую всеми устанавливаемыми на данный охладитель силовыми полупроводниковыми приборами (модулями). При установке модулей (выпрямитель, инвертор) на общий охладитель требуемое сопротивление определяется аналогично суммарному сопротивлению при параллельном включении резисторов:

$$R_{th(f\text{-}a)} = \frac{R_{th(f\text{-}a)1} R_{th(f\text{-}a)2}}{R_{th(f\text{-}a)1} + R_{th(f\text{-}a)2}}. \quad (56.21)$$

Как правило, на один охладитель удается установить все приборы при мощности инвертора до 55 кВт. Критерием перехода к применению двух и более охладителей служит длина требуемого профиля охладителя, которая для эффективного использования поверхности профиля должна быть не более 1 м.

Площадь охладителя (рис. 56.36), наиболее широко применяемого в рассматриваемых ПЧ, участвующая в излучении тепла, определятся по формуле:

$$A_{rad} = 2d(b + h), \quad (56.22)$$

где d, b и h — габаритные размеры профиля.

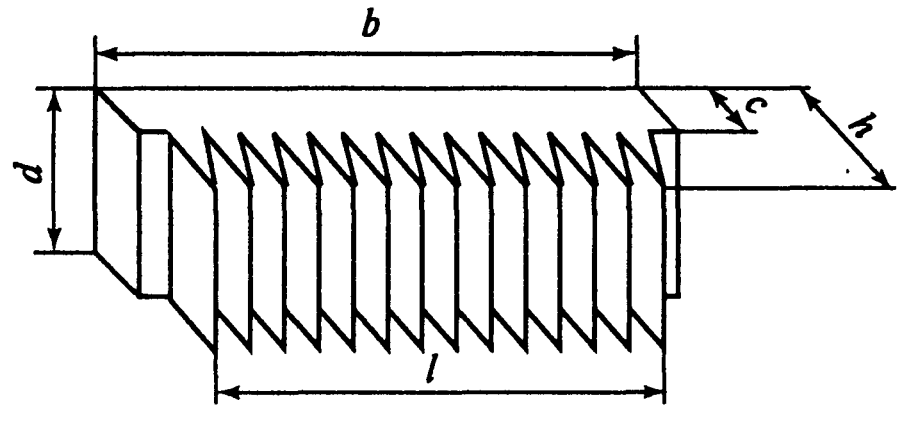


Рис. 56.36. Охладитель (гребенка)

Площадь данного охладителя, участвующая в конвекции,

$$A_{conv} = 2d[b + m(h - c)], \qquad (56.23)$$

где m - число ребер.

Переходное сопротивление излучению тепла

$$R_{Qrad} = \frac{\Delta T}{5{,}1 E A_{rad}\left[\left(\frac{T_c}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_a}{100}\right)^4\right]}, \qquad (56.24)$$

где T_c — температура поверхности охладителя, К; T_a — температура окружающего воздуха, К; $\Delta T = T_c - T_a$; E — коэффициент излучения поверхности ($E = 0{,}8$ для алюминия).

Переходное температурное сопротивление теплопередачи конвекцией (при $d < 1$ м)

$$R_{Qconv} = \frac{1}{1{,}34 A_{conv} F_{red}}\left(\frac{d}{\Delta T}\right)^{0{,}25}, \qquad (56.25)$$

где F_{red} — коэффициент ухудшения теплоотдачи (конвекции) [56.32] при расстоянии между ребрами охладителя 20 мм и менее. График зависимости F_{red} от расстояния между ребрами дан на рис. 56.37.

Переходное температурное сопротивление охладитель—окружающая среда при естественном охлаждении

$$R_{th(f\text{-}a)} = \frac{R_{Qrad} R_{Qconv}}{R_{Qrad} + R_{Qconv}}. \qquad (56.26)$$

Следовательно, для данного типа охладителя имеем следующую зависимость:

$$R_{th(f\text{-}a)} = \frac{BCd^{0{,}25}}{Ad(C + Bd^{0{,}25})} = f(d), \qquad (56.27)$$

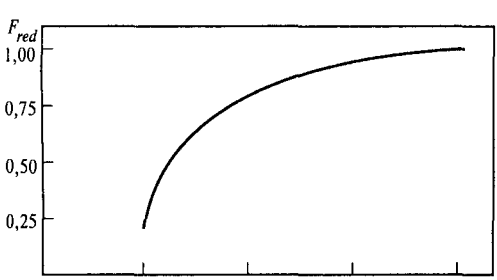


Рис. 56.37. Зависимость коэффициента F_{red} ухудшения конвекции от расстояния между ребрами охладителя

где A, B, C — коэффициенты, получаемые при подстановке (56.24) и (56.25) в (56.26).

Температурное сопротивление является при прочих неизменных условиях нелинейной функцией длины охладителя d при расположении ребер вертикально. Для конкретного типа охладителя требуется рассчитать зависимость $R_{th(f\text{-}a)} = f(d)$ и выбрать длину охладителя d так, чтобы температурное сопротивление было не более расчетного значения (56.19) для всех приборов, установленных на охладителе. Например, для ПЧ на мощность двигателя 55 кВт $R_{th(f\text{-}a)} \approx 0{,}03$ °С/Вт, а на мощность двигателя 2,2 кВт — $R_{th(f\text{-}a)} \approx 0{,}8$ °С/Вт.

Ряд фирм, производящих профили для охладителей, дают на свою продукцию зависимости $R_{th(f\text{-}a)} = f(d)$ или значения $R_{th(f\text{-}a)}$ на единицу длины профилей, а также зависимости $R_{th(f\text{-}a)}$ от скорости охлаждающего воздуха. При скорости охлаждающего воздуха 3 м/с тепловое переходное сопротивление уменьшается в среднем в 1,7—2 раза. Следовательно, по сравнению с расчетной длиной профиля для естественного охлаждения длина охладителя при принудительном воздушном охлаждении со скоростью воздуха 3 м/с может быть уменьшена также в 1,7—2 раза.

Расчет фильтра. Коэффициент пульсаций на входе фильтра (отношение амплитуды напряжения к среднему значению)

$$q_{1\text{вх}} = \frac{2}{m^2 - 1}, \qquad (56.28)$$

где m — пульсность схемы выпрямления ($m = 6$ для трехфазной мостовой схемы, $m = 2$ для однофазной мостовой схемы).

Параметр сглаживания LC-фильтра

$$L_0 C_{01} = \frac{S + 1}{(2\pi m f_s)^2}, \qquad (56.29)$$

где $S = q_{1\text{вх}}/q_{1\text{вых}}$ — коэффициент сглаживания по первой гармонике; f_s — частота сети, Гц.

Параметр сглаживания C-фильтра

$$L_s C_{02} = \frac{S + 1}{(2\pi m f_s)^2}, \qquad (56.30)$$

где L_s — индуктивность сети, Гн, приведенная к звену постоянного тока.

Значения коэффициента сглаживания S лежат в диапазоне от 3 до 12.

Индуктивность дросселя LC-фильтра для обеспечения коэффициента мощности на входе выпря-

мителя $K_м = 0{,}95$ в [56.32] определяется из следующих условий:

$$L_0 \geq 3L_{0\min}; \qquad (56.31)$$

$$L_{0\min} \approx \frac{0{,}013\,U_д}{2\pi f_s I_d}, \qquad (56.32)$$

где I_d — номинальный средний ток звена постоянного тока.

В [56.31] был сделан вывод о том, что в трехфазных инверторах с ШИМ по синусоидальному закону реактивная энергия полностью скомпенсирована по выходной частоте. Это означает, что $K_м$ зависит преимущественно (без учета запаздывания открывания полупроводниковых приборов) от индуктивности фильтра L_0 и индуктивности питающей сети L_s, зависимость $K_м = f(L_0/L_{0\min})$ для трехфазного мостового выпрямителя приведена на рис. 56.38.

Значение минимальной индуктивности $L_{0\min}$ фильтра определяется из (56.31).

Из рис. 56.38 видно, что для обеспечения $K_м = 0{,}95$ необходимо иметь индуктивность дросселя фильтра $L_0 \approx 3L_{0\min}$.

Емкость конденсаторов, необходимая для протекания реактивного тока нагрузки инвертора, находится из выражения:

$$C_{03} = \frac{\sqrt{3}\,I_{sm1}\sin^2\left(\frac{\varphi_1}{2} - \frac{\pi}{12}\right)}{2U_d f_{sw} q_1}, \qquad (56.33)$$

где I_{sm1} — амплитудное значение тока в фазе двигателя, А; φ_1 — угол сдвига между первой гармоникой фазного напряжения и фазного тока; q_1 — коэффициент пульсаций; f_{sw} — частота ШИМ, Гц.

После выбора типа фильтра (*LC* или *C*) рассчитывается емкость конденсаторов C_{01} или C_{02} и сравнивается с емкостью C_{03}, рассчитанной по (56.33). Для практической реализации фильтра используют конденсаторы с наибольшим значением емкости C_{0i} ($i = 1$, 2 или 3).

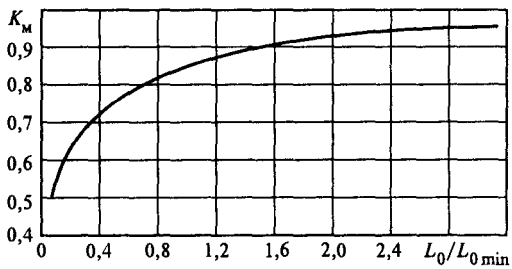


Рис. 56.38. Зависимость $K_м = f(L_0/L_{0\min})$ для трехфазного выпрямителя

Амплитуда тока, протекающего через конденсаторы фильтра на частоте пульсаций выпрямленного тока (по первой гармонике)

$$I_{C0m} = q_{1вых} U_d \cdot 2\pi m f_s C_{0i}. \qquad (56.34)$$

Далее в зависимости от значения C_{0i} и амплитуды тока формируется батарея конденсаторов с емкостью C_{0i} и более, допустимым по амплитуде током I_{C0m} и более и напряжением 800 В и более для трехфазной мостовой схемы или 400 В для однофазной мостовой схемы выпрямителя. Запас по току принимается в зависимости от требуемого ресурса работы инвертора.

Некоторые фирмы, производящие электролитические конденсаторы, дают более подробную информацию по выбору конденсаторов по току. Например, для конденсаторов, изготовляемых по стандарту IEC 384-4, имеем допустимое амплитудное значение тока (при $T = 85$ °C и $f = 100$ Гц) $I = 3{,}1$ А при следующих номинальных параметрах: $U = 450$ В, $C = 470$ мкФ. В каталоге фирмы «Siemens Matsushita Components» для электролитических конденсаторов приведена зависимость поправочного коэффициента от частоты для приведения тока к частоте $f_i = 100$ Гц (табл. 56.28).

Например, для ПЧ на мощность двигателя 55 кВт $C_{0i} = 5540$ мкФ (32 конденсатора с номинальными параметрами: 680 мкФ, 400 В, включенных парами последовательно для повышения рабочего напряжения — всего 16 пар, которые включены параллельно для получения заданной емкости), а на мощность 2,2 кВт $C_{0i} = 235$ мкФ (2 конденсатора с параметрами 470 мкФ, 400 В, включенных последовательно). Применяются также электролитические конденсаторы на большие емкости и большие токи, например конденсаторы Rifa (4700 мкФ, 450 В) допускают амплитудное значение переменной составляющей тока: на 100 Гц — 14,8 А и на 10 кГц — 34,9 А и классифицируются как приборы Long Life (10 лет службы). Однако по цене и удобству распределенного размещения электролитических конденсаторов в ПЧ в целях уменьшения ин-

Таблица 56.28. **Зависимость поправочного коэффициента от частоты для приведения тока к частоте $f_i = 100$ Гц**

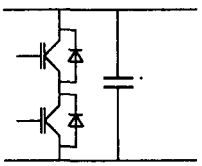
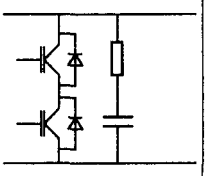
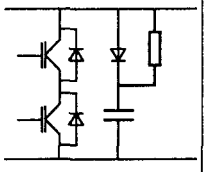
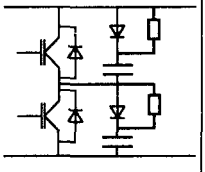
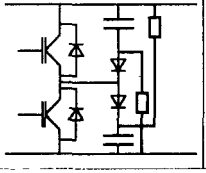
Частота, Гц	90	100	400	800	1000	2000
Поправочный коэффициент	0,8	1,0	1,2	1,3	1,35	1,4

дуктивности монтажа, по ремонтопригодности и доступности приобретения «батарея» из «мелких» конденсаторов может оказаться более предпочтительной, чем из «крупных» конденсаторов.

Расчет снаббера. Так как IGBT коммутируется с высокой скоростью, то напряжение U_{CE} быстро возрастает, особенно при запирании транзистора, и может достигнуть критического значения, способного вызвать пробой либо коллектора либо затвора транзистора (последнее возможно, если индуктивность цепей управления IGBT велика). Чтобы минимизировать превышение напряжения (перенапряжение) и предотвратить аварию IGBT, требуется установка снаббера (демпфирующей цепи). Типичные схемы снабберов и их особенности рассмотрены в табл. 56.29.

Для указанных схем необходимо выбирать конденсатор с хорошими высокочастотными характеристиками, малой собственной индуктивностью, высокими допустимыми импульсными токами и малым тангенсом угла потерь, например, К78-2 или Э63К.

Таблица 56.29. **Типичные схемы снабберов и их особенности**

№ п/п	Схема	Особенности
1		1. Малое число элементов 2. Короткий провод снаббера 3. Большие пульсации тока через электролитический конденсатор
2		1. Малое число элементов 2. Более длинный провод снаббера, чем в схеме 1 3. Малые пульсации тока через электролитический конденсатор
3		1. Малое число элементов 2. Низкие потери мощности 3. Подходит для конденсаторов средней и малой емкости
4		1. Большое число элементов 2. Большие потери 3. Перенапряжения могут быть эффективно ограничены
5		1. Большое число элементов 2. Низкие потери 3. Подходит для конденсаторов большой емкости

Сопротивление резистора зависит от емкости конденсатора C и частоты коммутации IGBT f_{sw}. Расчетные формулы для выбора мощности резисторов цепей снабберов приведенных в табл. 56.29 схем имеют следующий вид:

схемы 2, 3 и 5

$$P = 0{,}5C\,\Delta U^2 f_{sw}; \qquad (56.35)$$

схема 4

$$P = 0{,}5C\,(U + \Delta U)^2 f_{sw}, \qquad (56.36)$$

где U — напряжение коллектор—эмиттер в установившемся режиме, В, которое равно напряжению звена постоянного тока преобразователя системы АИН с ШИМ; ΔU — перенапряжение, В (рис. 56.39).

Выбор сопротивления резистора производится из условия минимума колебаний тока коллектора при включении IGBT:

$$R \geq 2\sqrt{\frac{L_{sn}}{C}}, \qquad (56.37)$$

где L_{sn} — индуктивность цепей снаббера, Гн, которая должна быть 10 нГн или менее; C — емкость снаббера, Ф.

Ток, протекающий через диод снаббера, импульсный. Он почти равен отключаемому току коллектора и длится до 1 мкс.

Отношение максимума тока через диод снаббера к среднему около (20—50) : 1. Диод должен быть высокочастотным со временем восстановления запирающих свойств $t_{rr} = 0{,}3$ мкс и менее.

Значение ΔU зависит от многих факторов, оно не должно превышать 60 В. Так, для схем в табл. 56.29 можно отметить следующее:

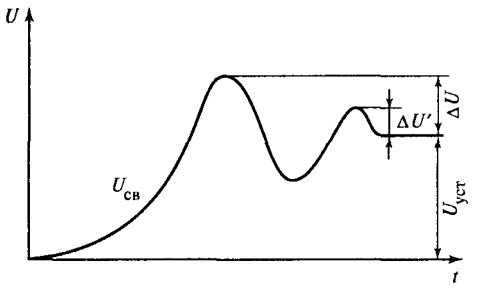


Рис. 56.39. Напряжение на коллекторе IGBT при его запирании

бросок напряжения ΔU (см. рис. 56.39) при запирании модуля определяется как параметрами схемы, так и характеристиками IGBT, поэтому ΔU не может быть выражен математически;

ΔU зависит от индуктивности L_1 проводов между электролитическим конденсатором и снаббером (значение L_1 должно быть 50 нГн или менее);

ΔU существенно зависит от индуктивности L_2 цепей снаббера (значение L_2 должно быть 10 нГн или менее);

ΔU незначительно зависит от сопротивления резистора R_g на входе затвора и от температуры;

ΔU не определяется емкостью снаббера.

Следовательно, для ограничения ΔU важно ограничить индуктивности L_1 и L_2 путем уменьшения длины проводов и их бифилярного монтажа.

Емкость конденсатора снаббера определяется напряжением второго броска $\Delta U'$ (см. рис. 56.39), который не должен превышать 25 В. Выражение для расчета емкости представляется в виде:

$$C \approx L_1 (IC/\Delta U')^2, \qquad (56.38)$$

где L_1 — индуктивность проводов между электролитическим конденсатором и IGBT-модулем; I_C — отключаемый ток.

Хотя емкость конденсатора снаббера определяется значением индуктивности L_1 и может быть рассчитана по (56.38), окончательно уточнить значение емкости C можно, установив модуль и определив перенапряжение. Типичное значение емкости снаббера составляет 1 мкФ на 100 А коммутируемого транзистором IGBT тока.

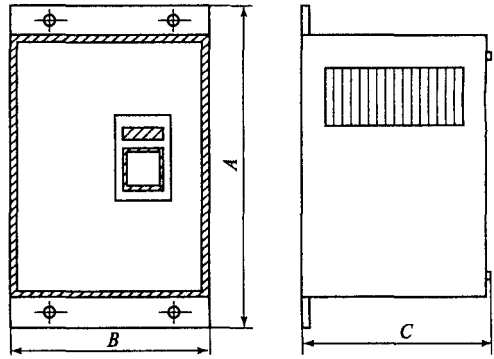


Рис. 56.40. Габаритные размеры ПЧ «Универсал»



Рис. 56.41. Габаритные размеры ПЧ и сопрягающих модулей МС серии «КЭУ»

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Преобразователи частоты (рис. 56.40—56.42) выпускаются сотнями фирм во всем мире в различных исполнениях, в диапазоне мощностей от долей киловатт до десятков мегаватт. Приведенные далее технические данные охватывают лишь небольшую часть низковольтных ПЧ (до 1000 В) общего назначения, выпускаемых отечественными и зарубежными производителями (табл. 56.30—56.56). Сведения о высоковольтных и мощных ПЧ можно найти в каталогах таких фирм, как «Siemens», «ABB», «General Electric», «Allen Bradley» и др.

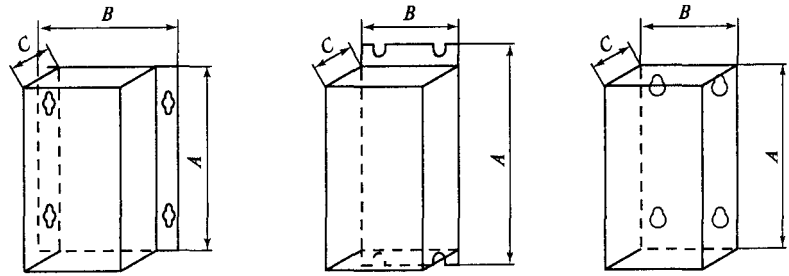


Рис. 56.42. Кодировка размеров ПЧ VLT серии 3000

Преобразователи частоты «Универсал» (производство Института биологического приборостроения РАН, Россия)

Таблица 56 30 **Технические данные ПЧ «Универсал»**

Выход	Число фаз	3
	Выходное напряжение, В	0 — напряжение питающей сети
	Диапазон выходных частот, Гц	0,5 –512
	Диапазон регулирования скорости в разомкнутой системе в замкнутой системе	 1 50 1 100
	Принцип управления	Закон управления U/f
	Способ модуляции	Синусоидальная центрированная ШИМ
	Тактовая частота ШИМ, кГц	4,8
Вход	Число фаз	3
	Напряжение питающей сети, В	380 ± 20 %
	Частота питающей сети, Гц	50 (60)
	Коэффициент мощности, $\cos\varphi$	0,95
	Коэффициент полезного действия	0,97 при нагрузке 100 %
Рабочие функции	Задание частоты или технологической переменной	Числовое задание с пульта оператора Потенциометр (10 кОм) 0—5 В, 0—10 В, ±5 В, ±10 В 0—5 мА, 4—20 мА Последовательный канал связи RS-232
	Уставки задания частоты или технологической переменной	Восемь постоянных настраиваемых уставок, выбор через дискретные входы
	Дискретность задания частоты, Гц	Аналоговые входы 0,02 для 100 Гц (максимум) Остальные источники 0 015
	Подача команд «Пуск» («Стоп»), «Запрет работы», «Реверс»	С пульта оператора Через дискретные входы По последовательному каналу связи RS 232
	Тахограммы разгона (замедления)	Линейная или S-образная Выбор одного или двух уровней интенсивностей (отдельно для разгона и для замедления) Выбор начальной частоты пуска
	Торможение	Блокировка инвертора и выбег двигателя Программное торможение до минимальной частоты Динамическое торможение (торможение постоянным током)
	Подключение внешних устройств	Подключение внешнего тормозного резистора для приема энергии торможения Управление механическим тормозом
	Регулятор технологической переменной	Встроенный ПИД-регулятор с возможностью коррекции по возмущению (ввод положительной обратной связи) Настраивается каждая составляющая
	Встроенные функции работа со станциями группового управления (СГУ) производства ИБП РАН	Двунаправленное взаимодействие между СГУ и ПЧ посредством входных и выходных дискретных сигналов Автоматическое обеспечение резерва от ПЧ или от сети Взаимодействие с системой автоматики центрального теплового пульта (БАТ, «Мастер») Плавный перевод двигателя с сети на ПЧ и обратно
Сервисные функции	Повторный пуск двигателя	Автоматический повторный пуск после некоторых видов аварий, количество перезапусков настраивается Настройка времени выбега двигателя (до 4 мин) для защиты от пуска еще не остановившегося двигателя «Подхват» двигателя — перезапуск вращающегося двигателя с той же частоты
	Банк аварийных ситуаций	Для контроля и диагностики работы привода во внутреннем ОЗУ запоминаются 20 последних аварийных ситуаций

Окончание табл. 56.30

Сервисные функции	Исключение резонансных зон	Настройка двух диапазонов запрещенных для работы частот
	Режимы коррекции	Коррекция выходного напряжения в зависимости от напряжения питающей сети Коррекция интенсивности набора частоты при увеличении фазного тока Коррекция интенсивности снижения частоты при увеличении напряжения в звене постоянного тока Коррекция задания выходной частоты (в установившемся режиме) при увеличении фазного тока
	Повышение крутящего момента при пуске	Кратковременное увеличение выходного напряжения для преодоления повышенного момента трогания
Защитные функции	Защиты преобразователя	Быстродействующая аппаратная защита силовых ключей От понижения или повышения напряжения в звене постоянного тока От неправильной работы входного тиристорного выпрямителя При пропадании питания От короткого замыкания на корпус
	Защиты двигателя	Максимально-токовая От обрыва фазы, перекоса фаз Тепловая защита
Опции	Внешние	Возможность подключения датчика температуры двигателя
	Внутренние	Возможность программного изменения во времени задания на частоту или технологическую переменную; настройка циклограмм (программ циклического формирования уставки задания в реальном времени) с пульта оператора Возможность архивирования (сброса во внутреннюю память) параметров технологического процесса для последующей диспетчеризации и анализа Цифровое осциллографирование внутренних переменных ЭП и параметров технологического процесса Возможность объединения ПЧ в локальную промышленную сеть стандарта RS-485 (двухпроводная линия) для согласованного управления несколькими рабочими станциями
Исполнение	Стандарт защиты	IP20
	Температура окружающей среды, °С	При полной нагрузке от 0 до +40 При транспортировке и хранении от –20 до +40
	Сертификация	РСт

Таблица 56.31. **Типоразмеры ПЧ «Универсал»**

Технические данные	Типоразмер											
	15	18,5	22	30	37	45	55	75	110	160	220	320
Номинальная мощность двигателя (M = const), кВт	15	18,5	22	30	37	45	55	75	110	160	220	320
Номинальный ток преобразователя (M = const), А	31	38	43	57	71	86	110	144	216	325	432	650
Допустимая перегрузка (M = const)	150 % номинального тока ПЧ в течение 1 мин											
Номинальная мощность двигателя ($M \sim n^2$), кВт	20,8	25,6	29	38	51	58	74	110	150	220	300	440
Номинальный ток преобразователя ($M \sim n^2$), А	39	40	54	71	96	108	138	216	288	432	576	864
Допустимая перегрузка ($M \sim n^2$)	120 % номинального тока ПЧ в течение 1 мин											
Габаритные размеры (рис. 56.40), мм:												
высота A	520	600	670	670	850	1000	750	900	1300	1000	1300	1000
ширина B	340	340	340	340	340	340	600	600	600	600	1200	1200
глубина C	320	320	320	320	320	320	580	580	580	750	580	750
Масса, кг	24	30	35	45	60	70	80	110	160	240	300	400

Преобразователи частоты серии «КЭУ» (производство ОПЗ МЭИ, Россия)

В состав КЭУ входят ПЧ и сопрягающий модуль (МС), обеспечивающий автоматическое переключение двигателя рабочего механизма на питающую сеть и отключение КЭУ при срабатывании любой из его защит

Таблица 56 32 Технические данные ПЧ серии «КЭУ»

Выход	Число фаз	3
	Номинальное напряжение, В	380
	Номинальная частота, Гц	50
	Диапазон регулирования напряжения, В	0 — напряжение питающей сети
	Дискретность регулирования напряжения, %	0,8
	Диапазон регулирования частоты, Гц	2—60
	Дискретность регулирования частоты, Гц	0,05
	Дискретность ввода частоты с пульта оператора, Гц	0,5
	Диапазон регулирования скорости в разомкнутой системе	1 10
	Принцип управления	Скалярный
	Способ модуляции	Синусоидальная центрированная ШИМ
	Тактовая частота ШИМ, кГц	3—8
Вход	Число фаз	3
	Напряжение питающей сети, В	380 + 10 %, 380 – 15 %
	Частота питающей сети, Гц	50 (60)
Рабочие функции	Плавный частотный пуск и торможение двигателя с заданным темпом Реверс (без отдачи энергии в сеть) Поддержание частоты вращения на заданном уровне Регулирование частоты вращения в заданном диапазоне Автоматическое поддержание заданного значения технологического параметра Автоматическое повторное включение после аварийного отключения Отработка предварительно заданной временной диаграммы работы ЭП	
Защитные функции — защиты ПЧ и двигателя		Максимальная токовая От превышения напряжения на силовых транзисторных ключах От недопустимого снижения питающего напряжения или его исчезновения От неисправностей в системе питания цепей управления От превышения температуры охладителя От обрыва фазы
Опции	Внешние	Возможность подключения внешнего тормозного блока для приема энергии торможения, подключения внешнего датчика температуры двигателя Блок МС позволяет подключать автоматически два или три насоса раздельно подключать автоматически датчики технологических параметров осуществлять связь с системой автоматики центрального теплового пульта (БАТ, «Мастер» и др.) осуществлять связь с системой телеметрии диспетчерской осуществлять дистанционное управление резервным насосом с одновременным отключением КЭУ
	Внутренние	Возможность подключения компьютера через последовательный порт RS-232
Исполнение	Стандарт защиты	IP21
	Температура окружающей среды, °С	При полной нагрузке от 0 до +40 При транспортировке и хранении от –40 до +60

Таблица 56 33 **Типоразмеры ПЧ и сопрягающих модулей МС серии «КЭУ»**

Технические данные	Типоразмер			
	КЭУ 15		КЭУ 37	
Номинальная мощность двигателя (M = const), кВт	11—22		30—45	
Номинальный ток преобразователя (M = const), А	22—45		60 – 90	
Допустимая перегрузка (M = const)	120 % номинального тока ПЧ в течение 1 мин			
Габаритные размеры (рис 56 41), мм	ПЧ	МС	ПЧ	МС
высота a	370	370	398	398
ширина b	672	624	895	895
глубина c	347	347	276	276
Масса, кг	40	20	60	30

Преобразователи частоты «Сапфир»
(производство НПП «Сапфир», Россия)

Таблица 56 34 **Технические данные ПЧ «Сапфир»**

Выход	Число фаз	3
	Номинальное напряжение, В	380
	Номинальная частота, Гц	50
	Диапазон регулирования напряжения, В	10—380
	Диапазон регулирования частоты, Гц	2—50
Вход	Число фаз	3
	Напряжение питающей сети, В	350—450
	Частота питающей сети, Гц	50 (60) ± 5 %
Рабочие функции	Плавный частотный пуск и торможение двигателя с заданным темпом Динамическое торможение Поддержание частоты вращения на заданном уровне Регулирование частоты вращения в заданном диапазоне Автоматическое поддержание заданного значения технологического параметра Аварийное отключение и диагностика Автоматическое повторное включение после аварийного отключения	
Защитные функции — защиты ПЧ и двигателя		Максимальная токовая Времятоковая От неполнофазного режима работы входной или выходной фаз От понижения или повышения напряжения в цепи постоянного тока Тепловая защита ПЧ От исчезновения питания контроллера От продолжительной работы на резонансных для двигателя частотах
Опции внутренние		Возможность подключения компьютера через последовательный порт RS-232
Исполнение	Стандарт защиты	IP21
	Температура окружающей среды, °С	При полной нагрузке от –10 до +45

Таблица 56 35 **Типоразмеры ПЧ «Сапфир»**

Технические данные	Типоразмер									
	Р 5,5	Р 7,5	Р 10	Р 15	Р 22	Р 30	Р 55	Р 75	Р 90	Р 110
Номинальная мощность двигателя, кВт	5,5	7,5	10	15	22	30	55	75	90	110
Номинальный ток преобразователя, А	10	16	20	30	45	60	110	150	185	225
Габаритные размеры, мм										
высота	304	304	505	505	666	605	820	920	1050	1200
ширина	438	438	455	455	455	455	470	470	470	450
глубина	194	194	250	250	250	250	270	360	360	360
Масса, кг	14	15	20	22	30	32	48	60	75	90

Преобразователи частоты серии АТ (производство корпорации «Триол», Россия)

Таблица 56 36 Технические данные ПЧ серии АТ

Выход	Число фаз	3
	Номинальное напряжение	380[*1] В 3[*2], 6 или 10 кВ
	Номинальная частота, Гц	50 (100)
	Диапазон регулирования напряжения, В	0 — напряжение питающей сети ±2 %
	Дискретность регулирования напряжения, %	2
	Диапазон регулирования частоты, Гц	0,5—50 (100) ± 0,1 %
	Дискретность регулирования частоты, Гц	0,005
Вход	Число фаз	3
	Напряжение питающей сети	380[*3] В + 10 %, 380 В – 15 % 380[*4] В, 3, 6 или 10 кВ
	Частота питающей сети, Гц	50 (60)
Рабочие функции	Команды «Пуск» («Стоп»)	Подача команд с пульта Подача команд через дискретные входы
	Автоматический повторный пуск при обнаружении аварии или ошибки	Для некоторых видов аварийных ситуаций
	Регулятор технологической переменной	Использование встроенного программного ПИД-регулятора и соответствующего датчика технологического параметра Работа по таймеру с регулированием заданных программно значений параметра в интервалах реального времени
Защитные функции — защиты ПЧ и двигателя		От токов недопустимой перегрузки и короткого замыкания От замыкания на землю От неполнофазного режима работы входных и выходных цепей От перенапряжения на силовых элементах схемы От недопустимых отклонений регулируемого (в автоматическом режиме) технологического параметра От неисправностей системы питания и сбоев системы управления
Опции	Внешние	Имеется специальный потенциально изолированный источник постоянного напряжения 24 В, 0,2 А для обслуживания внешних информационно управляющих цепей
	Внутренние	Четыре дискретных входа (10 мА) Два аналоговых входа Четыре—восемь релейных выходов Два аналоговых выхода Возможность подключения портативного компьютера через последовательный порт RS-232 Создание локальной промышленной сети для согласованного управления несколькими рабочими станциями через последовательный порт RS-485
Исполнение	Стандарт защиты	IP00 IP21 IP54
	Температура окружающей среды, °С	При полной нагрузке от +1 до +40 При транспортировке и хранении от –40 до +60

[*1] Серии АТО1, АТО2, АТО4

[*2] Серия АТО3

[*3] Серии АТО1, АТО2, АТО4

[*4] Серия АТО3

Таблица 56.37 Типоразмеры ПЧ серии АТ

Технические данные	Типоразмер АТО1-										
	15	22	37	55	75	110	132	160	200	250	315
Номинальная мощность двигателя, кВт	11—15	17—22	30—37	45—55	75	90—110	132	160	180—200	250	315
Номинальный ток ПЧ, А	30	45	75	110	150	220	260	320	400	500	600
Допустимая перегрузка по току	120 % номинального тока ПЧ в течение 120 с										
Габаритные размеры, мм											
высота	520	615		900		1200				1600	
ширина	405	405		465		560				600	
глубина	310	320		330		450				450	
Масса, кг	40	45	48	60	65	90	110	110	130	180	200

Продолжение табл. 56.37

Технические данные	Типоразмер АТО2 -														
	5,5	7,5	11	15	22	37	55	75	90	110	132	160	200	250	315
Номинальная мощность двигателя, кВт	4,5—5,5	7,5	11	15	17—22	30—37	45—55	75	90	110	132	160	180—200	250	315
Номинальный ток ПЧ, А	10	15	22	30	45	75	110	150	180	220	260	320	400	500	600
Допустимая перегрузка	120 % номинального тока ПЧ в течение 120 с при времени усреднения 10 мин														
Габаритные размеры, мм															
высота	380		580		630	660		900		1100				1250	
ширина	300		320		320	420		465		520				520	
глубина	240		240		280	360		330		420				420	
Масса, кг	8	12	16	22	24	32	45	50	65	80	90	115	130	130	150

Продолжение табл. 56.37

Технические данные	Типоразмер АТО3 -											
	160	200	250	315	400	500	630	750	950	1250	1500	1600
Низковольтный ПЧ												
Мощность ПЧ, кВ · А	210	264	329	394	528	658	788	987	1182	1576	1974	1970
Допустимая перегрузка	120 % номинального тока ПЧ в течение 120 с											
Габаритные размеры, мм												
высота	1250				1900			1900		1900		
ширина	420				450			450		2200	3300	2750
глубина	420				450			450		450		
Масса, кг	110	120	150	160	520	600	640	900	960	1280	1800	1600
Трансформаторы												
Мощность ПЧ, кВ · А	250		315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	
Габаритные размеры, мм												
высота	1190		1200	1270	1340	1360	1470	1550	1610	1710	1770	
ширина	1200		1260	1380	1440	1500	1620	1590	1830	1860	2010	
глубина	660		810	810	810	810	810	980	980	980	1050	
Масса, кг	990		1130	1460	1730	1980	2370	2880	3480	4340	4950	

Окончание табл. 56.37

Технические данные	Типоразмер АТО4 -														
	5,5	7,5	11	15	22	37	55	75	90	110	132	160	200	250	315
Номинальная мощность двигателя, кВт	5,5	7,5	11	15	17—22	30—37	45—55	75	90	110	132	160	180—200	250	315
Номинальный ток ПЧ, А	10	16	22	30	45	75	110	150	180	220	260	320	400	500	600
Допустимая перегрузка	120 % номинального тока ПЧ в течение 120 с при времени усреднения 10 мин														
Габаритные размеры, мм															
высота	300		445		555	660		1100						1250	
ширина	300		320		420	420		520						520	
глубина	240		240		280	360		420						420	
Масса, кг	8	12	16	22	24	32	45	50	65	80	90	115	130	130	150

Преобразователи частоты VLT серии 3000 (производство фирмы «Danfoss», Дания)

Таблица 56.38 Технические данные преобразователей частоты VLT серии 3000

Выход	Число фаз	3		
	Номинальное напряжение, В	220 (200, 230)	380 (400, 415)	440 (460, 500)
	Номинальная частота, Гц	50/60/87/100		
	Диапазон регулирования напряжения, В	0 — напряжение питающей сети		
	Диапазон регулирования частоты, Гц	0—120 или 0 -500, программируется		
	Время линейного изменения, с	0,1—3600		
	Включение выхода	Не лимитируется (частое переключение может привести к прерыванию работы)		
Вход	Число фаз	3		
	Напряжение питающей сети, В	220 (200, 230) ± 10 %	380 (400, 415) ± 10 %	380 (400, 415, 440, 460, 500) ± 10 %
	Частота питающей сети, Гц	50 (60)		
	Коэффициент мощности cosφ	0,9 (1,0)		
	Коэффициент полезного действия	0,96 при нагрузке 100 %		
	Переключение	2 раза в минуту		
Защитные функции — защиты ПЧ и двигателя		От короткого замыкания От замыкания на землю Встроенная тепловая защита двигателя		
Опции	Внешние	Адаптивная настройка двигателя Прогрев подключенного двигателя Запуск «с хода» Выбор частоты для запуска двигателя Программируемая частота переключений		
	Внутренние	Восемь цифровых входов Два аналоговых входа Два сигнальных выхода Два релейных выхода на 250 В, 2 А и последовательный порт RS-485 для создания локальной промышленной сети согласованного управления несколькими рабочими станциями		
Исполнение	Стандарт защиты	IP00 (IP20, IP21 IP54)		
	Температура окружающей среды, °С	При полной нагрузке от 10 до +40 При транспортировке и хранении от –30 до +70		

Таблица 56.39 Размеры преобразователей частоты VLT серии 3000

Код размера (см. рис. 56.42)	Внешние размеры, мм			Код размера (см. рис. 56.42)	Внешние размеры, мм		
	A	*B*	*C*		*A*	*B*	*C*
1,0	300	281	178	1,8	940	400	280
1,1	360	281	178	2,0	660	242	260
1,2	390	281	178	2,1	780	242	260
1,3	530	281	178	2,2	950	306	296
1,4	440	281	178	3,0	900	495	340
1,5	500	281	178	3,1	1515	495	380
1,6	530	281	178	3,2	1695	495	495
1,7	810	355	280				

Таблица 56.40 Типоразмеры преобразователей частоты VLT серии 3000

Технические данные	Типоразмер VLT							
	3002	3003	3004	3006	3008	3011	3016	3022
При сетевом питании 3 × 220 (200...230)								
Номинальная мощность двигателя (*M* = const), кВт	1,1	1,5	2,2	4,0	5,5	7,5	11,0	15,0
Номинальный ток ПЧ (*M* = const), А	5,4	7,8	10,6	19,0	25,0	32,0	46,0	61,0
Допустимая перегрузка по току в течение 1 мин (*M* = const), %	125	160						

Продолжение табл 56 40

Технические данные		Типоразмер VLT							
		3002	3003	3004	3006	3008	3011	3016	3022
Допустимая перегрузка по мощности в течение 1мин (M = const), %		129	160						
Максимальный входной ток (M = const), А		6,8	9,1	13,3	17,5	22,2	26,4	41,7	52,2
Номинальная мощность двигателя ($M \sim n^2$), кВт		1,1	1,5	2,2	5,5	7,5	11,0	15,0	22,0
Номинальный ток ПЧ ($M \sim n^2$), А		5,4	7,8	10,6	25,0	32 0	46,0	61,0	88,0
Максимальный входной ток ($M \sim n^2$), А		6,8	9,1	13,3	23,1	29,6	42,0	56,8	72,3
Максимальный ток срабатывания предохранителя, А		16,0	16,0	25,0	40,0	50,0	60,0	80,0	125,0
Код размера (рис 56 42)/масса, кг	IP00	1,0/7,4	1,0/7,4	1,0/7,4	—	—	—	—	—
	IP20	—	—	—	2,0/24	2 0/26	2,1/32	2,2/49	2,2/51
	IP21	1,1/7,4	1,1/7,4	1,2/7 4	—	—	-	—	—
	IP54	1,3/11	1,3/11	1,3/11	1,7/34	1,7/37	1,7/48	1,8/63	1 8/65

Продолжение табл 56 40

Технические данные		Типоразмер VLT										
		3002	3003	3004	3006	3008	3011	3016	3022	3032	3042	3052
При сетевом питании 3 × 380 (400 415)												
Номинальная мощность двигателя (M = const), кВт		1,1	1,5	2,2	4,0	5,5	7,5	11,0	15,0	22,0	30,0	37,0
Номинальный ток ПЧ (M = const), А		2,8	4,1	5,6	10,0	13,0	16,0	24,0	32,0	44,0	61,0	73,0
Допустимая перегрузка по току в течение 1мин (M = const), %		125	158	160								
Допустимая перегрузка по мощности в течение 1мин (M = const), %		125	158	160								
Максимальный **входной** ток (M = const), А		2,8	4,8	7,0	10,0	13,0	13,8	21,8	30,7	41,9	55,6	66,5
Номинальная мощность двигателя ($M \sim n^2$), кВт		1,1	1,5	2,2	5,5	7,5	11,0	15,0	22,0	30,0	37,0	45,0
Номинальный ток ПЧ ($M \sim n^2$), А		2,8	4,1	5,6	13,0	16,0	24,0	32,0	44,0	61,0	73,0	88,0
Максимальный входной ток ($M \sim n^2$), А		2,8	4,8	7,0	13,0	17,0	22,0	31,0	41,5	57,5	66,5	80,0
Максимальный ток срабатывания предохранителя А		16,0	16,0	16,0	25,0	25,0	50,0	63,0	63,0	80,0	100,0	125,0
Код размера (рис 56 42)/масса, кг	IP00	1,0/7,4	1,0/7,4	1,0/7 4	1,4/12	1,5/14	—	—	—	—	—	—
	IP20	—	—	—	—	-	2,0 24	2,0/26	2,1/32	2,2/49	2,2/54	2,2/54
	IP21	1,1/8,0	1 1/8 0	1,1/8,0	1,6/13	1,6/15		—	—	—	—	—
	IP54	1,3/11	1,3/11	1,3/11	1,6/14	1,6/15	2,0/34	2,0/37	2,1/48	2 1/63	2,2/69	2,2/69

Продолжение табл 56 40

Технические данные	Типоразмер VLT						
	3060	3075	3100	3125	3150	3200	3250
При сетевом питании 3 × 380 (400 415)							
Номинальная мощность двигателя (M = const), кВт	45	55	75	90	110	132	160
Номинальный ток ПЧ (M = const), А	86	105	139	168	205	243	302
Допустимая перегрузка по току в течение 1 мин (M = const), %	150						
Допустимая перегрузка по мощности в течение 1мин (M = const), %	150						

Окончание табл 56 40

Технические данные		Типоразмер VLT						
		3060	3075	3100	3125	3150	3200	3250
При сетевом питании 3 × 380 (400, 415)								
Максимальный входной ток (M = const), А		84,6	103,3	138,4	167,2	201,7	241,9	293,3
Номинальная мощность двигателя ($M \sim n^2$), кВт		55	75	90	110	132	160	200
Номинальный ток ПЧ ($M \sim n^2$), А		105	139	168	205	243	302	368
Максимальный входной ток ($M \sim n^2$), А		103,3	138,4	167,2	201,7	241,9	293,3	366,3
Максимальный ток срабатывания предохранителя, А		150	150	250	250	300	450	500
Код размера (рис 56 42)/масса, кг	IP21	3,0/147	3,0/147	3,1/211	3,1/211	3,1/220	3,2/306	3,2/306
	IP54	3,0/147	3,0/147	3,1/211	3,1/211	3,1/220	3,2/306	3,2/306

Преобразователи частоты ACS (производство ABB)

Таблица 56 41 **Технические данные ПЧ серии ACS**

Выход	Число фаз	1	3	3	3
	Номинальное напряжение, В	(208 –240) ± ± 10 %	(208—240) ± ± 10 %	(380—480) ± ± 10 %	(500—690) ± ± 10 %
	Номинальная частота, Гц	50 (60, 87, 100)			
	Диапазон регулирования напряжения, В	0 — напряжение питающей сети			
	Диапазон регулирования частоты Гц	0 300			
	Дискретность уставки частоты, Гц	0,01			
	Ослабление поля, Гц	От 30 до 180 регулируемое			
	Частота коммутации, кГц	От 1 до 12 с шагом 0,1 кГц			
Вход	Число фаз	1	3	3	3
	Напряжение питающей сети, В	(208 –240) ± ± 10 %	(208—240) ± ± 10 %	(380—480) ± ± 10 %	(500—690) ± ± 10 %
	Частота питающей сети, Гц	48—63			
	Коэффициент мощности, cosφ	0,98			
Защитные функции — защиты ПЧ и двигателя		От перегрузки От короткого замыкания в момент запуска От замыкания на землю От неполнофазного режима работы входной или выходной фазы От перегрузки двигателя От превышения или недостатка напряжения От превышения температуры От заклинивания двигателя			
Опции	Внешние	Адаптивная настройка двигателя Запуск «с хода» Выбор частоты для запуска двигателя Программируемая частота переключений			
	Внутренние	Три программируемых дифференциальных аналоговых входа Шесть программируемых дискретных входов Два программируемых аналоговых выхода Три программируемых дискретных выхода (реле) и последовательный порт RS-485 для создания локальной промышленной сети согласованного управления несколькими рабочими станциями			
Исполнение	Стандарт защиты	IP00 (IP21, IP54)			
	Температура окружающей среды, °С	При полной нагрузке от 0 до +40 При транспортировке и хранении от –40 до +70			

Таблица 56.42 Типоразмеры ПЧ серии ACS

Технические данные	Типоразмер ACS 201-				
	1P1-1	1P6-1	2P1-1	2P7-1	4P1-1
При сетевом питании 1 и 3 × (208—240) В					
Номинальная мощность двигателя, кВт	0,55	0,75	1,1	1,5	2,2
Номинальный входной ток при однофазном питании, А	6,6	8,9	12,2	15,7	22,4
Номинальный входной ток при трехфазном питании, А	—	—	8,4	9,8	12,9
Допустимая перегрузка по току в течение 1 мин, %	150				
Номинальный ток ПЧ, А	3,0	4,3	5,5	7,1	10,7
Габаритные размеры, мм					
высота	181		251		
ширина	190		190		
глубина	157		157		
Масса, кг	3,1		4,1		

Продолжение табл. 56.42

Технические данные	Типоразмер ACS 201-					
	1P6-3	2P1-3	2P7-3	4P1-3	4P9-3	6P6-3
При сетевом питании 3 × (380—480) В						
Номинальная мощность двигателя, кВт	0,75	1,1	1,5	2,2	3,0	4,0
Номинальный входной ток, А	3,0	3,9	5,0	7,5	9,1	12,1
Допустимая перегрузка по току в течение 1 мин, %	150					
Номинальный ток преобразователя, А	2,5	3,2	4,1	6,2	7,5	10,0
Габаритные размеры, мм						
высота	251					
ширина	190					
глубина	157					
Масса, кг	4,1					

Продолжение табл. 56.42

Технические данные	Типоразмер ACS 601-						
	0005-3	0006-3	0009-3	0011-3	0016-3	0020-3	0025-3
При сетевом питании 3 × (380 - 480) В							
Номинальная мощность двигателя (M = const), кВт	2,2	3	4	5,5	7,5	11	15
Номинальная мощность двигателя ($M \sim n^2$), кВт	3	4	5,5	7,5	11	18,5	22
Допустимая перегрузка по току в течение 1 мин, %	150						
Номинальный ток ПЧ, А	6,2	7,5	10,0	13,2	18,0	24,0	31,0
Габаритные размеры, мм:							
высота	420			420		526	
ширина	220			260		306	
глубина	292			292		310	
Масса, кг	14			17,5		25	

Продолжение табл. 56.42

Технические данные	Типоразмер ACS 601-						
	0030-3	0040-3	0050-3	0060-3	0070-3	0100-3	0120-3
При сетевом питании 3 × (380—480) В							
Номинальная мощность двигателя (M = const), кВт	18,5	22	30	37	45	55	75
Номинальная мощность двигателя ($M \sim n^2$), кВт	30	37	45	55	75	90	110
Допустимая перегрузка по току в течение 1 мин, %	150						
Номинальный ток ПЧ, А	39	47	62	76	86	112	147
Габаритные размеры, мм							
высота	715			715		860	
ширина	306			306		480	
глубина	357			429		428	
Масса, кг	35			50		88	

Окончание табл. 56.42

Технические данные	Типоразмер ACS 607-									
	0100	0120	0140	0170	0210	0260	0320	0400	0490	0610
При сетевом питании 3 × (380—480) В										
Номинальная мощность двигателя (M = const), кВт	75	90	110	132	160	200	250	315	400	500
Номинальная мощность двигателя ($M \sim n^2$) кВт	90	110	132	160	200	250	315	—	—	—
Допустимая перегрузка по току в течение 1 мин, %	150									
Габаритные размеры, мм										
высота	2065									
ширина	830		1030					2130		
глубина	644									
Масса, кг	280		360	370		400		710	870	

Преобразователи частоты «Vectorflux» и «Flowdrive» (производство фирмы «Emotron», Швеция)

Таблица 56.43 Технические данные ПЧ серии «Vectorflux»

Выход	Число фаз	3
	Номинальное напряжение, В	230 / 400
	Номинальная частота, Гц	50 (60)
	Диапазон регулирования напряжения, В	0 — напряжение питающей сети
	Диапазон регулирования частоты, Гц	0—2000
	Номинальная частота двигателя, Гц	25—2000
Вход	Число фаз	3
	Напряжение питающей сети, В	230 (141—297) / 400 (340—457)
	Частота питающей сети, Гц	50 (45—65)
Рабочие функции	Установка задания	С клавиатуры В цифровом виде через последовательный интерфейс Через аналоговый вход (потенциометр, 0—10 В постоянного тока, 0 (4)—20 мА) Выбор одного из восьми заранее запрограммированных значений через цифровой вход
	Режим регулирования	*IR*-компенсация
	Команды «Пуск» («Стоп»)	Подача команд с клавиатуры Подача команд в цифровом виде через последовательный интерфейс
	Пускотормозная характеристика	Линейная (S-образная) Отдельно подбираемая продолжительность Для каждого режима можно установить две различные продолжительности
	Динамическое (активное) торможение	Нормальное торможение Торможение с увеличением потока «Специальное» торможение с использованием патентованного метода повышения тормозной мощности
	Статическое торможение	Торможение постоянным током с установкой времени и тока
Защитные функции	Защита (ограничение)	Настраиваемое ограничение тока и момента с защитой от срыва при помощи регулирования частоты Защита двигателя в функции I^2t на основе температурной модели двигателя Защита двигателя датчиком с положительным температурным коэффициентом Регулируемое время работы инвертора на максимальном токе до подачи сигнала тревоги
	Индикация состояния	Готовность инвертора, $f = 0$, номинальная скорость, вверх (вниз), $U = 0$, перенапряжение, превышение тока, перегрузка, превышение температуры, пониженное напряжение

Окончание табл 56.43

Опции внутренние		Три специальных цифровых входа для выбора параметров Четыре специальных цифровых входа для функций «Пуск» («Стоп»), «Вверх» («Вниз») Три программируемых дифференциальных аналоговых входа Шесть программируемых дискретных входов Два программируемых аналоговых выхода Три программируемых дискретных выхода (реле) и последовательный порт RS-232 (RS-485) с различными протоколами для создания локальной промышленной сети согласованного управления несколькими рабочими станциями
Исполнение	Стандарт защиты	IP21
	Температура окружающей среды, °С	При полной нагрузке от 0 до +45 При транспортировке и хранении от –10 до +60

Таблица 56.44 **Типоразмеры ПЧ серии «Vectorflux»**

Модель	Мощность двигателя, кВт	Номинальный ток двигателя, А	Максимальный ток двигателя А	Габаритные размеры (высота × ширина × глубина), мм	Масса, кг
При сетевом питании 3 × 230 В					
HF23 009	1,3	5,5	9,4	460 × 211 × 220	9,1
HF23-011	1,7	7,0	11,9		9,5
HF23-016	2,3	9,5	16,2		9,8
HF23-021	3,2	12,5	21		10,1
HF23-028	4,3	16,5	28	560 × 211 × 220	12,4
HF23 039	6,3	23	39		12,8
HF23 054	8,6	32	54	735 × 313 × 283	34,7
HF23 066	10,7	39,66	37		35,7
HF23 076	12,7	45	76		35,9
HF23-100	17,3	59	100		36,8
При сетевом питании 3 × 400 В					
HF40 009	2,2	5,5	9,4	460 × 211 × 220	9,1
HF40 011	3,0	7,0	11,9		9,5
HF40-016	4,0	9,5	16,2		9,8
HF40-021	5,5	12	21		10,1
HF40-028	7,5	16,5	28	560 × 211 × 220	12,4
HF40-039	11	23	39		12,8
HF40 054	15	32	54	735 × 313 × 283	34,7
HF40 066	18,5	39,66	37		35,7
HF40-076	22	45	76		35,9
HF40-100	30	59	100		36,8

Таблица 56.45 **Технические данные ПЧ серии «Flowdrive»**

Выход	Число фаз	3
	Номинальное напряжение, В	400 ± 15 %
	Номинальная частота Гц	50 (60)
	Диапазон регулирования напряжения В	0 — напряжение питающей сети
	Диапазон регулирования частоты, Гц	0—1000
	Частота коммутации, кГц	От 1,5 до 6 (настраиваемая, в моделях от 003 до 210)
	Коэффициент полезного действия, %, при нагрузке 110 %	97—98

Окончание табл. 56.44

Вход	Число фаз	3
	Напряжение питающей сети, В	400 (340 –457)
	Частота питающей сети, Гц	50 (60)
	Коэффициент мощности, cosφ	0,95
Защитные функции — защиты ПЧ и двигателя		От перегрузки по току От превышения допустимой нагрузки От превышения или недостатка напряжения От превышения температуры От короткого замыкания в момент запуска От замыкания на землю От пропадания входной или выходной фазы От перегрузки двигателя
Опции	Внешние	Адаптивная настройка двигателя Запуск «с хода» Выбор частоты для запуска двигателя Программируемая частота переключения
	Внутренние	Три программируемых дифференциальных аналоговых входа Шесть программируемых дискретных входов Два программируемых аналоговых выхода Три программируемых дискретных выхода (реле) и последовательный порт RS-232 (RS-485) для создания локальной промышленной сети согласованного управления несколькими рабочими станциями
Исполнение	Стандарт защиты	IP20, IP54
	Температура окружающей среды, °С	При полной нагрузке от 0 до +40 (IP20), от 0 до +35 (IP54) При транспортировке и хранении от –10 до +60

Таблица 56.46 Типоразмеры ПЧ серии «Flowdrive»

Модель	Мощность двигателя, кВт	Номинальный ток двигателя, А	Максимальный ток двигателя, А	Габаритные размеры (высота × ширина × глубина), мм	Масса, кг
UF40-003	0,75	2,5	3,0	400 × 220 × 150	10
UF40-005	1,5	4,0	5,0		
UF40-007	2,2	6,0	7,0		
UF40 011	4	9,5	11		
UF40 016	5,5	13	16		
UF40-022	7,5	18	22	500 × 290 × 230	26
UF40-031	11	26	31		
UF40 037	15	31	37		
UF40 055	22	46	55		
UF40 073	30	61	73	750 × 340 × 295	55
UF40-089	37	74	89		
UF40 108	45	90	108		
UF40-131	55	109	131	900 × 450 × 330	85
UF40-175	75	145	175		
UF40-210	90	175	210		
UF40 252	110	210	252	1145 × 500 × 420 (IP20) 2000 × 600 × 500 (IP54)	135 250
UF40 300	132	250	300		
UF40 360	160	300	360		
UF40 450	200	375	450	2000 × 1200 × 600 (IP54)	530—580
UF40-564	250	470	564		
UF40 708	315	590	708		

Преобразователи частоты «Unidrive» (производство фирмы «Control Techniques», Великобритания)

Таблица 56.47. **Технические данные ПЧ «Unidrive»**

Выход	Число фаз	3
	Номинальнос напряжснис, В	380—480
	Номинальная частота, Гц	48—62
	Диапазон рсгулирования напряжсния, В	0 — напряжснис питающсй ссти
	Диапазон рсгулирования частоты, Гц	0—1000; программирустся
	Тактовая частота ШИМ, кГц	3; 4,5; 6; 9; 12
Вход	Число фаз	3
	Напряжснис питающсй ссти, В	(380 – 10 %)—(480 + 10 %)
	Частота питающсй ссти, Гц	48—62
	Коэффицисит мощности cosφ	0,9 (1,0)
	Коэффицисит полсзного дсйствия	0,96 при нагрузкс 100 %
	Пsrрсключсчис	2 раза в минуту
Защитныс функции — защиты ПЧ и двигатсля		От короткого замыкания Ог замыкания на зсмлю Встроснная тспловая защита двигатсля
Опции	Внсшнис	Адаптивная настройка двигатсля Прогрсв подключсннного двигатсля Запуск «с хода» Выбор частоты для запуска двигатсля Программирусмая частота пsrрсключсний
	Внутрсннис опции	Воссмь цифровых входов Чстырс аналоговых входа Два аналоговых выхода Два рслсйных выхода и послсдоватсльный порт RS-232 (RS-485) для создания локальной промышлснной ссти согласованного управлсния нсскольким рабочими станциями
Испол-нснис	Стандарт защиты	IP40
	Тсмпсратура окружающсй срсды, °С	При полной нагрузкс от –5 до +40 При транспортировкс и хранснии от –40 до +50

Таблица 56.48. **Типоразмеры ПЧ «Unidrive»**

Модсль	Мощность двигатсля, кВт	Нспрсрывный выходной ток, А	Пиковый ток (4 с), А	Ток псрсгрузки (60 с), А	Входной ток, А	Рскомсндусмый ток прсдохранитсля, А	Типоразмср (рис. 56.43)	Масса, кг
UNI1401	0,75	2,1	3,7	3,1	5,4	6	1	4
UNI1402	1,1	2,8	4,9	4,2	5,9	10		
UNI1403	1,5	3,8	6,7	5,6	5,3	10		
UNI1404	2,2	5,6	9,9	8,3	7,1	10		
UNI1405	4	9,5	16,8	14,1	9,5	16		
UNI2401	5,5	12	21,2	17,9	13,7	16	2	8
UNI2402	7,5	16	28,2	23,8	16,3	20		
UNI2403	11	25	44,1	37,2	27	35		
UNI3401	15	34	60,0	50,6	34	40	3	22
UNI3402	18,5	40	70,6	59,6	39	50		
UNI3403	22	46	81,2	68,5	49	60		
UNI3404	30	60	106,0	89,4	59	70		
UNI3405	37	74	136,0	114.7	74	80		
UNI4401	45	96	169,5	143	96	100	4	70
UNI4402	55	124	219,0	184,7	120	125		
UNI4403	75	156	275,5	232,3	151	160		
UNI4404	90	180	317,8	268	173	200		
UNI5401	132	300	—	360	280	450	5	—

Преобразователи частоты «Master Drives» (производство фирмы «Siemens», Германия)

Таблица 56 49. **Технические данные ПЧ «Master Drives»**

Выход	Число фаз	3		
	Номинальнос напряжснис, В	(200 – 15 %)– (230 + 15 %)	(380 – 15 %)– (480 + 10 %)	(500 – 15 %)– (600 + 10 %)
	Номинальная частота, Гц	50 (60)		
	Диапазон рсгулирования напряжс-ния, В	0 — напряжснис питающсй ссти		
	Диапазон рсгулирования частоты, Гц	0—200		
	Максимальный ток пsrсгрузки	136 % номинального тока ПЧ в тсчснис 60 с при врсмсни цикла 300 с		
	Выбор закона управлсния *U*/*f*	Пsrсмснный момснт Вскторнос управлснис потоком бсз датчика Энсргосбsrсжснис		
	Способ модуляции	Синусоидальная цснтрированная ШИМ		
	Тактовая частота ШИМ, кГц	Настраивасмая от 1,7 до 16		
Вход	Число фаз	3		
	Напряжснис питающсй ссти, В	(200 – 15 %)– (230 + 15 %)	(380 – 15 %)– (480 + 10 %)	(500 – 15 %)– (600 + 10 %)
	Частота питающсй ссти, Гц	50 (60) ± 6 %		
Рабочис функции	Пуск, останов и рсгулированис скорости двигатсля Динамичсскос торможснис и торможснис до полной остановки Энсргосбsrсжснис ПИ-рсгулированис (скорость потока, давлснис и т.п.) Заданис скорости Работа в пошаговом рсжимс Автоматичсский захват с поиском скорости (подхват на ходу) Автоматичсскос ограничснис работы на нижнсй скорости			
Защитныс функции — защиты ПЧ и двигатсля		Гальваничсская развязка мсжду силовой и управляющсй цспями Защита от коротких замыканий: внутрснних источников питания мсжду выходными фазами Защита от замыкания на зсмлю Тспловая защита от пsrсгрузки по току Встроснная тспловая защита двигатсля Защита от понижснного или повышснного напряжсния питания		
Опции внутрснніс		Чстырс цифровых выхода Ссмь цифровых входов Два аналоговых входа Два аналоговых выхода Послсдоватсльныс порты RS-232 и RS-485 для обсспсчсния связи мсжду промышлснным компьютсром и прсобразоватслсм		
Испол-нснис	Стандарт защиты	IP00, IP20		
	Тсмпсратура окружающсй срсды, °С	При полной нагрузкс от 0 до +40 При транспортировкс и хранснии от –25 до +70		

Таблица 56.50. **Типоразмеры ПЧ «Master Drives»**

Модсль	Мощность двигатс-ля, кВт	Номинальный вы-ходной ток, А	Габаритныс размсры (высота × ширина × глубина), мм	Масса, кг
При сетевом питании 3 × (220—230) В				
6SE7021-1CA60	2,2	10,6	90 × 425 × 350	8
6SE7021-3CA60	3	13,3		
6SE7021-8CB60	4	17,1	135 × 425 × 350	12
6SE7022-3CB60	5,5	22,9		
6SE7023-2CB60	7,5	32,2		

Окончание табл 56 50

Модель	Мощность двигателя, кВт	Номинальный выходной ток, А	Габаритные размеры (высота × ширина × глубина), мм	Масса, кг
При сетевом питании 3 × (220– 230) В				
6SE7024-4CC60	11	44,2	180 × 600 × 350	24
6SE7025-4CD60	15	54	270 × 600 × 350	35
6SE7027-0CD60	18,5	69		
6SE7028-1CD60	22	81		
При сетевом питании 3× (380 480) В				
6SE7016-1EA61	2,2	6,1	90 × 425 × 350	8
6SE7018-0EA61	3	8		
6SE7021-0EA61	4	10,2		
6SE7021-3EB61	5,5	13,2	135 × 425 × 350	12
6SE7021-8EB61	7,5	17,5		
6SE7022-6EC61	11	25,5	180 × 600 × 350	24
6SE7023-4EC61	15	34		
6SE7023-8ED61	18,5	37,5	270 × 600 × 350	35
6SE7024-7ED61	22	47		
6SE7026-0ED61	30	59		
6SE7027-2ED61	37	72		
6SE7031-0EE60	45	92	270 × 1050 × 365	55
6SE7031-2EF60	55	124	360 × 1050 × 365	65
6SE7031-5EF60	75	146		
6SE7031-8EF60	90	186		
6SE7032-1EG60	110	210	508 × 1450 × 465	155
6SE7032-6EG60	132	260		
6SE7033-2EG60	160	315		165
6SE7033-7EG60	200	370		180
6SE7035-1EK60	250	510	800 × 1750 × 565	400
6SE7036-0EK60	315	590		
6SE7037-0EK60	400	690		460
При сетевом питании 3 × (500—600) В				
6SE7014-5FB61	2,2	4,5	135 × 425 × 350	12
6SE7016-2FB61	3	5,6		
6SE7017-8FB61	4	7,8		
6SE7021-1FB61	5,5	11		
6SE7021-5FB61	7,5	15,1		
6SE7022-2FC61	11	22	180 × 600 × 350	24
6SE7023-0FD61	18,5	29	270 × 600 × 350	35
6SE7023-4FD61	22	34		
6SE7024-7FD61	30	46,5		
6SE7026-1FE60	37	61	270 × 1050 × 365	55
6SE7026-6FE60	45	66		
6SE7028-0FF60	55	79	360 × 1050 × 365	65
6SE7031-1FF60	75	108		
6SE7031-3FG60	90	128	508 × 1450 × 465	155
6SE7031-6FG60	110	156		
6SE7032-0FG60	132	192		180
6SE7032-3FG60	160	225		
6SE7033-0FK60	200	297	800 × 1750 × 565	400
6SE7033-5FK60	250	354		
6SE7034-5FK60	315	452		

Преобразователи частоты «Altivar 18» (производство фирмы «Schneider Electric», Франция)

Таблица 56 51 Технические данные ПЧ серии «Altivar 18»

Выход	Число фаз	1	3	3
	Номинальное напряжение, В	(200 – 15 %)— (240 + 10 %)	(200 – 15 %)— (230 + 10 %)	(380 – 15 %)— (460 + 10 %)
	Номинальная частота, Гц	50 (60)		
	Диапазон регулирования напряжения, В	0 — напряжение питающей сети		
	Диапазон регулирования частоты, Гц	0,5—320		
	Запаздывание при изменении задания, мс	5		
	Разрешение по частоте, Гц	0,1		
	Максимальный переходный ток	150 % номинального тока ПЧ в течение 60 с		
	Диапазон регулирования скорости	1 50		
	Перегрузочный переходный момент	150 % номинального момента двигателя в течение 60 с		
	Выбор закона управления *U/f*	Переменный момент Векторное управление потоком без датчика Энергосбережение		
	Способ модуляции	Синусоидальная центрированная ШИМ		
	Тактовая частота ШИМ, кГц	Настраиваемая от 2,2 до 12		
Вход	Число фаз	1	3	3
	Напряжение питающей сети, В	(200 – 15 %)— (240 + 10 %)	(200 – 15 %)— (230 + 10 %)	(380 – 15 %)— (460 + 10 %)
	Частота питающей сети, Гц	50 (60) ± 5 %		
Рабочие функции	Пуск, останов и регулирование скорости двигателя Динамическое торможение и торможение до полной остановки Энергосбережение ПИ-регулирование (скорость потока, давление и т.п.) Задание скорости Работа в пошаговом режиме Автоматический захват с поиском скорости (подхват на ходу) Автоматическое ограничение работы на нижней скорости			
Защитные функции — защиты ПЧ и двигателя		Гальваническая развязка между силовой и управляющей цепями Защита от коротких замыканий: внутренних источников питания между выходными фазами Защита от замыкания на землю Тепловая защита от перегрузки по току Встроенная в ПЧ тепловая защита двигателя Защита от пониженного или повышенного напряжения питания		
Опции внутренние		Четыре логических входа Три аналоговых входа Один логический выход Наличие двух внутренних источников и последовательный порт RS-232 для обеспечения связи между промышленным компьютером и ПЧ		
Исполнение	Стандарт защиты	IP31, IP20		
	Температура окружающей среды, °С	При полной нагрузке от 0 до +40 (+50) При транспортировке и хранении от –25 до +65		

Таблица 56.52. **Типоразмеры ПЧ серии «Altivar 18»**

Технические данные	Типоразмер ATV-18							
	U09M2	U18M2	U29M2	U41M2	U54M2	U72M2	U90M2	D12M2
Напряжение питания	1 × (200—240) В				3 × (200—230) В			
Номинальная мощность двигателя, кВт	0,37	0,75	1,5	2,2	3,0	4,0	5,5	7,5
Номинальный ток ПЧ, А	2,1	3,6	6,8	9,6	12,3	16,4	22	28
Габаритные размеры, мм:								
высота	182		184	215			300	
ширина	112		149	185			210	
глубина	121		157	158			170	
Масса, кг	1,5		2,1	2,8	3,3		7,8	

Продолжение табл. 56.52

Технические данные	Типоразмер ATV-18								
	U18N4	U29N4	U41N4	U54N4	U72N4	U90N4	D12N4	D16N4	D23N4
Напряжение питания	3 × (380—460) В								
Номинальная мощность двигателя, кВт	0,75	1,5	2,2	3,0	4,0	5,5	7,5	11	15
Номинальный ток ПЧ, А	2,1	3,7	5,3	7,1	9,2	11,8	16	22	29,3
Габаритные размеры, мм:									
высота	184		215			300		390	
ширина	149		185			210		245	
глубина	157		158			170		190	
Масса, кг	2,0	2,1	3,1	3,3		8,0		12,0	

Таблица 56.53. **Технические данные ПЧ серии «Altivar 58»**

Выход	Число фаз	1	3	3
	Номинальное напряжение, В	(200 – 10 %)—(240 + 10 %)	(208 – 10 %)—(230 + 10 %)	(380 – 10 %)—(500 + 10 %)
	Номинальная частота, Гц	50 (60)		
	Диапазон регулирования напряжения, В	0 — напряжение питающей сети		
	Диапазон регулирования частоты, Гц	0,1—500		
	Запаздывание при изменении задания, мс	5		
	Разрешение по частоте, Гц	0,1		
	Диапазон регулирования скорости в разомкнутой системе в замкнутой системе	 1:100 1:1000		
	Максимальный переходный ток	150 % номинального тока ПЧ в течение 60 с		
	Перегрузочный переходный момент	200 % номинального момента двигателя в течение 2 с 170 % номинального момента двигателя в течение 60 с		
	Выбор закона управления U/f	Постоянный момент Векторное управление потоком без датчика Переменный момент или энергосбережение С изменяемой конфигурацией		
	Способ модуляции	Синусоидальная центрированная ШИМ		
	Тактовая частота ШИМ, кГц	Настраиваемая от 0,5 до 16		
Вход	Число фаз	1	3	3
	Напряжение питающей сети, В	(200 – 10 %)—(240 + 10 %)	(208 – 10 %)—(230 + 10 %)	(380 – 10 %)—(500 + 10 %)
	Частота питающей сети, Гц	50 (60) ± 5 %		
Защитные функции — защиты ПЧ и двигателя		Гальваническая развязка между силовой и управляющей цепями Защита от коротких замыканий: внутренних источников питания между выходными фазами Защита от замыкания на землю Тепловая защита от перегрузки по току Встроенная в ПЧ тепловая защита двигателя Защита от пониженного или повышенного напряжения питания		

Окончание табл. 56.53

Опции	Основные функции	Пуск, останов и регулирование скорости двигателя Динамическое торможение и торможение до полной остановки Энергосбережение ПИ-регулирование (скорость потока, давление и т.п.) Задание скорости Работа в пошаговом режиме Автоматический захват с поиском скорости (подхват на ходу) Автоматическое ограничение работы на нижней скорости
	Внутренние опции	Четыре логических входа Два аналоговых входа Два логических выхода Наличие двух внутренних источников и последовательный порт RS-485 для обеспечения связи между промышленным компьютером и ПЧ
Исполнение	Стандарт защиты	IP21, IP55
	Температура окружающей среды, °С	При полной нагрузке от –10 до +40 (+50) При транспортировке и хранении от –25 до +65

Таблица 56.54. **Типоразмеры ПЧ серии «Altivar 58»**

Технические данные	Типоразмер ATV-58H-						
	U09M2	U18M2	U29M2	U41M2	U72M2	U90M2	D12M2
Применение с увеличенным моментом (170 % $M_{ном}$)							
Напряжение питания	1 × (200—240) В						
Номинальная мощность двигателя, кВт	0,37	0,75	1,5	2,2	3,0	4,0	5,5
Номинальный ток ПЧ, А	2,3	4,1	7,8	11	13,7	18,2	24,2
Габаритные размеры, мм:							
высота	206		230		286	325	
ширина	113		150		175	230	
глубина	167		184		184	210	
Масса, кг	2,2		3,8		6,9	13,0	

Продолжение табл. 56.54

Технические данные	Типоразмер ATV-58H-					
	U29M2	U41M2	U54M2	U72M2	U90M2	D12M2
Применение с увеличенным моментом (170 % $M_{ном}$)						
Напряжение питания	3 × (200—240) В					
Номинальная мощность двигателя, кВт	1,5	2,2	3,0	4,0	5,5	7,5
Номинальный ток ПЧ, А	7,8	11	13,7	18,2	24,2	31
Габаритные размеры, мм:						
высота	230		286		325	
ширина	150		175		230	
глубина	184		184		210	
Масса, кг	3,8		6,9		13,0	

Продолжение табл. 56.54

Технические данные	Типоразмер ATV-58H-							
	U18N4	U29N4	U41N4	U54N4	U72N4	U90N4	D12N4	D16N4
Применение с увеличенным моментом (170 % $M_{ном}$)								
Напряжение питания	3 × (380—500) В							
Номинальная мощность двигателя, кВт	0,75	1,5	2,2	3,0	4,0	5,5	7,5	11
Номинальный ток ПЧ, А	2,3	4,1	5,8	7,8	10,5	13,0	17,6	24,2
Габаритные размеры, мм:								
высота	230			286			325	
ширина	150			175			230	
глубина	184			184			210	
Масса, кг	3,8			6,9			13,0	

Продолжение табл. 56.54

Технические данные	Типоразмер ATV-58H-						
	D23N4	D28N4	D33N4	D46N4	D54N4	D64N4	D79N4
Применение с увеличенным моментом (170 % $M_{ном}$)							
Напряжение питания	3 × (380—500) В						
Номинальная мощность двигателя, кВт	15	18,5	22	30	37	45	55
Номинальный ток ПЧ, А	33	41	48	66	79	94	116
Габаритные размеры, мм:							
высота	415	550			650		
ширина	230	240			350		
глубина	210	283			304		
Масса, кг	15	34			57		

Окончание табл. 56.54

Технические данные	Типоразмер ATV-58H-					
	D28N4	D33N4	D46N4	D54N4	D64N4	D79N4
Применение со стандартным моментом (120 % $M_{ном}$)						
Напряжение питания	3 × (200—240) В					
Номинальная мощность двигателя, кВт	22	30	37	45	55	75
Номинальный ток ПЧ, А	44	60	72	85	105	138
Габаритные размеры, мм:						
высота	550			650		
ширина	240			350		
глубина	283			304		
Масса, кг	34			57		

Преобразователи частоты серий SJ300 и L300Plus (производство фирмы «Hitachi», Япония)

Таблица 56.55. **Технические данные ПЧ серий SJ300 и L300Plus**

Выход	Число фаз	3
	Номинальное напряжение, В	380—480
	Номинальная частота, Гц	50 (60)
	Диапазон регулирования напряжения, В	0 — напряжение питающей сети
	Дискретность регулирования напряжения, %	0,5
	Диапазон регулирования частоты, Гц	0,1—400
	Дискретность регулирования частоты, Гц	0,01
	Точность поддержания скорости	±5 % (при бессенсорном векторном управлении)
	Принцип управления	*U/f* (линейная, квадратичная)
	Способ модуляции	Синусоидальная центрированная ШИМ
	Несущая частота ШИМ, кГц	0,5—12 (15)
Вход	Число фаз	3
	Напряжение питающей сети, В	(380—480) ± 10 %
	Частота питающей сети, Гц	50 (60) ± 5 %
Рабочие функции	Задание частоты или технологической переменной	Числовое задание 0—5 В, 0—10 В, ±5 В, ±10 В 0—20 мА, 4—20 мА
	Команды «Пуск» («Стоп»)	Подача команд с пульта Подача команд через дискретные входы
	Автоматический повторный пуск при обнаружении аварии или ошибки	Для некоторых видов аварийных ситуаций
	Регулятор технологической переменной	ПИД – регулятор

Окончание табл. 56.55

Защитные функции — защиты ПЧ и двигателя		От перегрузки по току, напряжению От пониженного напряжения От превышения температуры От короткого замыкания От кратковременного пропадания напряжения питания От неполнофазного режима работы От перегрузки устройства динамического торможения При сбоях во внешнем оборудовании Электронная термозащита двигателя
Опции	Внешние	Возможность подключения внешнего тормозного блока для приема энергии торможения Возможность управления внешним механическим тормозом Подключение внешнего датчика температуры двигателя
	Внутренние	Восемь программируемых дискретных входов Пять программируемых дискретных выходов Три аналоговых выхода Возможность создания локальной промышленной сети для согласованного управления несколькими рабочими станциями через последовательный порт RS-485
Исполнение	Стандарт защиты	IP20
	Температура окружающей среды, °С	При полной нагрузке от –10 до +50 При транспортировке и хранении от –20 до +65

Таблица 56.56. **Типоразмеры ПЧ серий SJ300 и L300Plus**

Технические данные	Типоразмер SJ300-						
	015HF	022HF	036HF	055HF	075HF	110HF	150HF
Номинальная мощность двигателя, кВт	0,15	2,2	3,7	5,5	7,5	11	15
Номинальный ток ПЧ, А	3,8	5,3	8,6	12	16	22	32
Перегрузка по току	150% в течение 60 с, 200% в течение 0,5 с						
Габаритные размеры, мм:							
высота	255				260		390
ширина	150				210		250
глубина	140				170		190
Масса, кг	3,5				5		12

Продолжение табл. 56.56

Технические данные	Типоразмер SJ300-					
	185HF	220HF	300HF	370HF	450HF	550HF
Номинальная мощность двигателя, кВт	18,5	22	30	37	45	55
Номинальный ток ПЧ, А	38	48	58	75	90	110
Перегрузка по току	150 % в течение 60 с, 200 % в течение 0,5 с					
Габаритные размеры, мм:						
высота	390		540	550		700
ширина	250		310	390		480
глубина	190		195	250		250
Масса, кг	12		20	30		50

Окончание табл. 56.56

Технические данные	Типоразмер L300-							
	110HF	150HF	185HF	220HF	300HF	370HF	450HF	550HF
Номинальная мощность двигателя, кВт	11	15	18,5	22	30	37	45	55
Номинальный ток ПЧ, А	23	29	37	43	57	70	85	105
Перегрузка по току	120 % в течение 30 с, 150 % в течение 0,5 с							
Габаритные размеры, мм:								
высота	260		390			540	550	
ширина	210		250			310	390	
глубина	178,5		198,5			195	250	
Масса, кг	5		12			20	30	

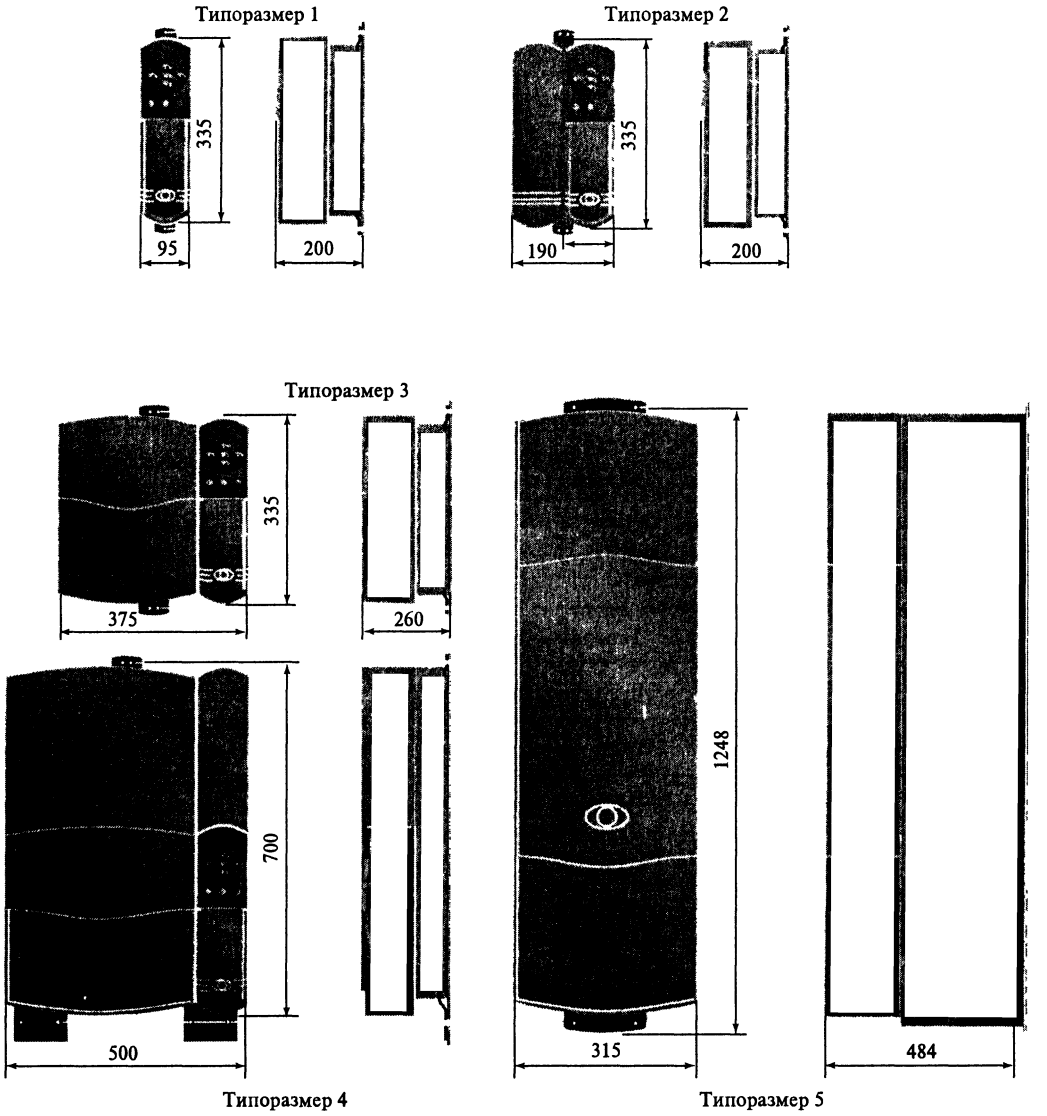


Рис. 56.43. Габаритные размеры ПЧ «Unidrive»

56.6. ДАТЧИКИ

Формирование требуемых статических и динамических характеристик автоматизированного ЭП осуществляется путем применения обратных связей по регулируемым координатам. Информацию о регулируемых координатах получают с датчиков, преобразующих значение регулируемых координат в пропорциональный электрический сигнал. В автоматизированном ЭП используются датчики напряжения, тока, магнитного потока, скорости, ускорения, положения, давления усилия крутящего момента и др. При регулировании технологических координат средствами ЭП применяются датчики давления, расхода, напряжения и др.

По принципу действия датчики делятся:

на аналоговые, в которых измеряемая входная величина преобразуется и обрабатывается в непрерывной аналоговой форме;

на дискретные, в которых входная величина преобразуется в цифровую.

Ниже приводятся технические данные датчиков.

АНАЛОГОВЫЕ ДАТЧИКИ

Датчики тока и напряжения. В ЭП сигналы, пропорциональные току и напряжению, снимаются соответственно с измерительных шунтов, вторичных обмоток трансформаторов тока и делителей напряжений, с вторичных обмоток трансфор-

Таблица 56.57. **Технические данные датчиков тока и напряжения системы УБСР-АИ**

Параметр	Датчик тока	Датчик напряжения
Входное напряжение, В	±0,2	±10
Входное сопротивление, Ом	20	10 000
Коэффициент передачи	40—140	1,0
Полоса пропускания, кГц	2,0	2,0
Нелинейность характеристики, %	0,5	0,5
Амплитуда пульсации, мВ	20	20

матора напряжения. Эти сигналы используются непосредственно и могут преобразовываться в сигналы, пропорциональные ЭДС, мощности, магнитного потока и т.д.

Основными проблемами при создании датчиков тока и напряжения являются проблемы гальванической развязки силовых цепей и цепей управления при сохранении высокого быстродействия и точности. В аналоговых датчиках тока и напряжения для разделения цепей применяют модуляцию входного сигнала и трансформирование его с последующей демодуляцией и усилением.

Повышение несущей частоты до 30—35 кГц дает возможность увеличить частоту пропускания до 1,5—2 кГц.

В блочной унифицированной системе регуляторов на интегральных элементах (УБСР-АИ) выполнены датчики тока и напряжения с полосой пропускания 2 кГц. Гальваническая развязка входных и выходных цепей датчиков рассчитана на напряжение до 1 кВ. Точность преобразования входных величин находится в пределах 1 %. Технические данные этих датчиков приведены в табл. 56.57.

В табл. 56.58 приведены технические данные датчиков тока LA, LT и напряжения LV фирмы LEM. Принцип действия датчиков основан на использовании эффекта Холла с компенсацией первичного магнитного поля, созданного стабилизированным источником тока.

Датчики LA, LT и LV предназначены для преобразования постоянного, переменного, импульсных токов и напряжений в пропорциональный выходной ток, повторяющий форму входного сигнала с обеспечением гальванической развязки между входной и выходной цепями.

Датчик магнитного потока. В качестве датчика магнитного потока используются полупроводниковые датчики Холла, технические данные которых приведены в табл. 56.59.

Датчики скорости. Статические и динамические характеристики ЭП постоянного тока с регулятором скорости оцениваются линейностью, симметричностью выходной характеристики, уровнем и частотой переменной составляющей в сигнале, температурным дрейфом, зоной нечувствительности датчика скорости. Нелинейность и асимметрия выходной характеристики, температурный дрейф и зона нечувствительности датчика скорости приводят к увеличению статической погрешности и уменьшению диапазона регулирования. Наличие низкочастотной переменной составляющей в сигнале датчика приводит к появлению переменной составляющей в токе якоря двигателя и требует снижения быстродействия регулятора скорости.

В автоматизированном ЭП широкое применение в качестве датчиков скорости находят тахогенераторы постоянного и переменного тока.

Тахогенераторы постоянного тока преобразуют частоту вращения вала в пропорциональное частоте выходное напряжение постоянного тока. Тахогенераторы постоянного тока бывают с возбуждением от постоянных магнитов и с электромагнитным возбуждением. Основными показателями, характеризующими функциональные свойства тахогенераторов постоянного тока, являются крутизна, нелинейность, асимметрия, коэффициент пульсации и температурный коэффициент выходного напряжения.

Крутизна выходной характеристики, В/(об/мин), определяется по формуле

$$S = U_{\text{вых}}/n,$$

где $U_{\text{вых}}$ — выходное напряжение, В, при частоте вращения n, об/мин.

Нелинейность изменения выходного напряжения H представляет собой полусумму абсолютных значений наибольшей положительной и наибольшей отрицательной погрешностей выходного напряжения в отдельных точках характеристики.

При этом погрешность выходного напряжения ΔU, %, при некоторой установленной частоте вращения вычисляется по формуле

$$\Delta U = (U_{\text{вых}}/U_{\text{ном}} - n/n_{\text{ном}})100,$$

где $U_{\text{вых}}$ — выходное напряжение при установленной частоте вращения n; $U_{\text{ном}}$ — выходное напряжение при номинальной частоте вращения $n_{\text{ном}}$.

Асимметрия выходного напряжения A тахогенератора определяется как отношение абсолютного значения разности выходных напряжений, измеренных при правом и левом направлениях вращения, к сумме этих напряжений при установленном значении частоты вращения якоря. У современных тахогенераторов асимметрия не превышает 1,0 %.

Пульсация $U_{\text{вых}}$ складывается из оборотной, полюсной, коллекторной и зубцовой составляющих. Наиболее нежелательными являются низкочастотные пульсации — оборотные и полюсные, частота которых соизмеряется с полосой пропускания автоматических систем, что влияет на динамические характеристики систем.

Таблица 56.58. **Технические данные датчиков тока и напряжения фирмы LEM (Германия)**

Тип	$I_{ном.вх}$, А	Диапазон измерения, А	Точность, % $I_{ном}$	$K_т$	$I_{ном.вых}$, мА	$R_{внут}$, Ом	$U_{пит}$, В	$I_{потр}$, мА	Частота, кГц	Диэлектрическая прочность изоляции, кВ	Температура, °С	Вход, мм	Габаритные размеры, мм	Масса, г
Датчики тока														
LA 25-NP	5, 6, 8, 12, 25	0...±36	0,6	(1—5): 1000	25	110	±15		До 150	2,5	0...+70	—	29 ×26 ×16	22
LA 25-NP/SP25											−40...+85			
LA 55-P	50	0...±70	0,65		50	80	±12—15	10	До 200	2,0	−25...+85	12,7 × 7	36 ×27 ×28	18
LT 100-P	100	0...±150	0,5	1:1000	100	30	±15		До 150	3,0	0...+70	10	45 ×35 ×33	50
LT 100-P/SP42											−50...+85			75
LT 100-S		0...±200				25	±12—18	28		5,0	0...+70	15	76 ×48 ×50	125
LT 100-S/SP30											−50...+70			180
LT 300-S	300	0...±500		1:2000	150	35				6,0	0...+70	20	95 ×50 ×52	160
LT 300-S/SP2				1:3000	100	80					−50...+70			250
LT 500-S	500	0...±1000	0,3	1:5000			±15—24	35		12	0...+70	25	100 ×64 ×92	480
LT 500-S/SP53											−50...+85			680
LT 1000-SI	1000	0...±1500			200	40	±15	25		6,0	0...+70	40	160 ×74 ×102	700
LT 1000-SI/SP58			0,2				±15—24	30			−50...+85			850
LT 2000-S	2000	0...±3000			400	25			До 100		0...+70	63	170 ×118 ×155	2100
LT 2000-S/SP4		0...±5000	0,25	1:4000	500	16				12			180 ×118 ×155	2500
LT 2005-S		0...±3000	0,2	1:5000	400	25		20		6,0		60,57 × 20,50	150 ×90 ×150	1500
LT 2005-S/SP2			0,4	1:4000	500	17				12	−25...+70		150 ×90 ×152	
Датчики напряжения														
LV 25-P	$10 \cdot 10^{-3}$	$0...\pm14 \cdot 10^{-3}$ (0—700 В)	0,6	2500: 1000	25	250* 110**	±12—15	10	28	2,5	0...+70	—	29 ×26 ×16	22
LV 25-P/SP3							±15				−40...+80			
LV 100	$10 \cdot 10^{-3}$	$0...\pm20 \cdot 10^{-3}$ (0—5000 В)	0,7	10 000: 2000	50	1900* 60**	±15	10	4	6,0	0...+70	—	138 ×62 ×45	460
LV 100/SP51	$10 \cdot 10^{-3}$	$0...\pm20 \cdot 10^{-3}$ (0—9000 В)	0,7	10 000: 2000	50	2000* 60**	±15—24	25	4	9,0	−50...+70	—		480

* Входное внутреннее сопротивление.

** Выходное внутреннее сопротивление.

Таблица 56.59. **Технические данные датчиков Холла**

Тип	Чувствительность при 25 °С, мкВ/мА	Ток питания, мА	Температурный коэффициент чувствительности, %/°С	Входное и выходное сопротивление, кОм	Диапазон температур, °С	Габаритные размеры, мм
Датчики на кремниевой основе						
ДХК-7А	4,5	9	0,08	0,5—1	−60...+120	11 × 4,5 × 0,4
ДХК-7Г						8,5 × 7 × 0,45
ДХК-7С		15				17 × 10 × 0,6
ДХК-7М		5		0,5—1,2		3 × 3 × 0,35
ДХК-14	9,0	7	0,15	1,1—2,5		10 × 7 × 0,45
ДХК-14С		15				17 × 10 × 0,6
Датчики на германиевой основе						
ДХГ-2	3,5	13	0,3	0,2—0,35	−60...+70	10 × 7 × 0,4
ДХГ-2С		22				17 × 10 × 0,6
ДХГ-2М		7		0,18—0,36		3 × 3 × 0,35
ДХГ-2Ф		5				2 × 2 × 0,35
ДХГ-1	1,8	20	0,2	0,12—0,2		10 × 7 × 0,4
ДХГ-0,5	0,9	24	0,03	0,04—0,09		
ДХГ-0,5С		45		0,04—0,11		17 × 10 × 6
ДХГ-0,5М		12		0,04—0,15		3 × 3 × 0,35
ДХГ-0,5Ф		8				2 × 2 × 0,35
ДХ101	0,4—1,8	15	0,4	0,04—0,18	−80...+80	—
ДХ102		20				
ДХ103		30				
ДХ114		50		0,018—0,03		
Датчики на основе арсенида галлия						
ДХ200	0,3—1,9	120	0,15	$(0,5—5)10^{-3}$	−196...+100	—
ДХ211		150				
ДХ212		180				
ДХ213		200				
ДХ214		250				
ДХ221		180				
ДХ222		200				
ДХ223		250				
ДХ224		350				
Датчик на основе твердого раствора индия в арсениде индия						
ДХ500	0,2—1,0	100	0,03	$(0,7—7)10^{-3}$	−196...+180	—
ДХ511		110				

Типовое значение пульсации, или коэффициент пульсации выходного напряжения тахогенератора, %, определяется по формуле

$$K_{пул} = (\Delta U_{вых}/2U_{ср})100,$$

где $\Delta U_{вых}$ — разность между наибольшим и наименьшим значениями выходного напряжения за один оборот тахогенератора; $U_{ср}$ — среднее значение выходного напряжения, измеренное вольтметром постоянного тока.

Зубцовые и коллекторные пульсации могут быть уменьшены на 30—50 % путем включения в цепь генераторной обмотки емкостных фильтров. При этом следует учитывать, что при емкостях от 0,01 до 0,1 мкФ на 10—20 % увеличивается нелинейность.

Температурный коэффициент $\delta U/T$ выходного напряжения тахогенератора характеризует максимальное изменение $U_{вых}$ при изменении температуры на 1 °С в диапазоне рабочих температур. Эта погрешность не более 0,08 % на 1 °С обусловлена изменением сопротивления якоря.

Классификация тахогенераторов постоянного тока серии ТГП по точности проводится по значе-

ниям нелинейности и асимметрии $U_{вых}$ в соответствии с табл. 56.60.

Высокоточные тахогенераторы рекомендуется применять в прецизионных скоростных следящих системах, точные — в цепях стабилизации скоростных систем средней точности, низкоточные — в цепях коррекции позиционных следящих систем. В табл. 56.61 приведены технические данные коллекторных тахогенераторов серии ТГП продолжительного режима работы. Тахогенераторы 2,5ТГП-6, ТП32-25-0,1 и ТП32-16-2,5 выполняются с полым ротором.

В табл. 56.62 приведены технические данные коллекторных тахогенераторов постоянного тока с электромагнитным возбуждением серии ТД. Напряжение возбуждения 110 В, номинальная частота вращения 1500 об/мин, с одним концом вала, имеющим шпоночную канавку.

Технические данные тахогенераторов серии ТГ постоянного тока, коллекторных, с электромагнитным возбуждением, с двумя концами вала приведены в табл. 56.63.

В комплектных тиристорных ЭП используются встроенные тахогенераторы постоянного тока с электромагнитным возбуждением серии СЛ. Технические данные тахогенератора СЛ-121Г приведены в табл. 56.64.

В механизмах с возвратно-поворотным движением используется бесконтактный тахогенератор постоянного тока с ограниченным углом поворота

Таблица 56.60. **Классы точности тахогенераторов постоянного тока**

Показатель	Тахогенератор						
	высокоточный		точный		низкоточный		
	Класс точности						
	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	2,5
Нелинейность измерения выходного напряжения, %, не более	±0,02	±0,05	±0,1	±0,2	±0,5	—	—
Асимметрия выходного сигнала, %, не более	±0,025	±0,05	±0,125	±0,25	±0,5	±1,25	±2,5

Таблица 56.61. **Технические данные тахогенераторов серии ТГП**

Тип	$n_{ном}$, об/мин	S, мВ/(об/мин)	H, %	A, %	$K_{пул}$, %	$R_н$, кОм	$\delta U/T$, %/°С	$M^*_{тр}$, 10^{-4} Н · м	Масса, кг
ТГП3	9000	4	0,5	1	10	10	0,4	15	0,07
ТГП-3А	3000	4	5	0,5	10	3	0,4	15	0,07
ТГП-3Б	3500	4	0,5	1	10	10	0,4	20	0,06
ТГП-3Д	3000	4	0,5	1	10	10	0,4	40	0,09
ТГП-5	6000	4	0,2	0,5	5	10	0,4	15	0,09
2,5ТГП-6	6000	6	0,1	0,3	3	10	0,02	8	0,1
ТП32-25-01	3000	25	0,1	0,25	5	25	0,02	49	0,22
ТП32-16-2,5	3000	16	—	5	5	2	—	49	0,22

* Здесь и далее $M_{тр}$ — момент статического трения; $R_н$ — сопротивление нагрузки.

Таблица 56.62. **Технические данные тахогенераторов серии ТД**

Тип	S, мВ/(об/мин)	H, %	A, %	$R_н$, кОм	$\delta U/T$, %/°С
ТД-101	23	—	2,5	0,14	0,42
ТД-102	50	1,5	2,5	0,45	0,42
ТД-102ОС	50	1,5	2,0	22	0,42
ТД-103	100	—	2,5	1,2	0,83
ТД-104	50	—	2,5	5	—

Таблица 56.63. **Технические данные тахогенераторов серии ТГ**

Тип	$n_{ном}$, об/мин	S, мВ/(об/мин)	H, %	A, %	$R_н$, кОм	$I_в$, А	$M_{тр}$, 10^{-4} Н · м	Масса, кг
ТГ-1	110	96	1	1	10	0,3	120	1,79
ТГ-2	2400	51	1	1	2	0,3	100	1,0

Таблица 56.64. **Технические данные тахогенератора СЛ-121Г**

Тип	$n_{ном}$, об/мин	S, мВ/(об/мин)	H, %	A, %	$R_{н}$, кОм	$I_{в}$, А	$U_{в}$, В	$M_{тр}$, 10^{-4} Н·м	Масса, кг
СЛ-121Г	3000	16	3	3	2	0,09	110	58,8	0,45

Таблица 56.65. **Технические данные тахогенератора ТГ-2М2**

Тип	$n_{ном}$, об/мин	S, мВ/(об/мин)	H, %	φ_{max}, град	$M_{гр}$, 10^{-4} Н·м	Масса, кг
ТГ-2М2	2	300	12	±50	5	1,0

Таблица 56.66. **Технические данные тахогенераторов серии ПТ**

Тип	$n_{ном}$, об/мин	$I_{я\ ном}$, А	$U_{ном}$, В	$I_{в}$, А	$U_{в}$, В	Масса, кг
Двигатели с подшипниками скольжения						
ПТ-42	100	0,1	230	1,0	55	122,5
ПТ-42	200	0,25				
ПТ-42	400	0,5				
ПТ-32	600			0,5		102
ПТ-22	800	0,2		0,35		90
ПТ-22	1000					
Двигатели с подшипниками качения						
ПТ-32/1	200	0,1	230	0,5	55	100
ПТ-32/1	600	0,5				
ПТ-32/1	1000					
ПТ-32/1	1200					
ПТ-22/1	2400			0,35		80

ротора типа ТГ-2М2. Выходная обмотка расположена на статоре, а ротор выполнен в виде постоянного магнита. Технические данные тахогенератора приведены в табл. 56.65.

В приводах прокатных станов, бумажной, химической промышленности, в мощных турбогенераторах используются специальные тахогенераторы постоянного тока с электромагнитным возбуждением серии ПТ.

Магнитная система тахогенераторов серии ПТ свободно подвешена на валу посредством шариковых подшипников и фиксируется креплением к подшипниковому щиту приводного электродвигателя. Тахогенераторы на частоту вращения 600 об/мин и выше выполняются с добавочными полюсами. Технические данные тахогенераторов серии ПТ приведены в табл. 56.66 для двигателей с подшипниками скольжения и качения.

В табл. 56.67 дан уровень пульсаций тахогенераторов серии ПТ.

Для станочного ЭП используются тахогенераторы серии МЭТ, технические данные которых приведены в табл. 56.68.

В автоматизированном ЭП асинхронные тахогенераторы серии ТГА выполняют функции информационного элемента, выходное напряжение которого линейно зависит от частоты вращения ротора при постоянном сдвиге фаз между напряжением возбуждения $U_{в}$ и выходным напряжением $U_{вых}$.

Таблица 56.67. **Пульсации тахогенераторов серии ПТ**

Наименование пульсаций	Частота пульсаций*, Гц	Амплитуда пульсаций, %
Оборотные	$n/60$	0,25
Полюсные	$n/15$	0,5
Зубцовые	$Zn/60$	1,4
Коллекторные	$Kn/60$	0,6

* n — частота вращения; Z — число зубцов ротора; K — число коллекторных пластин.

Таблица 56.68. **Технические данные тахогенераторов серии МЭТ**

Тип	$n_{ном}$, об/мин	S, мВ/(об/мин)	H, %	A, %	$R_{н}$, кОм	Масса, кг
МЭТ-8/30	1500	20	0,36	0,35	1,0	12
МЭТ-8/55	1200	29	0,35	0,35	0,68	12

Классификация тахогенераторов серии ТГА по точности производится по показателям табл. 56.69.

Таблица 56.69. **Классификация тахогенераторов серии ТГА**

Показатель	Тахогенератор					
	высокоточный		точный		низкоточный	
	Класс точности					
	0,025	0,05	0,1	0,25	0,5	1
Нелинейность изменения выходного напряжения, %, не более	±0,025	±0,05	±0,1	±0,25	±0,5	—
Отношение остаточной ЭДС к крутизне, об/мин, не более	15	20	20	20	25	50
Отношение переменной составляющей остаточной ЭДС к крутизне, об/мин, не более	2	3	3	5	—	—
Фазовая погрешность от изменения частоты вращения, не более	±20′	±20′	±25′	±30′	—	—

Таблица 56.70. **Технические данные асинхронных тахогенераторов серии АТ**

Тип	$U_{ном}$, В	f, Гц	$I_{ном}$, А	$n_{ном}$, об/мин	S, мВ/(об/мин)	H, %	$e_{ост}$, мВ	$\delta U/T$, %/°С	$R_н$, кОм	$e_{ост\,п}$, В	Масса, кг
АТ-1	115	400	0,14	4000	3,0	0,3	35	0,01	—	6	1,0
АТ-1Д	127	50	—	1500	1,4	0,3	25, 50	0,15	—	5	1,0
АТ-2	115	400	—	5000	1,0	0,3	25, 50	0,015	—	7	0,3
АТ-3	115, 36	400	—	4000	0,4	0,2	15, 30	—	25	5	0,25
АТ-161	110	400	0,2	4000	4,0	0,15	80	0,008	2	—	0,89
АТ-261	110	400	0,35	4000	5,3	1,5	100	0,009	2	—	1,85
АТ-231	110	500	0,29	4000	5,5	0,1	25, 27	0,006	2	17	2,1
АТ-603*	110	400	0,15	4000	3,0	0,1	25, 50	0,005	—	—	1,0

* Тахогенератор АТ-603 — двухфазная машина.

Тахогенераторы переменного тока — это двухфазная электрическая машина с полым немагнитным ротором. Генераторная обмотка и обмотка возбуждения располагаются на статоре машины. Основными параметрами ТГА являются крутизна, нелинейность, постоянная и переменная составляющие остаточной ЭДС, фазовая погрешность от частоты вращения, а также температурные коэффициенты выходного напряжения и фазы выходного напряжения.

Остаточная ЭДС $e_{ост}$ — это наибольшая остаточная ЭДС по основной гармонике на выводах генераторной обмотки при неподвижном роторе в пределах одного оборота ротора.

Переменная составляющая остаточной ЭДС $e_{ост\,п}$ определяется разностью между наибольшим и наименьшим значениями остаточной ЭДС по основной гармонике в пределах одного оборота ротора.

Фазовая погрешность ТГА $\Delta\varphi_п$ находится как наибольшая разность фаз ЭДС тахогенератора при номинальной и минимальной частотах вращения в рабочем диапазоне.

В ЭП рекомендуется применять точные тахогенераторы в целях стабилизации скоростных следящих систем, низкоточные — в корректирующих цепях позиционных следящих систем.

Технические данные асинхронных однофазных с полым немагнитным ротором тахогенераторов приведены в табл. 56.70.

Синхронные тахогенераторы используются в фазочувствительных схемах следящего ЭП в качестве генераторов опорного напряжения и в качестве датчиков частоты вращения.

Синхронные тахогенераторы выполняются с возбуждением от постоянных магнитов, расположенных на роторе. Амплитуда и частота выходного напряжения тахогенераторов пропорциональна частоте вращения ротора.

Коэффициент несинусоидальности напряжения тахогенератора, %, определяется соотношением

$$K_{нс} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2} U_ν^2}}{U_{вых}} 100,$$

где $U_ν$ — действующее значение напряжения ν-й гармоники; n — номер последней из учитываемых гармоник выходного напряжения.

В табл. 56.71 приведены технические данные двухполюсных трехфазных синхронных тахогенераторов серии СГ.

Таблица 56.71. **Технические данные синхронных тахогенераторов серии СГ**

Тип	$n_{ном}$, об/мин	$U_{вых}$, В	f, Гц	$K_{нс}$, %	$R_н$, кОм	$P_{вых}$, Вт	Масса, кг
СГ-024	1500	30	25	3	0,19	3,25	1,0
СГ-025	3000	60	50	3	0,19	13	1,0

Таблица 56.72. **Технические данные тахогенераторов серии ГОН**

Тип	$n_{ном}$, об/мин	$U_{вых}$, В	f, Гц	$K_{нс}$, %	Электрическая асимметрия обмоток, град	$R_н$, кОм	$M_{тр}$, 10^{-4} Н·м	Масса, кг
ГОН 3000-50	3000	140	50	—	—	30	—	1,3
ГОН-К2М	1800	80	30	7,0	2,0	10	—	1,2
ГОН-4	600	80	100	15	1,0	30	29,4	0,18

Таблица 56.73. **Технические данные датчиков ускорения серии МП**

Тип	Пределы измерения*	Погрешность измерения, %, менее	Сопротивление потенциометра, кОм	Напряжение питания, В	Частота собственных колебаний, Гц	Масса, кг, менее
МП-18	$-0{,}3g...+0{,}3g$	±1,5	1,0—3,1	6 ± 0,2	5,0	1,0
ПМ-95	$-1{,}5g...+1{,}5g$	±3,0	1,283	6 ± 0,5	7,0 ± 2,0	0,4

* $g = 9{,}8$ м/с^2.

Технические данные синхронных двухполюсных двухфазных генераторов опорного напряжения приведены в табл. 56.72.

Датчики ускорения. Для получения электрического сигнала, пропорционального ускорению вала электрического двигателя или рабочего органа производственного механизма, используются различные типы датчиков ускорения.

При вращательном движении электрический сигнал, пропорциональный угловому ускорению $E = \mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t$, может быть получен на генераторной обмотке тахогенератора переменного тока (см. табл. 56.70), если обмотку возбуждения включить на постоянное напряжение.

Измерение линейных ускорений движущихся объектов и преобразование в электрический сигнал осуществляется инерционными датчиками линейных ускорений. В табл. 56.73 приведены технические данные инерционных потенциометрических датчиков серии МП. Действие датчиков этого типа основано на измерении перемещения инерционной массы относительно корпуса и преобразовании этого перемещения в электрический сигнал, пропорциональный ускорению.

В высокочастотных системах регулирования для измерения линейных ускорений (особенно малых) используются датчики ускорения с механотронным преобразователем. Механотрон — электровакуумный электронно-механический преобразователь, в котором управление анодным током осуществляется путем непосредственного механического перемещения анода лампы.

На рис. 56.44 приведена схема включения механотронного акселерометра, а в табл. 56.74 — технические данные преобразователей.

Датчики положения. В аналоговых системах автоматического управления ЭП в качестве датчиков положения используются электромашинные преобразователи угловых перемещений в электрический сигнал. Технические данные индукционных датчиков угла приведены в табл. 56.75.

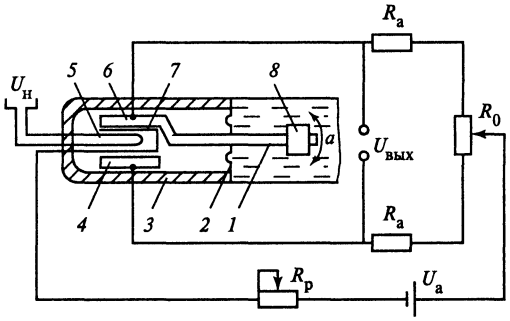


Рис. 56.44. Схема включения механотронного датчика ускорения:

1 — штырь; *2* — мембрана; *3* — баллон лампы; *4* — неподвижный анод; *5* — нагреватель; *6* — подвижный анод; *7* — катод; *8* — инерционная масса

В табл. 56.75 приняты обозначения: α — угол поворота рота; S — крутизна характеристики выходного напряжения; $e_{ост}$ — остаточная ЭДС; H — нелинейность характеристики; φ — сдвиг фаз выходного напряжения относительно напряжения возбуждения; $R_н$ — активное сопротивление нагрузки; $\Delta K_т$ — изменение коэффициента трансформации при изменении температуры окружающей среды; φ_α — изменение фазы выходного напряжения от угла поворота ротора в диапазоне линейности выходной характеристики; δ_φ — изменение сдвига фаз выходного напряжения.

В следящих ЭП в качестве *датчиков углового положения* используются сельсины и синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы различных типов. Технические данные сельсинов и вращающихся трансформаторов приведены в табл. 56.76 и 56.77.

Таблица 56.74. **Технические данные механотронов**

Параметр	Тип									
	6МХ1С	6МХ2Б	6МХ3С	6МХ4С	6МХ5С	6МХ1Б	6МХ7С	6МХ8Б	6МХ9Б	6МХ10С
Анодное напряжение $U_а$, В	10	10	8	12	15	10	10	10	10	15
Напряжение накала $U_н$, В	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
Сопротивление анодной нагрузки $R_а$, кОм	2—3	4—5	0,8—1,0	3—4	6—10	4—5	2—3	3—5	3—5	10—12
Внутреннее сопротивление прибора $R_и$, кОм	0,1—0,7	0,1—0,7	0,1—0,7	0,1—0,7	0,1—0,7	0,1—0,7	0,1—0,7	0,1—0,7	0,1—0,7	0,1—0,7
Диапазон перемещений a, мкм	±100	±100	±100	±500	±1000	0—140	±70	±100	±50	±2500
Чувствительность по току к перемещению $\psi_{i\,мост}\,a$, мкА/мкм	20—30	15—20	60—80	6—8	2,0—2,5	15—12	25—35	11—12	8—10	0,4—0,5
Нелинейность выходной характеристики $\varepsilon_{мост}$, %, менее	1,0	4,0	1,0	1,0	1,0	4,0	1,0	1,0	4,0	1,0
Максимальная сила, приложенная к концу штыря, Н	0,3	0,15	0,4	0,7	0,7	0,02	0,3	0,2	0,03	0,7
Длина штыря, мм	30 ± 1	30 ± 1	30 ± 1	30 ± 1	30 ± 1	30 ± 1	30 ± 1	30 ± 1	30 ± 1	50 ± 1
Частота собственных колебаний, Гц	220—265	630—670	220—320	220—320	220—320	1200—1300	220—265	500—650	2700—3200	200—300

Таблица 56.75. **Технические данные индукционных датчиков угловых перемещений серии Д**

Тип	$U_{ном}$, В	f, Гц	α, град	S, мВ/мин	$e_{ост}/S$, мин	H, %	φ, град	$R_н$, кОм	$\Delta K_т$, %	φ_α, град	δ_φ, град	Масса, кг
10Д-20Б1	4	1000	±5,0	1,3	2,25	1,5	50	0,5	7,0	2,0	7,0	0,015
15Д-32А	36	400	±6,0	57	0,7	1.5	15	5,0	5,0	3,0	3,5	0,06
15Д-32Б	36	1000	±6,0	83,3	0,6	1,5	10	5,0	2,0	2,0	4,0	0,06
45Д-50М	36	400	±40	4,6	6,5	1,0	30	20	5,0	0,6	4,0	0,06
45Д-45	36	400	±40	16,7	3,6	1,0	7,0	10	2,5	—	—	0,125
45Д-20Б	36	1000	±30	6,4	3,9	1,5	17	10	2,5	2,5	3,0	0,02
60Д-50	36	400	±60	3,0	7,0	1,0	7,0	5	3,0	—	—	0,07
60Д-50	40	1000	±60	3,0	7,0	1,0	3,0	5	1,5	—	—	0,07

Таблица 56.76. **Технические данные сельсинов**

Параметр	Тип					
	БД160	БД404	БД501П	БС404П	ДИД505	НЭД101
Напряжение питания, В	110	110	110	110	57	50
Максимальный потребляемый ток, А	0,43	0,4	1,3	0,9	0,3	0,35
Вторичное напряжение, В	100	150/48	150/48	100	68	48
Частота, Гц	400	50	50	400	50	50
Частота вращения, об/мин	300	500	500	300	500	300
Точность, %	±0,25	±0,25	±0,25	±0,35	±0,25	±0,75
Гарантийная наработка, ч	1500	3000	3000	3000	1500	1500
Масса, кг	0,42	2,1	3,75	1,25	2,65	0,8

Таблица 56.77. **Технические данные вращающихся трансформаторов**

Параметр	Тип							
	ВТ-1	ВТ-2	ВТ-4Б	ВТ-5	ВТ-6	ВТМ-1В	ВТМ-6	ВТМ-6В
Напряжение питания, В	110	110	60	40	40	26	60	60
Коэффициент трансформации	0,565	0,565	0,57	0,53	1,0	1,0	1,0	1,0
Входное сопротивление при частоте 500 Гц, Ом	700	950	600	500	400	500	500	500
Частота, Гц	500	500	500	1000	500	500	2000	2000
Частота вращения, об/мин	2000	2000	2000	2000	2000	3000	3000	3000
Точность, %	±0,11	±0,11	±0,11	±0,06	±0,3	±0,8	±0,8	±0,8
Масса, кг	3,0	2,0	0,65	0,7	0,8	0,35	0,35	0,35

Таблица 56.78. **Пределы измерения усилий тензометрическими датчиками серии RM**

Тип	RM2	RM5	RM10	RM20	RM30	RM50	RM75	RM100	RM150	RM200	RM250
Предельное усилие, 10 кН	20	50	100	200	300	500	150	1000	1500	2000	2500

В качестве аналоговых датчиков линейных перемещений используются механотронные преобразователи (см. табл. 56.74) с разрешающей точностью измерения 0,1 мкм.

Датчики усилия и крутящего момента. Конструкции датчиков усилия и крутящего момента, реализующих прямое измерение момента, делятся на две группы:

к первой группе относятся датчики, которые при помощи наклеенных тензоэлементов преобразуют деформацию упругого чувствительного элемента датчика в изменение электрического сигнала;

ко второй группе относятся датчики, в которых под влиянием приложенного усилия или крутящего момента происходит изменение какой-либо физической характеристики, в свою очередь преобразуемой в изменение электрического сигнала. К этой группе относятся магнитоупругие, анизотропные датчики усилия и датчики крутящего момента.

В металлургическом прокатном производстве используются измерители усилия с *тензометрическими датчиками* серии RM (табл. 56.78).

На поверхности чувствительного элемента датчика усилия серии RM (рис. 56.45, *а*) наклеены тензорезисторы R_1, R_2, R_3 и R_4. Под действием приложенного к торцам цилиндра усилия F цилиндр деформируется, а вместе с ним деформируются тензорезисторы, в результате чего изменяется их сопротивление. При сжатии цилиндра сопротивление резисторов R_2 и R_4 уменьшается, а резисторов R_1 и R_3 увеличивается. Резисторы R_1—R_4 включаются в измерительную мостовую схему (рис. 56.45, *б*). К одной из диагоналей моста подводится напряжение питания, а с другой диагонали снимается напряжение, пропорциональное усилию F. Пары резисторов R_1, R_3 и R_2, R_4 располагаются во взаимно перпендикулярных направлениях для термокомпенсации моста.

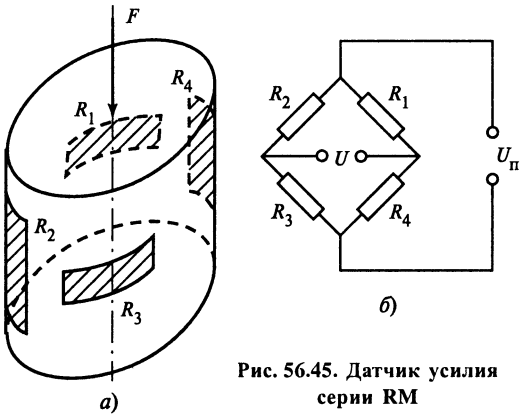


Рис. 56.45. Датчик усилия серии RM

Основные технические данные датчиков серии RM:

Класс точности	0,2
Нелинейность, %	±0,2
Повторяемость, %	0,2
Выходное напряжение, мВ/В	1,5
Напряжение питания, В	20
Входное и выходное сопротивление, Ом	400 ± 0,5
Рабочий диапазон температур, °С	–40...+70
Температурная погрешность, %/°С	±0,005
Быстродействие, с	0,001

Таблица 56.79. **Пределы измерения моментов магнитоупругими датчиками серии МИМ**

Тип	Предельный момент, 10 кН · м
МИМ-45/3В2	0,05
МИМ-55/3В2	0,1
МИМ-70/3В2	0,2
МИМ-80/3В2	0,4
МИМ-82/3В2	0,4
МИМ-110/3В2	0,8
МИМ-140/3В2	1,6
МИМ-175/3В2	3,5
МИМ-200/3А1	15,0
МИМ-215/3В1	6,0
МИМ-220/3Б2	16,5
МИМ-320/3Б1	45,0
МИМ-350/3В1	31,6
МИМ-420/3Б2	65,0
МИМ-490/3В1	150,0
МИМ-500/3Б1	150,0
МИМ-500/2Б2	190,0
МИМ-550/3В1	150,0
МИМ-580/3В1	150,0
МИМ-760/3В1	260,0

Примечание. В обозначении датчика три первые буквы обозначают магнитоупругий измеритель момента; две или три цифры до знака дроби обозначают диаметр вала, мм; 3А — датчики со всеми шихтованными магнитопроводами обмоток; 3Б — датчики с шихтованным магнитопроводом первичной обмотки и монолитным магнитопроводом вторичной обмотки; 3В — датчики с монолитными магнитопроводами; последняя цифра обозначает тип исполнения (1 — датчик монтируют на неподвижном основании; 2 — устанавливают в собственных подшипниках на контролируемом валу).

В прокатных станах для измерения крутящих моментов широкое применение находят *магнитоупругие датчики момента* серии МИМ (табл. 56.79).

Принцип действия *трансформаторного датчика* серии МИМ основан на появлении анизотропии магнитной проницаемости вала под действием измеряемого крутящего момента (рис. 56.46).

Датчик состоит из двух U-образных сердечников, на одном из которых расположена первичная

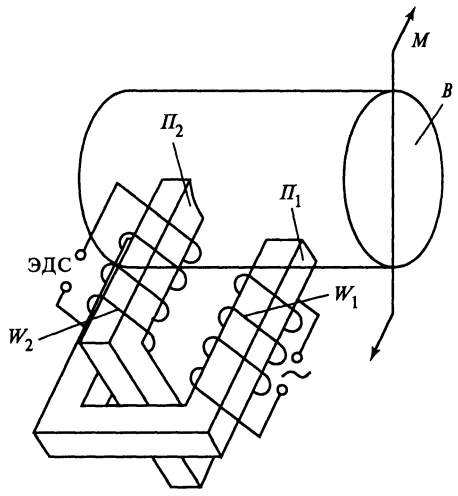


Рис. 56.46. Трансформаторный датчик серии МИМ

обмотка датчика W_1, к которой подводится переменное напряжение, а на другом — вторичная сигнальная обмотка W_2. Полюсы магнитопровода $П_2$ обмотки W_2 расположены симметрично по отношению к полюсам магнитопровода $П_1$ обмотки W_1. Когда вал B не нагружен, первичная обмотка создает в теле вала симметричное магнитное поле. Так как вторичная обмотка располагается вдоль одной и той же эквипотенциальной линии этого магнитного поля, ЭДС вторичной обмотки равна нулю. При появлении крутящего момента M изменяется магнитная проницаемость вала, нарушающая симметрию магнитного потока. В результате во вторичной обмотке датчика наводится ЭДС, пропорциональная действующему моменту.

Основные технические данные датчиков момента типа МИМ:

Напряжение питания, В	220
Входное сопротивление, кОм	20
Основная погрешность, %	±3
Чувствительность, В/(кН · м)	0,092

Датчики давления. В качестве преобразователей избыточного давления при высокой степени разрежения (в вакууме) используются манотроны, технические параметры которых приведены в табл. 56.80.

Таблица 56.80. **Технические данные манотронов**

Параметр	Избыточное давление			Вакуум			
	Тип						
	6МДХ1Б	6МДХ2Б	МДХ3Б	6МДХ4С	6МДХ5С	6МДХ11С*	6МДХ12С
Анодное напряжение $U_а$, В	10—15	10—15	10—15	Менее 30	Менее 30	Менее 25	Менее 30
Сопротивление анодной нагрузки $R_а$, кОм	4,0—6,0	4,0—6,0	4,0—6,0	4,0—6,0	4,0—6,0	4,0—6,0	4,0—6,0
Внутреннее сопротивление $R_п$, кОм, менее	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5
Диапазон измеряемых давлений, Па	0—$5 \cdot 10^4$	0—$9{,}8 \cdot 10^5$	0—$9{,}8 \cdot 10^5$	1,33—$1{,}33 \cdot 10^3$	13,3—$1{,}33 \cdot 10^4$	$6{,}7 \cdot 10^3$—$1{,}4 \cdot 10^5$	$6{,}6 \cdot 10^2$—133,32
Чувствительность по току, мкА/Па	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	Более 2,25	Более 0,75	Более $5{,}25 \cdot 10^{-2}$	Более 17,3
Нелинейность выходной характеристики, %	2,0—3,0	2,0—3,0	2,0—3,0	1,0—2,0	1,0—2,0	2,0—3,0	1,0—2,0
Частота собственных колебаний, Гц, более	500	500	500	500	500	500	500

* Можно использовать для измерения избыточного давления.

ДИСКРЕТНЫЕ ДАТЧИКИ

Дискретные датчики используются в автоматизированном ЭП в основном при регулировании положения и скорости, когда требования к точности регулирования не могут быть удовлетворены аналоговыми датчиками. Один из наиболее точных и прямых методов измерения положения вала двигателя или механизма основан на использовании цифровых *кодирующих преобразователей угла* (КПУ). Имеются КПУ, измеряющие абсолютное угловое положение с разрешением 10^{-6} относительно полного оборота. В таких КПУ на 20—21 двоичный разряд разрешение по углу составляет менее 1″. Высокие точности достигаются путем применения прецизионных кодирующих дисков и оптических либо фотоэлектрических устройств.

Существует два основных типа КПУ: *накапливающие преобразователи* (преобразователи приращений, инкрементные) и *преобразователи абсолютных значений* (преобразователи считывания).

В накапливающих преобразователях используется датчик и счетная система, суммирующая приращения. Кроме того, необходим репер, относительного которого приращения должны суммироваться или вычитаться.

Кодирующие преобразователи абсолютных значений такого репера не требуют, обеспечивая цифровое считывание абсолютного значения углового положения.

Для измерения линейных перемещений используются линейные кодирующие преобразователи абсолютного и накапливающего типов. Обычно они содержат длинную шкалу и двигающуюся вдоль этой шкалы сканирующую головку, фиксирующую относительное перемещение. Фактически шкала представляет собой линейную развертку КПУ.

Накапливающие и абсолютные кодирующие преобразователи перемещений можно использовать для измерений скорости методом последовательного счета импульсов за заданный интервал времени или на основе измерения длительностей периодов между этими импульсами путем подсчета сигналов опорной частоты в течение указанных периодов.

В табл. 56.81 приведены технические данные преобразователей абсолютных значений угловых перемещений серии ПУФ.

Основные технические данные оптоэлектронных инкрементных датчиков угловых перемещений, предназначенных для станочных ЭП, приведены в табл. 56.82.

В табл. 56.83 даны технические данные соединительных муфт для датчиков серии ЛИР.

В позиционирующих и измерительных системах металлорежущих станков и координатно-измерительных машинах используются *преобразователи линейных перемещений*. В табл. 56.84 приведены технические данные преобразователей серии ЛИР.

В промышленных механизмах, работающих в особо тяжелых условиях, для измерения скорости используются инкрементные датчики серии ПДФ, а

Таблица 56.81. **Технические данные преобразователей абсолютных значений угловых перемещений серии ПУФ**

Наименование	Тип		
	ПУФ-ФЭП-К-Г-8	ПУФ-ФЭП-К-11	ПУФ-ФЭП-КБ-02
Форма представления выходной информации	Цифровая, в двоичном коде Грея	Цифровая в двоичном коде	Цифровая в двоичном коде
Разрядность выходного кода	8	11	15
Способ выдачи кода	Параллельный	Параллельный	Параллельный
Уровни выходных сигналов при нагрузке 150 ± 15 Ом относительно «вывода + 5», В	Лог. «0» ≤ 0,4 Лог. «1» ≥ 2,4	Лог. «0» ≤ 0,4 Лог. «1» ≥ 2,4	Лог. «0» ≤ 0,4 Лог. «1» ≥ 2,4
Разрешающая способность, дискрет/оборот	256	2048 ± 1	2048 ± 1
Погрешность, менее	1°24′	600″	600″
Угловая скорость входного вала, 1/с	100	20	20
Напряжение питания, В	5 ± 0,25	5 ± 0,25; 15 ± 1,5	5 ± 0,25; 15 ± 1,5
Потребляемая мощность, Вт	2,0	1,5	6,0
Масса, кг	0,6	0,65	0,85
Габаритные размеры (диаметр × длина), мм	∅71 × 93	∅71 × 110,5	∅71 × 154

Таблица 56.82. **Технические данные инкрементных датчиков угловых перемещений серии ЛИР**

Тип	Количество импульсов за один оборот	Точность	Габаритные размеры, мм	Температура, °С
		С массивным валом		
ЛИР-61	270—1350	±150″; ±300″	∅16 × 30	0—75
ЛИР-55	100—100 000	±150″; ±300″	∅35 × 29,5	0—75
ЛИР-54	100—50 000	±150″; ±300″	∅27 × 40	0—75
ЛИР-56	100—100 000	±150″; ±300″	∅36,5 × 37	0—75
ЛИР-22	100—5000	±60″; ±150″	∅58 × 46	0—75
ЛИР-21	100—5000	±60″; ±150″	∅56 × 60	0—75
ЛИР-20	100—5000	±60″; ±150″	∅56 × 60	0—75
ЛИР-23	100—5000	±15″; ±30″	∅58 × 43	0—75
ЛИР-40	9000—450 000	±2,5″; ±5,0″	∅110 × 50	0—50
ЛИР-30	18 000—900 000	±1,5″; ±2,0″	∅170 × 51	0—50
		С полым валом и интегральной муфтой		
ЛИР-128	100—50 000	150	∅54 × 5	0—75
ЛИР-157	100—25 000	150	∅35 × 45	0—75
ЛИР-145	9000—450 000	5,0	∅90 × 49	0—50
ЛИР-135	18 000—900 000	2,0	∅170 × 60	0—50

Таблица 56.83. **Технические данные муфт для датчиков серии ЛИР**

Тип	Допустимый момент нагрузки, Н · м	Максимальная частота вращения, об/мин	Погрешность передачи вращения	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
ЛИР-104	0,1	16 000	±10″	∅30 × 22	0,027
Лир-109	0,5	3000	±1,0″	∅70 × 38	0,2
ЛИР-110	1,0	1000	±0,5″	∅98 × 20	0,25

Таблица 56.84. **Технические данные инкрементных датчиков линейных перемещений серии ЛИР**

Параметр	Тип	
	ЛИР-5	ЛИР-9
Точность измерения, мкм/м	±(3; 5; 10)	±(3,0; 5,0; 10)
Шаг растра, мкм	20; 40	20; 40
Дискретность отсчета, мкм	0,5;1,0;2,0;2,5;5,0;10	0,5; 1,0; 2,0; 2,5; 5,0; 10 (с интерполятором НП-25-02, НП-50-0,1)
Максимальная скорость перемещения, м/мин	60	60
Температура эксплуатации, °С	0—45	0—45
Максимальное ускорение, м/с^2	30	30
Длина измерения, мм	70—1240	7—3220
Поперечное сечение, мм	48,5 × 20	52 × 25
Масса, кг	1,0	1,9

Таблица 56.85. **Технические данные инкрементных датчиков скорости серии ПДФ**

Тип	Количество импульсов за один оборот	Частота вращения, об/мин	Уровни выходных сигналов, В	Ток нагрузки, мА
ПДФ-3	90—600	До 3000	Лог. «0» ≤ 0,5 Лог. «1» ≤ 24	20
ПДФ-3Д	720—2500	До 1200	Лог. «0» ≤ 0,5 Лог. «1» ≤ 24	20
ПДФ-5	100—2500	До 1200	Лог. «0» ≤ 0,5 Лог. «1» ≤ 24	20

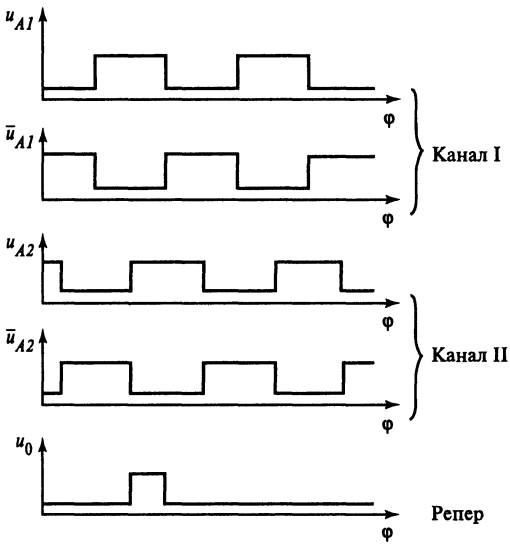


Рис. 56.47. Графики выходных напряжений датчика серии ПДФ:

u_{A1}, $\overline{u}_{A1}$ — прямой и инверсный сигналы выходного канала I датчика; u_{A2}, $\overline{u}_{A2}$ — прямой и инверсный сигналы выходного канала II датчика; u_0 — реперный сигнал

для измерения угловых перемещений — датчики абсолютных значений серии ПКФ.

Датчик ПДФ имеет двухканальные выходы, генерирующие две серии импульсов *A1* и *A2*, сдвинутых один относительно другого на электрический угол, равный 90°. При вращении вала по часовой стрелке импульсы серии *A1* опережают импульсы серии *A2*. В датчике предусмотрен реперный импульс шириной в 90°. Передний фронт этого импульса совпадает с передним фронтом выходного импульса серии *A2*, задний — с задним фронтом выходного импульса серии *A1* (рис. 56.47).

Каждая серия выходных импульсов и реперный импульс представлены в прямом и инверсном виде.

Технические данные дискретных датчиков скорости серии ПДФ приведены в табл. 56.85.

Основные технические данные дискретных датчиков положения серии ПКФ приведены в табл. 56.86.

Таблица 56.86. **Технические данные датчиков положения серии ПКФ**

Наименование	Тип	
	ПКФ-1	ПКФ12-1
Форма представления выходной информации	Двоичный код Грея	Двоичный код Грея
Разрядность выходного кода	10	12
Способ выдачи выходного сигнала	Параллельный	Параллельный
Уровни выходных сигналов, В	Лог. «0» ≤ 5 Лог. «1» ≤ 24	Лог. «0» ≤ 5 Лог. «1» ≤ −10
Разрешающая способность, число импульсов	1024	4096

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

56 1 **Электротехнический** справочник В 4-х т Т 2 Электротехнические изделия и устройства / Под общ ред профессоров МЭИ В Г Герасимова и др (гл ред И Н Орлов) —8-е изд , испр и доп М Изд-во МЭИ, 1998

56 2 **Справочник** по электрическим машинам В 2-х т / Под общ ред И П Копылова, Б К Клокова М Энергоатомиздат, 1988, 1989

56 3 **Алиев И.И.** Электротехнический справочник —3-е изд , испр и доп М Издательское предприятие «РадиоСофт», 2000

56 4 **Анурьев В.И.** Справочник конструктора-машиностроителя В 3-х т Т 3 —7-е изд , перераб и доп М Машиностроение, 1992

56 5 **Редукторы** и мотор-редукторы общемашиностроительного применения Справочник / Л С Бойко, А З Высоцкий, Э Н Галиченко и др М Машиностроение, 1984

56 6 **Особенности** тиристорных преобразователей напряжения для электроприводов механизмов массового применения / А О Горнов, В А Анисимов, Ю В Рожанковский // Промышленная энергетика 1990 № 10 С 19—23

56 7 **Тиристорные** преобразователи напряжения для асинхронного электропривода / Л П Петров, О А Андрющенко, В И Капинос и др М Энергоатомиздат, 1986

56 8 **Браславский И.Я.** Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением М Энергоатомиздат, 1988

56 9 **Асинхронные** электроприводы с тиристорными преобразователями напряжения (современное состояние разработок) / И Я Браславский, А А Бурлаков, А М Зюзев и др // Электротехническая промышленность Сер 08 Электропривод 1989 Вып 24 С 1—56

56 10 **Грейвулис Я.П., Рыбицкий Л.С.** Тиристорный асинхронный электропривод для центробежных насосов Рига Зинатне, 1983

56 11 **Сидоров Н.В.** Оценка теплового режима асинхронного двигателя при питании от тиристорного преобразователя напряжения Сб науч трудов М МЭИ, 1988 № 165 С 111—117

56 12 **Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф.** Общий курс электропривода М Энергоатомиздат, 1992

56 13 **Энергосберегающая** технология электроснабжения народного хозяйства В 5 кн Практ пособие / Под ред В А Веникова Кн 2 Энергосбережение в электроприводе / Н Ф Ильинский, Ю В Рожанковский, А О Горнов М Высшая школа, 1989

56 14 **Пар И.Т., Захарова З.А.** Энергосберегающие микропроцессорные регуляторы напряжения для асинхронного привода // Электротехническая промышленность Сер 08 Электропривод 1990 Вып 28 С 1—44

56 15 **Масандилов Л.Б.** Электропривод подъемных кранов М Изд-во МЭИ, 1998

56 16 **Булгаков А.А.** Частотное управление асинхронными электродвигателями М Наука, 1966

56 17 **Сандлер А.С.** Регулирование скорости вращения мощных асинхронных двигателей М Энергия, 1966

56 18 **Бедфорд Б., Хофт Р.** Теория автономных инверторов Пер с англ М Энергия, 1969

56 19 **Бернштейн И.Я.** Тиристорные преобразователи частоты без звена постоянного тока М Энергия, 1968

56 20 **Бродовский В.Н., Иванов Е.С.** Приводы с частотно-токовым управлением М Энергия, 1974

56 21 **Кривицкий С.О., Эпштейн И.И.** Динамика частотно-регулируемых электроприводов с автономными инверторами М Энергия, 1970

56 22 **Сандлер А.С., Сарбатов Р.С.** Преобразователи частоты для управления асинхронными двигателями М Энергия, 1966

56 23 **Сандлер А.С., Гусяцкий Ю.М.** Тиристорные инверторы с широтно-импульсной модуляцией М Энергия, 1968

56 24 **Тиристорные** преобразователи частоты в электроприводе / Под ред Р С Сарбатова М Энергия, 1980

56 25 **Справочник** по преобразовательной технике / Под ред И М Чиженко Киев Техника, 1978

56 26 **Фираго Б.И., Готовский Б.С., Лисс З.А.** Тиристорные циклоконверторы Минск Наука и техника, 1973

56 27 **Мыцык Г.С.** Расчет параметров входного и выходного токов полностью управляемых непосредственных преобразователей с циклическим алгоритмом управления // Электричество 1977 № 1 С 62—67

56 28 **Pohjalainen P., Tiitinen P., Lalu J.** The next generation motor control method Direct Torque Control, DTC EPE Chapter Symposium Lausanne, Switzerland, 1994 P 1—7

56 29 **Современное** состояние и тенденции в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе (краткий аналитический обзор) / Л Х Дацковский, В И Роговой, Б И Абрамов и др // Электротехника 1996 № 10 С 18—28

56 30 **Преобразователи** частоты в современном электроприводе Доклады научно-практического семинара М Изд-во МЭИ, 1998

56 31 **Электропривод** переменного тока с частотным управлением / Ю Бюттер, Ю М Гусяцкий, А В Кудрявцев и др , Под ред Г А Щукина М Изд-во МЭИ, 1989

56 32 **Уильямс Б.** Силовая электроника приборы, применение, управление М Энергоатомиздат, 1993

Раздел 57

МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ

СОДЕРЖАНИЕ

57.1. Функции и основные структуры 123
57.2. Универсальные промышленные контроллеры 126
Общие положения (126). Программируемые логические контроллеры (128). Промышленные компьютеры (143). Промышленные контроллеры (149).
57.3. Контроллеры управления движением 150
Типовые структуры систем управления движением (150). Примеры контроллеров управления движением (154). Совмещенные контроллеры-сервоусилители (155). Комплексные системы управления движением (157).
57.4. Специализированные встраиваемые программируемые контроллеры 159
Микроконтроллеры класса «Motor Control» (160). Примеры перспективных систем прямого цифрового управления приводами переменного тока (175).
Список литературы 179

57.1. ФУНКЦИИ И ОСНОВНЫЕ СТРУКТУРЫ

По отношению к микропроцессорным средствам управления системы электропривода можно рассматривать с двух сторон. С одной стороны, регулируемый электропривод — одна из важнейших составных частей систем комплексной автоматизации производства. Вследствие этого для управления системами электропривода широко применяются технические средства современных технологий автоматизации: промышленные компьютеры, технологические контроллеры, микропроцессорные программно-технические комплексы (рис. 57.1). С другой стороны, в состав современной системы регулируемого электропривода обязательно входит преобразователь на основе силовых полупроводниковых ключей. Для управления длительностью проводящего состояния этих ключей в соответствии с требованиями по созданию определенных электромеханических характеристик привода используются специализированные встраиваемые микропроцессорные системы (МП-системы). Элементная база для создания таких систем — однокристальные микро-



Рис. 57.1. Классификация микропроцессорных средств, используемых в системах управления электроприводом

процессорные контроллеры (МК). Специфика задач, возникающих при построении замкнутых цифровых систем управления электроприводом, а также возросшая потребность в таких системах обусловили выделение проблемно-ориентированного сектора МК для управления электрическими двигателями — микроконтроллеров класса «Motor Control». Таким образом, с одной стороны, микропроцессорные средства предстают в виде функционально и конструктивно законченных устройств, которые подлежат выбору и последующему программированию, а с другой стороны, в виде элементной базы микросхем, на основе которых надлежит проектировать встраиваемую систему управления.

На рис. 57.2 приведена обобщенная структурная схема автоматизированной системы управления (АСУ) технологической установки, в которую в качестве одного из исполнительных органов входит регулируемый электропривод. Его основная функция — регулирование частоты вращения вала двигателя. Коммутацию токов в обмотках двигателя осуществляет силовой электронный преобразователь, неотъемлемой частью которого является система управления. На нее возложены функции формирования длительности сигналов проводящего состояния силовых ключей, быстродействующего регулятора тока, регулятора скорости, реализации различных режимов плавного пуска и торможения (токоограничение, ограничение ускорения за счет задатчика интенсивности, S-кривые с ограничением рывка), защиты и самодиагностики. Совершенствование технико-экономических показателей регулируемого электропривода в значительной степени обусловлено:

переходом к алгоритмам бездатчикового управления, которые требуют увеличения производительности управляющего МК;

повышением частоты коммутации ключей силового преобразователя до 20 кГц, вследствие чего формирование сигналов управления этими ключами уже не может быть реализовано только программными средствами.

Эти два обстоятельства определили своеобразие архитектуры специализированных МК для управления электроприводом: высокопроизводительное процессорное ядро в сочетании с периферийными модулями, которые на аппаратном уровне формируют сигналы управления ключами преобразователя, реализуют синхронизированное с ними быстрое преобразование аналоговых сигналов токов и напряжений в обмотках двигателя в цифровой код. МК с такой архитектурой получили название «Motor Control». На основе именно этих МК выполняется специализированный программируемый контроллер в составе преобразователя частоты регулируемого электропривода.



Рис. 57.2. Двухуровневая АСУ с регулируемым электроприводом в качестве исполнительного устройства: *ДU* — датчик напряжения; *ДI* — датчик тока; *Дv* — датчик скорости; *Д1*, *Д2*, *Д3* — датчики технологических величин

В рассматриваемом примере (см. рис. 57.2) задача локального управления режимами установки в целом возложена на *технологический контроллер*, который посредством устройств ввода считывает информацию о параметрах объекта управления, вычисляет корректирующие воздействия и с помощью устройств вывода передает их на исполнительные устройства, одним из которых является регулируемый электропривод. В большинстве случаев на технологический контроллер возложены еще две функции: связи с пультом оператора (MMI — Men Maching Interface) и обмен данными с системой управления верхнего уровня (АСУ производственной линии, участка, предприятия) с использованием одного из стандартов информационных промышленных сетей. В качестве аппаратного решения технологического контроллера могут быть использованы программируемые логические контроллеры (ПЛК), PC-совместимые промышленные контроллеры, промышленные компьютеры, т.е. универсальные изделия стандартного ряда средств промышленной автоматизации, архитектура, аппаратные и программные решения которых не имеют непосредственной ориентации на задачи управления электроприводом.

По отношению к регулируемому электроприводу как исполнительному устройству структура локальной АСУ может претерпевать изменения. Так, в случае достаточно простых алгоритмов управления вычислительная мощность встроенных в преобразователь микропроцессорных средств управления оказывается достаточной для реализации на программном уровне регулятора произвольной технологической величины, значение которой изменяется с изменением частоты вращения вала двигателя. Тогда при наличии в аппаратных средствах встраиваемой специализированной системы управления преобразователем дополнительных аналоговых и дискретных входов-выходов возможно создание простейшей системы управления технологической установкой локального уровня на базе только встраиваемого контроллера без применения дополнительных технологических контроллеров. Тогда сам вентильный преобразователь становится локальным узлом АСУ, т.е. по отношению к регулируемому электроприводу локальная АСУ становится одноуровневой (рис. 57.3). Современные преобразователи частоты предусматривают такую возможность:

встраиваемая микропроцессорная система имеет в своем составе коммуникационный порт с протоколом обмена в одном из стандартов информационных промышленных сетей;

система команд для изменения настроек пользователя содержит типовые команды программирования ПЛК, реализованного на программном уровне в режиме разделения времени с задачами управления преобразователем частоты (пример использования технологии Soft PLC).

В классе регулируемых электроприводов можно выделить подкласс, получивший название сервоприводы (исполнительные приводы). Они, как правило, осуществляют вспомогательные перемещения и имеют относительно малую мощность. В качестве основной функции сервоприводов могут выступать отработка заданной последовательности перемещений (позиционирование), отработка требуемой траектории движения с требуемой скоростью (контурное управление). Достаточно часто указанные функции необходимо выполнять согласованно для нескольких осей многодвигательного электропривода, осуществляющего перемещение рабочего органа или обрабатываемого материала на плоскости или в пространстве. Как правило, требуется достаточно высокая точность позиционирования и воспроизведения траектории, что обусловливает характерную черту сервоприводов — наличие замкнутого контура регулирования

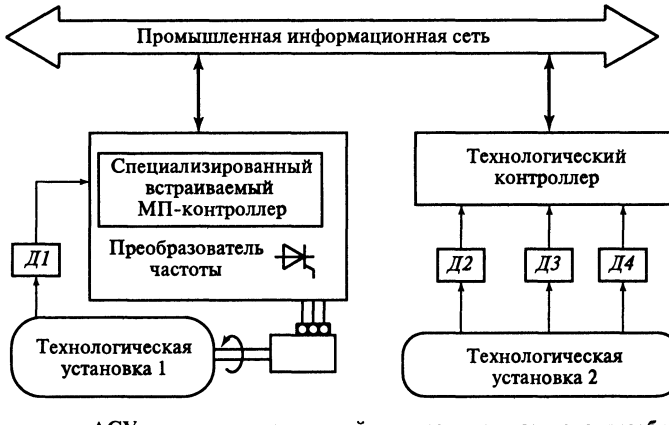


Рис. 57.3. Одноуровневая АСУ: специализированный контроллер в составе преобразователя частоты выполняет функции ПЛК

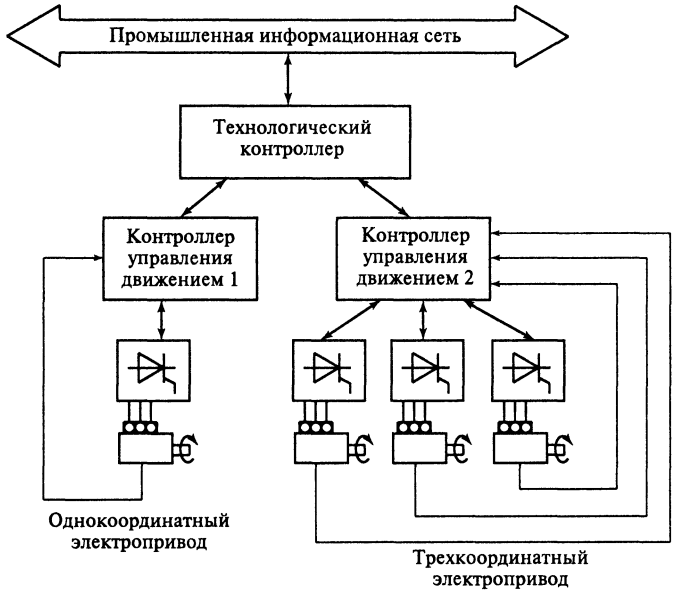


Рис. 57.4. Трехуровневая АСУ: для управления группами взаимосвязанных приводов используются контроллеры управления движением

с обратной связью по положению, реализованной в цифровом виде с помощью либо дискретных кодовых датчиков положения, либо дискретных импульсных датчиков, либо специальной цифровой обработки сигналов, получаемых от сельсинов, синусно-косинусных вращающихся трансформаторов, либо с помощью других специальных датчиков. Контур регулирования положения может отсутствовать только в сервоприводах на базе шаговых двигателей, поскольку в данном случае свойство самого двигателя — фиксировать положение выходного вала — позволяет при определенных условиях получить достаточно высокие показатели по точности в разомкнутой по положению структуре системы регулирования.

Изначально сервоприводы наиболее широко были распространены в электрооборудовании металлорежущих станков и входили в состав систем числового программного управления (ЧПУ). Расширение сферы автоматизации привело к появлению специализированных устройств управления — контроллеров управления движением сервоприводов и специализированных силовых преобразователей — сервоусилителей, способных работать как автономно, так и в составе различных распределенных систем управления, в частности, как интеллектуальные модули в составе ПЛК.

Конструктивно контроллеры и силовые преобразователи сервоприводов могут быть оформлены в виде отдельных модулей, устанавливаемых на свободное место крейта промышленного компьютера, ПЛК или другого стандартного каркаса, либо в виде отдельных блоков, либо контроллер и силовой преобразователь объединены в одном блоке. Следует отметить, что часто один модуль контроллера управления движением может обслуживать сразу несколько взаимосвязанных осей. В этом случае по отношению к регулируемому электроприводу локальная АСУ становится трехуровневой (рис. 57.4). На верхнем уровне расположен технологический контроллер — универсальное средство промышленной автоматизации. На среднем уровне располагаются контроллеры управления движением, которые могут быть интеллектуальными модулями в составе ПЛК, на котором реализован верхний уровень, или представлять собой отдельный модуль. Но и в том, и в другом случае контроллер управления движением — это проблемно ориентированное средство промышленной автоматики, которое уже специализировано для управления определенным типом электропривода, но оно не привязано жестко к конкретной модели исполнительного устройства. На нижнем уровне расположен специализированный встраиваемый программируемый контроллер в составе силового преобразователя.

57.2. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ КОНТРОЛЛЕРЫ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В недавнем прошлом в качестве технологического контроллера использовались преимущественно программируемые логические контроллеры. На ПЛК возлагались функции релейно-контактной

автоматики, вычислителей и регуляторов технологических контуров Такое положение дел объясняется, с одной стороны, ходом исторического развития (ПЛК были первым специализированным микропроцессорным средством промышленной автоматизации), а с другой стороны, удобством его программирования (ПЛК программируются на проблемно ориентированных языках, таких как язык релейно-контактных схем, функциональных блоков регуляторов)

Однако в настоящее время положение дел изменилось коренным образом Под функциональным определением *технологический контроллер* скрывается целая гамма технических средств автоматизации, среди которых наиболее ярко выделяются три группы изделий *промышленные компьютеры, промышленные контроллеры программируемые логические контроллеры* Следует особо подчеркнуть, что во многих литературных источниках все эти средства часто характеризуют общим понятием «промышленный контроллер» (ПК, не путать с персональным компьютером!) Использование общего понятия не является случайным Все перечисленные средства обладают следующими свойствами

1 Средства выполнены на основе микропроцессорной элементной базы, т е являются микропроцессорными системами Каждая микропроцессорная система имеет в своем составе память, в которую разработчик системы управления заносит последовательность действий, законы регулирования и необходимые параметры уже после выпуска ПК, на этапе проектирования, наладки и эксплуатации конечной системы Именно программируемость микропроцессорных систем в общем и ПК в частности обеспечивает широкое внедрение этих средств во все сферы промышленного производства

2 Средства уже имеют в своем составе устройства сопряжения с объектом (УСО) или могут быть легко дооснащены ими (случай промышленного компьютера) На УСО возлагаются функции гальванической изоляции между источниками дискретного и аналогового сигналов, оконечным силовым оборудованием и портами ввода-вывода микропроцессорной системы, приведения границ шкалы непрерывного сигнала к стандартному диапазону измерительного канала, предварительной низкочастотной фильтрации Именно наличие УСО делает ПК полностью законченным средством автоматизации, которое не требует никаких аппаратных доработок в процессе адаптации к объекту управления

3 Большинство ПК имеют модульное конструктивное исполнение, при котором базовая модель представляет собой крейт с набором посадочных мест, объединенных внутренней магистралью ПК, и минимально необходимый набор модулей центральный процессор, память, источник питания, устройства ввода-вывода дискретных сигналов Дополнительные модули разнообразных УСО, коммуникационных процессоров для работы в информационной промышленной сети, модули обслуживания клавиатуры и панелей индикации выбираются пользователем и устанавливаются на свободные места крейта Такая конструкция обеспечивает чрезвычайную гибкость технических средств ПК и для подавляющего большинства задач управления позволяет собрать необходимую конфигурацию аппаратных средств

4 ПК имеют специальное конструктивное исполнение размещение плат на специальных шасси, покрытие плат специальными составами, применение пыле- и влагонепроницаемых корпусов, создание избыточного давления внутри корпуса и т д Все эти меры обеспечивают работоспособность с высокой надежностью в условиях повышенного уровня электромагнитных помех, агрессивной химической среды, вибраций, удаленного расположения объекта от средства управления Вследствие этого обеспечивается высокий уровень надежности системы АСУ

Разбиение множества ПК на перечисленные выше группы средств не является строго обозначенной отличительными признаками классификацией Границы между средствами в значительной степени размыты, поэтому невозможно дать строгое определение каждого из этих средств Однако описать функциональные особенности каждой группы средств представляется возможным

Промышленный компьютер (IPC — Industrial PC) В настоящее время это выполненная на элементной базе микропроцессоров для персональных компьютеров (от IBM386 до Pentium MMX) *полностью программно и аппаратно совместимая с персональными компьютерами* и обладающая характерным для персональных компьютеров набором устройств ввода-вывода (жесткие и гибкие магнитные диски или полупроводниковые Flash-диски, контроллеры для подключения дисплея, клавиатуры, контроллеры типовых интерфейсов) микропроцессорная система в промышленном конструктивном исполнении

Промышленный контроллер — микропроцессорная система, вычислительная мощность которой практически не отличается от мощности промышленного компьютера, однако если для первого одной из основных задач была функция MMI, то контроллер ориентирован в основном на работу в качестве локального узла сбора и передачи данных в распределенной сети в реальном масштабе времени или на локальное управление объектом Промышленные контроллеры оснащены аналоговыми и дискретными адаптерами ввода-вывода подобно ПЛК В последнее время под промышленным контроллером все чаще понимают программно совмес-

тимые с компьютерами IBM PC аппаратные платформы, хотя это и не обязательно.

С функциональной точки зрения изделия этих двух групп объединяет важная особенность — открытое программное обеспечение. В эти изделия может быть загружено любое программное обеспечение, работающее под управлением операционной среды Windows или специальных операционных систем (ОС) реального времени, программа управления может быть написана на языках высокого уровня общего применения. Эта особенность является чрезвычайно привлекательной.

Программируемый логический контроллер (ПЛК, PLC — Programmable Logic Controller) — микропроцессорная система специальной архитектуры. Оснащена проблемно ориентированным программным обеспечением для реализации алгоритмов логического управления и (или) замкнутых систем автоматического управления в сфере промышленной автоматики. ПЛК отличаются от специализированных встраиваемых микропроцессорных контроллеров универсальностью структуры и инвариантностью по отношению к объекту управления в пределах указанного класса задач. Программное обеспечение ПЛК не является открытым. И в этом главное отличие ПЛК от промышленных компьютеров и контроллеров.

ПРОГРАММИРУЕМЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ КОНТРОЛЛЕРЫ

Первые ПЛК появились в 1967 г. и были предназначены для локальной автоматизации наиболее часто встречающихся в промышленности технологических задач, которые описывались преимущественно логическими уравнениями. ПЛК с успехом заменили блоки релейной автоматики и устройства жесткой логики на интегральных микросхемах малой и средней степени интеграции [57.1]. Отсюда и название программируемый логический контроллер — ПЛК.

Тридцатилетний опыт технического развития и эксплуатации привел к выделению ПЛК в отдельный класс микропроцессорных систем. ПЛК представляют собой завершенную форму микропроцессорных средств, которые характеризуются оригинальной архитектурой и специальным программным обеспечением. Реализованные решения в области аппаратных и программных средств преследуют цель обеспечения максимально возможного уровня надежности при работе в промышленных условиях эксплуатации. Весь комплекс этих решений можно разделить на следующие функциональные группы: специальная архитектура центрального процессора ПЛК, различные способы резервирования, программные методы защиты информации, специальная схемотехника УСО, специальные быстродействующих магистрали связи с удаленными УСО, встроенная диагностика, специальное конструктивное исполнение.

Структура ПЛК, подключенного к объекту управления, представлена на рис. 57.5. Центральный процессор (CPU) включает собственно микропроцессор, память программ и память данных, формирователи магистрали сопряжения с локальными модулями ввода-вывода (локальными модулями УСО называют модули, конструктивно расположенные в одном крейте с платами CPU и памяти ПЛК), адаптеры связи с удаленными модулями УСО, адаптеры связи с сервисным периферийным оборудованием (пульт оператора, дисплей, печатающее устройство).

Архитектура CPU ПЛК имеет следующие особенности:

память программ и память данных ПЛК разделены не только логически, но и физически. Специализация центральной памяти ПЛК является их особенностью. Причем область памяти выходных переменных обязательно выполнена энергонезависимой с целью поддержания рабочего состояния объекта при отключении питания;

CPU ПЛК имеет устройства контроля адресного пространства;

при построении CPU используются методы структурного резервирования составных элементов. Например, CPU может включать два обрабатывающих блока, которые объединены блоками принятия решений. Сигналы выходных воздействий формируются только в том случае, если они одинаковы для обоих блоков. Отказавшая структура выявляется с помощью встроенных тестов;

CPU ПЛК имеют в своем составе несколько сторожевых таймеров, которые контролируют строго определенное время выполнения одного цикла управляющей программы и отдельных ее частей;

CPU средних и мощных ПЛК часто выполнены многопроцессорными. Причем распределение задач между отдельными процессорами обусловлено типовыми алгоритмами функционирования ПЛК, а способы передачи информации между процессорами подчиняются жесткому требованию реализации программы управления объектом за строго определенный временной интервал.

Интерфейс между датчиками, исполнительными устройствами и CPU ПЛК обеспечивается специальными электронными модулями ввода-вывода, в ПЛК их часто называют адаптерами ввода-вывода. В связи с тем что ПЛК ориентированы на работу в промышленных условиях, особое внимание уделяется схемотехнике и конструкции помехоустойчивых дискретных входов-выходов. Кроме собственно приема информации адаптеры дискретных входов производят предварительную обработку сигна-

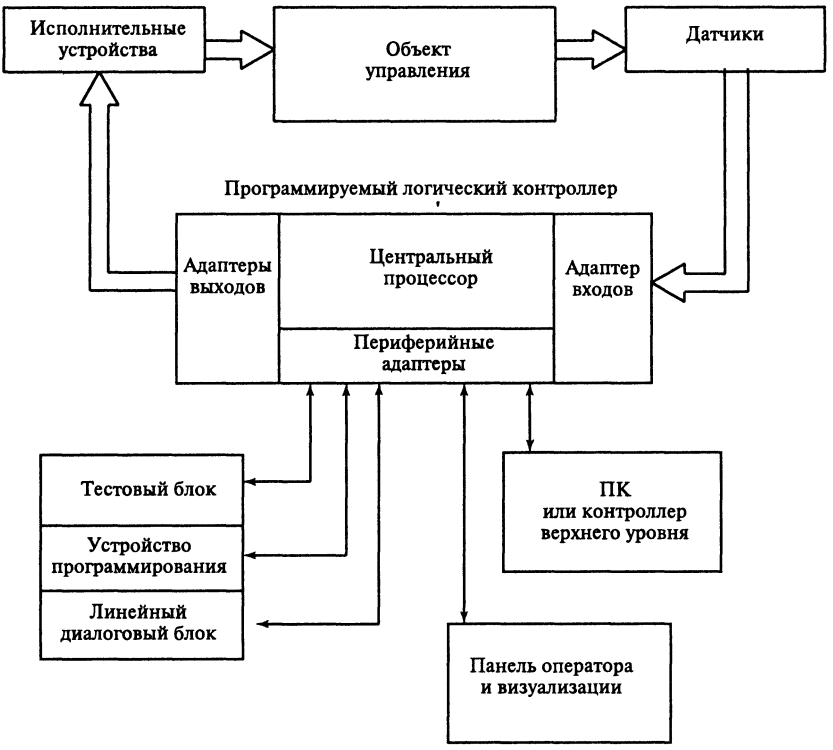


Рис. 57.5. Программируемый логический контроллер в системе управления

ла, выделение полезного сигнала из зашумленного, реализуют развязку сигналов с различными уровнями мощности. Уровни постоянного и переменного напряжения входного дискретного сигнала стандартизированы: постоянное напряжение 24 В, переменное 130 В и 240 В. Адаптеры дискретных выходов должны кроме гальванической развязки обеспечивать определенную мощность сигнала, необходимую для управления исполнительным устройством. Стандартные параметры выходов следующие: постоянное напряжение 24 В, переменное напряжение 130 и 240 В при токе до 10 А.

Память программ ПЛК состоит из двух сегментов. Первый сегмент — неизменяемая часть, которая содержит в себе операционную систему ПЛК. По существу, это интерпретатор инструкций программы пользователя, которые размещаются во втором сегменте памяти — сегменте программы управления. Второй сегмент — это изменяемая часть программы. Она заносится на этапе адаптации серийного изделия для управления конкретным объектом.

ПЛК характеризуются циклическим характером работы. Каждый цикл выполнения программы управления состоит из четырех этапов (рис. 57.6). На первом этапе происходит тестирование аппаратуры CPU. Если тест дает удовлетворительные результаты, производится запуск цикла. На втором этапе осуществляется опрос всех входных переменных и запоминание их состояния в специальной области оперативной памяти данных, называемой PII (Process Input Image — образ состояния входных переменных). На третьем этапе CPU производит вычисление логических выражений, составляющих программу пользователя, используя в качестве аргументов состояние входных образов и внутренние переменные. Последние используются для обозначения режимов работы системы, а также отражают состояние программно-моделируемых таймеров и счетчиков. Результатом выполнения программы являются значения выходных переменных и новые значения внутренних переменных. CPU записывает выходные переменные в другую специальную область памяти данных, называемую POI (Process Output Image — образ состояния выходных переменных). Одновременно CPU управляет счетчиками, таймерами и обозначает новые режимы работы системы установкой или сбросом битов состояний в памяти. На четвертом этапе слово выходных воздействий выдается (все разряды одновременно) из POI в порты вывода и поступает на входы адаптеров выходных сигналов. Далее цикл работы ПЛК воспроизводится снова.

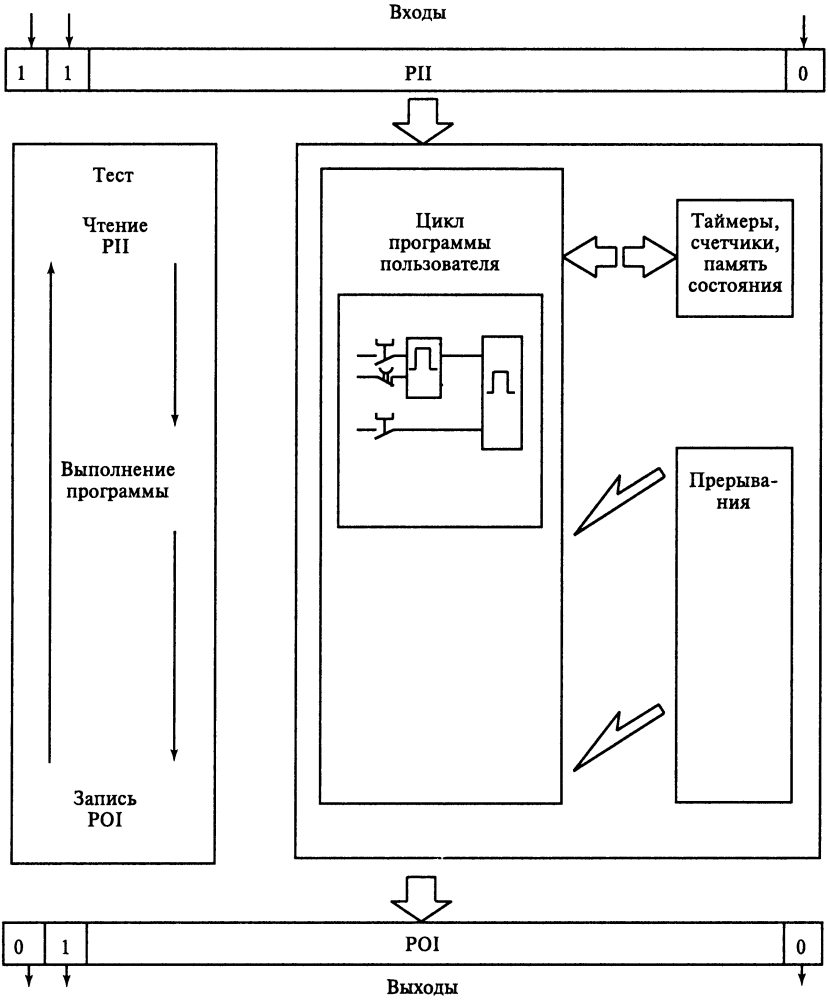


Рис. 57.6. Диаграмма работы ПЛК «Simatic S7-200/300/400»

Такая организация работы ПЛК (по существу, это простейшая операционная система) имеет следующие преимущества:

1) время реакции программы управления на изменение входных сигналов строго определено. Если обратиться к классификации ОС вычислительных средств, то такая система носит название ОС реального времени с жестким режимом работы;

2) невозможность внесения изменений в интерпретатор инструкций гарантирует исключение ошибок программирования аппаратных средств на нижнем уровне. В этом случае необходимость изучения структуры и особенностей выполнения аппаратных средств полностью отпадает. Не случайно, что при описании ПЛК никогда не конкретизируется, на какой элементной базе (тип микропроцессора) выполнен ПЛК;

3) интерпретатор инструкций содержит в себе аппаратно-ориентированные алгоритмы программной защиты от сбоев аппаратуры, которые оставаясь практически незаметными для пользователя, значительно повышают надежность системы.

Рассмотренная модель функционирования ПЛК поясняет, почему быстродействие ПЛК принято оценивать эквивалентным временем «опроса» 1024 (1 К) дискретных входов. Обычно указывается время выполнения одного цикла программы средней сложности для 1024 дискретных входов, включая этапы чтения PII и загрузки данных из POI в буферы. В некоторых случаях может быть указано эквивалентное время «опроса» одного входа. Следует отчетливо представлять, что последнее зависит от быстродействия CPU, но оно всегда будет превышать время выполнения одной битовой инструкции микроконтроллером CPU, так как для реализа-

ции полного цикла даже для одного дискретного входа требуется строго определенная последовательность. Грамотно составленный проспект ПЛК обычно указывает две величины, характеризующие быстродействие: время выполнения битовой инструкции CPU и время опроса 1 К дискретных входов. Первое характеризует быстродействие CPU, второе — быстродействие ПЛК как законченного устройства, включая особенности операционной системы. Следует отметить, что рассмотренный исторически сложившийся способ оценки быстродействия в настоящее время используется преимущественно для малых ПЛК. Для средних и мощных ПЛК, программы управления которых включают большое число вычислительных операций, оценки, основанные на модели логического управления, перестали быть актуальными. Для этих ПЛК указывается время выполнения операций определенного типа. В табл. 57.1 представлены сведения о быстродействии некоторых ПЛК.

Рассмотренная упрощенная ОС ПЛК является однозадачной. Если ПЛК заменяет несколько независимых релейных схем, то программные модули, реализующие каждую из схем, будут расположены в памяти последовательно. Поэтому время реакции ПЛК на изменение входных сигналов будет определяться суммарным временем выполнения всех программных модулей. Если среди обслуживаемых устройств окажется такое, которое требует более быстрой реакции, то рассматриваемая однозадачная ОС этого сделать не позволит. Очевидно, что мультипроцессорный путь повышения быстродействия применим только для мощных ПЛК (но он, конечно, не является единственным для мощных ПЛК).

Другим способом повышения быстродействия ПЛК является переход к многозадачным ОС. Ранее многозадачные ОС были характерны только для мощных ПЛК, в настоящий момент такая ОС не редкость даже для ПЛК малого формата. Одним из способов создания многозадачных ОС является использование механизма прерывания по сигналам внешних устройств, которыми управляет ПЛК. Такой механизм используют все ПЛК фирмы «Siemens».

Придание ПЛК регулирующих функций потребовало введения в состав языков программирования ПЛК команд работы с двоичными словами. ПЛК стали выполнять сложные вычисления. Причем представления чисел в формате с фиксированной запятой оказалось недостаточно, и сейчас многие ПЛК имеют в системе команд библиотеки для работы с числами в формате с плавающей запятой. В первую очередь арифметические команды используются для реализации алгоритмов ПИД-регуляторов, причем не просто регуляторов, а с алгоритмами самонастройки и оптимизации переходных процессов.

Несмотря на такое существенное усложнение базового программного обеспечения, разработчики ПЛК не спешат уходить от проверенных временем принципов построения ПЛК. Так, алгоритм функционирования всех ПЛК фирмы «Siemens» (законодателя в области ПЛК), вплоть до мощного S7-400, выполнен соответствующим схеме рис. 57.6, а не в виде системы со свободно загружаемым программным обеспечением. Очень показательным является пример с ПЛК «Telemecanique TSX 47-10/20». Для включения алгоритма ПИД-регулирования в его программу необходимо не только записать соответствующие команды, но и подключить специальный блок памяти в разъем на передней панели корпуса ПЛК. Пользователю при обращении к функции ПИД-регулирования следует задать только коэффициенты и постоянные времени к неизменяемому программному коду регулятора.

ПЛК принято делить на три группы. Ранее эти группы называли гаммами [57.1]. Сейчас в русско-

Таблица 57.1. **Быстродействие ПЛК**

Тип ПЛК	Оценка быстродействия, указанная в каталоге	Примечание
Simatic S7-200	Время выполнения 1 К бинарных команд 0,8 мс	Малый ПЛК
Modicon TSX Micro	Время выполнения 1 К бинарных команд 0,15 мс	
	Время «опроса» 1 К дискретных входов 0,7 мс	
Simatic S7-300	Время выполнения 1 К бинарных команд 0,3 мс	Средний ПЛК
	Время выполнения 1 К смешанных команд 0,8 мс	
DL-305 Direct Logic	Время выполнения 1 К бинарных команд 0,87 мс	
	Время «опроса» 1 К дискретных входов 4—5 мс	
Simatic S7-400	Время выполнения 1 К бинарных команд 0,08 мс	Мощный ПЛК
	Время выполнения 1 К операций сложения 0,08 мс	
	Время выполнения 1 К операций сложения в формате с плавающей запятой 0,48 мс	

Таблица 57.2. **Функции ПЛК разного формата**

Критерии определения гаммы ПЛК в 1979 г.			Критерии определения формата ПЛК в 1998 г.		
Гамма	Число дискретных входов-выходов	Выполняемые функции	Формат	Число дискретных входов-выходов	Выполняемые функции
Нижняя	$20 < N < 100$	Обработка цифровых данных не производится	Малый, или micro PLC	$10 < N < 100$	Типовые: логические, временные, счетные, арифметические в формате с фиксированной запятой. Расширенные: арифметические с плавающей запятой, ПИД-регулирование
Средняя	$100 < N < 500$	Производится упрощенная цифровая обработка	Средний, или mini PLC	$100 < N < 500$	Логические, временные, счетные, цифровая обработка, ПИД-регулирование, регулирование по законам нечеткой логики (Fuzzy logic). Сетевые возможности
Верхняя	$100 < N < 4096$	Производится совершенная цифровая обработка	Мощный, или power PLC	$100 < N < 128$ К	Логические, временные, счетные, цифровая обработка, ПИД-регулирование, регулирование по законам нечеткой логики (Fuzzy logic). Работа с таблицами, средства MMI интерфейса, расширенные сетевые возможности

язычной литературе используют термин «формат», а в англоязычной эти три группы характеризуют как micro PLC, mini PLC и power PLC. В табл. 57.2 представлены количественные и качественные критерии для ПЛК разного формата, которые были приняты 20 лет назад [57.1] и те, которые существуют в настоящее время.

Данные табл. 57.2 свидетельствуют о том, что порог рентабельности ПЛК сместился. В 1979 г. ПЛК нижней гаммы считались рентабельными, если они заменяли устройство автоматики с общим числом входов-выходов, равным 20 [57.1], в настоящее время можно встретить ПЛК с 5—10 входами-выходами (табл. 57.3, контроллеры Logo). Произошло это не потому, что микропроцессорная элементная база стала относительно дешевле. Повысился уровень требований к простым устройствам автоматизации, которые должны обладать более развитым интерфейсом визуализации, а также обеспечивать возможность работы в общей информационно-управляющей сети предприятия. Две последние функции затруднительно реализовать другими средствами, кроме микропроцессорных. Одновременно повысилась функциональная сложность всех ПЛК. Раньше ПЛК нижней гаммы выполняли только логические, счетные и временные функции, сейчас примерно половина ПЛК малого формата реализует алгоритмы регулирования.

Функциональная гибкость ПЛК верхней гаммы существенно расширилась. Так, число дискретных входов-выходов, обслуживаемых «Simatic S7-400» может доходить до 128 К, число аналоговых входов — до 8 К. Мощные ПЛК реализуют задачи логического управления, регулирования, в том числе по законам нечеткой логики, имеют функции работы с таблицами для создания баз данных, оснащены программной поддержкой средств визуализации систем SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition).

Как уже отмечалось ранее, не всегда оправдана реализация станции оператора с использованием выделенного промышленного компьютера. Поэтому в ПЛК среднего формата и особенно мощных ПЛК особое внимание уделяется возможности подключения и программной поддержке пультов оператора и устройств визуализации технологического процесса. Практически все фирмы-изготовители ПЛК имеют в номенклатуре продукции ряд текстовых и графических панелей операторов, а также программные продукты для их параметрирования. Диапазон возможностей панелей оператора кратко рассмотрим на примере продукции фирмы «Siemens». Текстовые панели OP3/OP7/OP17 предназначены для простых применений; так, OP3 рекомендуются в качестве переносного пульта. Дисплей панелей жидкокристаллический с подсветкой, число строк от 2 до 4, число символов в строке от 20 до 40. Для OP17 максимальное число клавиш панели 46. Графические панели OP27/OP35/OP37 имеют разрешающую способность до 640 × 480 точек, число клавиш до 68. Панели имеют встроенный процессор, что разгружает ПЛК от операций формирования изображения в реальном времени.

При построении систем комплексной автоматизации требуется включение практически каждого ПЛК в информационную сеть предприятия, способную работать в сложных промышленных условиях Поэтому одним из основных требований к современному ПЛК любого формата является аппаратная и программная совместимость с одним или несколькими стандартами сетей промышленного назначения В недалеком прошлом многие фирмы-изготовители ПЛК и средств автоматизации разрабатывали собственные протоколы обмена (DH-485 для «Allen Bradley», K-sequence для «PLC-Direct», Telway для «Telemecanique»), что отражено в табл 57 3 и 57 4 Это в значительной степени обусловлено иерархической топологией сети для крупных производственных установок, которые требуют использования нескольких децентрализованных систем управления, выполненных, как правило, на ПЛК одной фирмы и подключенных к мощному ПЛК верхнего уровня той же фирмы Такой подход был выгоден фирмам-производителям, так как вынуждал применять только их оборудование Однако возросшая степень интеграции на уровне SCADA требует получения информации в централизованное пользование практически от каждого ПЛК Поэтому конкурентоспособными останутся те ПЛК, которые обеспечивают сопряжение с открытыми промышленными сетями, такими как Modbus, Profibus, Ethernet Именно адаптацией к различным промышленным сетям обусловлено чрезвычайное разнообразие CPU современных мощных ПЛК

ПЛК малого формата были и остаются наиболее многочисленной группой в семействе логических контроллеров Этот факт в полной мере подтверждается числом строк табл 57 3, в которой представлены ПЛК малого формата от ведущих мировых производителей, которые существуют на российском рынке Три фактора определяют их столь прочное положение Во-первых, в настоящее время наблюдается стремление к автоматизации тех объектов, которые ранее ей не подлежали управление освещением общественных зданий, различного рода раздаточными автоматами, турникетами, запорной арматурой различных трубопроводов и т д Во-вторых, «освоение» малыми ПЛК функций регулирования позволяет им в значительной мере заменить ПЛК среднего формата В-третьих, средние и мощные ПЛК частично вытесняются промышленными компьютерами и контроллерами

Анализ данных табл 57 3 позволяет отметить следующие тенденции в развитии малых ПЛК

Произошло изменение элементной базы памяти программ Энергонезависимые оперативные запоминающие устройства (ОЗУ) с блоком резервного питания на аккумуляторах заменили программируемые пользователем постоянные запоминающие устройства (ПЗУ) с электрическим стиранием (типа EEPROM или FLASH) Микросхемы этой элементной базы имеют большую информационную плотность при меньшем энергопотреблении Это позволило существенно увеличить память программ малых ПЛК (до 64 К) при уменьшении габаритов плат CPU Резервный автономный источник питания теперь может использоваться для поддержания работоспособности устройства в целом

Общее совершенствование микроэлектронной базы привело к миниатюризации малых ПЛК (рис 57 7) Максимальный линейный размер всех моделей лежит в пределах 20 см

Поменялся подход к конструктивному исполнению ПЛК малого формата Почти полностью исчезли малые ПЛК модульного исполнения Базовая модель ПЛК малого формата теперь имеет неизменяемую пользователем конфигурацию с фиксированным числом дискретных входов-выходов (их стали называть интегрированными) Базовая модель выполняется в нескольких модификациях, различающихся типом встроенного источника питания (+ 24 В или ~ 130 или 240 В), типом CPU и электрическими параметрами дискретных входов-выходов Это объясняется открывшейся в связи с микроминиатюризацией электронных компонентов возможностью повысить надежность ПЛК путем уменьшения числа плат в его конструктивном исполнении Нередки одноплатные варианты Несмотря на неизменяемую конфигурацию по числу входов-выходов базовой модели, практически все малые ПЛК обладают возможностью подключения модулей расширения с адаптерами аналоговых и дополнительных дискретных входов-выходов Существование именно модулей расширения преследует две цели Во-первых, обеспечить помехозащищенный ввод сигналов с удаленных датчиков, что достигается путем передачи данных от модуля расширения к базовой модели по специальной цифровой магистрали Длина такой магистрали может достигать нескольких сотен метров Поэтому схемотехническое исполнение цифровой части адаптеров расширения значительно отличается от аналогичных по функциям интегрированных адаптеров Иногда такие адаптеры называют модулями удаленного ввода И только во-вторых, модули расширения служат для увеличения числа входов-выходов и расширения их номенклатуры

Как правило, малые ПЛК имеют два способа программирования с помощью карманного программатора или через интерфейс последовательного обмена с использованием средств разработки, реализованных на персональном компьютере Для простейших ПЛК ясно прослеживается стремление к реализации режима программирования «на линии», при котором не требуется никаких дополнительных устройств (см Logo)

Таблица 57.3. **ПЛК малого формата (micro PLC)**

Модель ПЛК Фирма-производитель (габариты, мм) Условия работы	Выполняемые функции	Модификация	Параметры CPU	Дискретный ввод-вывод			Аналоговый ввод-вывод Специальные модули	Сетевые адаптеры	Языки программирования
				Количество	Параметры				
					Ввод	Вывод			
Simatic S7-200 Siemens							Входы 0—5 В; 0—50 мВ 1 В—30 В (всего 16 диапазонов) Выходы −10—+10 В 0—20 мА		
(160×80×62)	Логические, временные, счетные, арифметические		CPU212. Память программ 1 К ОЗУ данных 512 Быстродействие 1,3 мкс	Интегрированные 8/6 Максимальное*1 78			6/2*2	RS-485	
(197×80×62)	Логические, временные, счетные, арифметические с фиксированной и плавающей запятой	Неизменяемая конфигурация; 4 модификации в зависимости от типа CPU	CPU214. Память программ 2 К ОЗУ данных 2 К Быстродействие 0,8 мкс	Интегрированные 14/10 Максимальное*1 120	= 24 В ~ 130 В	Транзистор 24 В/0,5 Реле + 24 В/2 ~ 240 В/2 Триак ~ 240 В/2	12/4*2	RS-485	SREP7 Micro/DOS SREP7 Micro/WIN
(218×80×62)	Логические, временные, счетные, арифметические с фиксированной и плавающей запятой, ПИД-регулированием		CPU215. Память программ 8 К ОЗУ данных 2,5 К Быстродействие 0,8 мкс	Интегрированные 14/10 Максимальное*1 120			12/4*2	RS-485 PROFIBUS DP	
(218 × 80 × 62)	Логические, временные, счетные, арифметические с фиксированной и плавающей запятой, ПИД-регулированием		CPU216. Память программ 8 К ОЗУ данных 2,5 Быстродействие 0,8 мкс	Интегрированные 24/16 Максимальное*1 128			12/4*2	2 × RS-485	
Modicon-TSX Micro AEG Modicon	Логические, временные, счетные, арифметические со словами одинарной и двойной длины, в формате с плавающей запятой, работа с таблицами, ПИД-регулированием	Неизменяемая конфигурация; 3 модификации: TSX 37-10 TSX 37-21 TSX 37-22	Быстродействие 0,3 мкс Память программ 4,7 К Память программ 7,8 К Память программ 40 К	16/12 Допускает расширение до 248	= 24 В ~ 115 В ~ 240 В	Транзистор ~ 240 В/2 А Реле 240 В/2 А	8/8 Входы 4—20 мА ± 10 В Выходы 4—20 мА	Встроенный порт RS-232C Поддерживает сети с протоколом Modbus UNITELWAY	Набор языков: булевых операторов, РКС, графов Ручной программатор
TSX 17 micro PLC	Логические, временные, счетные	Неизменяемая конфигурация; 2 модификации по типу CPU	TSX17-10 Память программ 8 К Быстродействие 5 мкс	12/8 22/12 24/16	= 24 В ~ 24 В	Транзистор 24 В/2 А Реле 0,5 А	Нет	Встроенный порт RS-485 для терминала оператора и программатора	Фирменный язык PL7-1 (язык булевых операторов)
Telemeca niqua	Логические, временные, счетные, арифметические; 4 встроенных ПИД-регулятора; часы реального времени		TSX17-20 Память программ 24 К Быстродействие 12 мкс	12/8 22/12 24/16	= 24 В ~ 24 В	Транзистор 24 В/2 А Реле 0,5 А	4/2 Входы ± 10 В; ± 20 В Выходы 4—20 мА ± 10 В ШИМ-выход	Встроенный порт RS-232C Поддерживает сети с протоколом Modbus UNITELWAY Поддерживают работу с удаленными модулями	Фирменный язык PL7-1 Фирменный язык PL7-2 (язык графов и РКС)

MicroLogix 1000 Alen-Bradley 0—55 °C	Логические, временные, счетные, арифметические, высокоскоростной счетчик с квадратурным выходом для импульсного датчика положения	Неизменяемая конфигурация, 3 модификации по числу входов-выходов	—	10/6 20/12 12/5	= 24 В ~ 230 В	Транзистор Реле	Нет Нет 4/1	Встроенный порт RS-232C, может быть использован для подключения терминала оператора При использовании модуля 1761-NET-Aic можно объединить в сеть DH-485м	Ручной программатор или дистанционное программирование через модем
DL 205 PLC Direct by Koyo Inc 0—60 °C	Логические, временные, счетные, арифметические Логические, временные, счетные, арифметические, часы реального времени, встроенный журнал самодиагностики Логические, временные, счетные, арифметические, часы реального времени, встроенный журнал самодиагностики 4 ПИД-регулятора с самонастройкой	Модульное исполнение, 4 типа каркасов на 3, 4, 6, 9 модулей	DL230 Память программ 2 К DL240 Память программ 2,5 К Энергонезависимое ОЗУ 1024 байт DL250 Память программ 7 К ОЗУ 7 К	128	= 24 В ~ 132 В	Транзистор = 24 В Триак 264 В/0,5 А Реле Вывод 264 В/1 А	4/2 Ввод 4—20 мА 0—10 В Вывод 4—20 мА Имеет специальный модуль для управления шаговым двигателем	Предназначен для автономной работы Порт RS-323C используется для программирования 2 порта RS-323C Поддерживает сети с протоколами K-sequence DirectNET, Modbus RTU Поддерживает работу с удаленными модулями Порты RS-323C и RS-422 Протоколы сети те же Поддерживает работу с удаленными модулями (до 1 К входов-выходов	Фирменные языки RLL (61 команда, язык типа РКС) и RLLplus (128 команд, язык граф-схем)
FEC Micro Festo (130×80×60) 0—55 °C	Логические, временные счетные, арифметические	Неизменяемая конфигурация, 2 модификации по типу CPU	CPU FEC 20 Память программ 256 К Быстродействие 2 мкс CPU DOS SPS Память программ 256 К Быстродействие 2 мкс	Интегрированные 12/8 Максимальное с модулями расширения 36/24	= 27 В	Транзистор = 24 В Реле 2А	—	Встроенный порт RS-232C для подключения панелей оператора или объединения в сеть	Для CPU FEC 20м языки типа РКС FSTIPC-KOP и FSTIPPC-AWL Для CPU DOS SPSм — языки высокого уровня C++, Pascal, BASIC Программирование через интерфейс RS-232C
Logo Siemens (72×90×55) 0—55 °C	Логические, временные, счетные	Неизменяемая конфигурация, 4 модификации в зависимости от напряжения питания, типа входов и выходов	Объем памяти программ составляет 30 типовых функций	6/4	= 24 В ~ 115 В	Транзистор 0,3 А Реле 8 А для R-нагрузки, 2 А для RL-нагрузки	Нет	Нет	Язык функциональных схем, 14 функций типа И, ИЛИ, НЕ, триггеры задержки включения и выключения, счетчики, ввод программы при помощи 6 клавиш и жидкокристаллического дисплея на передней панели ПЛК, связь с ПК Можно создавать, дублировать, документировать и архивировать программы
Logo!L Siemens (126×90×55) 0—55 °C	Логические, временные, счетные, часы реального времени	Неизменяемая конфигурация, 7 модификаций в зависимости от напряжения питания, типа входов и выходов		12/8	= 24 В ~ 115 В ~ 230 В	Транзистор 0,3 А Реле 10 А для R-нагрузки 3 А для RL-нагрузки	Нет	Сетевой адаптер AS-интерфейса для работы с Simatic S7-200	

*1 Адаптеры подключаются с использованием модулей расширения

*2 Только с использованием модулей расширения

Таблица 57.4. **ПЛК среднего формата (mini PLC)**

Модель ПЛК Фирма-производитель (габариты) Условия работы	Выполняемые функции	Модификация	Параметры CPU	Дискретный ввод-вывод			Аналоговый ввод-вывод			Специальные модули	Сетевые адаптеры	Языки программирования
				Число	Параметр		Число	Параметр				
					Ввод	Вывод		Ввод	Вывод			
Simatic S7-300 Siemens (400×125×130)	Логические, временные, счетные, арифметические с фиксированной и плавающей запятой	Модульное исполнение Каркас на 8 модулей адаптеров	CPU312-IFM Память программ 6 К Быстродействие 0,6 мкс*1	Интегрированные 10/6 Максимальное 128	4 типа модулей = 24 В ~ 130 В ~ 120 В	7 типов модулей Транзистор 24 В/2 А Реле ~ 130 В/2 А ~ 240 В/2 А Триак ~ 230 В/2 А	5 типов модулей 32	0—5 В ± 80 мВ — ± 10 В ± 10 мА—4—20 мА (всего 16 диапазонов)	0—10 В/±10 В 0—20 мА /4—20 мА ± 20 мА	6 интеллектуальных модулей для управления различными типами двигателей. Специальные модули для термопар и термосопротивлений	2 типа коммуникационных процессоров: порт RS-232C и контроллер сети SINEC L2. Поддерживает протоколы PROFIBUS и промышленный Ethernet	STEP7 Micro/DOS SREP7 Micro/WIN
			CPU313 Память программ 12 К Быстродействие 0,6 мкс*1	Максимальное 128			32					
			CPU314 Память программ 24 К Быстродействие 0,3 мкс	Максимальное*2 512			64					
			CPU314-IFM Память программ 24 К Быстродействие 0,3 мкс*1	Интегрированные 20/16 Максимальное*2 1024			Интегрированные 4/1 128					
			CPU315 Память программ 48 К Быстродействие 0,3 мкс*1	Максимальное*2 1024			128					
			CPU316 Память программ 64 К Быстродействие 0,3 мкс*1	Максимальное*2 1024			128					

Продолжение табл. 57.4

TSX 47 Telemecanique		Модульное исполнение. 2 типа каркасов: на 5 (индекс J) и на 8 модулей адаптеров. J-конфигурация модулей расширения не допускает								Специальные модули для термопар и термосопротивлений		
(364×282×235)		TSX 47-J		160*3 Не допускает интеллектуальных модулей			2/2*4			1 тип модуля высокоскоростного счета и позиционирования	Все модификации: RS-232C Поддерживает сети с протоколом MODBUS RTU	
(482×282×235)	Логические, временные, счетные, арифметические, ПИД-регулирование	TSX 47-10	Память программ — энергонезависимое ОЗУ или EPROM 8/16/32K. Память данных 2K Двухзадачная операционная система	256*3 Допускает модули расширения, общее число модулей не более 16	Всего 15 типов модулей = 24 В = 48 В ~ 24 В ~ 48 В ~ 130 В ~ 240 В	Всего 16 типов модулей Транзистор 24 В/2 А 48 В/0,5 А Реле + 24 В; ~ 48 В ~ 240 В Триак ~ 130 В/2 А	2/2*4	8 типов модулей ввода (3 — интеллектуальные) 0—10 В/–10—+ 10 В 0—20 мА/4—20 мА	5 типов модулей вывода (3 — интеллектуальные) 0—10 В/–10—+10 В 0—20 мА/4—20 мА	1 тип модуля высокоскоростного счета и позиционирования		
(364×282×235)		TSX 47-20J		160*3 Допускает установку 2 интеллектуальных модулей			4 или 8/4*4			4 типа модулей высокоскоростного счета и позиционирования (3 — интеллектуальные)	В TSX 47-20J и TSX 47-20 дополнительный модуль для сети TELWAY network	Фирменный язык PL7-2 (язык графов и РКС)
(482×282×235)		TSX 47-20		256*3 Допускает модули расширения, общее число модулей не более 16, из них 2 могут быть интеллектуальными			4 или 8/4*4			4 типа модулей высокоскоростного счета и позиционирования (3 — интеллектуальные)		

Продолжение табл 57.4

Модель ПЛК Фирма-производитель (габариты) Условия работы	Выполняемые функции	Модификация	Параметры CPU	Дискретный ввод-вывод			Аналоговый ввод-вывод			Специальные модули	Сетевые адаптеры	Языки программирования
				Число	Параметр		Число	Параметр				
					Ввод	Вывод		Ввод	Вывод			
DL305 PLC Direct by Koyo Inc (163×108×90) (194×108×90) (256×108×90) 0—55 °C	Логические, временные, счетные, арифметические, ПИД-регулирование	Модульное исполнение 3 типа каркасов на 5, 8, 10 модулей (CPU устанавливается на место модуля) Допускается присоединение 3 каркасов модулей расширения	Память программ — энергонезависимое ОЗУ или EPROM с ультрафиолетовым стиранием DL330 Память программ 3,7 К Быстродействие 1,5 мкс	128 с модулями расширения 176	11 типов модулей = 24 В = 36 В ~ 24 В ~ 30 В ~ 130 В ~ 265 В	16 типов модулей Транзистор 24 В/2 А Реле = 24 В/2 А, ~ 240 В/5 А Триак ~ 230 В/2 А	16/4*4	7 типов модулей 0—10 В/–10—+10 В 0—20 мА/4—20 мА	3 типа модулей 0—10 В/–10—+10 В 0—20 мА/4—20 мА	Специальные модули для термопар и термосопротивлений, 1 тип модуля высокоскоростного счета, измерения скорости и направления вращения двигателя, 6 различных типов операторских панелей OptiMate	RS-232C Поддерживает сети с протоколом Direct-NET	Фирменный язык RLL (61 команда, язык типа PKC)
			DL330P Память программ 3,7 К Быстродействие 2,0 мкс	128 с модулями расширения 176			16/4*4				RS-232C Поддерживает сети с протоколом Direct-NET	Фирменные языки RLL (61 команда, язык типа PKC) и RLLplus (128 команд, язык граф-схем)
			DL340 Память программ 3,7 К Быстродействие 4,0 мкс	136 с модулями расширения 176			16/4*4				2 × RS-232C Поддерживает сети с протоколом Direct-NET MODBUS RTU	Фирменные языки RLL (61 команда, язык типа PKC) и RLLplus (128 команд, язык граф-схем)
C200 Omron	Логические, временные, счетные, арифметические, ПИД-регулирование	Модульное исполнение 4 типа каркасов на 3, 5, 8, 10 модулей (CPU устанавливается на место модуля)	CPU32-E Память программ 7,2 К Память данных 6 К CPU43-E Память программ 15,2 К Память данных 6 К CPU64-E Память программ 31,2 К Память данных 6К	640	4 типа модулей = 24 В ~ 220 В	8 типов модулей Транзистор 24 В/2 А Реле 24 В/2 А ~ 240 В/2 А	6 типов модулей	0—5 В 0—10 В –10—+10 В 4—20 мА	0—10 В/±10 В 4—20 мА	Специальные модули для термопар и термосопротивлений	Коммуникационный сопроцессор, 2 × RS-232 Сетевые модули Controller Link, SYSMATIC Link	

Окончание табл. 57.4

SLC-500 Allen-Bradley	Логические, временные, счетные, арифметические, ПИД-регулятор	Модульное исполнение	SLC 5/01 Память программ 4 К	256	1746 — семейство модулей ввода-вывода дискретных и аналоговых сигналов, ввод сигналов с датчиков температуры — термопар и терморезисторов	Встроенный порт DH-485C	Программный продукт RSLogic 50
			SLC 5/02 Память программ 4 К	256/256		Встроенный порт DH-485	
			SLC 5/03 Память программ 16 К Быстродействие 0,44 мкс	1024/1024		Встроенный порт DH-485C и RS-232C	
			SLC 5/04 Память программ 64 К Быстродействие 0,37 мкс	4096/4096		Встроенный порт Data Highway Plus	
			SLC 5/05 Память программ 64 К Быстродействие 0,37 мкс	4096/4096		Встроенный порт Ethenet TCP/IP и RS-232	

*1 Указано время выполнения одной битовой операции.

*2 Данные адаптеры подключаются с использованием модулей расширения.

*3 Указано максимальное число вводов-выводов для крейта без модулей расширения.

*4 Указано максимальное число каналов на один модуль.

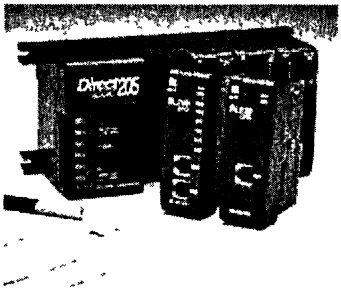


Рис. 57.7. ПЛК малого формата Direct Logic 205

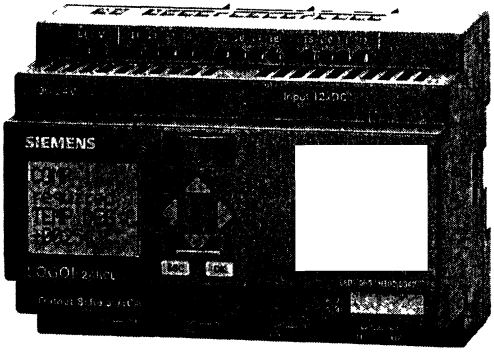


Рис. 57.8. Универсальный логический модуль Logo! фирмы «Siemens»

Практически все ПЛК малого формата поддерживают один или несколько протоколов обмена локальных промышленных сетей. Сетевые возможности становятся одной из главных характеристик изделий данного класса.

Остановимся коротко на отдельных образцах малых ПЛК. Simatic S7-200 и Modicon TSX Micro — самые быстродействующие и мощные среди малых ПЛК. Близок к ним по функциональным возможностям DL205 PLC Direct. Особое внимание заслуживает маленький ПЛК Logo фирмы «Siemens» (рис. 57.8). Его даже называют не ПЛК, а лишь универсальным логическим модулем в электротехнике. Значительную часть площади передней панели корпуса Logo занимает графический жидкокристаллический дисплей, на котором при помощи шести клавиш можно «собрать» схему коммутации из 30 функциональных модулей. Logo запомнит программу во Flash-памяти и будет реализовывать заданный алгоритм коммутации. При необходимости контроллер может быть перепрограммирован на месте установки. Устройство имеет защиту от несанкционированного доступа.

Менее многочисленной группой являются ПЛК среднего формата (см. табл. 57.4), однако разнообразие модификаций, которые можно выполнить на их основе, значительно превысит количество модулей малых ПЛК. Это обусловлено модульной структурой исполнения ПЛК среднего формата, при которой разработчику системы управления предлагается на выбор несколько крейтов, различающихся числом посадочных мест, и набор модулей, из которых может быть составлена система. Причем, если ранее под произвольно конфигурируемыми модулями обычно подразумевались модули адаптеров ввода-вывода, то теперь выбирать предстоит в каждой из пяти функциональных групп:

модули центрального процессора (CPU),

модули адаптеров ввода-вывода (дискретных и аналоговых);

модули высокоскоростного счета;

интеллектуальные модули;

коммуникационные модули.

Число различных модулей CPU, предлагаемых для одной модели ПЛК, доходит до шести (Simatic S7-300). Модули различаются объемом памяти программ и данных, быстродействием, набором функций, которые заложены в ОС, максимально возможным числом входов-выходов, наличием встроенных портов последовательного обмена того или иного типа. Самыми мощными CPU (объем памяти программ до 48 К, быстродействие 0,3 мкс на одну битовую операцию) обладает Simatic S7-300

Количество различных модулей адаптеров дискретных входов-выходов для каждой модели ПЛК таково, что обеспечивается полная функциональная достаточность адаптеров всех типов стандартных сигналов для всех ПЛК. Поэтому сравнение ПЛК по электрическим параметрам адаптеров дискретных сигналов не имеет смысла.

Адаптеры аналогового ввода-вывода разных ПЛК также весьма близки по параметрам, но самое большое число диапазонов измеряемых напряжений и токов имеют модули ввода Simatic S7-300. Стандартной функцией адаптеров аналогового ввода стало измерение температуры с возможностью непосредственного подключения первичных датчиков (терморезисторов и термопар).

Функционально устоявшееся семейство адаптеров ввода-вывода пополнилось новым типом модулей — модулями высокоскоростного счета. Традиционно, функции счетчиков и таймеров реализовывались в ПЛК программными средствами, поэтому интервалы квантования по времени составляли 0,1—10 с. Основу модулей высокоскоростного счета составляет реверсивный счетчик (f_{max} = 2 кГц для TSX 47-20 фирмы «Telemecanique», f_{max} = = 500 кГц для S7-300 фирмы «Siemens»), который путем программных установок может быть настроен на измерение временно́го интервала с генерацией сигнала прерывания, если его значение не лежит в заданных пределах; на режим измерения частоты вращения двигателя путем подсчета числа импуль-

сов на заданном временном интервале; на режим квадратурного счета, который позволяет создать датчик положения.

Особо следует остановиться на интеллектуальных модулях. Именно эти модули (а не возросшая мощность CPU) определяют переход на качественно новый функциональный уровень ПЛК среднего формата по сравнению с малыми ПЛК. Интеллектуальные модули позволяют производить предварительную обработку входных сигналов или формируют выходные сигналы по заданному алгоритму с параметрами, полученными от CPU. Такой подход, во-первых, разгружает CPU от выполнения части задач и, во-вторых, позволяет легко структурировать программу управления, что всегда ведет к повышению надежности программного обеспечения. По функциональному признаку различают три типа интеллектуальных модулей:

аналогового ввода-вывода;

высокоскоростного ввода;

управления электроприводами различного типа.

Часть интеллектуальных модулей реализует свои функции на аппаратном уровне. Например, интеллектуальные модули аналогового ввода-вывода серии 1771 фирмы «Allen Bradley» выполняют следующие преобразования:

определение скорости нарастания входного сигнала и установку соответствующего бита в случае превышения заданного значения;

определение превышения входным сигналом заданных порогов и установку соответствующего бита;

определение превышения входным сигналом заданных порогов в пределах зоны нечувствительности и установку соответствующего бита;

ограничение скорости нарастания выходного сигнала;

ограничение выходного значения сигнала на заданном уровне.

Другая часть интеллектуальных модулей содержит в своем составе микропроцессор, который производит предварительную обработку сигналов в цифровом виде после преобразования аналоговых величин в двоичные коды. Примером может служить 16-канальный интерфейс аналогового ввода TSX AEM1601 для ПЛК TSX 47-20. Его набор возможных функций преобразования содержит следующие алгоритмы:

извлечения квадратного корня;

линеаризации показаний первичного датчика (для терморезисторов);

компенсации температурного дрейфа для термопар;

приведения двоичных кодов к численным значениям в реальных физических единицах (градусах Цельсия, паскалях, процентах заданного диапазона значений);

генерации запросов на прерывание при достижении заданного значения величины.

Интерфейсы управления электроприводами по типу реализуемых алгоритмов следует разделить на две группы сложности. Модули первой группы имеют в составе реверсивный счетчик с режимом квадратурного счета, на основе которого выполняется датчик положения подвижной части на координатной оси. Модули формируют дискретные выходные сигналы в соответствии с программой, которая хранится в памяти модуля и инициализируется CPU ПЛК. Модули первой группы осуществляют параметрическое управление по координате положения и не имеют регулятора в контуре обратной связи. Примером может служить модуль TSX AXM171 (ПЛК TSX 47-20 фирмы «Telemecanique»). Модуль предназначен для применения в таких областях, как поверхностная обработка, механизмы подъема и т.д., в которых требуется позиционирование подвижной части вдоль координатной оси посредством перемещения без контроля уровней ускорения и замедления. Модуль выполняет следующие функции:

определяет координату подвижной части посредством преобразования сигналов импульсного датчика перемещения;

хранит в памяти закон управления перемещением в координатах «положение», «скорость». Разрешающая способность по координате «положение» равна 16, по координате «скорость» 3;

формирует дискретные сигналы управления для силового блока в соответствии с законом перемещения. Каждый дискретный выход соответствует одному из трех значений скорости, плюс один бит направления движения.

Модуль имеет встроенный режим обучения, при котором установленная позиция кодируется датчиком положения и автоматически заносится в память. Собственная система команд модуля включает 41 инструкцию, объем памяти программ 50 инструкций.

К этой же группе следует отнести модуль электронных меток FM352 фирмы «Siemens» для управления исполнительными механизмами конвейера (Electronic Cam). Модуль определяет положение детали на конвейере, используя сигналы импульсного датчика перемещения или датчика положения с последовательным выходом, и формирует логические сигналы пуска и останова привода конвейера и исполнительных механизмов конвейера при установке очередной детали на рабочую позицию. Контроллер может различать от 32 до 128 позиций с учетом направления движения, число дискретных выходов модуля для управления равно 13.

Модули второй группы сложности имеют в своем составе регулятор контура обратной связи по положению. Более подробно эти модули рассмотрены в § 57.3.

Как правило, библиотеки интерфейсных модулей для средних и мощных ПЛК одной фирмы объ-

единены Причем для ПЛК среднего формата накладываются лишь ограничения по числу интеллектуальных модулей, которые могут быть подключены к магистрали CPU, но практически не накладывается ограничений на тип модулей

Рассматривая ПЛК среднего формата, нельзя не упомянуть интегрированные системы управления Simatic C7-620, которые сочетают в едином корпусе ПЛК, а также панели визуализации и обслуживания Такое интегрированное решение позволяет реализовывать компактные системы управления технологическим оборудованием при значительном снижении денежных затрат Во все устройства ряда C7-620 встроены CPU ПЛК S7-300, панель оператора типа OP, модули цифровых и аналоговых адаптеров Система может быть расширена модулями ПЛК S7-300

Главная отличительная черта мощных ПЛК — мультипроцессорные CPU Переход к мультипроцессорным структурам вызван необходимостью параллельного выполнения задач собствен управления, сбора данных, обслуживания сетев функций, выполнения функций человеко-маши ного интерфеиса при сохранении жестких требо нии к времени реализации алгоритма управлен Именно мультипроцессорные CPU позволя мощным ПЛК сохранить свойства ОС с жестк режимом работы в условиях разнообразия выпо няемых функций

Вторая особенность мощных ПЛК — возмо ность включения нескольких модулей CPU в сост конфигурации ПЛК Так, Simatic S7-400 допуска одновременное включение двух CPU (рис 57 9), FPC 400 — до пяти Это связано с необходимост повышения быстродействия программы управлен при большом числе входов-выходов Кроме того, т кое решение позволяет распределить различн функциональные задачи между разными модуля CPU, а также дублировать выполнение некотор функций с целью повышения надежности Отмети

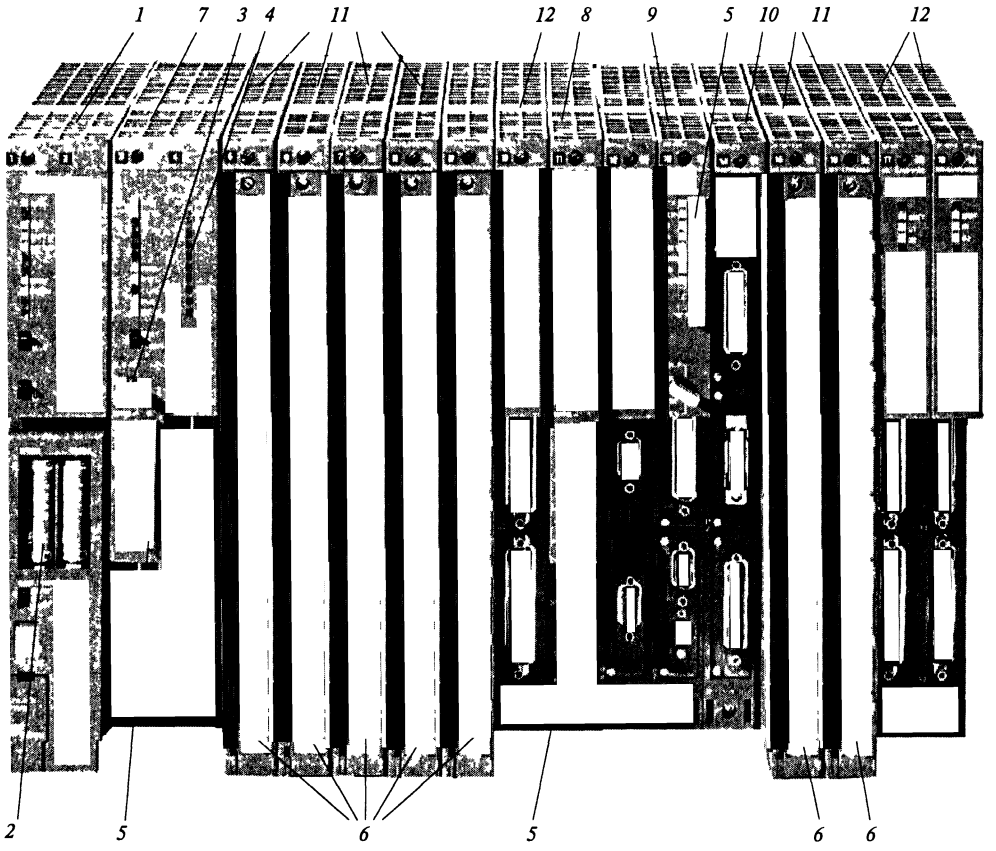


Рис. 57.9. Мощный ПЛК Simatic S7-400 фирмы «Siemens»

1 — модуль блока питания, *2* — буферная батарея, *3* — ключ переключения режимов работы ПЛК, *4* — свето диоды индикации состояний и отказов, *5* — субмодуль памяти *6* — фронтальные соединения с маркировкой внешних цепей, *7* — центральный процессор № 1, *8* — центральный процессор № 2, *9* — модуль FM 456 4 (M7), *10* — модуль расширения M7, *11* — модули ввода-вывода, *12* — интерфейсные модули

что FPC 400 фирмы «Festo» обладает уникальным на сегодняшний день свойством он позволяет объединить в своем составе типовой процессор FPC 405 ПЛК и процессор промышленного компьютера Festo IPC с открытым программным обеспечением, причем программирование этих процессоров можно вести на разных языках

Третья особенность мощных ПЛК — большая вариативность модулей CPU, предлагаемых в составе каждой модели (табл 57 5) Как отмечалось ранее, это вызвано желанием разработчика адаптировать мощные ПЛК практически к любым промышленным информационным сетям

Мощные ПЛК оснащены всеми возможными типами модулей ввода-вывода

ПЛК являются проблемно ориентированными машинами С момента создания ПЛК языки их программирования были ориентированы на конечного пользователя, который является специалистом по автоматизации, но не является профессиональным программистом Постепенно множество языков ПЛК разделилось на следующие группы

графические языки релейно-контактных схем (РКС),

графические языки логических схем,

графические языки функциональных блоков (Grafcet),

мнемонические языки символьного кодирования на основе булевых выражений,

языки ассемблерного типа

Накопленный опыт был обобщен в виде стандарта IEC1131-3, в котором определено пять языков программирования SFC — последовательных функциональных схем, LD — релейных диаграмм, FBD — функциональных блоковых диаграмм, ST — структурированного текста, IL — инструкций Использование стандартных языков позволяет существенно снизить затраты на разработку прикладного программного обеспечения Язык SFC находится над всеми остальными и дает возможность описать логику программы на уровне чередующихся функциональных блоков и условных переходов Функциональные блоки отображают собой действия, которые должны быть исполнены, в том числе и параллельно, а условные переходы задают условия, которые необходимо выполнить для перехода к следующему функциональному блоку Инструкции для функциональных блоков и условных переходов могут быть написаны на одном из четырех других языков Язык LD используется для описания различных логических выражений и реализует элементы релейно-контактных схем Язык FBD позволяет строить комплексную процедуру, состоящую из различных функциональных блоков Язык ST относится к классу языков высокого уровня и по мнемонике похож на язык Pascal Он служит для создания процедур со сложной логикой Язык IL принадлежит к классу языков низкого уровня и позволяет реализовать высокоэффективные функции Этот язык имеет смысл применять для написания наиболее критичных мест программы

Использование языков стандарта IEC1131-3 соответствует концепции открытых систем, а именно делает программу управления некритичной к конкретному оборудованию Поэтому, несмотря на различные названия, языки программирования практически всех современных ПЛК удовлетворяют стандарту IEC1131-3

ПРОМЫШЛЕННЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ

Промышленный компьютер — класс средств технической автоматизации, обладающий тремя отличительными признаками программно совместим с компьютером IBM PC, имеет в своем составе полный набор средств для реализации человеко-машинного интерфейса (дисплей, клавиатуру, дополнительные панели оператора), обладает повышенной устойчивостью к воздействиям внешней среды Последнего все производители добиваются всеми мыслимыми, хотя и примерно одинаковыми способами Для борьбы с пылью создают избыточное давление внутри системного блока, при этом всасывающие вентиляторы снабжаются пылеулавливающими фильтрами В моделях для пультового монтажа применяется брызгозащита лицевой панели С вибрациями и ударами борются, применяя прочные шасси и корпуса, закрепляя платы расширения дополнительными амортизирующими скобами, размещая дисковые накопители на специальной виброударостойкой подвеске Компоненты интерфейса человек—машина также выполняются с учетом жестких условий эксплуатации В клавиатурах в обязательном порядке предусмотрена пылевлагозащита В рабочих станциях применяется ограниченный набор функциональных клавиш, они выполнены по пленочной технологии Все большее распространение получают сенсорные экраны, дающие неограниченные возможности в создании дружественных интерфейсов

Конструктивное исполнение системного блока промышленного компьютера отличается от офисного Процессорная плата наравне с периферийными вставляется в пассивную объединительную плату с большим числом слотов расширения Так как промышленному компьютеру часто приходится взаимодействовать с большим количеством датчиков и исполнительных устройств, то число слотов расширения нередко достигает 20 Можно сказать, что принципы конструктивного исполнения персональные компьютеры в значительной степени унаследовали от ПЛК, одновременно явившись их полной противоположностью с точки зрения программного обеспечения

Таблица 57 5 **ПЛК верхнего формата (power PLC)**

Модель ПЛК Фирма-производитель (габариты) Условия работы	Выполняемые функции	Модификация	Параметры CPU	Дискретный ввод-вывод			Аналоговый ввод-вывод			Специальные модули	Сетевые адаптеры	Языки программирования
				Число	Параметры		Число	Параметры				
					Ввод	Вывод		Ввод	Вывод			
Simatic S7-400 Siemens (450×290×210)	Логические, временные, счетные, арифметические с фиксированной и плавающей запятой, ПИД-регулирование регулирование по законам нечеткой логики	Модульное исполнение Каркас на 16 модулей адаптеров Допускает расширение до 21 крейта	Возможна установка в крейт одного или двух CPU CPU412-1 Память программ 48 К Быстродействие 0,2 мкс*1 CPU413-1/413-DP Память программ 72 К Быстродействие 0,2 мкс*1 CPU414-1/414-2DP Память программ 128 К Быстродействие 0,1 мкс CPU416-1 Память программ 512 К Быстродействие 0,08 мкс*1	4 К 16 К 64 К 128 К	4 типа модулей = 24 В = 120 В ~ 130 В ~ 220 В	5 типов модулей Транзистор 24 В/2 А Реле ~ 130 В/2 А ~ 240 В/2 А Триак ~ 230 В/2 А	7 типов модулей 256 1 К 4 К 8 К	±80 мВ/—/±10 В ±10 мА/—/4—20 мА (всего 16 диапазонов)	0—10 В/±10 В 0—20 мА/4—20 мА	6 интеллектуальных модулей семейства SIMATIC S5 для управления различными типами двигателей	4 типа коммуникационных процессоров порт RS-232C и контроллеры сети SINEC L2, SINEC H1 Поддерживает протоколы PROFIBUS и промышленный Ethernet	SREP7 micro/DOS STEP7 micro/WIN
FPC400 Festo	Логические, временные, счетные, арифметические с фиксированной и плавающей запятой, ПИД-регулирование, регулирование по законам нечеткой логики	Модульное исполнение Каркас на 7 или 14 модулей адаптеров Допускает модули расширение	Возможна установка в крейт до 5 CPU FPC405 Память программ 96 К Память данных 32 К FPC406 Память программ 512 К Память данных 512 К FESTO IPC Процессор промышленного компьютера с открытым программным обеспечением	4 К*2 4 К*2 4 К*2	5 типов модулей = 24 В ~ 130 В ~ 220 В	3 типа модулей Транзистор 24 В/0,5 А Реле = 24 В/2 А ~ 240 В/2 А	3 типа модулей	0—10 В 0—20 мА		9 интеллектуальных модулей для управления различными типами двигателей	Коммуникационные процессоры порт RS-232C, контроллеры сети FESTO FIEDBUS и PROFIBUS	Языки C++, Pascal, Visual BASIC и др Языки технологического программирования STL, LDR Язык общего применения высокого уровня BASIC

Продолжение табл 57 5

TSX 40 Vertion V5 processors Telemecanique	Логические, временные, счетные, арифметические, ПИД-регулирование	Модульное исполнение Основной каркас на 11 модулей адаптеров Допускает модули расширения	Память программ — энергонезависимое ОЗУ или EPROM 32/64/128/256 К Многозадачная операционная система TSX 47-P47 405 Быстродействие 0,5 мкс TSX 47-P47 415 Быстродействие 0,5 мкс TSX 47-P47 425/455 Быстродействие 0,5 мкс TSX 47-P67 425/455 Быстродействие 0,5 мкс TSX 47-P87 425/455 Быстродействие 0,3 мкс TSX 47-P107 455/485 Быстродействие 0,3 мкс	512 1024 1024 2048 2048 2048	15 типов модулей = 24 В = 48 В ~ 24 В ~ 48 В ~ 130 В ~ 240 В	16 типов модулей Транзистор 24 В/2 А 48 В/0,5 А Реле + 24 В, ~ 48 В ~ 240 В Триак ~ 130 В/2 А	1*3 4*3 4*3 16*3 32*3 56*3	8 типов модулей (3 — интеллектуальные) 0—10 В/–10—+10 В 0—20 мА/4—20 мА	5 типов модулей (3 — интеллектуальные) 0—10 В/–10—+10 В 0—20 мА/4—20 мА	Специальные модули для термопар и термосопротивлений 4 типа модулей высокоскоростного счета и позиционирования (3 — интеллектуальные), 5 типов интеллектуальных модулей управления	2 модуля коммутационных процессоров RS-232/RS-4222/RS-485 Контроллер сети TELWAY network 1*4 4*4 1*4 2*4 4*4 4*4	Фирменный язык PL7-3 Система разработки программного обеспечения V5 Развитая система MMI OPTIONAL MMI Software

Продолжение табл. 57.5

Модель ПЛК Фирма производитель (габариты) Условия работы	Выполняемые функции	Модификация	Параметры CPU	Дискретный ввод-вывод			Аналоговый ввод-вывод			Специальные модули	Сетевые адаптеры	Языки программирования
				Число	Параметр		Число	Параметр				
					Ввод	Вывод		Ввод	Вывод			
DL405 PLC Direct by Koyo Inc			Память программ — энергонезависимое ОЗУ или EPROM с ультрафиолетовым стиранием DL430 Память программ 3,5 К								4 модуля коммуникационных процессоров	
(275×108×90) (349×108×90) (423×108×90) 0—60 °С	Логические, временные, счетные, целочисленные арифметические			320/320 С модулями расширения 1664			8/16*5			Специальные модули для термопар и термосопротивлений 6 типов интеллектуальных модулей из них 3 для управления различного типа двигателями Пульт оператора DirectVIEW 1000 с 4×6-символьным дисплеем и 10 клавишами, 6 различных типов операторских панелей OptiMate	RS-232C Поддерживает сети с протоколом Direct-NET (slave)	Фирменный язык RLL (61 команда, язык типа РКС
	Логические, временные, счетные, целочисленные арифметические Часы реального времени, журнал встроенной диагностики	Модульное исполнение 3 типа каркасов на 4, 6, 8 модулей адаптеров входа-выхода Допускается присоединение каркасов модулей расширения	DL440 Память программ 15,5 К ОЗУ данных 7 К Быстродействие 0 33 мкс (время выполнения битовой операции)	640 С модулями расширения 1664	10 типов модулей = 15 В = 30 В = 52 В ~ 24 В ~ 37 В ~ 130 В ~ 265 В	14 типов модулей Транзистор 24 В/2 А 150 В/2 А Реле = 24 В/2 А, ~ 265 В/1 А Триак ~ 265 В/2 А	8/16*5	4 типа модулей ввода 0—10 В/±5 В, ± 10 В 0—20 мА/4—20 мА	6 типа модулей ввода 0—10 В/±5 В ± 10 В 0—20 мА/4—20 мА		2×RS-232C Поддерживает сети с протоколом K-siquense Direct-NET (master/slave) MODBUS RTU	Фирменные языки RLL (61 команда язык типа РКС) и RLLplus (170 команд, язык граф схем)
	Логические, временные, счетные, арифметические в формате с плавающей запятой, 4-контурное ПИД-регулирование температуры, 16 встроенных ПИД-регуляторов с самонастройкой		DL450 Память программ — 15,5 К ОЗУ данных — 15 К	640 С модулями расширения 1536			8/16*5				2×RS-232C 1×RS-232C/RS-485 (встроенный телерадиомодем) Поддерживает сети с протоколом K-siquense Direct-NET (master/slave) MODBUS RTU	Фирменные языки RLL (61 команда, язык типа РКС) и RLLplus (170 команд язык граф-схем)

Окончание табл. 57.5

PLC-5 Alen-Bradly	Логические, временные, счетные, арифметические, ПИД-регулирование	Модульное исполнение	Семейство Enhanced PLC-5/11, -5/20, -5/30, -5/40, -5/60, - 5/80 Семейство Ethernet PLC-5/20E, -5/40E, -5/80E Семейство ControlNet PLC -5/20C, -5/40C, -5/60C, -5/80C Семейство Protectid PLC -5/26 B, -5/46 B, -5/86 B Обеспечивают дополнительные средства защиты от несанкционированного доступа	От 512 до 3072	1746 — семейство модулей ввода-вывода дискретных и аналоговых сигналов, ввод сигналов с датчиков температуры — термопар и терморезисторов 1771 — семейство модулей расширено интеллектуальными модулями аналоговых сигналов 1792 — малогабаритные модули для дискретных сигналов. Степень защиты IP 67 и NEMA 6P. Используются в распределенных системах, построенных на основе сети DeviceNet 1794 — малогабаритные модули, имеющие высокую степень защиты от ударов и вибрации. Используются в распределенных системах, построенных на основе сетей ControlNet, DeviceNet, Remote I/O.	Встроенный порт RS-232C Встроенный порт сети Ethernet Коммуникационный процессор быстродействующей локальной сети ControlNet Встроенный порт RS-232C	Программный продукт RSLogic 50
ControlLogix Alen-Bradly			Семейство Logix 5550	4096	1756 — новейшее семейство модулей. Совместно с контроллерами Logix5550 образуют новую аппаратную платформу для создания быстродействующих систем управления высокой надежности и диагностируемости.	Коммуникационные процессоры для сетей ControlNet, DeviceNet, Data Highway Plus, Universal Remote I/O.	

*1 Указано время выполнения одной битовой операции.

*2 Указанное число адаптеров может быть подключено с использованием модулей расширения.

*3 Максимальное число интеллектуальных модулей.

*4 Число модулей коммуникационных процесссоров.

*5 Указано максимальное число каналов на 1 модуль.

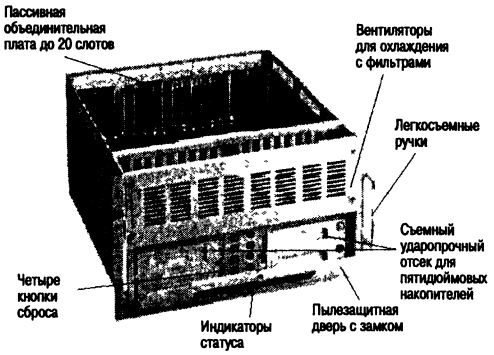


Рис. 57.10. Шасси промышленного компьютера IPC-622 фирмы «Advantech»

Одним из ведущих производителей промышленных компьютеров является фирма «Advantech», на примерах продукции которой удобно проиллюстрировать основные направления развития этого класса изделий. Фирма «Advantech» выпускает промышленные компьютеры пяти типов конструктивного исполнения: компьютеры на основе промышленных шасси, рабочие станции, панельные компьютеры, модульные компьютеры, одноплатные компьютеры. Последние предназначены для встраиваемых применений, но редко применяются для управления силовыми блоками электропривода, так как являются решением неоптимальным.

Линия компьютеров на основе промышленных шасси (рис. 57.10) представляет собой своеобразный конструктор, состоящий из ряда промышленных шасси и ряда плат, среди которого выделяют процессорные платы, модули памяти, коммуникационные модули, модули ввода-вывода (совсем как в ПЛК). Рассматриваемый тип компьютеров подлежит дополнительной комплектации дисплеями и органами управления.

Ниже приведены примеры из библиотеки модулей промышленных компьютеров фирмы «Advantech»:

Процессорная плата PCA-6145DX4-100:

Тип процессора Intel 486DX4-100

Оперативная память до 32 Мбайт

Твердотельный диск на плате до 512 кбайт

Интерфейс EIDE 32 бита, до двух жестких дисков емкостью 8,4 Гбайт

Интерфейс накопителя, до двух гибких дисков емкостью до 2,88 Мбайт

Сторожевой таймер — восемь программируемых интервалов, генерируется сигнал сброса

Параллельный и два последовательных порта (COM2 — RS-485)

Порты клавиатуры и мыши

Контроллер VGA 1 Мбайт видеопамяти

Модуль двухпортового интерфейса CAN-MIC-2630:

Скорость передачи до 1 Мбит/с

Гальваническая развязка 1000 В

Работа через окно в памяти

Назначение контактов соответствует стандарту CiA

Модуль аналогового ввода MIC-2728:

12 разрядов, 100 кГц

16 каналов с объединенным общим выводом или восемь дифференциальных входов

Программируемый коэффициент усиления

Модуль FLASH/ОЗУ/ПЗУ MIC-2810:

Максимальный объем до 6 Мбайт

Эмуляция накопителя на гибком диске

Сторожевой таймер

Модуль цифрового ввода MIC-2730

16 оптоизолированных цифровых входов

Гальваническая развязка 2500 В

Светодиодная индикация состояния входа

Модуль цифрового вывода MIC-2750:

16 оптоизолированных цифровых выходов

Гальваническая развязка 2500 В

Светодиодная индикация состояния входа

Другой чрезвычайно распространенной конструкцией промышленного компьютера являются изделия под названием «рабочие станции». Термин «рабочая станция» применительно к промышленным компьютерам не означает, что изделие имеет повышенную вычислительную мощность. Отличительный признак индустриальных рабочих станций — размещение дисплея, системного блока и клавиатуры в едином корпусе. Пользователю предлагается конструкция, содержащая компоненты человеко-машинного интерфейса и шасси для установки плат процессора, памяти, ввода-вывода из вышеупомянутого каталога. Ниже приведены основные характеристики рабочей станции AWS-822 фирмы «Advantech» (рис. 57.11):

Восьмислотовая кросс-плата, поддерживающая все типы PC/AT плат ряда PCA и MIC. Блок с кросс-платой имеет выдвижную конструкцию, обеспечивая легкость доступа к установленным в нем платам

14-дюймовый цветной дисплей в противоударном экранирующем каркасе с разрешением 1024 × 768 точек

Две мембранные 27-клавишные клавиатуры для ввода данных

20-клавишная клавиатура для задания функций технологического процесса

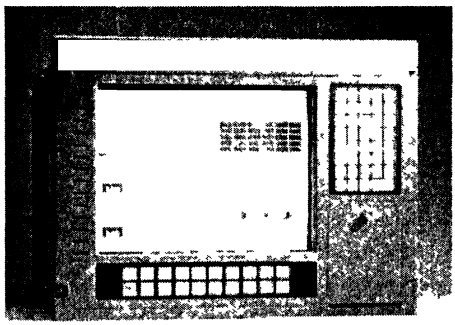


Рис. 57.11. Рабочая станция AWS-822 фирмы «Advantech»

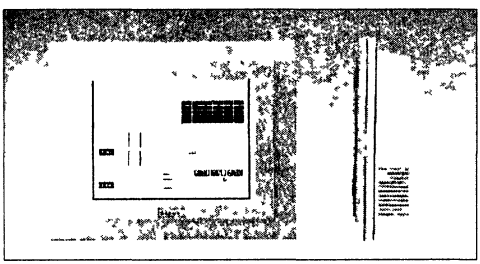


Рис. 57.12. Панельный компьютер PPC-100 фирмы «Advantech»

Два дополнительных разъема для клавиатуры на перед ней и задней панелях

Место для накопителя 3,5″

Встроенный источник питания 250 Вт

Размеры 482 × 356 × 410 мм

Масса 26 кг

Отличительный признак панельных компьютеров — малые габариты, особенно в глубину Достигается это как за счет применения в качестве дисплеев плоских панелей, так и за счет уменьшения количества плат расширения Панельные компьютеры предназначены для организации MMI-интерфейса непосредственно на управляемых объектах Краткая техническая характеристика одного из последних панельных компьютеров PPC-100 приведена ниже (рис 57 12)

Процессорная плата на базе процессора 486DX2/4

Память до 64 Мбайт

Дисплей 10,4″ на основе цветной или монохромной панели с разрешением 640 × 480

Твердотельный диск с памятью до 512 кбайт

Интерферейс для накопителя на гибком диске 1 2/1,44/2 88 Мбайт

Место для накопителя 2,5″

Аналоговый резистивный сенсорный экран, прочность покрытия до 30 млн касаний

Параллельный порт (ECP/EPP)

Четыре последовательных порта (3 × RS 323, 1 × RS 422/485)

Интерфейс Ethernet

Четыре изолированных дискретных выхода

Встроенный источник питания 50 Вт

Размеры 342 × 256 × 61,5 мм

Масса 2,7 кг

ПРОМЫШЛЕННЫЕ КОНТРОЛЛЕРЫ

Термином «промышленный контроллер» характеризуют класс средств промышленной автоматики, которые выполнены в специальном конструктивном исполнении, имеют развитый набор УСО и обязательно программируются на языках общего применения (не проблемно ориентированных) Это означает, что элементная база центрального процессора может быть любой начиная с 8-разрядных однокристальных и заканчивая коммуникационными процессорами Однако, следуя концепции открытых систем, производители средств промышленной автоматики (но не телемеханики и коммуникационных технологий) в значительной степени перешли на IBM PC-совместимую элементную базу Поэтому в большинстве случаев под определением «промышленный контроллер» в узком смысле скрывается PC-совместимый контроллер модульного исполнения, ориентированный на решение задач локального управления с минимальной реализацией функций человеко-машинного интерфейса

Следует выделить две линии развития аппаратных средств PC-совместимых промышленных контроллеров

1 Максимальное сохранение архитектуры IBM PC в области малогабаритных встраиваемых систем Наиболее известными изделиями этой линии являются модульные контроллеры в стандарте PC/104 (стандарт предложен фирмой «Ampro») и контроллеры в стандарте micro PC, производимые фирмой «Octagon Systems» (рис 57 13) Оба упомянутых стандарта в наименьшей степени отошли от первоначальной концепции персональных компьютеров Оба стандарта имеют модульный принцип построения, при котором конечная конфигурация изделия определяется включенным в его состав набором функциональных плат (модулей) Именно поэтому изделия рассматриваемых стандартов в разной конфигурации могут быть с одинаковым успехом отнесены и к промышленным компьютерам, и к промышленным контроллерам

2 Максимальное сохранение архитектуры и конструктивных решений ПЛК с заменой процессорного модуля на PC-совместимый с открытым программным обеспечением Девиз изделий этой

Таблица 57 6 **Характеристики контроллеров серии ADAM-5000 фирма «Advantech»**

Тип контроллера	Модуль центрального процессора	Модули УСО	Коммуникационные модули
ADAM-5000	Процессор 80188	Четыре модуля УСО	RS-485
ADAM-5000/485	ОЗУ 32 кбайт	Всего до 64 каналов цифрового ввода-вывода или 32 аналоговых канала только для ADAM-5000	RS-485
ADAM-5000/CAN	Flash-ПЗУ 128 кбайт Сторожевой таймер		Контроллер CAN с протоколами DivictNet или CANOpen
ADAM-5510			RS-232 и RS-485

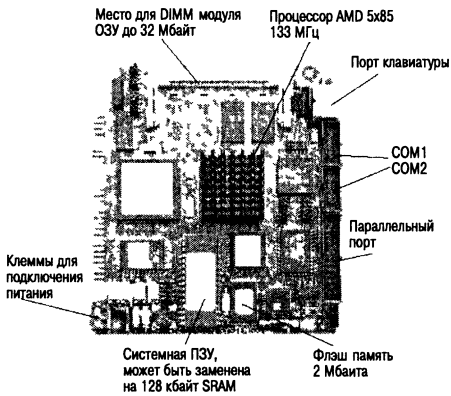


Рис. 57.13. Плата центрального процессора промышленного контроллера в стандарте micro PC (модель 5066-586 фирмы «Octagon Systems»)

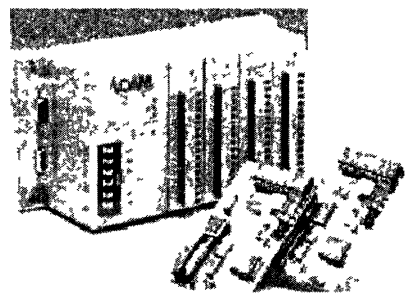


Рис. 57.14. Промышленный контроллер ADAM-5000 фирмы «Advantech»

линии «все достоинства PC и PLC в одном изделии» Причем ведущие фирмы-производители подошли к такому решению с разных сторон Так, законодатели в области ПЛК фирм «Siemens» и «Festo» на основе уже готовых решений Power-PLC с развитой библиотекой интеллектуальных периферийных модулей предложили альтернативные решения с заменой блока центрального процессора И у ПЛК большого формата фирмы «Siemens» Simatic S7-400» появился собрат Simatic M7 с процессором FM456-4 Фирма «Festo» в набор процессорных модулей ПЛК FPC400 ввела модуль PC-совместимого процессора FPC406 Причем допускается одновременная работа в составе FPC400 модуля процессора ПЛК FPC405, который предназначен исключительно для функций управления технологическим процессом, и модуля FPC406, который используется для хранения и обработки данных и визуализации технологического процесса Аналогичные решения предлагаются известными производителями ПЛК уже на уровне micro PLC Примером может служить ПЛК FEC фирмы «Festo» (см табл 57 3) и ПЛК DL205 фирмы «Direct Logic» Подходя к аналогичному решению, законодатель в области промышленных компьютеров фирма «Advantech» предложила серию контроллеров ADAM5000 (табл 57 6, рис 57 14), которая по числу обслуживаемых дискретных входов-выходов соответствует micro PLC, но имеет открытую архитектуру центрального процессора

Российские производители промышленных контроллеров пытаются найти свою нишу среди широкой номенклатуры средств, предлагаемых всемирно известными производителями Краткая характеристика технологических контроллеров российского производства представлена в табл 57 7

57.3. КОНТРОЛЛЕРЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

ТИПОВЫЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

Традиционные системы управления движением (рис 57 15) были основаны на концепции централизованного управления с использованием компьютера в формате VME или позднее (PC) с платами управления движением, подключенными к шине VME или ISA/PCI

Современные технологии основаны на системах, разделенных на секции (распределенные системы) Каждая секция имеет контроллер, находящийся непосредственно рядом с силовым преобразователем Такая технология имеет следующие преимущества

модульность в конструкции и развитии системы

обнаружение локальных ошибок, простота устранения неисправностей и обслуживания,

Таблица 57 7 **Промышленные контроллеры российских производителей**

Тип	Производитель	Краткая техническая характеристика
МФК	«Текон», г Москва	Многофункциональный технологический контроллер, имеющий большую гибкость при конфигурировании, обладающий мощными вычислительными ресурсами (процессоры семейства 586) и большим количеством каналов ввода-вывода (более 750) Контроллер предназначен для сбора, обработки информации и управления объектами в схемах автономного управления или в составе распределенной системы управления на основе локальных сетей уровней LAN (Ethernet, Arcnet) и Fieldbus (Bitbus, CAN)
ТКМ51		Программируемый технологический контроллер в пылебрызгозащищенном исполнении (IP54) с возможностью резервирования Предназначен для сбора, обработки информации и формирования воздействия на объект управления (промышленное оборудование) в составе распределенных иерархических или локальных автономных АСУ ТП Имеет встроенную функциональную клавиатуру (36 клавиш), дисплей (газоразрядный или жидкокристаллический (ЖК), интерфейсы Bitbus, RS-232, RS-485, Centronics, широкую гамму дискретных и аналоговых модулей УСО Количество модулей УСО 4 Примерное количество входов-выходов 190 Контроллер может работать как в одиночном, так и в дублированном режиме
ТКМ52		Новый вариант контроллера ТКМ51 Отличается PC-совместимой процессорной платой и средой разработки, общей с контроллером МФК Конструкция корпуса и номенклатура модулей ввода-вывода аналогична ТКМ51 Сохранена возможность резервирования контроллера Типовой вариант поставки имеет 8 Мбайт оперативной памяти и 4 Мбайта Flash-памяти, на корпус выведены разъемы Ethernet (RJ-45), LPT, COM1 (RS-232), COM2 (RS-232), COM2 (RS-422, RS-485)
MIF	«Торнадо, модульные системы», г Новосибирск	Отказостойкие технологические контроллеры на базе модулей интеллектуальных функций (MIF-модулей) На их основе возможно создание как больших управляющих сетей реального времени, так и автономных интеллектуальных контроллеров Характеризуются дублированнй CAN-магистралью в качестве внутренней системной шины контроллера для межмодульной коммуникации Реализована «горячая» замена модулей Контроллеры полностью программно совместимы с системами VME9000, IUC9000, Smart I/O
ЭК-2000	«Эмикон», г Москва	Серия промышленных контроллеров средней и большой сложности
КУРС-2000	НТЦ «Контроллеры и управляющие распределенные системы», г Москва	Предназначены для использования в качестве интеллектуальных УСО или периферийных контроллеров нижнего уровня в составе программно-технических комплексов АСУ ТП любой сложности с использованием Field bus-интерфейсов Развитые сервисные аппаратные и программные средства позволяют использовать ПЛК Курс-2000 автономно в качестве местных пультов управления
QCIC	«Науцилус», г Москва	PC-совместимый контроллер на базе процессорного модуля PC-104 фирмы «Ampro Computers» и плат ввода-вывода фирмы «ComputerBoards»
ВИРА-ПКМ	СКБ космического приборостроения Института космических исследований РАН, г Таруса	Промышленный контроллер, предназначенный для использования в распределенных системах управления, сбора и обработки информации в качестве контроллера нижнего уровня Может выпускаться в различном конструктивном исполнении
ДС4001	«Дискретные системы», г Москва	Моноблочный промышленный контроллер, предназначен для использования в системах контроля и управления промышленным оборудованием в случаях, когда требуется ограниченное количество разнородных каналов ввода-вывода, может комплектоваться графическим ЖК-дисплеем и клавиатурой, работает под управлением ОС PTS DOS 6 65 и ядра реального времени RTKernel 4 5 Модули ввода-вывода — одноканальные модули дискретного (аналогового) ввода-вывода серии G5 Grayhill Вычислительное ядро — микроконтроллер ДС1001
ДС4002		Проектно-компонуемый промышленный контроллер, предназначен для использования преимущественно в распределенных многоуровневых системах контроля и управления промышленным оборудованием с большим числом каналов ввода-вывода Сетевой интерфейс Ethernet 10BASE-T 10 Мбит/с

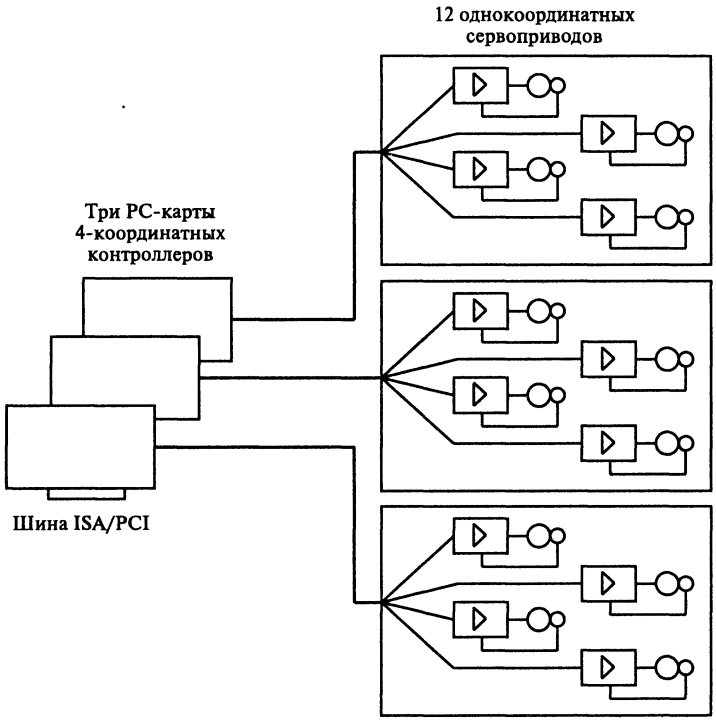


Рис. 57.15. Структура традиционной 12-координатной системы управления движением

сохранение кабельных соединений в целом локальными в пределах каждой секции, уменьшение стоимости монтажа машины;

независимое тестирование каждой секции машины;

параллельное проектирование каждой секции;

более легкое использование внешнего управляющего оборудования и интерфейса с уровнем программного обеспечения (использование канала передачи данных с распределенными контроллерами), независимость поддержки от поставщика;

повторное использование аппаратных и программных средств и технологии;

меньшее количество резервного оборудования и снижение трудозатрат по снабжению, так как управляющие блоки могут быть почти идентичными;

легкость расширения числа осей (контроллеров).

В настоящее время используются два варианта в рамках распределенной системы управления: один — с полуавтономными узлами и низкоскоростным обменом данных (рис. 57.16), другой — с высокоскоростным каналом обмена и PC, действующим как координатор технологической установки (рис. 57.17).

В первом варианте прикладная программа загружается в управляемый узел сети. Процессор CPU в секции полуавтономного узла имеет свое программное обеспечение, осуществляет связь по интерфейсу с аппаратными средствами через входы-выходы или используемое совместно соединение с импульсным датчиком (для соединения ведомых осей с ведущей осью). Большинство блоков управления используют линию вход-выход для аварийной остановки.

Преимущество такого метода состоит в строго определенных рамках и ясной структуре системы. Для всех узлов необходимо:

написание прикладной программы для узла;

загрузка;

тестирование узла.

После этого включаются все узлы и, вероятно, устройство в целом будет работать.

Однако в этой системе нет обмена данными между блоками управления, что является недостатком, поскольку данные в секции N не могут быть использованы в соседней секции $N+1$. А это требуется, когда положение ведущей оси используется как задание для других осей или данные других датчиков (о потере питания, изменении температуры, перегрузке и т.д.) должны быть доступны для других узлов. И не все оси (в различных блоках управления) могут начинать движение точно в одно и то же время. Такие требования необходимы, например, в установках по производству кристаллов микросхем, в машинах по сканированию полупроводниковых пластин и очень рекомендуются во всех областях применения с короткими по времени

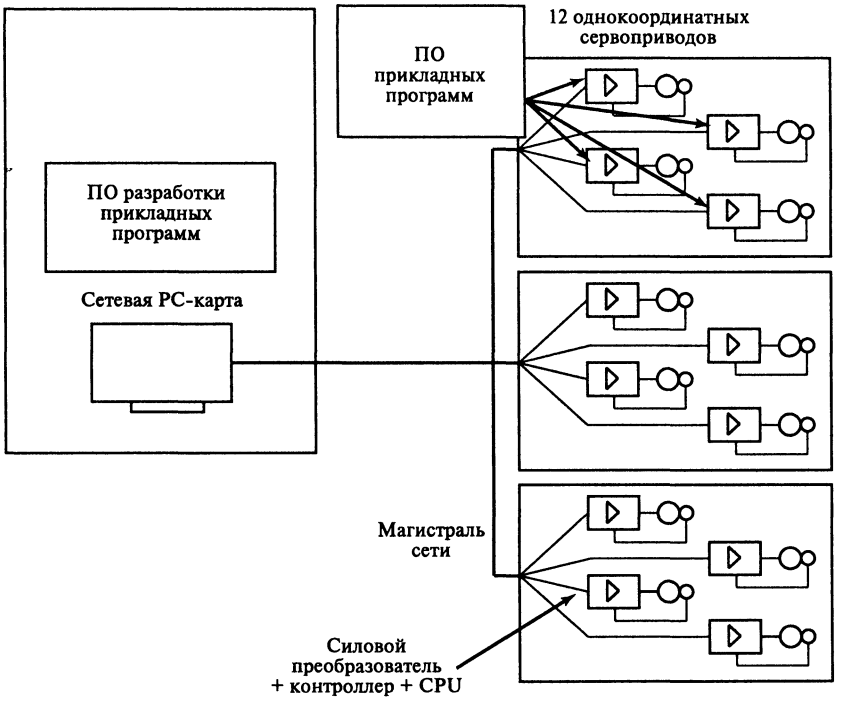


Рис. 57.16. Структура распределенной 12-координатной системы управления движением с локальным прикладным ПО

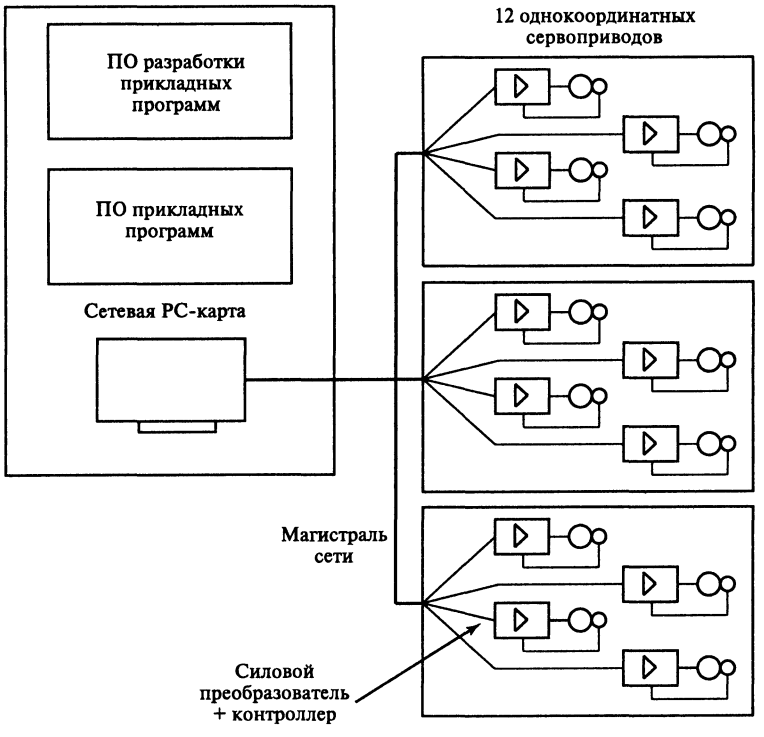


Рис. 57.17. Структура распределенной 12-координатной системы управления движением с центральным прикладным ПО

траекториями (около 10 мс или менее). Также в системе ось *X* не может реагировать на состояние оси *Y* (что необходимо при электронном воспроизведении кулачковых механизмов и редукторов связанных осей в разных блоках управления).

Еще один недостаток — невозможность переключения ведомой оси кулачка или редуктора на новую ведущую ось в реальном масштабе времени. При сложных перемещениях, требующих преобразования координат, кинематических вычислений или моделирования, отсутствует центральный узел, способный произвести вычисления и затем распределить результаты в реальном масштабе времени. Это также относится к генераторам опорных точек, которые вычисляют траектории в многокоординатных системах (роботах, многокоординатных машинах в целом). Кроме того, невозможно написать одну общую прикладную программу, структурированную на языке СИ для всех узлов, включая в рассмотрение интерфейсы машины и связи с внешним оборудованием, а также передачу данных в реальном времени, определяющую состояние осей при возникновении сбойных ситуаций.

При реализации быстрой коммуникационной связи между узлами (см. рис. 57.17) перечисленные выше недостатки устраняются. Сравнение рис. 57.16 и 57.17 показывает, что с точки зрения архитектуры между ними нет различий. Однако в устройстве, показанном на рис. 57.17, компьютер выполняет больше работы, чем в устройстве на рис. 57.16.

ПРИМЕРЫ КОНТРОЛЛЕРОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

Как уже упоминалось выше, контроллеры управления движением могут быть оформлены в виде отдельных плат, вставляемых в свободный слот материнской платы ПК или другой стандартный каркас, либо в виде отдельных блоков. Примером первого варианта конструктивного исполнения может служить контроллер DAX-3S фирмы «Nyquist Industrial Control» (Нидерланды).

DAX-3S — высокопроизводительный контроллер движения с возможностью управления до трех осей. Карта контроллера DAX-3S выполнена на основе 32-разрядного цифрового процессора обработки сигналов (DSP) и может быть установлена непосредственно в VME-шину. Аппаратные средства контроллера позволяют ввести в контур регулирования положения дополнительные высокоскоростные сигналы внешней коррекции. Встроенное программное обеспечение DAX-3S позволяет организовать согласованное управление несколькими осями. При этом обеспечивается синхронизация времени выборки сигналов обратной связи между контроллерами, что позволяет получить высокую точность управления.

Контроллер DAX-3S применяется для высокоточного управления движением в станках, робототехнике и механизмах автоматизации общего назначения.

Основные свойства DAX-3S:

управление одной, двумя или тремя осями (координатами);

выполнение любой задачи движения, толчковый режим, позиционирование из точки в точку и контурное управление;

независимое или координированное движение по разным осям;

электронная система кулачков и редукции;

цифровой ПИД-регулятор для обеспечения оптимальной точности;

S-кривая ускорения и замедления;

интерполяция кубическими сплайнами;

двухпортовое ОЗУ для изменения параметров движения во время работы;

гибкое изменение тактовой частоты DSP до 60 МГц;

высокоскоростные регистры-защелки для точной регистрации заданного положения;

расширение шины DSP для ввода дополнительных сигналов входов-выходов непосредственно в контур регулирования;

стандартные оптоизолированные дискретные входы-выходы;

программирование на языке высокого уровня C или C++;

синхронность времени дискретизации и команд между многими платами.

Большое разнообразие функциональных модулей управления движением различного назначения имеет семейство ПЛК Simatic S7-400 фирмы «Siemens».

Модуль позиционирования (трехканальный) FM451 применяется для управления электроприводами с червячной передачей. С его помощью выполняется задание точек позиционирования и управление позиционированием по трем независимым осям. Для привода червячной передачи используются стандартные двигатели. Управление двигателем модуль осуществляет через контакторы или преобразователь частоты. Функции позиционирования:

установка высокой и низкой скорости перемещения;

режим абсолютного позиционирования, который обеспечивает перемещение на позицию, задаваемую в виде цифровых величин в таблице модуля FM451;

режим относительного позиционирования — ось перемещается на заранее определенное расстояние;

режим ссылки на точку позиционирования — синхронизация работы контроллера производится

по контрольным точкам с использованием число-импульсного датчика перемещения

Модуль электронного командоконтроллера FM452 предназначен для формирования последовательности команд по аналогии с кулачковым командоконтроллером Начало последовательности операций определяется сигналом датчика положения, подключенного к входу модуля Контроллер отличается высокой скоростью выполнения операций Он оснащен 16 дискретными выходами для воздействия на процесс, обеспечивает динамическое смещение, автоматически компенсирующее задержки в конечных элементах управления Все элементы управления подключаются непосредственно к модулю В необходимых случаях для управления исполнительными механизмами используются промежуточные реле

Контроллер допускает управления по следующим каналам

32 дорожки, 16 дискретных выходов,

16, 32, 64 или 128 кулачков,

управление по положению, по времени или смешанное,

Модуль позиционирования FM453 является интеллектуальным трехканальным модулем для решения широкого круга задач позиционирования с управлением серводвигателями и (или) шаговыми двигателями Он может быть использован для решения комплексных задач точного позиционирования по нескольким осям и перемещения к заданным точкам с высокой скоростью Управление осуществляется сигналами ±10 В Для управления шаговыми двигателями задается направление вращения и формируются импульсы управления Для контроля над процессом позиционирования используются различные декодеры В приводах с шаговыми двигателями декодеры могут не применяться

Модуль автоматического регулирования FM455 является универсальным интеллектуальным 16-канальным модулем, который применяется для решения широкого круга задач автоматического регулирования На его основе могут быть построены системы регулирования температуры, давления, потока и других параметров Модуль выпускается в двух модификациях

FM455C — для непрерывного автоматического управления исполнительными устройствами, подключенными к 16 аналоговым выходам,

FM455S — для пошагового или импульсного управления интеллектуальными электродвигательными приводами или приводами с дискретным управлением, которые подключены к 32 дискретным выходам

Основные характеристики этих модулей

16 измерительных аналоговых входов и дополнительный вход температурной компенсации,

возможность использования датчиков с дифференциальными выходными сигналами, термопар, термосопротивлений, а также датчиков с унифицированными выходными сигналами тока и напряжения,

16 аналоговых (FM455C) или 32 дискретных выхода (FM455S),

питание датчиков от внешнего источника постоянного напряжения 24 В

Выполняемые функции

использование готовых структур регулирования системы стабилизации заданного значения параметра, регулирование по отклонению, трехпозиционное регулирование, объединение нескольких перечисленных систем в единую структуру,

различные режимы работы автоматический, ручной, отказоустойчивый, следящий, резервный,

время преобразования (зависит от разрядности преобразования) для 12-разрядного преобразования — от 20 до 180 мс, для 14-разрядного преобразования — от 100 до 1700 мс (определяется количеством используемых аналоговых каналов),

два алгоритма управления оптимальное самонастраивающееся регулирование температуры, ПИД-регулирование,

защищенный режим модуль может продолжать функционировать самостоятельно в случае отказа центрального процессора

СОВМЕЩЕННЫЕ КОНРОЛЛЕРЫ-СЕРВОУСИЛИТЕЛИ

Стремление к максимально полному удовлетворению различных требований потребителей, с одной стороны, и развитие сетевых технологий, с другой, привели к появлению интегрированных в одном конструктиве сервоусилителей и контроллеров управления движением Такое решение дает преимущества по стоимости, времени ввода в эксплуатацию для относительно простых сервосистем Кроме того, это позволяет унифицировать состав оборудования, используя один и тот же тип преобразователя в системах различного назначения — регулирование скорости, момента или позиционирование В то же время сохраняется возможность согласовать при необходимости работу отдельных электроприводов, осуществляя между ними обмен информацией по тому или иному интерфейсу

Автономное функционирование сервосистемы требует наличия в ее составе средств настройки режима работы и его параметров, программирования траектории движения Существенное значение приобретает также состав дополнительных средств, позволяющих приспособить алгоритм работы к конкретному объекту и технологическому процессу (дискретные и аналоговые входы-выходы, возможность подключения пультов оператора)

Комбинированное устройство «Ultra Plus» фирмы «Allen-Bradley» объединяет в общем конструктиве силовую часть и микропроцессорную систему

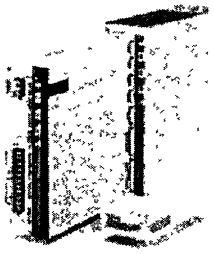


Рис. 57.18. Контроллер-сервоусилитель «Ultra Plus» фирмы «Allen-Bradley»

управления, обеспечивающую управление как положением, так и скоростью (рис. 57.18.).

Силовая часть рассчитана на работу с бесколлекторными двигателями серий F, H, N и имеет следующие диапазоны номинальных параметров:

Длительная выходная мощность, кВт	1—12
Длительный выходной ток, А	5—65
Пиковый выходной ток, А	10—150
Входное линейное напряжение, В	115—240
Частота, Гц	50/60

Параметры бесколлекторных двигателей:

F-серия	
Частота вращения, об/мин	0—4000
Длительный момент, Н · м	3,5—24,9
Пиковый момент, Н · м	9—49,8
H-серия	
Частота вращения, об/мин	0—6000
Длительный момент, Н · м	0,56—50,85
Пиковый момент, Н · м	1,24—124,3
N-серия	
Частота вращения, об/мин	0—6000
Длительный момент, Н · м	0,2—6
Пиковый момент, Н · м	0,5—17

Управляющая часть характеризуется показателями, приведенными в табл. 57.8.

Технические характеристики контроллера в составе устройства «Ultra Plus»:

Микропроцессор	80C196KC Intel
Тактовая частота, МГц	20
Сторожевой таймер, с	0,016
Память фирменного ПО, К	96 с 8 EPROM текста
Память программ пользователя, К	32
Обратная связь двигателя	Инкрементальный датчик положения
Входная частота датчика положения, кГц	750
Импульсный вход, кГц	До 800
Аналоговые входы-выходы	
ЦАП, бит	12
ЦАП для отображения параметров управления, бит	8
АЦП, бит	10/12*
Цифровые входы-выходы	
Входы общего назначения	16 (определяемых пользователем)
Выходы общего назначения	8 (определяемых пользователем)
Контакты реле	2 (замыкающих)
Последовательные каналы ввода-вывода	
Порты	2
Тип	RS-232C / RS-422
Скорость обмена, бод	1200—19 200
Ответвления	63

* При дополнительной карте расширения памяти и числа входов-выходов.

Система допускает установку пользователем коэффициентов пропорциональной и интегральной частей регуляторов скорости и положения.

Имеется режим автонастройки. Генератор команд ручной настройки обеспечивает настройки в реальном масштабе времени. Язык программирования GML Ultra устраняет необходимость в настроечных потенциометрах и обеспечивает создание, редактирование и компиляцию программы в автономном режиме.

Таблица 57.8

Показатель	Диапазон	Разрешающая способность*
Координата положения	$\pm 2^{31} : 1$	2,7′
Координата скорости	$\pm 2^{32} : 1$	0,000229 об/мин
Координата ускорения	$\pm 2^{32} : 1$	0,00381 об/с^2
Тип тахограммы	Линейная или S-кривая	—
Электронная редукция	От ± 32767 : 1 до ± 1 : 32767	—
Время реакция на изменение входного сигнала, мкс	35 ± 15	—

* Датчик положения (энкодер) — 2000 меток на оборот.

Устройство «MintDrive» фирмы «Baldor» интегрирует в компактном корпусе силовой преобразователь для бесколлекторного серводвигателя (длительный номинальный ток от 2,5 до 15 А при прямом подключении силового ввода к сети 115 или 230 В) с контроллером движения, имеющим широкий набор функций отработки перемещений и других управляющих функций Возможность задания абсолютных и относительных типов перемещений обеспечивает перемещение из точки в точку с высокой скоростью Скорость, ускорение и замедление могут быть заданы для каждого типа перемещения Трапецеидальный тип тахограммы перемещения обеспечивает самое быстрое перемещение из точки в точку, но сопровождается максимальным значением рывка и ударов в системе S-тип тахограммы перемещения обеспечивает более плавное изменение скорости, что увеличивает срок службы механической части электропривода Режим контурного управления обеспечивает непрерывное и плавное перемещение по траектории, проходящей через последовательность опорных точек

Электронное профилирование заменяет традиционные кулачковые механизмы на сервопривод и программируемый профиль движения «MintDrive» имеет второй вход импульсного датчика положения для использования в качестве задания от ведущего привода Электронная редукция и сцепление позволяют валам двух двигателей быть связанными друг с другом при прецизионной синхронизации и программируемом передаточным отношении Для этого также используется второй вход импульсного датчика положения

Режим летучих ножниц позволяет выполнять операции через регулярные интервалы при непрерывно движущемся материале Ускорение, синхронизация и обратный ход связываются с помощью программного обеспечения с движением продукта «MintDrive» поддерживает режим летучих ножниц за счет синхронизации оси своего двигателя с внешней осью, подающей материал Порт RS-232 поддерживает промышленный стандарт полного дуплексного последовательного обмена, что обеспечивает легкое соединение почти с любым устройством с последовательным портом Порт RS-485 поддерживает мультиточечное соединение и обеспечивает связь по сети RS-485 до 16 приводов типа «26S MotionDrives»

Коммуникационный массив является эффективным способом двунаправленной передачи данных между программой, работающей в контроллере, и отдельной программой пользователя, работающей на ведущем контроллере Коммуникационный массив дает последовательному порту RS-485 те же функциональные возможности, что и у параллельного двухпортового ОЗУ 18 входов пользователя читаются независимо или как байтовая информация Восемь входов пользователя могут быть сконфигурированы для прерывания MINT-программы, а восемь выходов пользователя могут быть записаны независимо или как один байт информации Все выходы пользователя имеют защиту от перегрузки по току, и состояние неисправности генерирует команду «Ошибка» в программе MINT Один выход может переключаться в запрограммированной позиции оси Четыре аналоговых входа могут быть прочитаны как два 12-битовых и два 10-битовых входа Имеется четыре аналоговых выхода с разрешением в 8 бит

«MintDrive» имеет два CAN-порта — 1 и 2 один используется для связи с модулями входов-выходов и панелью оператора фирмы «Baldor», другой — для подключения открытых по CAN-шине устройств ввода-вывода других производителей Эти узлы обеспечивают простоту подключения, быстрый и надежный метод расширения возможностей «MintDrive» CAN-шина — это двухпроводная последовательная связь, которая передает данные со скоростью до 1 Мбит/с на расстояние до 40 м (1000 м при 50 Кбит/с)

CAN-порт 1 поддерживает открытый протокол CAN для равноправного обмена сообщениями между несколькими устройствами «MintDrive» и для контроля модулей ввода-вывода других производителей «MintDrive» поддерживает следующие аксессуары CAN-шины по CAN-порту 2

модули восьми цифровых входов (оптоизолированные, от ± 12 до ± 24 В, светодиодная индикация состояния каждого входа),

модули восьми цифровых выходов (оптоизолированные, + 12 или + 24 В, 50 мА длительной нагрузки по всем каналам, защищенные от перегрузки по току и по нагреву, 350 мА для одного канала, светодиодная индикация состояния каждого выхода),

модули восьми релейных выходов (0,5 А, ~125 В, или 2 А, = 30 В),

модули 24 входов-выходов (аналогично модулям с восемью входами-выходами),

панели операторов (максимум до четырех)

Максимум до 63 узлов CAN-шины могут быть подключены к «MintDrive» Каждый из CAN-модулей имеет два электрически идентичных разъема RJ-45 CAN-шины, что позволяет несколько модулей соединять гирляндой Модули входов (выходов) могут быть смонтированы на DIN-рельсе

КОМПЛЕКСНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

Примером комплексной системы управления движением может служить система 9/PC фирмы «Allen-Bradley» Это система класса CNC, которая объединяет в себе аппаратные и программные сред-

ства числового программного управления, программируемого логического контроллера, удаленных устройств ввода-вывода. Она создавалась с использованием открытых интерфейсов, чтобы обеспечить пользователям большую гибкость в ее применении. Часть системы 9/PC, реализованная программно, работает в операционной системе Microsoft Windows NT Workstation (4,0 или позже). Система 9/PC имеет возможность сопряжения с дополнительными аппаратными и программными продуктами фирмы «Allen-Bradley» или других производителей. Типичная конфигурация системы 9/PC показана на рис. 57.19. Программные модули показаны в виде прямоугольников, содержащих имя соответствующего модуля, а аппаратные средства — в виде образа соответствующих плат или устройств.

Система 9/PC имеет четыре основных компонента:

9/PC CNC — устройство числового программного управления, реализованное на PCI-карте (плата 9/PC на рис. 57.19);

MMI — реализованный программно человеко-машинный интерфейс, основу которого составляет программный модуль BDS — базовый набор дисплеев;

SoftPLC — ПЛК, реализованный программно на базе модуля SoftLogix 5;

IO — средства ввода-вывода, реализованные на базе карты PCIDS и программного модуля IOLinx;

9/PC CNC — устройство, ориентированое на применении в токарных и фрезерных станках, может осуществлять управление несколькими приводами (до восьми, включая два привода шпинделей). Оно обеспечивает более 200 специфических функций числового программного управления, например, такие как компенсация размеров инструмента в траектории движения, калибровка оси, компенсация износа инструмента, синхронизация шпинделей, нарезание резьбы и т.п.;

BDS (Basic Display Set) — программа, основанная на языке VisualBasic, которая обеспечивает визуализацию работы CNC (например, таблицы смещения инструментов, статус CNC). BDS может взаимодействовать с программными продуктами других фирм через сервер данных и интерфейс OCI

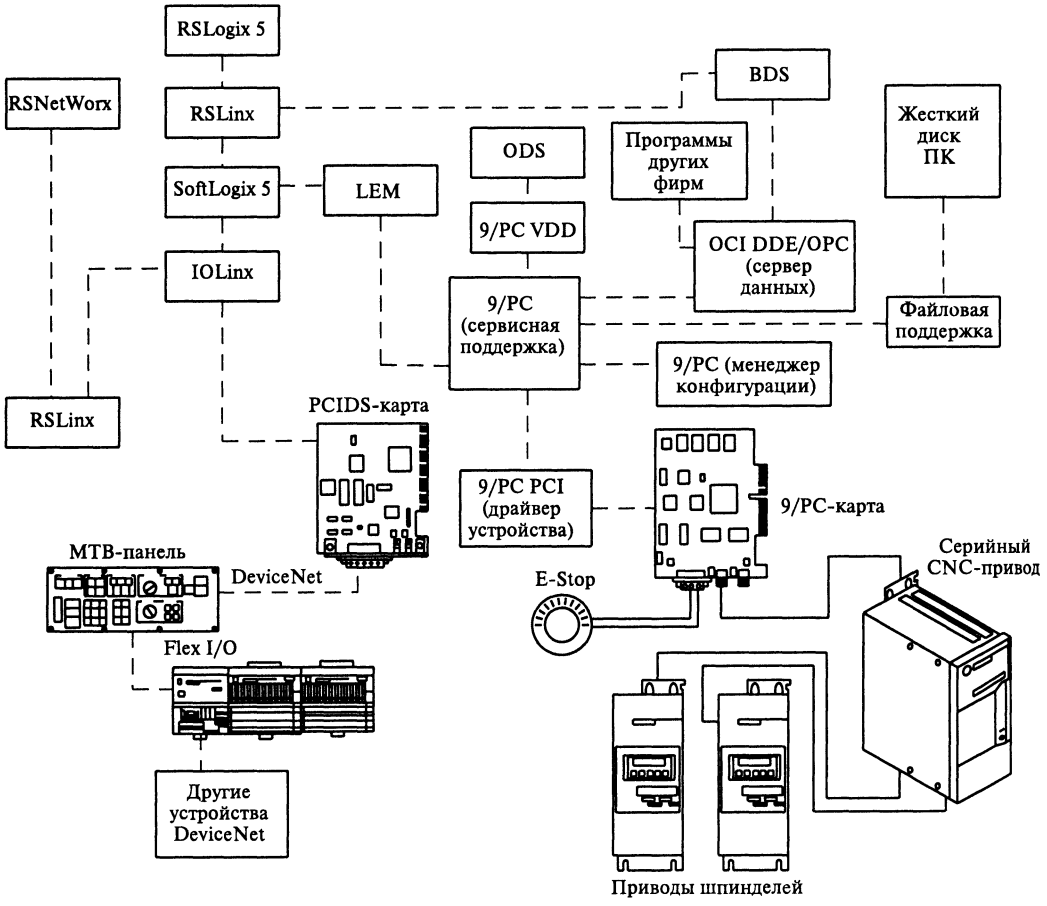


Рис. 57.19. Типовая конфигурация системы 9/PC фирмы «Allen-Bradley»

(Open Control Interface). OCI в свою очередь использует стандартные средства Microsoft Windows — DDE (Dinamic Data Exchage) и OPC (версию OLE — Object Linked Embedding) для управления процессами. Эти средства обеспечивают возможность связи (вставки) объектов, созданных в одном программном продукте, с другой программой.

Модуль SoftLogix 5, который является программным аналогом ПЛК, осуществляет дискретное управление по программе пользователя, написанной на языке лестничных диаграмм РКС. SoftLogix 5 работает на процессоре PC. Модуль LEM (Logic Extension Module) является интерфейсом, осуществляющем передачу флагов CNC между программным обеспечением 9/PC и SoftLogix 5.

Ввод-вывод дискретных сигналов, необходимый для функционирования дискретного управления и системы в целом, осуществляется через карту PCIDS по сети DeviceNet, к которой подключаются стандартная панель ручного управления MTB, устройство удаленных входов-выходов модуля Flex I/O и любые другие устройства, подключаемые к сети DeviceNet. Внешний сигнал аварийного отключения системы поступает от кнопки E-Stop непосредственно в плату 9/PC.

Назначение отдельных компонентов программного обеспечения приведено ниже:

Программный продукт	*Функция*
RSLogix 5	Написание и редактирование лестничных диаграмм РКС
RSLinx, SoftLogix 5	Выполнение лестничных диаграмм РКС
9/PC CNC Software	Запуск BDS
RSLinx	Конфигурирование драйвера DeviceNet
RSLinx, IOLinx, RSNetWorx	Коммуникация устройств DeviceNet с SoftLogix 5
RSJunctionBox	Коммуникация BDS с сервером данных
9/PC CNC Software	Конфигурирование параметров ЧПУ и привода (через ODS — Offline Development System)
9/PC CNC Software	Конфигурирование 9/PC (через 9/PC Configuration Manager)

57.4. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ВСТРАИВАЕМЫЕ ПРОГРАММИРУЕМЫЕ КОНТРОЛЛЕРЫ

Рост степени интеграции в микроэлектронике обусловил переход от достаточно сложных, состоящих из нескольких монтажных плат, микропроцессорных систем управления приводами к малогабаритным высокопроизводительным системам на основе однокристальных микроконтроллеров. Возросшие надежность и технологичность таких микропроцессорных систем сделали необратимой тенденцию массовой замены аналоговых систем управления системами прямого цифрового управления.

Под *прямым цифровым управлением* понимают:

непосредственное управление от микроконтроллера каждым ключом силового преобразователя: инвертора, управляемого выпрямителя, силового коммутатора обмоток вентильного индукторного двигателя, ключа звена рекуперации энергии и т.д.

прямой ввод в микроконтроллер сигналов различных обратных связей с последующей программно-аппаратной обработкой внутри микроконтроллера. Тип сигнала обратной связи может быть различным: дискретным, аналоговым, импульсным.

Возможность технической реализации непосредственного управления силовыми ключами определяется совершенствованием элементной базы силовой электроники. Освоено промышленное производство ряда новых электронных приборов, в частности, мощных МДП-транзисторов (MOSFET) и биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT), силовых модулей на их основе (верхний и нижний ключи стойки с обратными диодами и целые инверторы), а также силовых интеллектуальных модулей (IPM) со встроенными средствами защиты каждого ключа и интерфейсами для непосредственного подключения к микропроцессорным системам управления [57.2].

Существенное изменение претерпела также номенклатура датчиков механических и электрических величин в сторону их миниатюризации, повышения точности, интеграции в одном корпусе чувствительного элемента и электронной схемы преобразования первичного сигнала. Последнее позволило унифицировать выходные аналоговые сигналы датчиков, а в ряде случаев разместить в корпусе датчика интерфейс для непосредственной цифровой обработки микропроцессорной системой выходных сигналов датчиков.

Таким образом, система прямого цифрового управления ориентирована на отказ от значительного числа дополнительных интерфейсных плат и создание *одноплатных контроллеров управления приводами*, встраиваемых в силовое оборудование. Элементной базой для создания специализированных одноплатных контроллеров управления приводами служат однокристальные микроконтроллеры класса «Motor Control» (управление двигателями). Главное отличие этих изделий от микроконтроллеров общего назначения состоит в номенклатуре встроенных периферийных устройств, а также в максимальной адаптации архитектуры центрального процессора и системы его команд к задачам управления в реальном времени. Управление в реальном времени предполагает решение всех задач в строго отведенные для этой цели весьма малые интервалы времени, быструю реакцию на внешние

события по прерываниям, автономную работу периферийных устройств с минимальным использованием ресурсов центрального процессора

Создание внутри кристалла МК все более совершенных периферийных модулей, специализированных именно на задачах управления электроприводом, позволяет реализовать все алгоритмические задачи управления программно-аппаратными средствами только одного микроконтроллера В пределе встроенная система управления проектируется как однокристальная (только интегральная схема микроконтроллера) и вместе с силовым преобразователем и исполнительным двигателем конструктивно интегрируется в единое целое — *мехатронный модуль движения*, который через стандартный последовательный интерфейс обменивается управляющей и статусной информацией с системой более высокого уровня — промышленным программируемым контроллером или управляющим компьютером

Резкое возрастание сложности технологического оборудования, необходимость постоянной его диагностики, требование гибкого изменения параметров и даже алгоритмов работы отдельных устройств диктуют принципиально новые подходы к проектированию сложных систем привода и систем комплексной автоматизации — переход *к распределенным микроконтроллерным системам управления* на базе промышленных сетей При этом повышается надежность системы управления, сокращается число кабельных соединений, появляется возможность использования перспективных алгоритмов распределенного позиционного и контурного управления С учетом этой тенденции развития большинство МК класса «Motor Control» имеет на кристалле встроенные средства поддержки перспективных промышленных сетей, например встроенные CAN-контроллеры

МК для управления двигателями получили широкое распространение не только в приводах, но и в системах автономного и стабилизированного питания, в периферийных устройствах ЭВМ, бытовой, медицинской, военной технике, на транспорте

МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ КЛАССА «MOTOR CONTROL»

Однокристальные микроконтроллеры (МК) представляют собой законченную микропроцессорную систему обработки информации, которая реализована в виде одной большой интегральной микросхемы МК объединяет в пределах одного полупроводникового кристалла основные функциональные блоки МП-управляющей системы центральный процессор, который производит преобразования данных согласно алгоритму управления, постоянное запоминающее устройство, в котором хранится программа управления, оперативное запоминающее устройство, в которое заносятся промежуточные данные в ходе выполнения управляющего алгоритма, периферийные устройства для ввода и вывода информации [57 12] Широкое разнообразие выпускаемых моделей МК обеспечивает *модульный принцип построения*, который взят на вооружение всеми ведущими компаниями При модульном принципе построения все МК одного семейства содержат в себе базовый функциональный блок, который одинаков для всех МК семейства, и изменяемый функциональный блок, который отличает МК разных моделей в пределах одного семейства

Базовый функциональный блок включает в себя центральный процессор, внутренние магистрали адреса, данных и управления, схему тактирования, устройство управления режимами работы МК Базовый функциональный блок принято называть *процессорным ядром* МК

Изменяемый функциональный блок включает в себя модули различных типов памяти и модули периферийных устройств Размещенные на кристалле МК блоки памяти различаются по функциональному назначению (ОЗУ и ПЗУ), информационной емкости (количество ячеек памяти того и другого типа), а также по технологии занесения программы в ПЗУ Выпускаются МК с масочным, однократно программируемым (OTP ROM) и многократно программируемым ПЗУ Наиболее перспективным в настоящее время считается многократно программируемое пользователем ПЗУ, выполненное по технологии Flash

В группу модулей периферийных устройств МК общего назначения входит большинство из известных типов адаптеров сопряжения с объектом

параллельные порты ввода-вывода,

многорежимные таймеры (счетчики), таймеры периодических прерываний, процессоры событий Совокупность модулей указанного типа составляет подсистему реального времени МК,

многоканальные аналого-цифровой (АЦП) и цифроаналоговый (ЦАП) преобразователи,

контроллеры последовательного интерфейса связи нескольких типов (UART, SCI, SPI, CAN),

контроллеры клавиатуры, схемы управления жидкокристаллическими и светодиодными индикаторами

Таким образом, современные однокристальные МК общего назначения представляют собой развитую микропроцессорную систему, которая в ряде случаев может быть использована для решения задач управления электроприводом Однако так поступают все реже Дело в том, что в большинстве современных электроприводов для создания требуемой формы тока в обмотках двигателя используются регулируемые внутренними средствами си-

ловые преобразователи. Частота коммутации силовых ключей преобразователя составляет от 10 до 20 кГц, т.е. период коммутации равен всего 50—100 мкс. Система управления на основе МК должна обеспечить не только формирование интервалов указанной длительности, но и регулирование длительности проводящего состояния силовых ключей в пределах этого интервала с точностью не хуже 1 % в системах скалярного управления и 0,1—0,5 % в системах векторного управления. Формирование столь малых временных интервалов аппаратными средствами модулей таймеров и процессоров событий, входящих в состав МК общего назначения, практически невозможно. Поэтому был разработан специальный таймерный *модуль многоканального широтно-импульсного генератора (модуль ШИМ-генератора)*. Наличие в составе МК специализированного периферийного модуля ШИМ-генератора или исполнение характерных для этого модуля алгоритмов другим периферийным модулем подсистемы реального времени (обычно это процессор событий, или процессор временных интервалов, или менеджер событий) является классификационным признаком, который позволяет отнести МК к классу специализированных МК «Motor Control».

Модуль ШИМ-генератора ориентирован прежде всего на управление трехфазным инвертором напряжения. Модуль может быть также использован для управления другими устройствами силовой электроники, однако оптимизация режимов его работы во всех существующих в настоящее время МК класса «Motor Control» проведена именно для трехфазного инвертора напряжения. Модуль ШИМ-генератора реализует следующий минимальный набор функций (рис. 57.20):

генерирует цифровой опорный код с программируемой несущей частотой ШИМ-сигнала. Генератор «цифровой пилы» может работать как в режиме односторонней (с пилообразным опорным сигналом), так и двусторонней (с треугольным опорным сигналом) ШИМ-модуляции. В терминах микропроцессорной техники первый режим называют «фронтовой» ШИМ-модуляцией, второй режим — «центрированной» ШИМ-модуляцией. Главным недостатком «фронтовой» модуляции является одновременность переключения силовых ключей инвертора, что ухудшает гармонический состав формируемых выходных напряжений. Использование «центрированной» модуляции позволяет разнести во времени моменты переключения силовых ключей различных каналов инвертора и тем самым существенно улучшить гармонический состав выходного напряжения. Как видно из рис. 57.20, все выходные импульсы располагаются при этом симметрично относительно центра периода ШИМ;

генерирует шесть независимых или три комплиментарных пары ШИМ-сигналов. При независимом формировании аппаратные средства модуля могут реализовать такие наборы выходных сигналов, при которых оба ключа одной фазы инвертора закрыты или оба открыты (хотя последнее приведет к короткому замыканию на выходе звена постоянного тока). Этот режим предназначен для управления не инвертором напряжения, а другими типами преобразователей. В комплиментарном режиме ключи каждой фазы инвертора объединены в связанные пары. В любой момент в открытом состоянии находится только один ключ из пары, т.е. формируемые модулем сигналы управления ключами одной фазы взаимо инверсны. Именно такой алгоритм переключения вентилей характерен для способов формирования выходного напряжения инвертора методом ШИМ [57.11].

в комплиментарном режиме работы реализует вставку программируемого «мертвого времени». В этом режиме включение одного из вентилей пары производится спустя некоторое время после снятия сигнала управления с другого вентиля пары. Тем самым реализуется защита стойки инвертора от сквозного тока. Диапазон регулирования «мертвого времени» обычно составляет 0,125—125 мкс;

обеспечивает независимый выбор полярности сигналов ШИМ для верхней и нижней группы ключей. Это позволяет подключать к выходам МК любые типы драйверов управления силовыми ключами;

имеет режим аппаратной защиты, при котором сигнал со специального входа МК (от драйверов и дополнительных датчиков в силовой части инвертора) немедленно переводит вентили инвертора в закрытое состояние;

нагрузочная способность каждого из шести каналов ШИМ равна приблизительно 20 мА, что обеспечивает непосредственное подключение вывода МК к оптопаре драйвера управления ключом.

Наличие в составе МК специализированного модуля ШИМ-генератора является необходимым, но недостаточным условием для организации замкнутой системы управления электроприводом. Для измерения электрических переменных (сигналов датчиков тока и напряжения) МК класса «Motor Control» должен обязательно иметь еще одно периферийное устройство — *встроенный многоканальный аналого-цифровой преобразователь* с разрешением 10—12 двоичных разрядов и временем преобразования не более 10 мкс на канал. Для систем векторного управления может потребоваться еще более высокая производительность АЦП, вплоть до времени преобразования 500 нс на канал.

Для организации обратной связи по положению ротора двигателя используются импульсные датчики положения. Сигналы с датчика вводятся непосредственно в МК. Для приема и обработки этих сигналов могут быть использованы аппаратные средства *таймера общего назначения с несколькими каналами захвата* внешних сигналов или задейство-

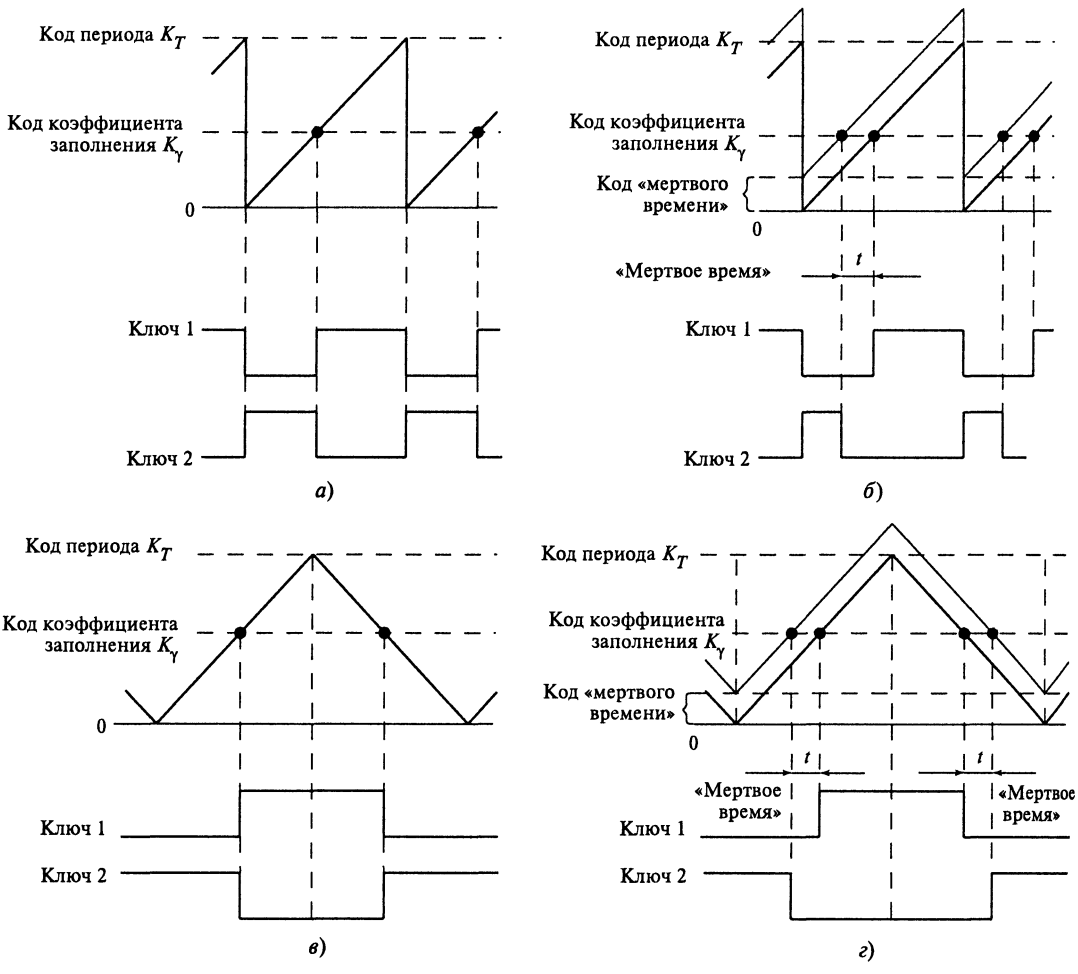


Рис. 57.20. Временны́е диаграммы формирования ШИМ-сигналов:

а — односторонняя (фронтовая) ШИМ при управлении силовыми ключами одного полумоста; *б* — односторонняя (фронтовая) ШИМ с формированием «мертвого времени» при управлении силовыми ключами одного полумоста; *в* — двусторонняя (центрированная) ШИМ при управлении силовыми ключами одного полумоста; *г* — двусторонняя (центрированная) ШИМ с формированием «мертвого времени» при управлении силовыми ключами одного полумоста

ваны несколько каналов *процессора событий*, также в режиме захвата. Упомянутые периферийные таймерные модули являются не специализированными, они входят в состав многих МК общего назначения. Но модули данного типа обязательно должны присутствовать в составе МК «Motor Control».

Более перспективным решением задачи обработки сигналов датчика положения ротора является использование специальных аппаратных средств — «квадратурных» декодеров, автоматически преобразующих две сдвинутые на 90° (электрических) последовательности импульсов с датчика в счетные импульсы и сигнал направления счета, поступающие на вход реверсивного счетчика. При этом идентификация положения ротора двигателя производится без затрат ресурсов центрального процессора, за исключением необходимости обращения к таймеру для считывания кода текущего механического положения ротора и его программного преобразования в код электрического положения внутри полюсного деления машины. Наличие аппаратных средств «квадратурного» декодера в составе модуля таймера характерно только для МК «Motor Control».

Итак, специализированный МК класса «Motor Control» представляет собой единство трех составляющих (рис. 57.21):

процессорного ядра с блоками памяти программ и данных;

некоторого набора периферийных модулей, который может изменяться от модели к модели, но



Рис. 57.21. Структура микроконтроллера класса «Motor Control»

порты ввода-вывода, многорежимный таймер с функциями входного захвата и выходного сравнения и многоканальный АЦП должны присутствовать в каждой модели МК класса «Motor Control»;

специализированного модуля ШИМ-генератора, который характерен только для МК «Motor Control».

МК для управления двигателями класса «Motor Control» выпускают следующие фирмы: «Texas Instruments», «Analog Devices», «Motorola», «Infineon», «Intel», «Hitachi», «Mitsubishi». Основной классификационный признак МК общего назначения — разрядность и архитектура процессорного ядра. Поскольку процессорное ядро МК для управления электроприводом в большинстве случаев не является специально разработанным, а заимствуется от МК общего назначения, то и МК «Motor Control» делят на следующие группы: 8-разрядные, 16-разрядные и DSP. DSP «Motor Control» — это МК с процессорным ядром, архитектура которого ориентирована на алгоритмы цифровой обработки сигналов, а набор периферийных модулей аналогичен рассмотренному.

Группа 8-разрядных МК невелика, это направление развивают лишь две фирмы: «Motorola» и «Infineon» (табл. 57.9). МК С504 и С508 фирмы «Infineon» программно совместимы с хорошо знакомым отечественным разработчикам ядром MCS51. Они обладают широкодиапазонным специализированным модулем ШИМ с максимальной среди всех 8- и 16-разрядных МК «Motor Control» разрешающей способностью. МК HC908MR32/16/8/4 фирмы «Motorola», оставаясь 8-разрядными, имеют периферию среднего по быстродействию 16-разрядного МК. Процессорное ядро рассматриваемых моделей заимствовано из нового семейства HC08, которое проектируется, как новый промышленный стандарт для 8-разрядных МК общего назначения [57.12]. Ядро МК HC08 значительно превосходит по быстродействию ядро МК С500, на котором базируются модели С504 и С508. Частота тактирования межмодульных магистралей HC08 составляет 8 МГц против 3,3 МГц у С500, планируется увеличение частоты тактирования ядра МК HC08 до 20 МГц. Система команд HC08 содержит операции быстрого умножения однобайтовых чисел и деления двухбайтовых на однобайтовые. Наибольший интерес в составе рассматриваемых моделей HC08 вызывает модуль ШИМ-генератора. Этот модуль имеет специальный режим аппаратной коррекции изменения длительности проводящего состояния вентилей фазы инвертора из-за вставки интервалов «мертвого времени». Кроме того, в модуле реализована программно-настраиваемая логика аппаратного отключения вентилей по четырем внешним сигналам. Благодаря последнему свойству режим токоограничения в обмотке двигателя может быть реализован только аппаратными средствами модуля, что упрощает передаточную функцию регулятора тока.

В группе 16-разрядных МК «Motor Control» присутствует продукция фирм «Infineon», «Intel», «Motorola», «Hitachi» и «Mitsubishi». МК двух последних производителей практически не используются российскими разработчиками, они имеются лишь в законченных изделиях. Поэтому их технические характеристики в данном разделе не приведены. Для 16-разрядных МК полностью сохраняется идеология модульного построения. Выражена она еще более отчетливо, так как процессорное ядро и периферийные модули становятся значительно сложнее. На рис. 57.22 представлена структура самого «быстрого» среди 16-разрядных МК «Motor Control» МК C167CR фирмы «Infineon».

Совершенствование структуры 16-разрядных МК ведется в двух направлениях: повышение производительности процессорного ядра и усложнение аппаратной реализации периферийных моду-

Таблица 57.9. **Технические характеристики 8-разрядных МК класса «Motor Control»**

Основные параметры	Тип МК			
	HC908MR32/16	HC908MR8/4	C508	C504
Тактовая частота, МГц	32	32	40	40
Частота внутренней магистрали, МГц	8	8	3,33	3,33
Встроенное ПЗУ программ:				
объем, кбайты	32/16	8/4	32	16
тип памяти	Flash	Flash /OTPROM	maskROM или OTPROM	maskROM или OTPROM
Встроенное ОЗУ данных, байты	512	256/192	256 + 1024 XRAM	256
Число линий ввода-вывода	46, из них 13 немультиплексированы	16, все мультиплексированы	40, из них 8 — АЦП, 6 — ШИМ	32, из них 8 — АЦП, 6 — ШИМ
Последовательные порты:				
число	2	1	1	1
тип интерфейса	SCI, SPI	SCI	UART	UART
Модули таймеров:				
число таймеров (счетчиков),	2	2	3	3
разрядность, биты	16	16	16	16
число каналов захвата (сравнения)	6	2	4	—
Модуль АЦП:				
число каналов	8	4	8	8
дискретность, биты	10	10	10	10
время преобразования, мкс	8	8	5	5
Модуль ШИМ:				
число каналов	6	6	6	6
дискретность, биты	12	12	16	16

лей с целью расширения их функциональных возможностей. Способы увеличения производительности заключаются в конвейерной обработке команд, переходе к регистровой структуре арифметического логического устройства, повышении частоты тактирования, реализации RISC-архитектуры центрального процессора (МК C167/164 фирмы «Infineon»). В результате производительность МК семейства MCS-96 фирмы «Intel» составляет от 1 до 5 млн операций в секунду [57.11], МК фирмы «Infineon» выполняют до 10 млн операций в секунду [57.16]. Но это повышение быстродействия достигнуто в рамках ядра общего назначения без применения специальных решений, ориентированных на алгоритмы управления электроприводом. В табл. 57.10, 57.11 и 57.12 приведены основные технические данные 16-разрядных МК класса «Motor Control».

Несмотря на значительное усложнение, периферийные модули 16-разрядных МК сохраняют то же функциональное назначение, что и в 8-разрядных МК. Но именно на уровне 16-разрядных МК в периферийных модулях таймера и АЦП появляются дополнительные режимы, необходимые только в системах управления электроприводом.

В подсистеме реального времени увеличилось число 16-разрядных таймеров (до 5 в МК C167 фирмы «Infineon») и принадлежащих им подсистем входного захвата и выходного сравнения. Появилась взаимосвязь между отдельными таймерами (каскадирование таймеров с увеличением разрядности до 32, синхронизация или тактирование одного из таймеров по сигналам другого). В модуле таймера появился режим «квадратурного счета». Установлены аппаратные межмодульные связи. Например, у многих МК реализована функция запуска АЦП по сигналам модуля временных функ-

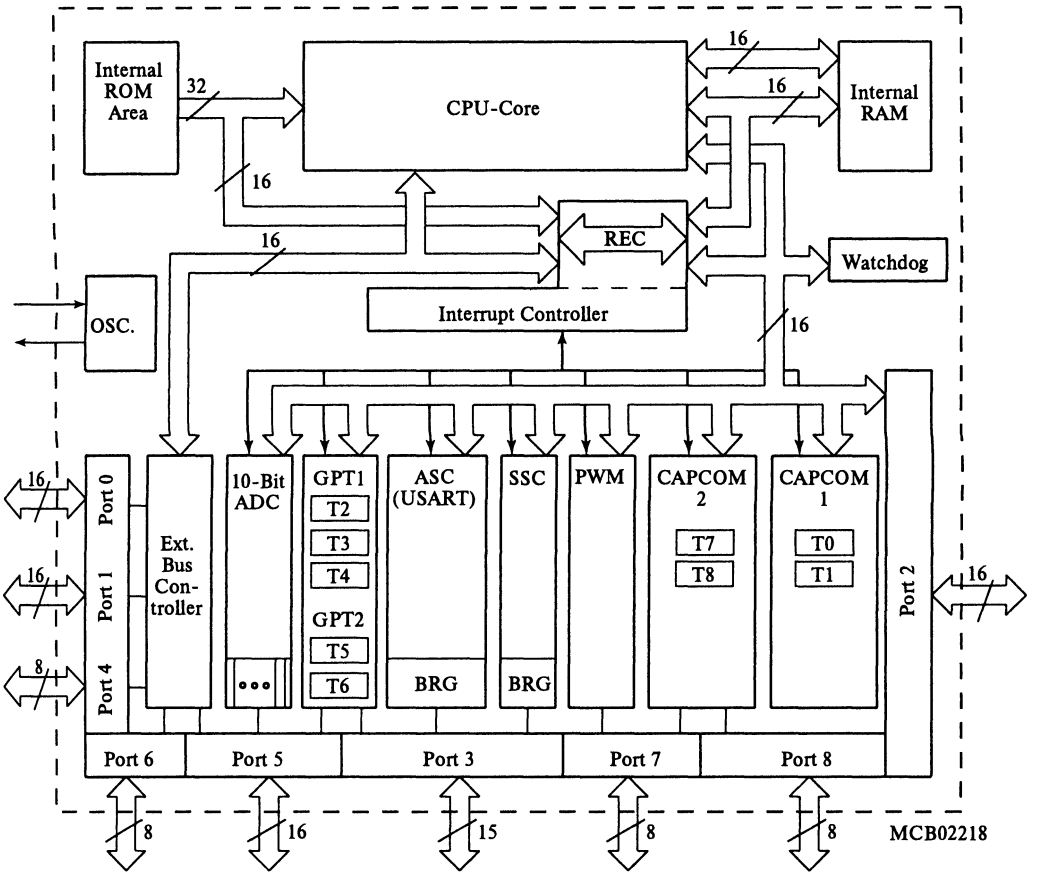


Рис. 57.22. Структура микроконтроллера C167CR фирмы «Infineon»

ций, что обеспечивает точные выборки сигнала во времени.

Модуль временных функций в 16-разрядных МК получил название *процессора событий*. По аналогии с 8-разрядными каждая серия 16-разрядных МК может иметь процессор событий двух уровней сложности:

низший уровень: набор таймеров общего назначения с подсистемами входного захвата и выходного сравнения. В МК фирм «Infineon» и «Motorola» такой модуль носит название General Purpose Time (GPT), в МК фирмы «Intel» его называют высокоскоростным устройством ввода-вывода данных (High Speed Input/Output—HSIO);

высший уровень: программируемый счетный массив. В МК фирмы «Infineon» такой модуль носит название Capture/Compare Unit (CAPCOM), в МК фирмы «Intel» его называют массивом процессора событий (Event Processor Array — EPA). МК фирмы «Motorola» оснащены модулем Time Processing Unit (TPU), который обладает возможностью микропрограммного управления и содержит собственный блок памяти. По существу, TPU является третьей ступенью в развитии процессора событий.

Встроенный многоканальный АЦП 16-разрядных МК не увеличил разрешающую способность по сравнению с 8-разрядными МК (10 разрядов у всех типов МК), однако возросло число каналов (до 16 в МК C167 фирмы «Infineon»). Очень важным является наличие встроенных устройств выборки и хранения (УВХ), которые позволяют производить замеры аналоговых величин в одни и те же моменты времени, несмотря на последовательное во времени преобразование этих величин в коды. Реализованная во всех МК связь между модулем процессора событий и модулем АЦП позволяет:

задавать моменты выборки аналоговых величин по сигналам процессора событий;

производить непрерывные измерения с загрузкой в память под управлением сервера периферийных транзакций.

Отличительной особенностью рассматриваемых 16-разрядных МК является наличие нового механизма обслуживания периферийных модулей, который реализует сервер периферийных транзак-

Таблица 57.10. **Технические характеристики 16-разрядных МК класса «Motor Control» фирмы «Infineon»**

Основные параметры	Тип МК	
	C164CI	C167CR-4RM/16XM
Тактовая частота, МГц	20	25
Встроенное ПЗУ программ (16-разрядных слов), К	64	32/128
Адресное пространство для подключения внешней памяти (16-разрядных слов), К	4096	16 384
Встроенное ОЗУ данных (16-разрядных слов), К	2	4
Число линий ввода-вывода	59	111
Последовательные порты:		
число	3	3
тип интерфейса	UART, SSC, CAN	UART, SSC, CAN
Модули таймеров:		
число таймеров (счетчиков)	5	9
разрядность, биты	16	16
число каналов захвата (сравнения)	8	4
Модуль процессора событий:		
тип	—	CAPCOM*
число каналов захвата (сравнения)		32
Модуль ШИМ:		
число каналов	6	4
дискретность, биты	16	16
Модуль АЦП:		
число каналов	8	10
дискретность, биты	10	10
время преобразования, мкс	9,7	9,7
время выборки, мкс	—	1,8
Тип корпуса	P-TQFP-80	P-MQFP-144

* Модуль CAPCOM позволяет реализовать дополнительные каналы ШИМ.

ций (Peripheral Transactions Server — PTS в МК фирмы «Intel», он же модуль PEC в МК фирмы «Infineon»). Данный модуль совмещает функции прерывания и прямого доступа к памяти. Сервер транзакций содержит устройство микропрограммного управления, которое по запросу на прерывание выполняет пересылку данных без участия центрального процессора: например из памяти в модуль последовательного интерфейса или из одной области памяти в другую. Средствами сервера транзакций выполняется сканирование АЦП, при котором измерения производятся непрерывно с автоматическим управлением коммутатором, полученные коды пересылаются в память.

Наиболее динамично в настоящее время развиваются МК «Motor Control» с DSP-архитектурой процессорного ядра. В этом сегменте элементную базу производят три фирмы: «Texas Instruments», «Analog Devices» и «Motorola» [57.13—57.15].

Основные отличия МК «Motor Control» с DSP-архитектурой процессорного ядра:

значительно возросла производительность МК, во-первых, благодаря новой архитектуре процессорного ядра и, только во-вторых, за счет повышения частоты тактирования;

на этапе перехода МК «Motor Control» к DSP-архитектуре процессорного ядра она была не просто заимствована из процессоров цифровой обработки сигналов, но усовершенствована специально для целей управления электроприводом. Так, в МК фирмы «Analog Devices» появился специальный блок для быстрого преобразования фазных токов к неподвижной системе координат (прямые и обратные преобразования Парка и Кларка), а в МК TMS320L'240x

Таблица 57 11 **Технические характеристики 16-разрядных МК класса «Motor Control» фирмы «Intel»**

Основные параметры	Тип МК			
	8XC196KC/ 8XC196KD	8XC196MC	8XC196MD	8XC196MH
Тактовая частота, МГц	20	16	16	16
Встроенное ПЗУ программ (16-разрядных слов), К	16/32	16	16	32
Адресное пространство для подключения внешней памяти (16-разрядных слов), К	64	64	64	64
Встроенное ОЗУ данных (16-разрядных слов), К	488/1000	488	488	744
Число линий ввода-вывода	48	53	64	52
Число последовательных портов	1	1	1	2
Число таймеров (счетчиков)	2	2	2	2
Модуль процессора событий				
тип	HSIO	EPA	EPA	EPA
число каналов захвата (сравнения)	10	8	12	6
Модуль ШИМ				
число каналов	6	6	6	6
дискретность, биты	16	16	16	16
Модуль АЦП				
число каналов	16		16	
дискретность, биты	10		10	
время преобразования, мкс	16,5—19,5		7—20	
время выборки УВХ, мкс	1—3		1	
Тип корпуса	N-68, S-80	U-64, S-80	U-64, S-80	U-64, S-80

(семейство '240x) фирмы «Texas Instruments» введены специальные команды,

кардинальные изменения претерпел блок ШИМ-генератора Его аппаратные средства стали поддерживать новый режим формирования выходного напряжения инвертора — так называемую векторную ШИМ,

дополнительные алгоритмы преобразования стали поддерживать модуль процессора событий и АЦП Кроме того, была повышена разрешающая способность АЦП до 12 разрядов и уменьшено время преобразования.

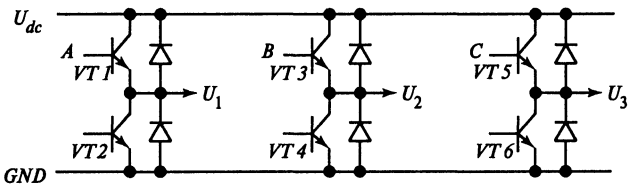
Остановимся более подробно на векторной ШИМ Большинство выпускаемых сегодня преобразователей частоты для регулирования частоты вращения трехфазных двигателей обеспечивают управление инвертором напряжения в режиме синусоидальной центрированной широтно-импульсной модуляции Суть метода состоит в одновременном управлении на заданной несущей частоте (10—20 кГц) сразу всеми шестью ключами *VT1—VT2* инвертора (рис. 57.23) таким образом, что в средних точках каждой стойки инвертора формируются волны синусоидального выходного напряжения U_1, U_2, U_3, сдвинутые одна относительно другой на 120° (электрических). При этом верхний и нижний ключи всегда коммутируются в противофазе и максимальная амплитуда выходного сигнала равна половине напряжения на звене постоянного тока $U_{dc}/2$ Если для формирования напряжения U_{dc} использовать стандартный неуправляемый выпрямитель, то двигатель окажется недоиспользованным по напряжению примерно на 15 %.

Для того чтобы обеспечить номинальные параметры исполнительного двигателя, приходится идти на искажение формы выходного напряжения в зоне частот, близких к номинальной, т.е переходить от синусоидальной формы выходного напряжения к трапецеидальной (в пределе — к прямоугольной). Исследования по поиску более совершенных методов управления продолжались более 10 лет и завершились созданием *теории векторной ШИМ-модуляции (ШИМ-модуляции базовых векторов)* и соответствующих аппаратных средств поддержки. Эти средства включены в ШИМ-генераторы специализированных МК «Motor Control» нескольких фирм, в том числе «Texas Instruments» и «Analog Devices»

Таблица 57.12. **Технические характеристики 16-разрядных и 32-разрядных МК класса «Motor Control» фирмы «Motorola»**

Основные парамстры	Тип МК					
	68HC16X1/ 68HC961X1	68HC16Y1/ 68HC961Y1	68HC16Y3	68332	68333	68336
	16-разрядные			32-разрядные		
Тактовая частота, МГц	16	16	16	16	16	16
Встроеннос ПЗУ программ: объсм, кбайты	48	48	96	16	64	32
тип памяти	Flash	ROM/Flash	ROM/Flash	ROM/Flash	ROM/Flash	ROM/Flash
Встроеннос ОЗУ данных, байты	2048	2048/4096	4096	2048	512	4048
Число линий ввода-вывода	47	47	96	47	96	96
Число последовательных портов	1	1	1	1	1	1
Число таймсров (счстчиков) (всс в модулс TPU)	16	16	16	16	16	16
Модуль процессора событий: тип	TPU	TPU	TPU	TPU	TPU	TPU
число каналов захвата (сравнсния)	16	16	32	16	16	16
Модуль ШИМ	Функции модуля ШИМ заложсны в TPU					
Модуль АЦП: число каналов	8					
дискрстность, бит	10					
врсмя прсобразования, мкс	8					
врсмя выборки УВХ, мкс	1—8					
Тип корпуса	132-QFP	132-QFP	160-QFP	132-QFP	144-QFP	160-QFP

Примсчание. Всс прсдставлснныс контроллсры являются контроллсрами общсго назначсния, однако TPU позволяст рсализовывать полнофункциональный ШИМ-модулятор, а такжс другис функции для управлсния различными типами двигатслсй. TPU с маской типа G спсциально прсдназначсн для управлсния различными типами электричсских двигатслсй.



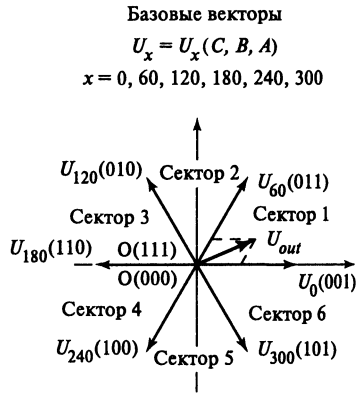
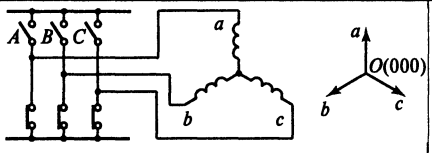
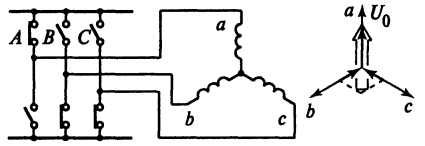
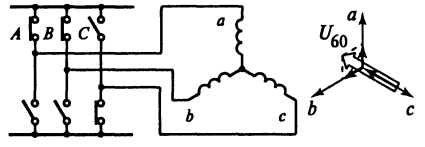
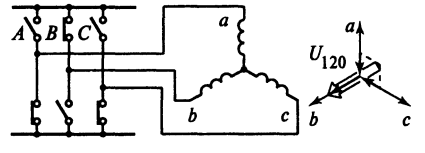
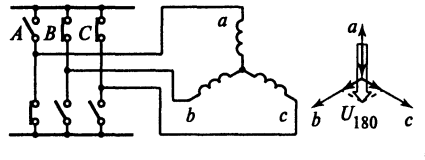
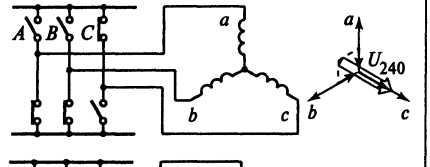
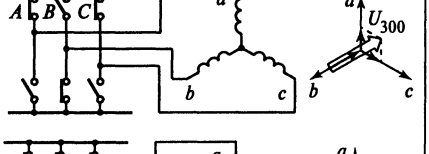
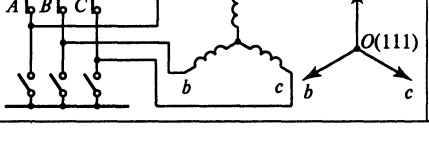


Рис. 57.23. ШИМ-модуляция базовых векторов

Суть метода состоит в отказе от одновременной коммутации всех ключей инвертора и в переходе к коммутации между несколькими заранее выбранными состояниями инвертора, каждое из которых соответствует определенному пространственному положению вектора результирующего напряжения, приложенного к двигателю. В табл. 57.13 показаны схемы включения силовых ключей и векторные диаграммы для наиболее часто используемого набора базовых векторов, соответствующего стандартной 6-тактной коммутации (верхний ключ, два нижних или два верхних, нижний).

Таблица 57.13. **Схемы включения и векторные диаграммы для инвертора в режиме ШИМ-модуляции базовых векторов**

Базовый вектор		Схема включения и векторная диаграмма	Фазные напряжения ($U_ф/U_{dc}$)		
Обозначение	Код		U_c	U_b	U_a
$O(000)$	000		0	0	0
$U_0(001)$	001		−1/3	−1/3	+2/3
$U_{60}(011)$	011		−2/3	+1/3	+1/3
$U_{120}(010)$	010		−1/3	+2/3	−1/3
$U_{180}(110)$	110		+1/3	+1/3	−2/3
$U_{240}(100)$	100		+2/3	−1/3	−1/3
$U_{300}(101)$	101		+1/3	−2/3	+1/3
$O(111)$	111		0	0	0

Имея восемь базовых векторов, два из которых «нулевые», а остальные сдвинуты в пространстве на 60° (электрических) (см. рис. 57.23), можно воспроизвести любой требуемый вектор выходного напряжения путем переключения на периоде ШИМ между двумя базовыми векторами текущего сектора U_x и $U_x + 60$ и нулевыми векторами $O(000)$ и $O(111)$.

Значение выходного напряжения U_{out} определяется скважностью включения базовых векторов γ_m, γ_{m+1} и γ_0:

$$U_{out} = U_x\gamma_m + U_{x+60}\gamma_{m+1} + O(000 \text{ или } 111)\gamma_0,$$

где $\gamma_m = T_m / T$; $\gamma_{m+1} = T_{m+1} / T$; $\gamma_0 = T_0 / T$; T — период ШИМ; T_m, T_{m+1}, T_0 — интервалы времени, в течение которых состояние ключей инвертора соответствует формированию векторов U_x, U_{x+60}, $O(000 \text{ или } 111)$.

Для каждого сектора диаграммы рис. 57.23 используются свои базовые векторы U_x, U_{x+60}. Например, для сектора 1: U_0, U_{60} и $O(111)$ или $O(000)$.

Амплитуда и фаза результирующего вектора напряжения зависят исключительно от скважности включения базовых векторов. Как показано на рис. 57.24, *а*, в предельном случае, когда нулевые векторы не используются, годограф вектора результирующего напряжения представляет собой шестиугольник, описанный вокруг базовых векторов. С учетом того что амплитуда базового вектора составляет 2/3 U_{dc}, возможно формирование кругового годографа вектора результирующего напряжения с амплитудой 0,577 U_{dc}, что на 15 % больше амплитуды выходного напряжения для случая классической синусоидальной центрированной ШИМ.

Существуют и другие варианты выбора базовых векторов. Так, использование векторов, соответствующих парной реверсивной коммутации фаз двигателя (рис. 57.24, *б*) обеспечивает ту же самую максимальную амплитуду вектора результирующего напряжения, а переход к базовым векторам, соответствующим 12-тактной коммутации (рис. 57.24, *в*), позволяет увеличить выходное напряжение инвертора уже на 27 %. Последний метод достаточно сложен в реализации и поэтому не используется.

Встроенные ШИМ-генераторы МК «Motor Control», имеющие режим центрированной ШИМ, могут работать в режиме ШИМ-модуляции базовых векторов. При этом в первом способе реализации используется двухпроходная коммутация с переключением базовых векторов на периоде ШИМ в последовательности: $O(000)$, m, $m+1$, $O(111)$, $m+1$, m, $O(111)$, как показано на рис. 57.25. Здесь же приведены формулы расчета уставок на сравнение для каждого из каналов ШИМ-генератора (CMP) в соответствии со скважностью включения базовых векторов γ_m, γ_{m+1}. Определение компонент результирующего вектора во всех обычных МК, кроме DSP, требует значительных ресурсов центрального процессора. Это может привести к невозможности реализации векторной ШИМ-модуляции на высоких частотах несущей (10—20 кГц). Кроме того, необходима программная коррекция влияния «мертвого времени» в зоне выходных напряжений, близких к минимальному.

Второй способ реализации векторной ШИМ заключается в использовании двух каналов полного сравнения и дополнительного последовательного управляющего автомата, включенного в состав ШИМ-генератора (рис. 57.26). Автомат работает по двум различным алгоритмам в зависимости от выбранного пользователем начального направления переключения базовых векторов: (m, $m+1$) или ($m+1$, m). Один из алгоритмов следующий:

установить в начале периода ШИМ состояние инвертора U_m;

при первом сравнении перевести инвертор в состояние U_{m+1};

при втором сравнении перевести инвертор в одно из нулевых состояний $O(000)$ или $O(111)$, код которого отличается от кода предыдущего состояния инвертора лишь одним разрядом;

при третьем сравнении восстановить предыдущее состояние U_{m+1};

при четвертом сравнении восстановить начальное состояние инвертора U_m.

Как видно из рис. 57.26, второй алгоритм отличается только порядком перебора базовых векторов. Главное отличие между алгоритмами состоит в том, к какой — верхней или нижней шине звена постоянного тока обеспечивается подключение одной из фаз на периоде ШИМ.

Одним из важнейших преимуществ метода является уменьшение числа переключений на периоде ШИМ с шести до четырех и сокращение на 30 % динамических потерь в ключевых элементах инвертора.

Несмотря на серьезную аппаратную поддержку методов векторной ШИМ-модуляции, разработчикам приходится решать в реальном времени ряд дополнительных задач: расчет номера базового сектора; определение составляющих базовых векторов и перепрограммирование ШИМ-генератора; коррекции влияния «мертвого времени» и потерь напряжения в силовых ключах; коррекции изменения напряжения на звене постоянного тока. Имея мощные вычислительные ресурсы сигнальных микроконтроллеров, можно справиться с этими задачами.

В конце 2000 г. наиболее разнообразный ряд моделей DSP «Motor Control» выпускала фирма «Texas» [57.13, 57.14]. Остановимся кратко на их

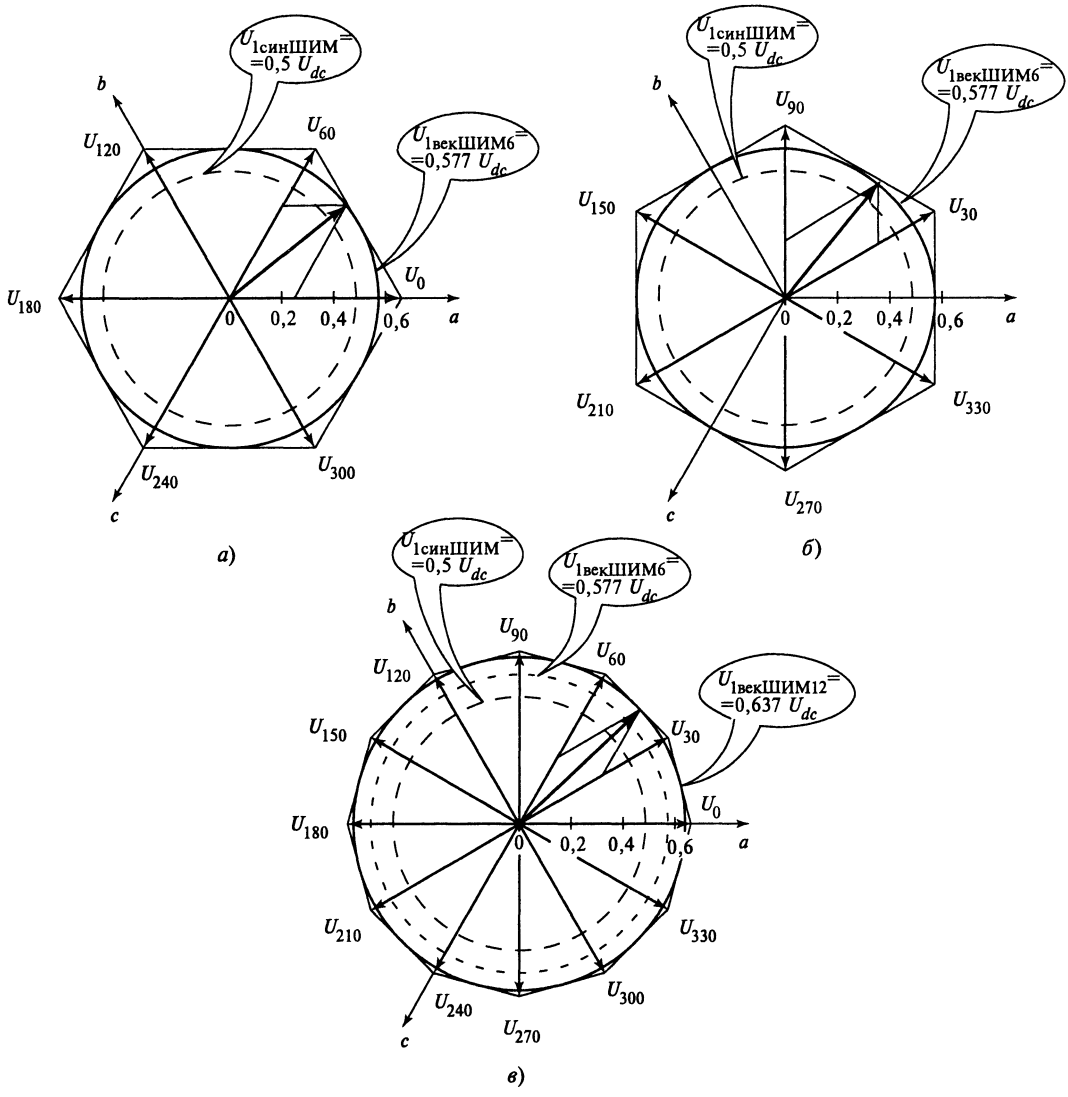
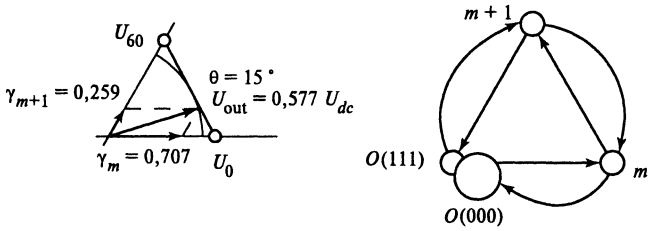


Рис. 57.24. Сравнительный анализ различных методов ШИМ-модуляции базовых векторов: $U_{1синШИМ}$ — напряжение 1-й гармоники выходного напряжения инвертора при формировании методом синусоидальной ШИМ; $U_{1векШИМ6}$ — напряжение 1-й гармоники выходного напряжения инвертора при формировании методом векторной ШИМ по первому способу; $U_{1векШИМ12}$ — напряжение 1-й гармоники выходного напряжения инвертора при формировании векторной ШИМ с двенадцатитактной коммутацией

характеристиках. Выпускаемые в настоящее время МК DSP типа TMS320'24x (семейство '24x, табл. 57.14) ориентированы прежде всего на создание приводов по классической схеме неуправляемый выпрямитель — инвертор — двигатель. Новое поколение МК TMS320L '240x (семейство '240x) существенно расширяет возможные сферы применения и допускает управление двухдвигательными (двухинверторными) приводами, а также приводами, построенными по схеме управляемый выпрямитель — инвертор — двигатель. Эффект достигается как за счет интеграции в кристалле МК сразу двух независимо работающих менеджеров событий с режимом векторной ШИМ, так и за счет существенного повышения производительности центрального процессора (до 30, 40 млн операций/с) и увеличения объема встроенной памяти программ (до 32 К 16-разрядных слов). МК '240x перспективны для построения приводов с активными цифровыми фильтрами, а также могут быть рекомендованы для управления преобразователями частоты с непосредственной связью и матричными преобразователями.

Семейство '240x перспективно для тяговых приводов с векторным управлением (электромоби-



Тип коммутации

$O(000)$, m, $m + 1$, $O(111)$, $m + 1$, m, $O(000)$

$$CMP_1 = \frac{1 - \gamma_m - \gamma_{m+1}}{2};\quad CMP_2 = \frac{1 + \gamma_m - \gamma_{m+1}}{2};\quad CMP_3 = \frac{1 + \gamma_m + \gamma_{m+1}}{2};$$

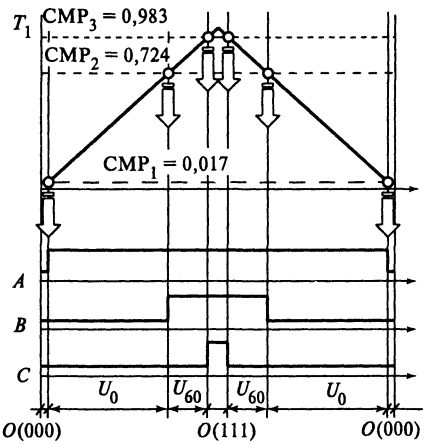


Рис. 57.25. Реализация векторной ШИМ-модуляции на базе стандартной центрированной ШИМ

ли, локомотивы, малые транспортные средства), а также приводов, работающих на активную нагрузку (краны, подъемники, канатные дороги, лифты), прежде всего из-за возможности прямого цифрового управления одновременно всеми ключами входного и выходного силового преобразователя, что решает проблему рекуперации энергии в тормозных режимах.

Технические характеристики улучшенного семейства специализированных МК DSP для управления двигателями '240x представлены в табл. 57.15. МК имеют различный объем встроенной памяти и различный набор периферийных устройств, что позволяет разрабатывать системы управления, оптимизированные по критерию максимума производительности и функциональных возможностей за минимум цены.

Типовая структура МК семейства '240x представлена на рис. 57.27. Его характерные особенности:

1. Два многофункциональных модуля менеджера событий (EVA и EVB). Восьмиканальный генератор (ШИМ) и два 16-разрядных таймера общего назначения в составе каждого менеджера событий обеспечивают:

прямое цифровое управление по шести каналам трехфазными инверторами напряжения в режимах фронтовой, центрированной или векторной ШИМ-модуляции;

управление дополнительными ключами по двум каналам в режимах стандартной фронтовой или центрированной ШИМ-модуляции;

быстродействующую аварийную блокировку выходов ШИМ-генератора по внешнему сигналу (авария в силовой части преобразователя);

защиту силовых ключей в стойке инвертора от сквозного тока на базе программируемого генератора «мертвого времени».

Блок трехканального модуля захвата в составе менеджера событий используется для ввода и изменения длительности импульсных сигналов. На его основе реализуется встроенный «квадратурный» декодер для интерфейса с импульсным датчиком положения в системах цифрового измерения положения и скорости.

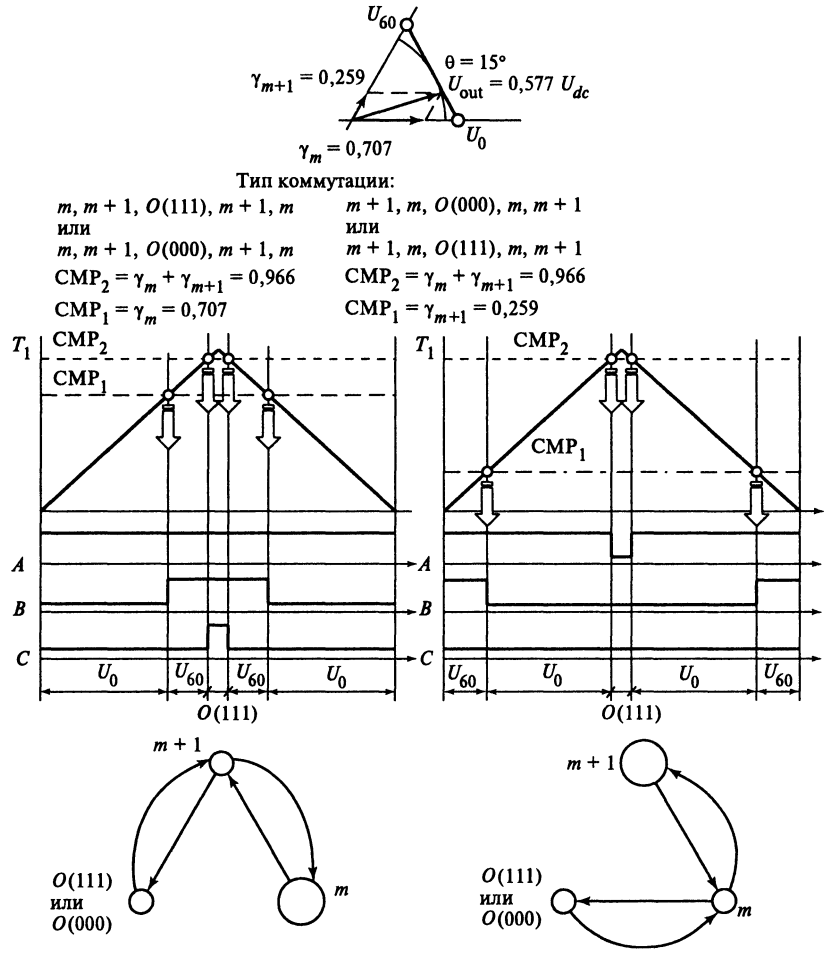


Рис. 57.26. Реализация векторной ШИМ-модуляции на базе двухканального компаратора и последовательного управляющего автомата

В составе менеджера событий имеется также блок синхронизации запуска встроенного АЦП по характерным моментам периода ШИМ.

Оптимизированная архитектура блока менеджеров событий предназначена для прямого цифрового управления приводами всех типов на базе асинхронных, синхронных, шаговых, вентильно-индукторных двигателей, коллекторных и бесколлекторных двигателей постоянного тока, а также для построения двух- и многодвигательных систем привода, двух- и многоинверторных систем, четырехквадрантных полностью управляемых силовых преобразователей, преобразователей с активными входными цифровыми фильтрами, преобразователей частоты с непосредственной связью, матричных преобразователей. Сдвоенный менеджер событий предоставляет в распоряжение пользователя уникальные возможности по управлению инверторами сразу двух преобразователей частоты. Причем имеется возможность одновременного ввода в «квадратурном» режиме сигналов положения сразу с двух импульсных датчиков. Используя таймеры, программист может программно идентифицировать скорость каждой оси и по разности скоростей организовать эффективное управление, например демпфирование упругих колебаний в механической части привода, безударную выборку зазоров и т.п. Это важно для сложных систем, где успешная борьба с упругими связями и зазорами в передачах является решающим фактором успеха.

Наличие значительного числа каналов формирования ШИМ-сигналов (16) открывает новые перспективы перед разработчиками систем управления приводами, способными рекуперировать энергию торможения в сеть, — приводами подъемных механизмов кранов, лифтов, шахтных механизмов и т.д. В этом случае МК может одновременно в реальном времени управлять входным и выходным

Таблица 57.14 **Технические характеристики МК DSP класса «Motor Control» фирмы «Texas Instruments» (семейство '24x)**

Основные параметры	Тип МК					
	F240	C240	F241	C241	C242	F243
Цикл выполнения команды, нс	50	50	50	50	50	50
Производительность, млн операций/с	20	20	20	20	20	20
ОЗУ двойного доступа DARAM (16-разрядных слов)	544	544	544	544	544	544
Встроенная Flash-память (16-разрядных слов), К	16	—	8	—	—	8
Встроенное ПЗУ (16-разрядных слов), К	—	16	—	8	4	—
Модуль менеджера событий.						
число таймеров общего назначения	3	3	2	2	2	2
число каналов сравнения/ШИМ	9/12	9/12	5/8	5/8	5/8	5/8
число каналов захвата/ввода «квадратурных» сигналов	4/2	4/2	3/2	3/2	3/2	3/2
Модуль АЦП·						
дискретность	10	10	10	10	10	10
число каналов	16	16	8	8	8	8
время преобразования, мкс	6,6	6,6	0,85	0,85	0,85	0,85
Последовательные порты·						
число	2	2	3	3	1	3
тип интерфейса	SCI, SPI	SCI, SPI	SCI, SPI, CAN	SCI, SPI, CAN	SPI	SCI, SPI, CAN
Число линий дискретного ввода-вывода	28	28	26	26	26	32
Тип корпуса	132 PQFP	132 PQFP	68 PLCC, 64 PQFP	68 PLCC, 64 PQFP	68 PLCC, 64 PQFP	144 TQFP

преобразователями, обеспечивая эффективную работу привода во всех четырех квадрантах.

2. Возросшая производительность 16-канального последовательного 10-разрядного АЦП с встроенным УВХ. Время преобразования существенно уменьшилось и составляет 500 нс на канал, включая время выборки данных. АЦП может работать в режиме автоматического сканирования, когда выполняется последовательный запуск аналого-цифрового преобразования по заранее заданным пользователем каналам, т.е. реализуется так называемая «измерительная сессия». Причем, в отличие от МК семейства '24x, где результаты преобразования размещались в двухуровневом стеке, в новых МК семейства '240x для каждого из 16 каналов предусмотрены свои индивидуальные регистры результата. Такой подход позволяет полностью отделить процесс получения данных от процесса их анализа, упрощая и ускоряя программирование. В течение одной сессии (последовательность преобразований) можно выполнить до 16 преобразований. Аналоговые входы АЦП могут рассматриваться как 16 независимых каналов или как две группы каналов по 8 входов в каждой группе. В последнем случае имеется возможность управлять процессом преобразования данных в каждой группе входов от своего менеджера событий EVA или EVB. Таким образом, можно запустить сессию следующим образом: немедленно (программный запуск); по событию в одном из менеджеров событий EVA или EVB, например по началу периода ШИМ; по внешнему сигналу запуска процесса преобразования. Гибкая система прерываний позволяет формировать запрос прерывания по готовности данных в конце каждого отдельного преобразования или по завершении сессии преобразований. Имеются режимы автоматической калибровки и тестирования АЦП.

3. Встроенный CAN-контроллер с поддержкой протокола 2.0B для реализации локальных промышленных сетей микроконтроллеров по двухпроводной линии связи.

4. Режим отладки в реальном времени с помощью внутрисхемного эмулятора, подключенного к МК через интерфейс JTAG (IEEE Standard 1149.1).

Таблица 57.15. **Технические характеристики МК DSP класса «Motor Control» фирмы «Texas Instruments» (семейство '240x)**

Основные параметры		Тип МК					
		'LF2407	'LF2406	'LF2402	'LC2406	'LC2404	'LC2402
Цикл выполнения команды, нс		33	33	33	33	33	33
Производительность, млн операций/с		30	30	30	30	30	30
ОЗУ	двойного доступа DARAM (16-разрядных слов)	544	544	544	544	544	544
	однократного доступа SARAM, (16-разрядных слов), К	2	2	—	2	1	—
Встроенная Flash-память (16-разрядных слов), К		32	32	8	—	—	—
Встроенное ПЗУ (16-разрядных слов), К		—	—	—	32	16	4
Загрузочное ПЗУ (16-разрядных слов)		256	256	256	—	—	—
Модуль менеджеров событий A и B (EVA, EVB):							
число таймеров общего назначения		4	4	2	4	4	2
число каналов сравнения/ШИМ		10/16	10/16	5/8	10/16	10/16	5/8
число каналов захвата/ввода «квадратурных» сигналов		6/4	6/4	3/2	6/4	6/4	3/2
Модуль АЦП:							
дискретность		10	10	10	10	10	10
число каналов		16	16	8	16	16	8
время преобразования, нс		500	500	500	500	500	500
Последовательные порты:							
число		3	3	1	3	2	1
тип интерфейса		SCI, SPI, CAN	SCI, SPI, CAN	SCI	SCI, SPI, CAN	SCI, SPI	SCI
Число линий дискретного ввода-вывода		41	41	21	41	41	21
Тип корпуса		144 TQFP	100 TQFP	64 TQFP	100 TQFP	100 TQFP	64 TQFP

ПРИМЕРЫ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДАМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Для большинства массовых применений двигателей переменного тока (насосы, вентиляторы, конвейеры, компрессоры и т.д.) требуется относительно небольшой диапазон регулирования скорости (1:10, 1:20) и относительно низкое быстродействие. При этом используются классические структуры *скалярного управления*, которые реализуются на базе 8- и 16-разрядных МК «Motor Control». Для перехода к широкодиапазонным (до 1:10 000), быстродействующим приводам станков, роботов и транспортных средств требуется применение более сложных структур *векторного управления*. Доля таких приводов в промышленности пока невелика, но быстро увеличивается.

На рис. 57.28 показана современная структура привода переменного тока с векторным управлением. В качестве исполнительного двигателя может применяться либо синхронный двигатель с активным магнитоэлектрическим ротором, либо синхронный реактивный двигатель, а при больших мощностях синхронный двигатель с независимым электромагнитным возбуждением. Возможно использование структуры и для управления трехфазными вентильно-индукторными двигателями с разнополярным питанием, а также шаговыми двигателями, работающими в режиме бесколлекторных двигателей постоянного тока (БДПТ). Такой привод является естественной альтернативой коллекторным приводам постоянного тока и часто называется приводом с вентильными двигателями (электронно-коммутируемыми двигателями).

Показанные на рис. 57.28 элементы системы управления могут быть реализованы на одном кристалле при условии правильного выбора типа МК. Поясним на примере этой задачи, какие функции

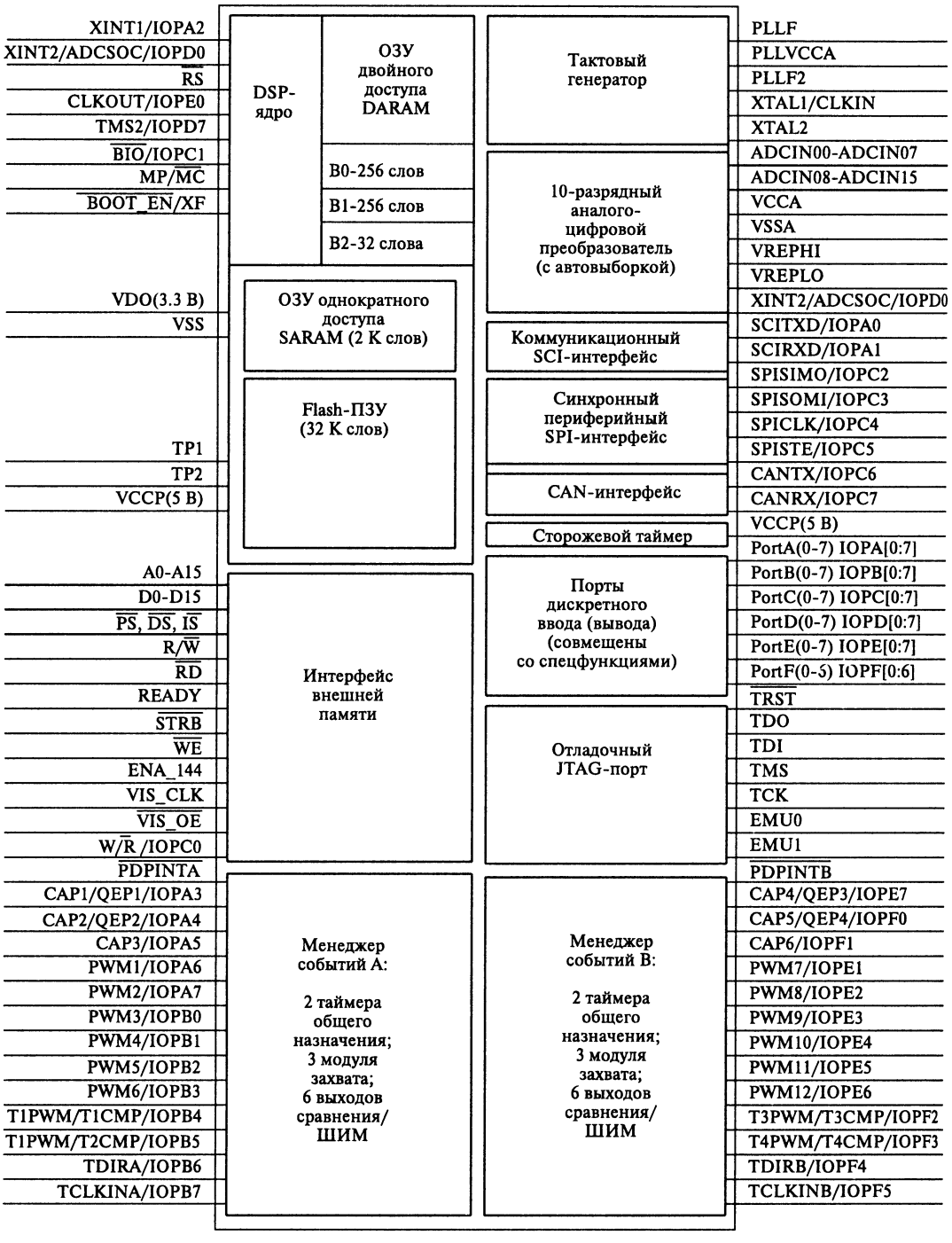


Рис. 57.27. Структурная схема '2407 14 KDSP

могут выполнять отдельные периферийные устройства специализированных МК.

В качестве силового преобразователя используется инвертор на IGBT-ключах или интеллектуальных силовых модулях. Входы драйверов ключей соединяются непосредственно с выходами встроенного в МК многоканального ШИМ-генератора. Задача этого устройства состоит в генерации шести управляющих сигналов на фиксированной частоте, обычно 10—20 кГц, с программно регулируемой

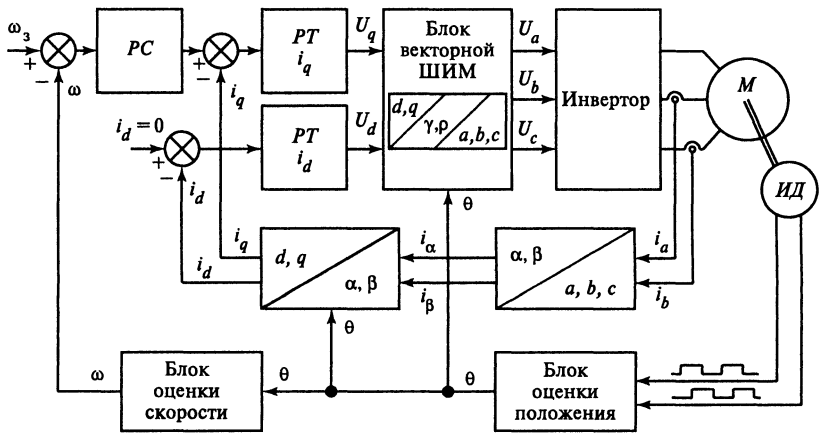


Рис. 57.28. Упрощенная структурная схема привода переменного тока с векторным управлением

скважностью для управления ключами инвертора в режиме ШИМ. При этом на выходе инвертора устанавливаются определенные мгновенные значения фазных напряжений и, следовательно, задаются амплитуда и фаза результирующего вектора напряжения, приложенного к обмотке статора двигателя *M*. Система векторного управления двигателями переменного тока строится таким образом, чтобы обе компоненты вектора напряжения (амплитуду и фазу) можно было регулировать независимо.

В схеме на рис. 57.28 предполагается использование обратной связи по положению ротора двигателя — импульсного датчика положения. Сигналы с датчика вводятся непосредственно в контроллер и обрабатываются в блоке оценки положения. Блок оценки положения реализуется в МК с использованием «квадратурного» декодера, автоматически преобразующего две сдвинутые на 90° (электрических) последовательности импульсов с датчика в счетные импульсы и сигнал направления счета, поступающие на вход реверсивного счетчика. Желательно, чтобы таймер, работающий в «квадратурном» режиме допускал начальную инициализацию в соответствии с числом меток на оборот импульсного датчика положения, а также имел режим автоматической коррекции своего состояния по реперному датчику (датчику начального положения).

Блок измерения скорости должен работать с регулируемым разрешением как по числу импульсов на периоде измерения скорости (от 1 до 255), так и с регулируемым разрешением по времени (максимальное разрешение 50—100 нс при диапазоне регулирования разрешения 1:128). Если перечисленные выше требования к периферийным устройствам микроконтроллера будут выполнены, то окажется возможной цифровая идентификация скорости в диапазоне как минимум 1:20 000 с точностью не менее 0,1 %, что требуется для прецизионных приводов в станкостроении и робототехнике.

На каждом периоде ШИМ-процессор получает с АЦП информацию о фактических значениях токов фаз i_a и i_b и программным путем восстанавливает значение тока (i_c) в фазе *c*, считая двигатель симметричным. Производится преобразование фазных токов к неподвижной системе координат, связанной со статором ($a, b, c \rightarrow \alpha, \beta$).

На основе информации, полученной с блока идентификации механического и электрического положения ротора, выполняется переход от неподвижной системы координат к подвижной, связанной с текущим положением ротора ($\alpha, \beta \rightarrow d, q$), что позволяет рассчитать компоненты результирующего вектора тока статора по осям *d* и *q* соответственно.

Известно, что момент синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов прямо пропорционален составляющей вектора тока статора по поперечной оси *q*. При этом для минимизации общего потребляемого двигателем тока необходимо поддерживать ток по продольной оси *d* равным нулю. Таким образом, в структуре системы векторного управления выход регулятора скорости привода РС следует подключить на вход регулятора тока по поперечной оси *PT* i_q для управления моментом двигателя, а на вход регулятора тока по продольной оси *PT* i_d подать нулевое задание (см. рис. 57.28).

Обычно регуляторы скорости и токов являются пропорционально-интегральными, причем регуляторы токов, в отличие от регулятора скорости и блока оценки скорости, работают на каждом периоде ШИМ. Периодичность вызова программ, обслуживающих контур скорости, задается по прерыванию от таймера.

Выходные сигналы регуляторов тока пропорциональны компонентам результирующего вектора напряжения статора по осям *d* и *q* соответственно. В блоке векторной ШИМ сначала выполняется пре-

образование компонент вектора напряжения к полярной системе координат (γ, ρ), связанной с продольной осью ротора, а затем с учетом текущего положения ротора θ определяются рабочий сектор, внутрисекторный угол и рассчитываются компоненты базовых векторов в абсолютной системе координат, связанной со статором. Формируются напряжения, прикладываемые к обмоткам двигателя U_a, U_b, U_c.

Рассмотренная выше структура системы управления обеспечивает автоматическое формирование в фазах двигателя синусоидальных токов и напряжений при работе исполнительного двигателя *ИД* в режиме бесколлекторного двигателя постоянного тока с оптимальным углом коммутации и минимизацией пульсаций электромагнитного момента.

Полная система векторного управления содержит дополнительный блок коррекции по ЭДС, улучшающий динамические свойства привода, блок коррекции выходного напряжения инвертора по фактическому значению напряжения на звене постоянного тока, блок управления цепью приема энергии рекуперативного торможения двигателя и некоторые другие блоки, например блок управления входным управляемым выпрямителем, если он предусмотрен. Важно отметить, что перечисленные выше преобразования координат (прямые и обратные преобразования Парка и Кларка), алгоритмы регулирования токов, управления ШИМ-преобразователем должны выполняться в реальном времени.

Особенностью системы векторного управления асинхронными двигателями является необходимость использования дополнительного вычислительного блока, в котором производится оценка текущего углового положения вектора потокосцепления ротора. Это делается на основе решения в реальном времени системы дифференциальных уравнений, составленных в соответствии с математической моделью двигателя. Естественно, что подобная операция требует дополнительных вычислительных ресурсов центрального процессора.

Стремление предельно удешевить привод, особенно для массового применения в бытовой технике (пылесосы, стиральные машины, холодильники, кондиционеры и т.д.), привело к отказу от датчиков механических переменных и переходу к системам бездатчикового управления, в которых для оценки механических координат привода (положения, скорости, ускорения) используются специальные цифровые наблюдатели. Это возможно только при высокой производительности центрального процессора, когда система дифференциальных уравнений, описывающих поведение привода, может быть решена в реальном времени.

В ряде сфер применения, например для приводов с вентильно-индукторными и бесколлекторными двигателями постоянного тока, вполне достаточно на интервале коммутации поддерживать в обмотке двигателя заданный фиксированный уровень тока. Структура системы управления при этом заметно упрощается (рис. 57.29).

Особенность схемы состоит в том, что ШИМ-генератор обеспечивает сразу две функции: автокоммутацию фаз двигателя по сигналам датчика положения и поддержание тока на заданном уровне путем регулирования приложенного к обмоткам

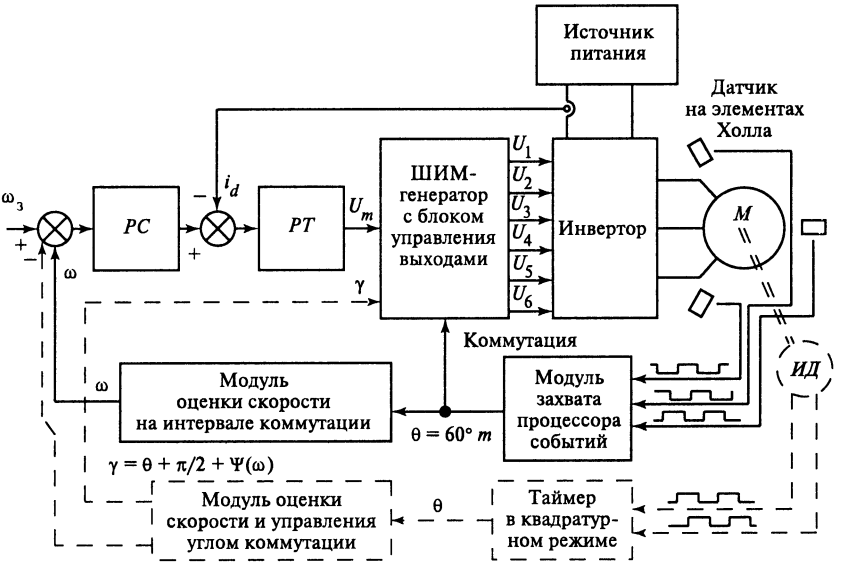


Рис. 57.29. Два варианта системы управления бесколлекторным двигателем постоянного тока (для второго варианта блоки показаны пунктиром)

двигателя напряжения. Первая функция может быть реализована автоматически, если ШИМ-генератор имеет встроенный блок управления выходами, допускающий прием команд от процессора событий. Вторая функция традиционна и реализуется путем изменения скважности выходных ШИМ-сигналов.

Для оценки положения ротора двигателя можно использовать либо датчик положения на элементах Холла, либо более дорогой импульсных датчик положения. В первом случае сигналы с датчика положения вводятся в МК на входы модулей захвата процессора событий. Отработка двигателем каждого целого шага идентифицируется процессором событий и вызывает автокоммутацию ключей инвертора. Прерывание, возникающее при каждом захвате фронта сигнала с датчика, используется для оценки времени между двумя соседними переключениями и, далее, скорости привода. Во втором случае можно получить более точную информацию о текущем положении ротора двигателя и о его скорости, что может потребоваться в приводах с интеллектуальным управлением углом коммутации в функции скорости.

Приводом следующего века по прогнозам большинства специалистов станет привод на основе вентильно-индукторного двигателя (ВИД). Двигатели этого типа просты в изготовлении, технологичны и дешевы. Они имеют пассивный ферромагнитный ротор без каких-либо обмоток или магнитов. Вместе с тем высокие потребительские свойства таких приводов могут быть обеспечены только при применении мощной микропроцессорной системы управления в сочетании с современной силовой электроникой. Для типовых приводов перспективны индукторные двигатели с самовозбуждением, а для тяговых приводов — индукторные двигатели с независимым возбуждением со стороны статора. В последнем случае система управления строится как система двухзонного регулирования скорости по аналогии с коллекторными приводами постоянного тока.

Таким образом, для реализации современных систем управления приводами переменного тока требуются высокопроизводительные МК или сигнальные МК с широким набором перечисленных выше встроенных периферийных устройств, допускающих совместную работу и требующих от центрального процессора минимальных ресурсов на обслуживание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

57.1. **Мишель Ж.** Программируемые контроллеры. Архитектура и применение: Пер. с франц. М.: Машиностроение, 1992.

57.2. **Козырев С.К., Обухов С.Г., Ремизевич Т.В.** Микропроцессоры и их применение: Электротехнический справочник. В 4 т. Т.1. Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под. общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. —8-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во МЭИ, 1995.

57.3. **Бретман В.В.** Контроллер всему голова // Промышленные АСУ и контроллеры. 1999. № 6. С. 10—15

57.4. **Матвеев В.И.** Нетрадиционный подход к традиционным ПЛК // Промышленные АСУ и контроллеры. 1999. № 3. С. 14—19.

57.5. **Сорокин С.** IBM PC в промышленности // Современные технологии автоматизации, 1996. № 1. С. 6—13.

57.6. **Иванов А.Н., Золотарев С.В.** Построение АСУТП на базе концепции открытых систем // Мир ПК. 1998. № 1. С. 40—44.

57.7. **Кузнецов А.** Промышленные компьютеры фирмы «Advantech» // Современные технологии автоматизации. 1997. № 1. С. 12—20.

57.8. **Simatic** S7/M7/C7 Programmable Controllers. Catalog ST 70. 1996. Order No.: E86060-K4670-A111-A2-7600.

57.9. **Гибко-программируемые** контроллеры или системы на базе персонального компьютера // Приборы и системы управления. 1998. № 8. С.77—78.

57.10. **Дубовик Е.А., Котов Н.А.** Промышленные сети // Промышленные АСУ и контроллеры. 1999. № 8. С. 3—9.

57.11. **Козаченко В.Ф.** Микроконтроллеры Intel MCS-196/296. М.: ЭКОМ, 1997.

57.12. **Ремизевич Т.В.** Микроконтроллеры для встраиваемых приложений: от общих подходов к семействам HC005 и HC08 фирмы «Моторола». М.: Додека, 2000.

57.13. **Высокопроизводительные** встраиваемые системы управления двигателями на базе сигнального микроконтроллера TMS320F241 / В.Ф. Козаченко, Н.А. Обухов и др. // Chip News. 2000. № 5. С. 28—32.

57.14. **Козаченко В.Ф. Грибачев С.И.** Перспективная серия МК фирмы «Texas Instruments» '240x для систем цифрового управления двигателями // Chip News. 1999. № 9. С. 7—14.

57.15. **Соловьев А. Веселов М.** Семейство DSP-МК фирмы «Analog Devices» для встроенных систем управления двигателями // Chip News. 1999. № 1. С. 17—23.

57.16. **Чучалов В.** Новый микроконтроллер серии C166 для управления электроприводами // Chip News. 1999. № 1. С. 47—52.

СОДЕРЖАНИЕ

58.1. Релейно-контакторные системы управления электроприводами 180
58.2. Системы, замкнутые по скорости и току 186
58.3. Позиционные системы 189
Электропривод механизмов точного останова. Требования к электроприводу (190). Электропривод механизмов слежения. Требования к электроприводу (195)
58.4. Система подчиненного регулирования координат электропривода 200
Принципы построения системы подчиненного регулирования (200). Контур регулирования тока (момента) в системе управляемый преобразователь — двигатель постоянного тока (201). Регулирование скорости в системе управляемый преобразователь — двигатель постоянного тока (205). Подчиненное регулирование координат в системе генератор — двигатель постоянного тока (207). Регулирование скорости в системе источник тока — двигатель (209). Система двухзонного регулирования скорости двигателя (210). Системы регулирования положения (212). Частотно-управляемый асинхронный электропривод (213).
58.5. Системы управления с нечеткой логикой (фаззи-логикой) 216
Список литературы 223

58.1. РЕЛЕЙНО-КОНТАКТОРНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Простейшие разомкнутые системы управления электроприводом (ЭП) составляются в основном из типовых узлов, которые широко освещены в справочной литературе [58.1, 58.2]. Релейно-контакторные схемы ЭП постоянного тока применяются редко из-за отсутствия сетей постоянного тока. Далее приведены схемы ЭП переменного тока с асинхронными двигателями (АД) с короткозамкнутым и фазным роторами.

Наиболее простая и распространенная схема ЭП с АД с короткозамкнутым ротором небольшой мощности (до 10 кВт) показана на рис. 58.1. Она содержит АД с короткозамкнутым ротором *M*; автоматический выключатель *QF*; трехфазный линейный контактор (магнитный пускатель) *KM*; две кнопки управления *SB*1 «Пуск» и *SB*2 «Стоп» с замыкающими и размыкающими контактами; предохранители *FU*1, *FU*2 с плавкими вставками; тепловое реле *KK*.

Схема обеспечивает пуск и останов двигателя, максимально-токовую, тепловую и нулевую защиты.

При необходимости реверса АД применяется реверсивная схема управления (рис. 58.2), в которой использован реверсивный магнитный пускатель с катушками *KM*1 и *KM*2. Их силовые контакты меняют чередования фаз напряжения, приложенного к АД и, следовательно, изменяют направление вращения магнитного поля. Напряжение на схему подается установочным автоматом *QF*. В схеме применены максимально-токовая (автоматический выключатель *QF* и предохранители с плавкими вставками *FU*1, *FU*2), тепловая (тепловое реле *KK*) и нулевая (катушки пускателей *KM*1 и *KM*2) защиты, а также электрическая и механическая блокировки, запрещающие одновременное включение пускателей *KM*1 и *KM*2.

На рис. 58.3 приведена схема управления АД с короткозамкнутым ротором, обеспечивающая динамическое торможение при останове с управлением по принципу времени. В режиме торможения обмотка статора питается постоянным током через вы-

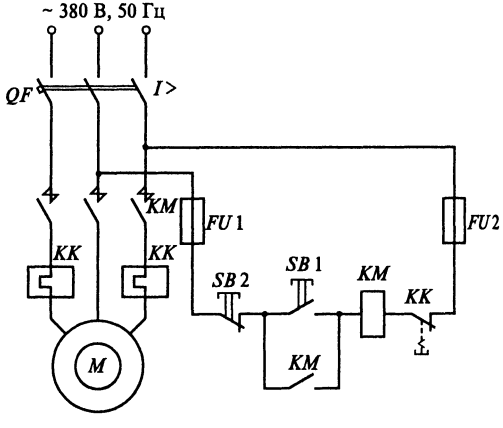


Рис. 58.1. Схема ЭП АД с короткозамкнутым ротором

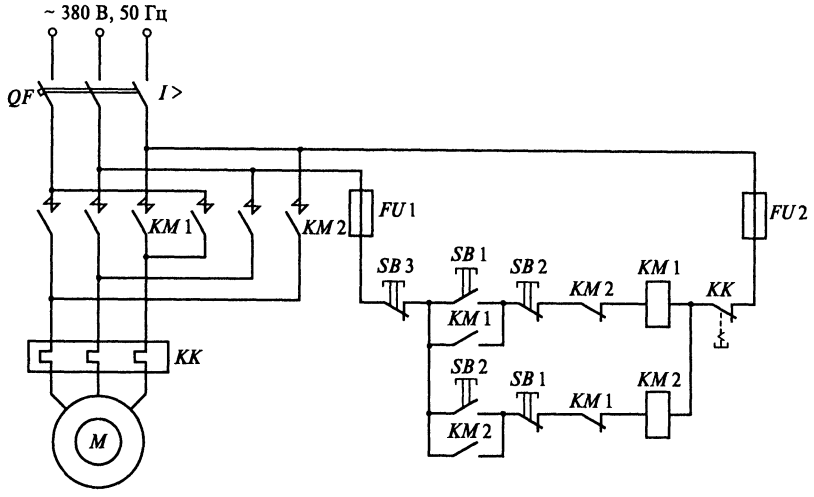


Рис. 58.2. Реверсивная схема управления

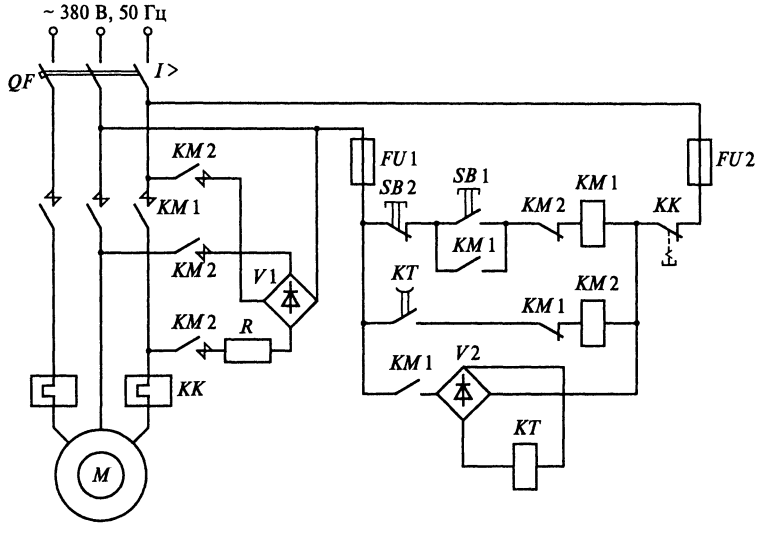


Рис. 58.3. Схема управления АД с короткозамкнутым ротором с динамическим торможением

прямитель *V1*, подключенный к сети переменного тока. Необходимое значение тормозного тока устанавливается резистором *R*. Выдержка времени динамического торможения обеспечивается реле времени постоянного тока *KT*, обмотка которого питается от выпрямителя *V2*. Напряжение на схему подается установочным автоматом *QF*, осуществляющим максимально-токовую защиту АД. В схеме может применяться тепловая защита с тепловым реле *KK*.

На рис. 58.4 показана схема управления АД с короткозамкнутым ротором с торможением противовключением при останове с управлением по принципу скорости, осуществляемым реле контроля скорости *SR*. При работе, например, в направлении «Вперед» включен контактор *KM*1 и замкнут контакт *SR*4. При нажатии кнопки «Стоп» *SB*3 включается вспомогательное реле *K*, которое отключает контактор *KM*1 и через замкнутый контакт *SR*4 включает контактор *KM*2. При этом изменяется чередование фаз на обмотке статора и происходит торможение противовключением. При скорости, близкой к нулю, контакт *SR*4 реле контроля скорости размыкается и отключает контактор *KM*2. Двигатель останавливается. При останове АД с направления «Назад» включен контактор *KM*2, а в *SR* замкнут контакт *SR*1. Останов происходит аналогично.

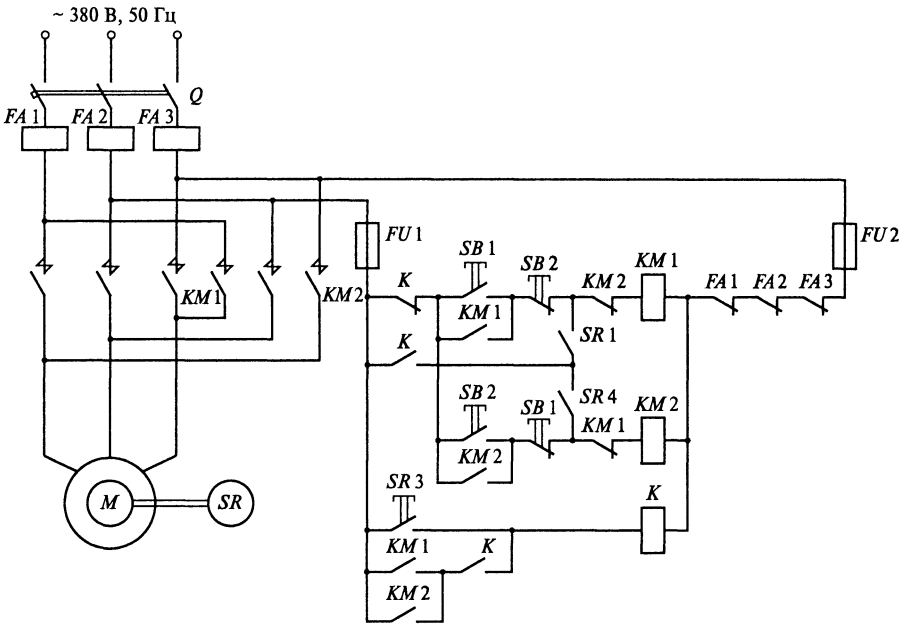


Рис. 58.4. Схема управления АД с короткозамкнутым ротором с торможением противовключением

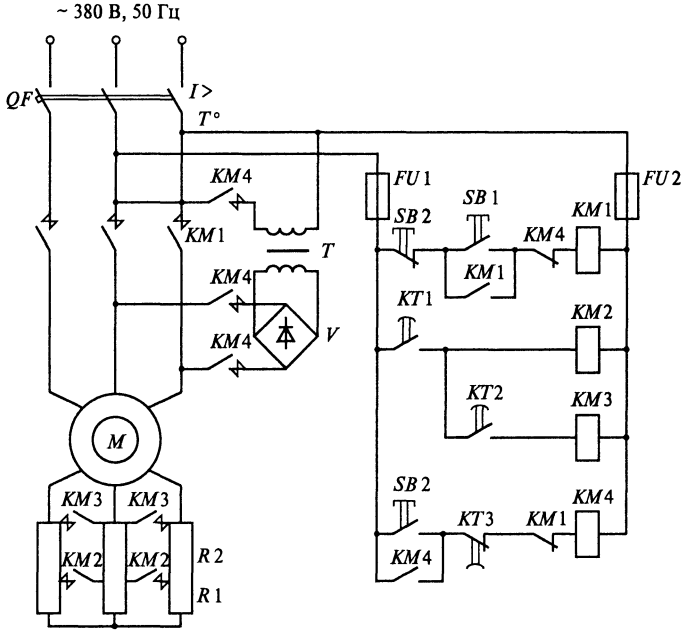


Рис. 58.5. Схема управления АД с фазным ротором со ступенчатым пуском

При реверсе АД кнопка «Стоп» *SB*3 не нажимается, а нажимается кнопка противоположного направления вращения. Двигатель затормаживается в режиме противовключения и далее разгоняется в противоположном направлении. Максимально-токовая защита двигателя осуществляется максимальным реле тока (*FA*1, *FA*2, *FA*3).

На рис. 58.5 показана схема управления АД с фазным ротором, в которой осуществляется пуск с двумя ступенями пускового резистора *R*1 и *R*2, обеспечивающими ограничение пускового тока и момента исходя из допустимой перегрузочной способности АД. Управление пуском осуществляется по принципу времени (реле *KT*1 и *KT*2). В качестве

реле времени могут использоваться реле времени постоянного тока, катушки которых подключены через выпрямитель. Могут применяться и пневматические приставки выдержки времени типа ПВЛ, механически соединенные с пускателями (реле *КТ*1 с пускателем *КМ*1, реле *КТ*2 с пускателем *КМ*2) [58.3, 58.4]. При останове АД применено динамическое торможение с управлением по принципу времени (реле *КТ*3 с пускателем *КМ*3). Обмотки статора питаются постоянным током через выпрямитель *V* с трансформатором *T*, вместо которого может применяться выпрямитель с резистором (см. рис. 58.3). При динамическом торможении в целях более эффективного торможения в обмотку ротора включаются тормозные резисторы, в качестве которых обычно используются пусковые резисторы. В качестве реле времени динамического торможения *КТ*3 в схеме использована пневматическая приставка ПВЛ, соединенная с пускателем динамического торможения *КМ*4. Для останова АД в схеме использован замыкающий контакт кнопки «Стоп» *SB*2.

На рис. 58.6 приведена схема управления АД с фазным ротором, работающим в повторно-кратковременных режимах с частыми пусками (до 1200 включений в час), что обусловило выполнение схемы с аппаратами постоянного тока. Схема обеспе-

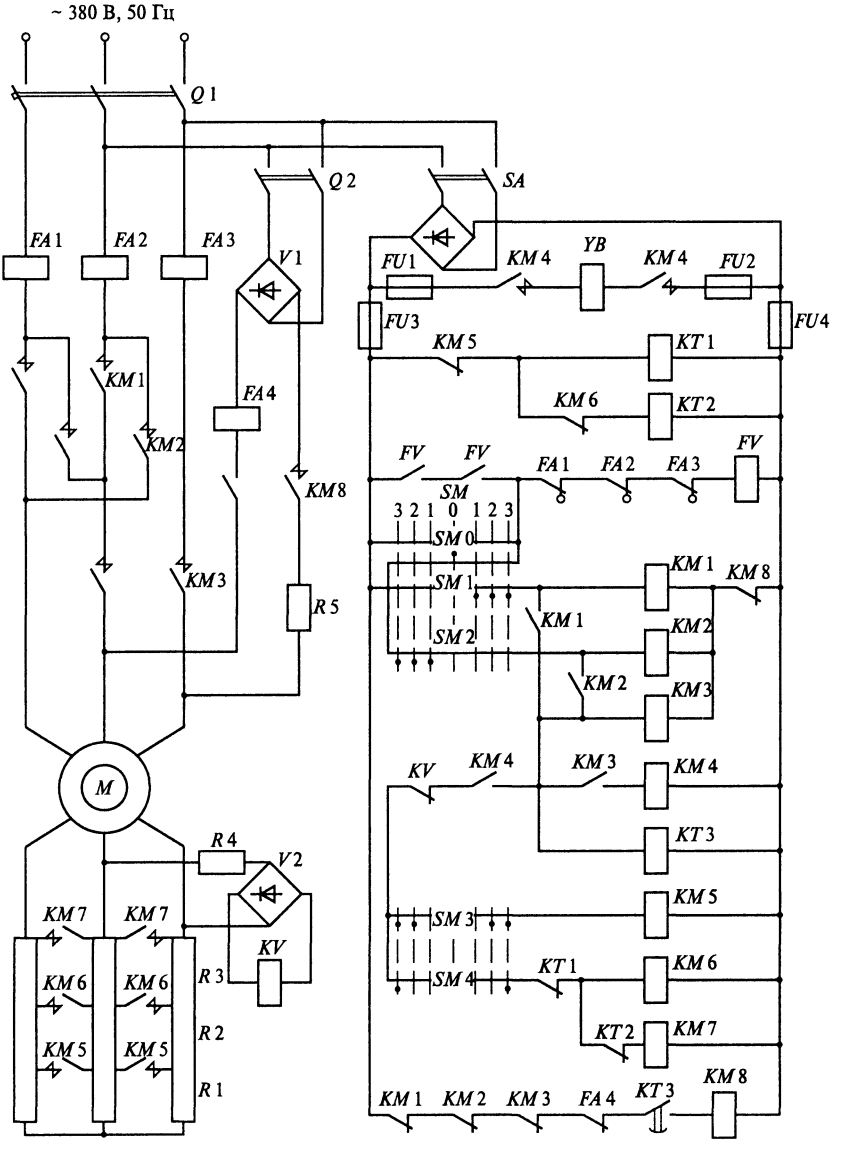


Рис. 58.6. Схема управления АД с фазным ротором в повторно-кратковременном режиме

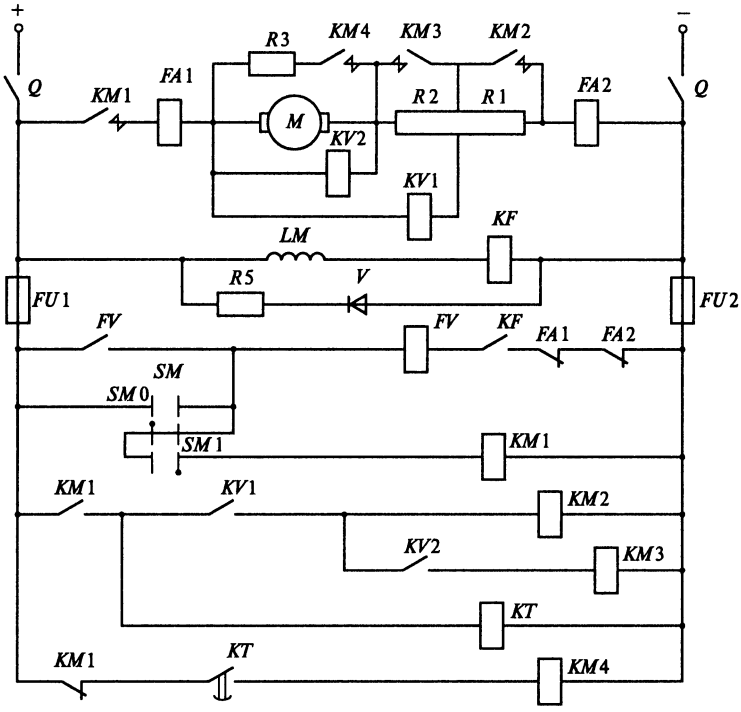


Рис. 58.7. Схема управления двигателем постоянного тока независимого возбуждения

чивает пуск АД с двумя ступенями пускового резистора с управлением по принципу времени (реле *KT*1, *KT*2), реверс с торможением противовключением с управлением по принципу скорости (реле *KV*), останов с динамическим торможением с управлением по принципу времени (реле *KT*1, *KT*2, *KT*3).

Для реверса АД командоконтроллер переводится в одно из противоположных положений. В момент переключения схемы на режим противовключения на обмотке ротора АД появляется примерно двойное напряжение по отношению к номинальному, что обеспечивает включение реле *KV*. Его размыкающий контакт отключает контакторы противовключения *KM*5 и ускорения *KM*6 и *KM*7. При этом в цепь ротора вводятся резисторы *R*1, *R*2, *R*3. По мере снижения скорости до нуля напряжение снижается до его номинального значения. При этом отключается реле *KV*, включается контактор *KM*5 и выводится резистор *R*1. Двигатель начинает разгоняться в обратную сторону.

Для останова АД командоконтроллер устанавливается в среднее нулевое положение *SM*0. При этом включается контактор *KM*8 и происходит динамическое торможение. В схеме применено механическое торможение, осуществляемое колодочным тормозом. В схеме осуществлены защиты: нулевая (реле *FV*) и максимально-токовая (максимальные реле тока *FA*1 — *FA*4 и предохранители с плавкими вставками *FU*1—*FU*4).

На рис. 58.7 показана одна их схем управления двигателем постоянного тока независимого возбуждения. Она обеспечивает пуск до номинальной скорости с двумя ступенями ускорения *R*1, *R*2, с управлением по принципу скорости (*KV*1, *KV*2) и останов с динамическим торможением (резистор *R*3) с управлением по принципу времени (реле *KT*). Команды управления подаются командоконтроллером *SM*. В схеме использованы контакторы: линейный *KM*1, ускорения *KM*2 и *KM*3, динамического торможения *KM*4. Напряжение на схему подается выключателем *Q*. В схеме применены максимально-токовая (максимальные реле тока *FA*1, *FA*2, предохранители с плавкими вставками *FU*1, *FU*2), минимально-токовая (реле минимального тока *KF*), нулевая (реле напряжения *FV*) защиты. Все защиты действуют на отключение двигателя, включая линейный контактор *KM*1. Обмотка возбуждения двигателя *LM* защищена также от перенапряжений обратным диодом *V* и разрядным резистором *R*5).

На рис. 58.8 приведена схема управления синхронным двигателем низкого напряжения, осуществляющая «тяжелый» пуск двигателя путем снижения напряжения с помощью резисторов *R*1. Напряжение на схему подается автоматическими выключателями *QF* и *SF*, на обмотку статора — линейным контактором *KM*2. Подключение пусковых резисторов осуществляет контактор *KM*1. Напряжение на обмотку возбуждения двигателя подается

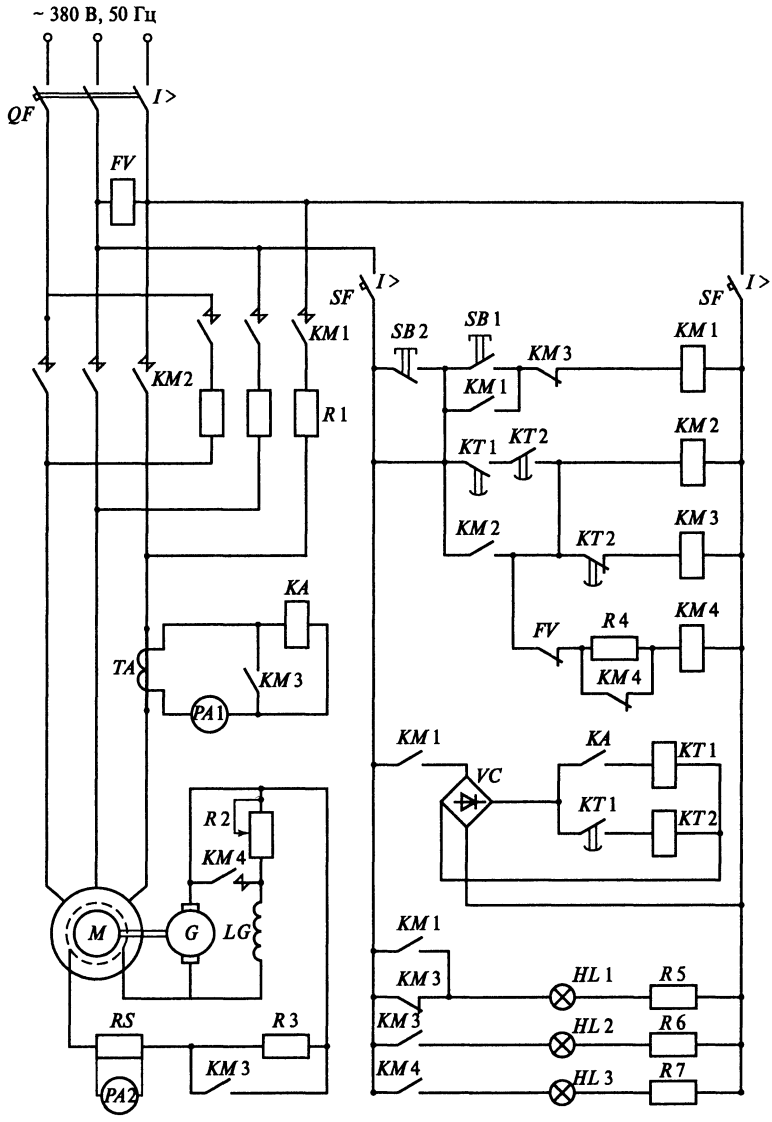


Рис. 58.8. Схема управления синхронным двигателем

от глухо подключенного возбудителя *G*. Отключение разрядного резистора и подачу полного напряжения на обмотку возбуждения двигателя производит контактор *KM*3. Управление подачей возбуждения осуществляется по принципу тока. Управляющие команды подаются кнопками управления *SB*1 и *SB*2. Работа схемы описана в [58.1].

В схеме применены нулевая (контактор *KM*2) и максимально-токовая (автоматические выключатели *QF* и *SF*) защиты. При снижении напряжения сети обеспечивается форсировка возбуждения с помощью реле *FV* и контактора *KM*4 и соответственно увеличение электромагнитного момента двигателя.

В схеме используется следующая сигнализация: зеленая лампа *HL*1 сигнализирует о подаче на схему напряжения питания, красная лампа *HL*2 — о наличии синхронизации, белая лампа *HL*3 — о наличии форсировки возбуждения. В схеме имеются два амперметра *PA*1 и *PA*2, позволяющие контролировать ток статора и ток возбуждения двигателя.

В рассмотренных схемах аппаратами управления являются: контакторы и магнитные пускатели [58.5—58.7]; промежуточные реле [58.4]; реле напряжения, тока, времени [58.8, 58.9]; выключатели,

командоаппараты, командоконтроллеры [58.10]; кнопки управления [58.11].

58.2. СИСТЕМЫ, ЗАМКНУТЫЕ ПО СКОРОСТИ И ТОКУ

Высокие технологические требования к статической точности регулирования и ограничения переменных ЭП (скорости, момента, угла поворота, положения и т.п.) обусловили применение замкнутых систем управления ЭП. Их техническая реализация базируется на применении систем управляемый преобразователь — двигатель (УП—Д) (систем Г—Д, ТП—Д, ШИП—Д) с различными вариантами подключения обратных связей по регулируемым переменным. На рис. 58.9 дан обобщенный пример системы УП—Д с параллельным подключением (с помощью ключей *K*1, *K*2, *K*3, *K*4) цепей обратных связей по напряжению, скорости и току двигателя М. Сигналы обратных связей с выхода датчиков переменных ЭП (датчиков напряжения *UV*, тока *UA*, скорости *BV*) совместно с сигналом управления $U_з$, поступают на вход регулятора, реализованного на основе суммирующего операционного усилителя *A* и операторных резисторов *R*1, *R*2, *R*3, *R*4, *R*5. С помощью последних могут меняться коэффициенты усиления регулятора и цепей обратных связей.

При включении лишь отрицательной обратной связи по напряжению УП (замкнут только ключ *K*1) уравнение механической характеристики ЭП имеет вид:

$$\omega = \omega_{0з} - \frac{\dfrac{R_п}{1 + K_{о.п}K} + R_я}{(k\Phi)^2} M, \qquad (58.1)$$

где $\omega_{0з} = U_з K/(1 + K_{о.п}K)\, k\Phi$ — заданная сигналом управления $U_з$ скорость идеального холостого хода двигателя в замкнутой системе ЭП; $K = K_п R_2/R_1$ — результирующий коэффициент усиления разомкнутой системы управления ЭП по выходной ЭДС преобразователя $E_п$; $K_п = \Delta E_п/\Delta U_у$ — коэффициент передачи УП между выходной ЭДС и напряжением управления $U_у$ УП; $K_{о.п} = K_{д.п}R_1/R_3$ — приведенный ко входу регулятора коэффициент обратной связи по выходному напряжению УП; $K_{д.п}$ — коэффициент усиления по напряжению датчика напряжения *UV* (с учетом потенциометра *RP* на выходе УП) $R_п$, $R_я$ — соответственно внутреннее сопротивление силовой цепи собственно УП и сопротивление якоря двигателя.

По (58.1) жесткость механической характеристики в замкнутой системе управления ЭП выше (линия *2* на рис. 58.10), чем в разомкнутой (линия *1*). При меньших значениях задающего сигнала скорости механические характеристики располагаются параллельно (линии *3*, *4*). При $K \to \infty$ (например, за счет $R_2 \to \infty$) $\Delta\omega \to MR_я/(k\Phi)^2$, т.е. падение скорости двигателя в замкнутой системе управления ЭП с от-

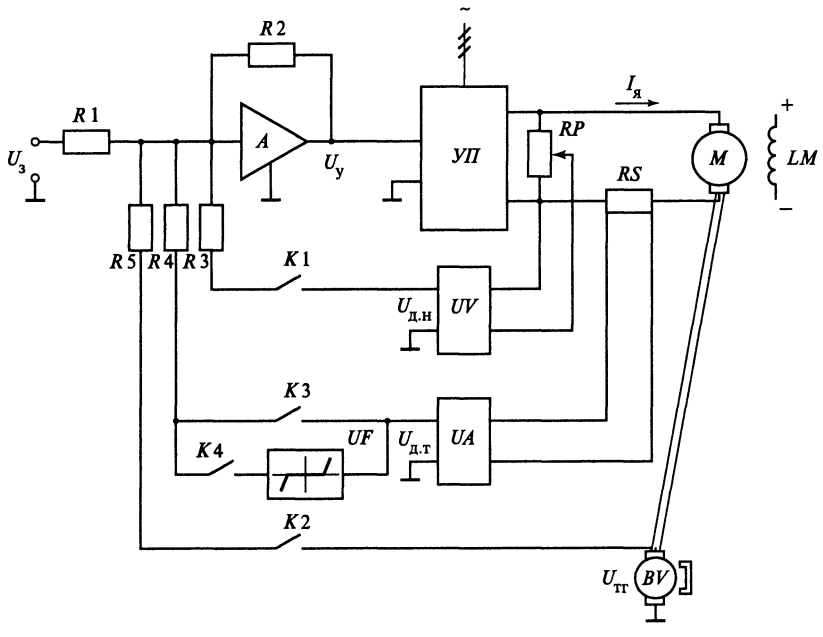


Рис. 58.9. Схема ЭП с обратными связями по его переменным

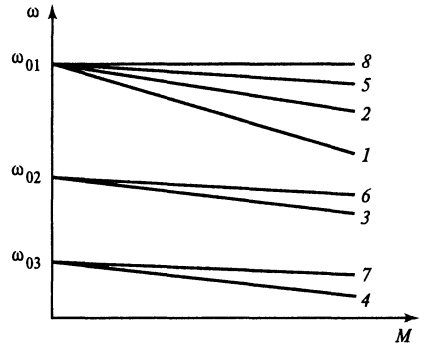


Рис. 58.10. Механические характеристики системы ЭП, замкнутой по напряжению и скорости

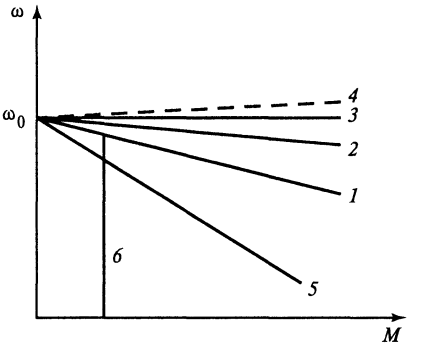


Рис. 58.11. Механические характеристики системы ЭП, замкнутой по току двигателя

рицательной обратной связью по напряжению УП в пределе равно падению скорости естественной механической характеристики двигателя.

При включении лишь отрицательной обратной связи по скорости двигателя (замкнут только ключ *К*2) уравнение механической характеристики ЭП имеет вид:

$$\omega = \omega_{0з} - \frac{\dfrac{R_п + R_я}{1 + K_{о\,с}K}}{(k\Phi)^2} M, \qquad (58.2)$$

где $\omega_{0з} = U_з K/(1 + K_{о\,с}K)\, k\Phi$ — заданная сигналом управления $U_з$ скорость идеального холостого хода двигателя в замкнутой системе управления ЭП; $K_{о\,с} = K_{тг}R_1/R_5$ — коэффициент обратной связи по скорости двигателя; $K_{тг} = U_{тг}/\omega$ — коэффициент передачи тахогенератора *BV*.

По (58.2) жесткость механической характеристики в замкнутой по скорости двигателя системе выше (линия *5* на рис. 58.10), чем в замкнутой по напряжению УП. При меньших значениях задающего сигнала скорости механические характеристики также располагаются параллельно (линии *6*, *7*). При $K \to \infty$ $\Delta\omega \to 0$, т.е. в замкнутой системе с отрицательной обратной связью по скорости двигателя может быть абсолютно жесткая механическая характеристика ЭП.

Изменить жесткость механической характеристики двигателя можно и за счет обратной связи по току двигателя (на рис. 58.9 замкнут лишь ключ *К*3). При этом уравнение механической характеристики ЭП в замкнутой системе управления имеет вид:

$$\omega = \omega_{0з} - \frac{R_п + R_я \pm K_{о\,т}K}{(k\Phi)^2} M, \qquad (58.3)$$

где $\omega_{0з} = U_з K/k\Phi$ — заданная сигналом управления $U_з$ скорость идеального холостого хода двигателя в замкнутой системе ЭП; $K_{о\,т} = K_{д\,т}R_1/R_4$ — результирующий коэффициент обратной связи по току якорной цепи двигателя; $K_{д\,т} = U_{д\,т}/I_я$ — коэффициент передачи датчика тока *UA* (с учетом шунта *RS* в якорной цепи двигателя). В соотношении (58.3) запись «±» обозначает: нижний знак «–» соответствует положительной обратной связи по току двигателя, а верхний «+» — отрицательной связи.

При положительной обратной связи по току двигателя в замкнутой системе управления жесткость механической характеристики ЭП по (58.3.) выше (линия *2* на рис. 58.11), чем в разомкнутой системе (линия *1*). При $KK_{о\,т} \to (R_п + R_я)$ $\Delta\omega \to 0$, т.е. в замкнутой системе с положительной обратной связью по току двигателя можно получить абсолютно жесткую механическую характеристику ЭП (линия *3*). При $KK_{о\,т} > (R_п + R_я)$ механическая характеристика имеет положительную жесткость (линия *4*). Из-за возможных нелинейностей в статических характеристиках элементов системы и ее способности к динамической неустойчивости при положительных обратных связях подобный способ повышения жесткости механической характеристики двигателя, как правило, используется в совокупности с другими обратными связями, например с отрицательной обратной связью по напряжению УП.

При отрицательной обратной связи по току двигателя жесткость механической характеристики ЭП заметно снижается (линия *5* на рис. 58.11). При $K \to \infty$ $\Delta\omega \to \infty$ механическая характеристика ЭП становится абсолютно мягкой (линия *6*) и соответствующей характеристике двигателя при питании от источника тока.

За счет комбинации обратных связей возможно формирование различных механических характеристик ЭП. Так, при отрицательной обратной связи по напряжению УП (ключ *К*1 на рис. 58.9 замкнут) и нелинейной отрицательной обратной связи по току (на рис. 58.9 замкнут ключ *К*4) формируются два участка механической характеристики двигателя

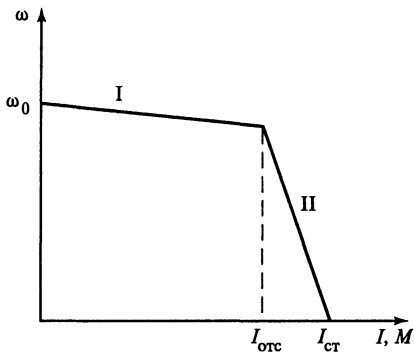


Рис. 58.12. Механические характеристики системы ЭП, замкнутой по напряжению и току двигателя, с блоком нелинейности

(рис. 58.12). На участке I при токе двигателя $I < I_{отс}$, когда обратная связь по току не действует, жесткость механической характеристики определяется соотношением (58.1). Для участка II, где обратная связь по току противодействует влиянию обратной связи по напряжению, уравнение механической характеристики ЭП в замкнутой системе управления имеет вид:

$$\omega = \omega_{0з} - \frac{\left(\frac{R_п}{1 + K_{о.п}K} + R_я\right) + \left(\frac{K_{о.т}K}{1 + K_{о.п}K}\right)}{(k\Phi)^2} M. \quad (58.4)$$

При этом жесткость механической характеристики ЭП снижается, и двигатель достигает нулевой скорости при токе стопорения $I_{ст}$. Значение $I_{ст}$ при постоянстве тока отсечки $I_{отс}$ определяется соотношением коэффициентов передачи цепей обратных связей по напряжению и току.

Подобные характеристики могут быть получены и при совместном применении отрицательной обратной связи по скорости и нелинейной отрицательной обратной связи по току (на рис. 58.9 замыкаются ключи $K2$ и $K4$). Для участка II, где обратные связи противодействуют друг другу, уравнение механической характеристики ЭП в замкнутой системе управления имеет вид:

$$\omega = \omega_{0з} - \frac{\left(\frac{R_п + R_я + K_{о.т}K}{1 + K_{о.с}K}\right)}{(k\Phi)^2} M. \quad (58.5)$$

Приведенные выше принципы формирования статических характеристик ЭП рассматривались при питании двигателя от управляемого источника ЭДС. Подобные характеристики могут быть получены и при питании двигателя от неуправляемого источника тока, обладающего свойством управляемого по цепи возбуждения «источника момента» [58.12]. Пример системы источник тока — двигатель с УП в цепи обмотки возбуждения LM двигателя M и с различными обратными связями по переменным ЭП представлен на рис. 58.13. Функциональный элемент UF в зависимости от сигнала U_0 ограничивает сигнал управления $U_у$ преобразователя, обеспечивая тем самым ограничение потока возбуждения двигателя. При отрицательной обратной связи по скорости двигателя (на рис. 58.13 замкнут лишь ключ $K1$) в предположении, что зависимость потока возбуждения двигателя от сигнала

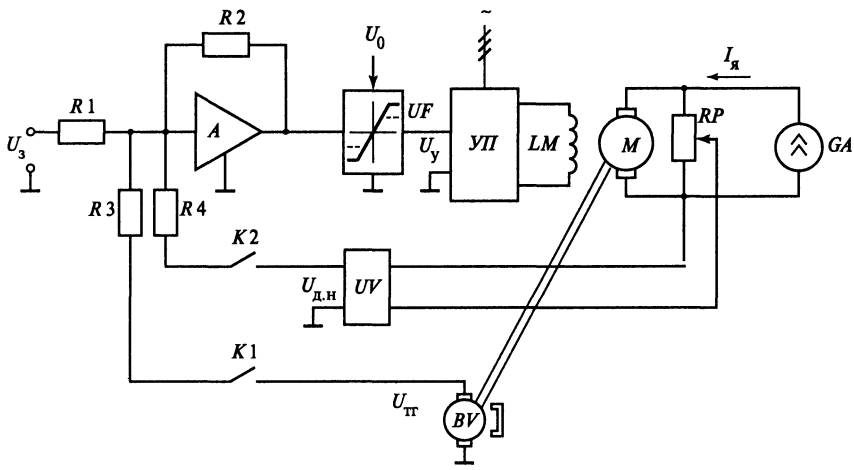


Рис. 58.13. Схема ЭП по системе источник тока — двигатель с обратными связями по ее переменным

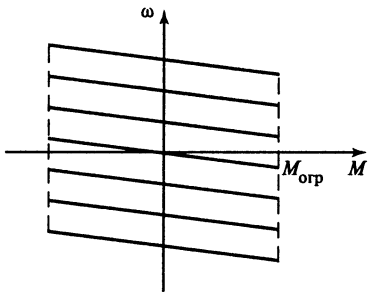


Рис. 58.14. Механические характеристики ЭП по системе источник тока — двигатель с обратной связью по скорости

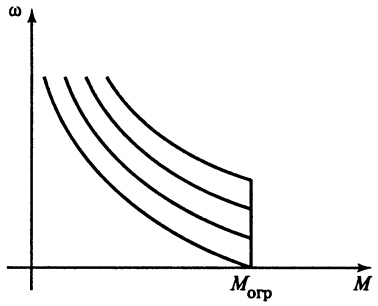


Рис. 58.15. Механические характеристики ЭП по системе источник тока — двигатель с обратной связью по напряжению

$U_у$ на рабочих участках линейна, уравнение механической характеристики ЭП имеет вид:

$$\omega = \omega_{0з} - \frac{M}{K_с}, \qquad (58.6)$$

где $\omega_{0з} = U_з / K_{о.с}$ — заданная сигналом управления $U_з$ скорость идеального холостого хода двигателя в замкнутой системе управления ЭП; $K_{о.с} = K_{тг} R_1 / R_3$ — коэффициент обратной связи по скорости двигателя; $K_{тг} = U_{тг} / \omega$ — коэффициент передачи тахогенератора BV; $K_с = M / \omega = K_{тг} K_{UF} K_п K_ф k I_я R_2 / (R_{о.в} R_3)$ — результирующий коэффициент передачи цепи обратной связи между электромагнитным моментом M и скоростью ω двигателя; K_{UF} — коэффициент усиления функционального элемента UF по напряжению; $K_п$ — коэффициент усиления УП по напряжению; $K_ф = \Delta\Phi / \Delta I_в$ — коэффициент передачи между потоком возбуждения Ф и током обмотки возбуждения $I_в$ двигателя; $I_я$ — ток якорной цепи двигателя (источника тока); $R_{о.в}$ — сопротивление обмотки возбуждения двигателя.

По (58.6) при различных сигналах $U_з$ на входе замкнутой по скорости системы механические характеристики ЭП будут представлять собой семейство параллельных характеристик, ограниченных по моменту на уровне $M_{огр}$ (рис. 58.14). Значение $M_{огр}$ можно регулировать путем ограничения напряжения $U_у$ на входе УП.

При отрицательной обратной связи по напряжению на якоре (на рис. 58.13 замкнут лишь ключ $K2$) или при пренебрежении сопротивлением якоря двигателя по ЭДС вращения двигателя уравнение механической характеристики ЭП имеет вид:

$$\omega = \frac{U_з I_я}{k_п M} - \frac{1}{K_п}, \qquad (58.7)$$

где $k_п = K_{о.п} R_1 / R_4$ — коэффициент цепи обратной связи по напряжению на якоре двигателя с учетом входных сопротивлений регулятора; $K_{о.п} = U_я / U_{д.п}$ — коэффициент передачи между напряжением на якоре двигателя $U_я$ и датчиком напряжения UV (с учетом потенциометра RP); $K_п = K_{о.п} K_{UF} K_п K_ф k R_2 / (R_{о.в} R_4)$ — результирующий и независимый от тока якоря коэффициент передачи цепи обратной связи в контуре регулирования напряжения двигателя при воздействии со стороны его электромагнитного момента.

По (58.7) при различных сигналах $U_з$ на входе замкнутой по напряжению на якоре системы механические характеристики ЭП будут представлять собой семейство гиперболических характеристик (рис. 58.15). Электропривод приобретает свойство стабилизировать мощность, развиваемую двигателем. Значение момента $M_{огр}$, как и в предыдущей системе, возможно регулировать путем ограничения напряжения $U_у$ на входе УП.

Подобное формирование желаемых статических характеристик ЭП может быть ограничено динамическими особенностями замкнутой системы управления и потребует дополнительной их коррекции.

58.3. ПОЗИЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Под позиционными системами понимают ЭП механизмов непрерывного или циклического действия, основным требованием к которым является точность останова или слежения, т.е. позиционирование с заданной точностью. К механизмам, требующим точности останова, относятся в основном подъемно-транспортные машины типа различного рода подъемников, лифтов, а также механизмы передвижения кранов и канатных дорог маятникового типа, механизмы роботов и манипуляторов.

К механизмам слежения относятся различного рода антенны, радиотелескопы, гелиоустановки, копировальные станки и т п В последующем рассмотрены механизмы циклического действия типа подъемно-транспортных машин и следящие типа антенн и радиотелескопов

ЭЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНИЗМОВ ТОЧНОГО ОСТАНОВА ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОПРИВОДУ

В простейшем случае задача точного останова сводится к отключению приводного двигателя и наложению механического тормоза в такой точке пути, из которой механизм перемещается в заданное положение с допустимой точностью

Максимальная неточность останова [58 13] равна

$$\Delta\varphi_{max} = \omega_{нач\ ср} t_{а\ ср}\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_{нач\ ср}} + \frac{\Delta t_а}{t_{а\ ср}}\right) +$$

$$+ \frac{J_{\Sigma ср}\omega^2_{нач\ ср}}{2M_{дин\ ср}}\left(2\frac{\Delta\omega}{\omega_{нач\ ср}} + \frac{\Delta M_{дин}}{M_{дин\ ср}} + \frac{\Delta J_\Sigma}{J_{\Sigma ср}}\right) \quad (58\ 8)$$

Анализ (58 8) показывает, что точность позиционирования зависит от средней начальной скорости $\omega_{нач\ ср}$ (рис 58 16) и ее отклонений $\Delta\omega$ в соответствии с жесткостью β механической характеристики двигателя Изменение момента $M_с$ сказывается на динамическом моменте $M_{дин}$, который равен сумме моментов статического сопротивления и механического тормоза $M_т$, т е $M_{дин} = M_с + M_т$ Точность позиционирования также определяется средним суммарным моментом инерции $J_{\Sigma ср}$ и отклонением ΔJ_Σ суммарного момента инерции от среднего

При данных изменениях нагрузки в соответствии с технологическим процессом и известном времени срабатывания аппаратуры $t_{а\ ср}$ и разбросе $\Delta t_а$ основным средством снижения ошибки позиционирования является уменьшение $\omega_{нач}$ и увеличение β Для получения требуемой скорости $\omega_{нач}$, обеспечивающей заданную точность останова $\Delta\varphi_{доп}$, в (58 8) $\Delta\varphi_{max}$ принимается равным $\Delta\varphi_{доп}$

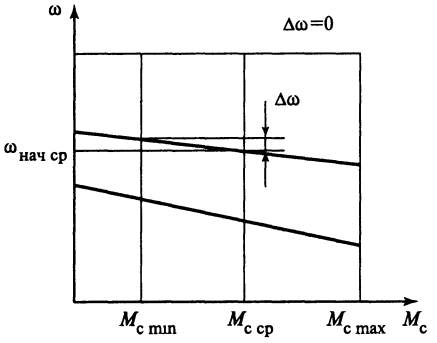


Рис. 58.16. Механические характеристики электропривода механизмов точного останова

При поступательном движении допустимая неточность останова для некоторых механизмов лежит в пределах, указанных ниже

	$\Delta S_{доп}$ мм
Лифты скоростные, больничные	10—20
Лифты остальные	35—50
Грузовые подъемники с вагонетками на рельсовом ходу	5—10
Клетевые шахтные подъемники с качающимися площадками	50—200
Маятниковые канатные дороги	200—300
Механизмы передвижных мостовых кранов с установкой по заданным координатам при дистанционном управлении	10

С учетом $\Delta\varphi_{max} = \Delta\varphi_{доп}$ определяется согласно (58 8) соотношение $\Delta\omega/\omega_{нач\ ср}$ и, следовательно, при известном β для выбранного приводного двигателя скорость $\omega_{нач}$ Возможные варианты расчета представлены на рис 58 16 Требование точного останова влияет на диапазон регулирования скорости $D = \omega_{ном}/\omega_{нач}$ при заданных пределах изменения $M_с$ ($M_{с\ min}$ — $M_{с\ max}$)

Анализ условий точного позиционирования необходимо дополнить двумя факторами погрешностью $\Delta S_{ДТО}$ срабатывания датчика точного останова (ДТО) и учетом упругости $\Delta l/2$ подъемных канатов при большой высоте подъема, т е

$$\Delta S_{доп} = \Delta S_{доп\ н} - \Delta S_{ДТО} - \frac{\Delta l}{2}, \quad (58\ 9)$$

где $\Delta S_{доп\ н}$ — максимально допустимая неточность останова, требуемая по нормам для данного механизма

Достоинством рассмотренного способа обеспечения точного останова является простота реализации, а недостатком — возможность затягивания процесса позиционирования и, следовательно, уменьшения производительности, что особенно заметно при высоких требованиях к точности и относительно большом диапазоне регулирования Последнее обстоятельство определяется разными темпами замедления при переходе ЭП с рабочей скорости на пониженную $\omega_{нач}$ в зависимости от момента $M_с$, так как $\varepsilon = -\frac{M_т + M_с}{J_\Sigma}$ Датчик, фиксирующий момент перехода на пониженную ско-

рость, устанавливается на определенном с учетом $M_{c\,min}$ расстоянии от ДТО, и поэтому имеет место процесс дотягивания до команды на полный останов. Этот процесс можно свести к минимуму применением замкнутых систем регулирования, инвариантных относительно нагрузки с фиксированными изменениями $\omega = f(t)$.

Однако при этом любое отклонение от требуемой зависимости $\omega = f(t)$ или воздействие возмущающих факторов, не связанных с моментом M_c, ведет к уменьшению быстродействия. Поэтому при необходимости осуществления точного позиционирования более радикальным является регулирование положения по отклонению, т.е. по разнице между заданным и действительным положением рабочего органа.

В наиболее простом виде такое регулирование предусматривается лишь на участке заданных перемещений, допустим в зоне точного останова, а на других участках такая система разомкнута по положению. На участке точного позиционирования положение рабочего органа контролируется датчиками углового или линейного его перемещения. На рис. 58.17 в качестве примера приведена схема размещения индуктивных датчиков контроля положения *ДТВ* и *ДТН*, расположенных на кабине подъемника, которые замыкаются скобой *ЗС*, находящейся у уровня точного останова. При замыкании сигналы на выходе *ДТВ* и *ДТН* минимальны и равны. При опускании кабины вниз на расстояние l магнитопровод *ДТВ* размыкается и его выход становится максимальным. И соответственно при подъеме максимален сигнал на выходе *ДТН*.

Ко всем ЭП подъемно-транспортных механизмов предъявляется требование ограничения ускорения допустимым значением. Для лифтов, грузопассажирских шахтных подъемников, т.е. механизмов, служащих для перевозки людей, допустимое ускорение ограничивается значением $a_{доп}$, при котором динамические нагрузки, воздействующие на организм человека в переходных режимах, не вызывают дискомфорта, физиологически неприятных ощущений. По правилам устройства и безопасной эксплуатации для пассажирских лифтов $a_{доп} = 2$ м/с^2, для больничных — 1 м/с^2, при останове лифтов $a_{доп} = 3$ м/с^2 при номинальной скорости до 2 м/с и $a_{доп} = 5$ м/с^2 при номинальной скорости до 4 м/с. Для пассажирских подъемников $a_{доп} \le 1{,}5$ м/с^2, для шахтных подъемников при подъеме и спуске людей по вертикальным выработкам $a_{доп} \le 0{,}75$ м/с^2, по наклонным — $a_{доп} \le 0{,}5$ м/с^2. Для подъемно-транспортных машин, предназначенных для транспортирования грузов, $a_{доп}$ ограничивается значением максимально допустимой нагрузки для данного механизма или необходимостью ограничения колебаний в его упругих элементах. Возможно ограничение $a_{доп}$ в целях исключения проскальзывания в фрикционных передачах, например в канатоведущих шкивах подъемных лебедок.

Другим важным требованием к ЭП подъемно-транспортных машин является обеспечение плавности протекания переходных процессов, что характеризуется величиной, производной от ускорения, $\rho = da/dt$ — рывком. Повышение плавности протекания переходных процессов путем ограничения рывка диктуется необходимостью создания комфортных условий для пассажиров лифтов (значение величины ρ в этом случае предписывается соответствующими правилами), а также в целях уменьшения ударов в кинематической цепи при выборе зазоров и снижения колебаний в упругих элементах. В случае рассмотренных ограничений оптимальная с точки зрения производительности диаграмма изменения скорости v привода имеет вид, изображенный на рис. 58.18.

Таким образом, общими требованиями к ЭП подъемно-транспортных машин являются:

обеспечение заданной точности позиционирования;

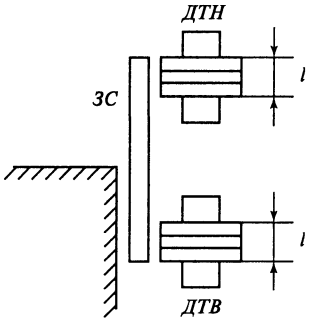


Рис. 58.17. Схема установки датчиков точного останова

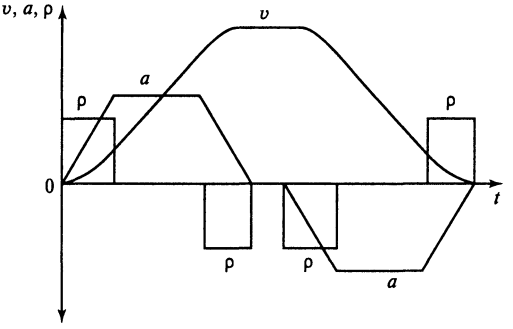


Рис. 58.18. Оптимальная диаграмма

ограничение ускорения и рывка до допустимых уровней плавного протекания переходных процессов;

регулирование скорости в целях получения необходимой начальной скорости при останове;

обеспечение заданного ускорения для получения максимальной производительности при значительных изменениях нагрузки.

При отсутствии жестких требований поддержания постоянства ускорения, когда рабочая скорость механизма невелика, возможно применение нерегулируемого ЭП с асинхронным короткозамкнутым двигателем.

При диапазоне регулирования скорости $D \le 10$ и отсутствии требования постоянства ускорения возможно применение многоскоростных асинхронных двигателей с регуляторами напряжения в статорной цепи, двигателей постоянного тока с шунтированием якоря и других систем регулирования ω в заданных пределах.

В случае жестких требований к постоянству ускорения при значительных изменениях нагрузки и необходимости регулирования скорости в диапазоне $D = 10$—50 находят применение двигатели постоянного тока с питанием по системе управляемый преобразователь—двигатель (УП—Д). В качестве УП в последнее время чаще используются тиристорные преобразователи, хотя возможно применение и генераторов постоянного тока. В качестве системы управления ЭП применяются система подчиненного регулирования с задатчиком интенсивности на входе первого или второго рода [58.13], системы модального управления и системы с переменной структурой.

В последние годы начали применяться, особенно рядом иностранных фирм, ЭП переменного тока с преобразователями частоты (ПЧ) со звеном постоянного тока и по системе ПЧ—АД на базе инвертора напряжения. Инвертор собран на базе силовых транзисторов с синхронно-импульсной модуляцией. Система регулирования в основе имеет модальный принцип управления.

Механизмы точного позиционирования работают с разными типами переменных нагрузок, часто имеющих случайный характер, с изменяющимися параметрами. Перспективным и эффективным в этом случае является применение систем управления с переменной структурой (СПС) со скользящими режимами [58.14—58.17].

Системы управления с переменной структурой принадлежат к классу систем с разрывным управлением, в которые вводятся функциональные элементы, изменяющие либо знак обратной связи по некоторым заранее выбранным координатам (типа сигнала рассогласования позиционирования, скорости, ускорения), либо коэффициенты усиления и т.п. При этом движение системы наделяется рядом желаемых свойств, таких как устойчивость, быстродействие и инвариантность относительно изменений параметров объекта регулирования и возмущающих воздействий.

В общем случае процедура синтеза СПС рассчитана на класс нелинейных объектов [58.17]. Однако в целях упрощения рассмотрим управление линейным стационарным объектом произвольного порядка при отсутствии ограничений на координаты, общее дифференциальное уравнение которого имеет вид:

$$\frac{\mathrm{d}x^n}{\mathrm{d}t} + a_n \frac{\mathrm{d}x^{n-1}}{\mathrm{d}t} + \ldots + a_2 \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} + a_1 x = \\ = -bU + d_i F_i, \qquad (58.10)$$

где x — переменная состояния системы (в частности для позиционного ЭП это сигнал либо рассогласования положения, либо слежения); $a_1, a_2, \ldots, a_n$, d_i — параметры объекта, b — коэффициент усиления, которые могут изменяться в некотором ограниченном диапазоне от минимального до максимального значения; U — управляющее воздействие; F_i — возмущающие воздействия (типа момента сопротивления M_c).

В канонической форме уравнение системы:

$$\left.\begin{aligned} \frac{\mathrm{d}x_i}{\mathrm{d}t} &= x_{i+1}, \quad i = 1, 2, \ldots, n-1; \\ \frac{\mathrm{d}x_n}{\mathrm{d}t} &= -\sum_{i=1}^{n} a_i x_i - bU + d_i F_i. \end{aligned}\right\} \qquad (58.11)$$

Скалярное управляющее воздействие U, представляющее собой линейную комбинацию координат x_i, подается на вход системы, т.е.

$$U = \sum_{i=1}^{n-1} \psi_i x_i, \qquad (58.12)$$

где ψ_i являются кусочно-постоянными функциями типа

$$\psi_i = \begin{cases} \alpha_i \text{ при } Sx_i \ge 0; \\ \beta_i \text{ при } Sx_i < 0, \end{cases} \qquad (58.13)$$

где S — уравнение линии или плоскости переключения, определяемое исходя из желаемого движения по выбранным траекториям:

$$S = \sum_{i=1}^{n} c_i x_i, \qquad (58.14)$$

где c_i — постоянные коэффициенты, причем $c_n = 1$.

В частном случае $S = c_1 x_1 + x_2 = 0$ — уравнение прямой линии с наклоном, пропорциональным c_1. Если учесть, что $\mathrm{d}x_1/\mathrm{d}t = x_2$, то дифференциальное

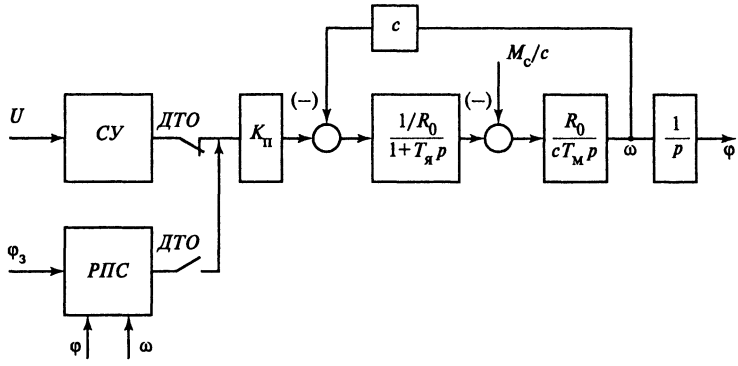


Рис. 58.19. Структурная схема ЭП с СПС

уравнение системы при движении вдоль S относительно x_1 имеет вид:

$$\frac{dx_1}{dt} + c_1 x_1 = 0, \qquad (58.15)$$

т е. является дифференциальным уравнением первого порядка, не зависящим от параметров системы, а определяемое лишь c_1.

Характер движения может быть заданным коэффициентами c_i линии или плоскости переключения, т.е. определяется корнями характеристического уравнения.

Условие существования устойчивого движения на плоскости S, так называемого скользящего режима, когда векторы фазовых скоростей [58.14] структур системы, определяемых функциями ψ_i, направлены встречно друг другу или принадлежат плоскости S, можно записать следующим образом:

$$S\frac{dS}{dt} \le 0. \qquad (58.16)$$

Если связать уравнение (58.11) объекта регулирования и уравнение, записанное относительно dS/dt, то на основании (58.16) коэффициенты α_i, β_i, при которых выполняются условия, необходимые и достаточные для реализации устойчивого движения, равны:

$$\left.\begin{aligned} \alpha_i &\ge \frac{c_{i-1} - a_{i\max} - c_{n-1}c_i + a_{n\max}c_i}{b_{\min}}; \\ \beta_i &\ge \frac{c_{i-1} - a_{i\min} - c_{n-1}c_i + a_{n\min}c_i}{b_{\max}}, \end{aligned}\right\} \qquad (58.17)$$

где $(c_{i-1} - a_i)/c_i = c_{n-1} - a_n$, $i = 1, 2, \ldots, n-1$; $c_n = 1$.

Процедура построения и синтеза СПС осуществляется в два этапа. На первом этапе выбирается плоскость (или линия) переключения $S_i = 0$. Часто в целях ограничения координат движения в систему наряду с основной плоскостью S_i вводятся дополнительные плоскости [58.14, 58.15].

На втором этапе проектирования выбирается уравнение $U = \psi_i x_i$.

Переходный процесс в СПС начинается с попадания на заданную плоскость S_i скольжения из некоторой области, определяемой начальными условиями, и продолжается затем скольжением вдоль S_i. В [58.16] предложен алгоритм управления, при котором отсутствует перерегулирование и имеет место максимальное быстродействие в процессе попадания на S_i.

На рис. 58.19 представлена структурная схема ЭП при работе в зоне точного останова. Регулятор переменной структуры *РПС* включается с помощью датчика точного останова *ДТО*. При этом на его вход подается сигнал задания $\varphi_з$, пропорциональный пути точного останова. Отметим, что с помощью *ДТО* отключается система управления *СУ* двигателем, обеспечивающая движение механизма в других режимах.

В канонической форме дифференциальное уравнение системы при пренебрежении постоянной времени преобразователя имеет вид:

$$\left.\begin{aligned} &\Delta\varphi = \varphi_з - \varphi = x_1; \\ &\frac{dx_1}{dt} = -\frac{d\varphi}{dt} = -\omega = x_2; \\ &\frac{dx_2}{dt} = -\frac{d\omega}{dt} = -\varepsilon = x_3; \\ &\frac{dx_3}{dt} = -\frac{d\varepsilon}{dt} = -\rho = \\ &= -a_1x_1 - a_2x_2 - a_3x_3 - bU + dM_c, \end{aligned}\right\} \qquad (58.18)$$

где $\Delta\varphi = x_1$ — сигнал рассогласования по положению, $\omega = x_2$ — скорость; $\varepsilon = x_3$ — ускорение, ρ — рывок; $a_3 = 1/T_я$; $a_2 = 1/(T_м T_я)$; $a_1 = 0$; $b = K_п/(cT_м T_я)$; $d = 1/(J_\Sigma T_я)$, $T_я$ и $T_м$ — электромагнитная и электромеханическая постоянные времени; c — конструктивная постоянная двигателя;

U — управляющее воздействие; J_Σ — момент инерции привода; $K_п$ — коэффициент усиления преобразователя.

Основная плоскость переключения S_1, определяющая характер движения в СПС, и две вспомогательные S_2 и S_3, ограничивающие ускорение в динамическом процессе, записываются так:

$$\left.\begin{aligned} S_1 &= c_1x_1 + c_2x_2 + x_3 \quad \text{при } |x_3| \le \varepsilon_{доп},\\ S_2 &= x_3 + \varepsilon_{доп} \quad \text{при } x_3 < -\varepsilon_{доп},\\ S_3 &= x_3 - \varepsilon_{доп} \quad \text{при } x_3 > \varepsilon_{доп}, \end{aligned}\right\} \qquad (58.19)$$

где $\varepsilon_{доп}$ — допустимое ускорение.

Управляющее воздействие U с учетом компенсации влияния момента статического сопротивления M_c выбрано следующим:

$$U = \psi_1x_1 + \psi_2x_2 + K_f \operatorname{sign} S. \qquad (58.20)$$

На рис. 58.20 представлена структурная схема регулятора с переменной структурой, где

$\alpha_1 \ge \dfrac{-c_1c_2 + a_{3\max}c_1}{b_{\min}}$ при $Sx_1 \ge 0$; $\beta_1 < \dfrac{-c_1c_2 + a_{3\min}c_1}{b_{\max}}$ при $Sx_1 < 0$; $\alpha_2 \ge \dfrac{c_1 - a_{2\min} - c_2^2 + a_{3\max}c_2}{b_{\min}}$ при $Sx_2 \ge 0$; $\beta_2 < \dfrac{c_1 - a_{2\max} - c_2^2 + a_{3\min}c_2}{b_{\max}}$ при $Sx_2 < 0$; $K_f \ge \left|\dfrac{d_{\max}}{b_{\min}}M_c\right|$ — коэффициент, мажорирующий M_c.

Современные системы управления, как правило, реализуются на базе вычислительной техники. Это позволяет сравнительно просто изменять коэффициенты c_1 и c_2 с учетом наложенных на систему ограничений, но с условием обеспечения устойчивости скользящих режимов.

На рис. 58.21 показано изменение координат в фазовом пространстве. Из начальной точки движение осуществляется вдоль вспомогательной плоскости S_2, сохраняя постоянным ε. Затем при пересечении плоскости S_2 и S_1 движение продолжается до достижения начала координат.

Применение СПС позволяет достигнуть независимости движения от изменений параметров системы и внешних воздействий. Часто такие системы называют системами с пассивной адаптацией, так как ЭП работает в принудительном режиме.

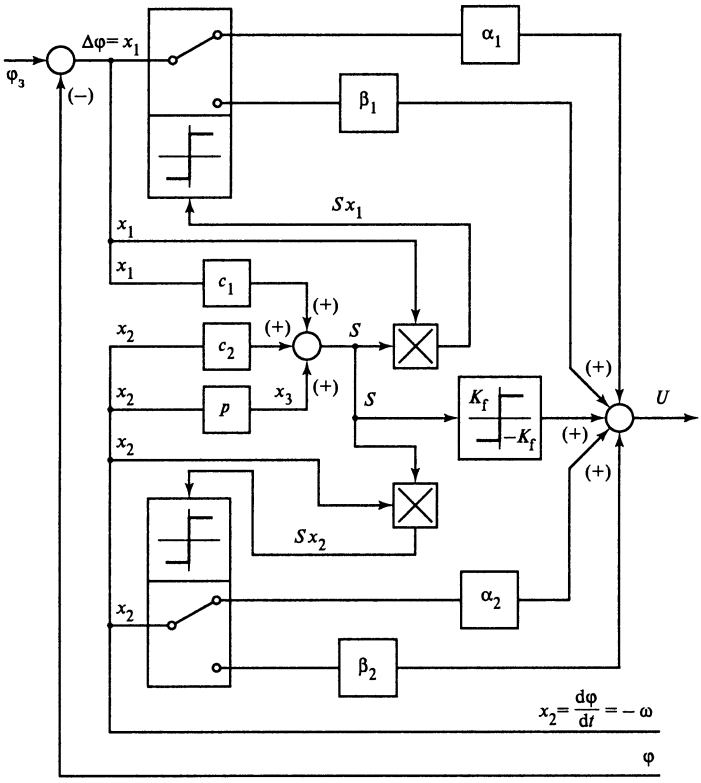


Рис. 58.20. Структурная схема регулятора с переменной структурой

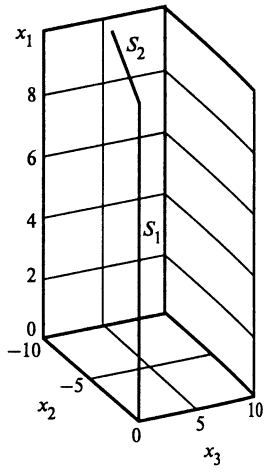


Рис. 58.21. Траектория движения в СПС третьего порядка

ЭЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНИЗМОВ СЛЕЖЕНИЯ. ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОПРИВОДУ

В [58.18] следящая система определяется как «...автоматическая система, в которой выходная величина с помощью обратной связи воспроизводит с определенной точностью входную, характер изменения которой заранее неизвестен». Там же следящий ЭП определен как электрическая система воспроизведения контролируемого или управляемого движения посредством силового исполнительного механизма.

Следящие электроприводы (СЭП) подразделяются: по *назначению* (различного рода производственные механизмы типа антенных установок, копировальных станков, гелиоустановок со слежением по положению исполнительной оси или рабочего органа); по *исполнению* (постоянного или переменного тока с различного рода измерительными или функциональными элементами, построенными на определенного типа элементной базе); по *принципу действия* (непрерывного или дискретного, подразделяемые, в свою очередь, на системы цифровые, релейные и импульсные, а также одноконтурные или многоконтурные).

В общем виде функциональная схема СЭП представлена на рис 58.22, где *П* — преобразователь электрический; *Д* — двигатель; *Р* — передаточное устройство; *ОУ* — объект управления; *ИУ* — измерительное устройство; *ФЧУ* — фазочувствительное выпрямительное устройство; *СУ* — система управления, включающая в себя в общем виде регуляторы переменных ЭП типа выходного угла, скорости, тока и т.д.

Управляющее воздействие $U_{вх}$ на входе системы может быть постоянным сигналом, эквивалентным заданному углу перемещения $\varphi_з$ либо изменяющимся по заданному закону, допустим, гармоническому или по программе, либо в виде непрерывной заводки с постоянной скоростью $\omega_з = d\varphi_з/dt = \text{const}$.

На объект управления — в общем случае многомассовую и следящую систему — действуют возмущающие воздействия *ВВ* типа момента трения сухого и вязкого, ветрового, различного рода помех и т.п.

В качестве измерительных устройств угла перемещения могут быть использованы сельсины, синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы, индуктосины. Возможно применение импульсных измерителей скорости с последующим аппаратным или программным интегрированием.

Основное требование, предъявляемое к СЭП, — обеспечение точности слежения. Результирующий сигнал рассогласования следящей системы

$$\delta = \delta_у + \delta_в + \delta_п + \delta_0, \qquad (58.21)$$

где $\delta_у$ — сигнал рассогласования относительно управляющего входного воздействия; $\delta_в$ — сигнал рассогласования от возмущающего воздействия; $\delta_п$ — сигнал рассогласования, обусловленный помехами; δ_0 — погрешность измерительного устройства.

В (58.21) нет погрешности, обусловленной зазорами в системе, которая компенсирована действием либо механических торсионов, либо электрических люфтовыбирающих устройств, или пренебрежимо мала.

Погрешность измерительного устройства δ_0 зависит от типа датчика: например для сельсинов она находится в пределах 0,25—0,5°, для вращающихся трансформаторов — в пределах нескольких минут, для цифровых — определяется их разрядностью.

Сигнал рассогласования от помехи $\delta_п$ связан с шумами преобразователя и может возникнуть на частоте питающей сети 50 Гц при наличии некоторого разброса в значениях углов управления открывающих импульсов полупроводниковых приборов различных фаз преобразователя. Однако его значение даже при колебании напряжений по фазам преобразователя в пределах 10—15 % составляет $(2—5)10^{-3}$ мин. Сигнал $\delta_п$ может быть обусловлен также помехами в радиосистеме, допустим в радиотелескопах.

Сигнал рассогласования $\delta_у$ следящего ЭП при отработке входного управляющего воздействия, заданного в виде сигнала, изменяющегося с постоянной скоростью при $M_с = 0$ определяется добротностью системы, например по скорости, 1/с,

$$Д_\omega = \omega_{уст\ max}/\delta_у = k, \qquad (58.22)$$

где $\omega_{уст\ max}$ — максимальная установившаяся скорость, рад/с; k — коэффициент усиления разомкнутой по скорости системы.

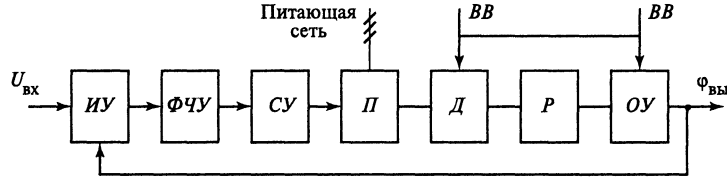


Рис. 58.22. Функциональная схема СЭП

Для уменьшения $\delta_у$ следует увеличивать k, что возможно лишь в допустимых пределах.

Добротность по ускорению, $1/с^2$,

$$Д_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{уст\ max}}{\delta_у}, \qquad (58.23)$$

где $\varepsilon_{уст\ max}$ — максимальное ускорение, рад/с^2.

Сигнал рассогласования $\delta_в$ связан с нагрузкой $M_с$ электропривода. Возмущения в механической части ЭП в общем случае носят случайный характер. Например, для СЭП радиотелескопов или гелиоустановок они определяются спектральной плотностью ветровой нагрузки $S_{Mв}$ и могут быть вычислены через дисперсию $Д_{\delta в}$:

$$Д_{\delta в} = \frac{1}{\pi}\int_0^\infty |A(j\omega)|^2 S_{Mв}\, d\omega; \qquad (58.24)$$

$$\delta_в = \sqrt{Д_{\delta в}}, \qquad (58.25)$$

где $|A(j\omega)|$ — модуль амплитудно-частотной характеристики при действии ветровой нагрузки $M_в$.

В переходных процессах СЭП имеет место динамическая погрешность, определяемая корнями уравнения системы при $M_с = 0$ вида:

$$J_\Sigma \frac{d^2\delta}{dt^2} + F\frac{d\delta}{dt} + k\delta = 0, \qquad (58.26)$$

где J_Σ — суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции; F — коэффициент затухания, определяемый статизмом механической характеристики двигателя и наличием вязкого трения.

Динамическая погрешность в переходных процессах может быть оценена коэффициентом затухания $\xi = \frac{F}{2}\sqrt{\frac{1}{kJ_\Sigma}}$. При $\xi > 1$ переходный процесс изменения динамической погрешности имеет апериодический характер, при этом динамическая погрешность увеличивается. При $\xi < 1$ корни уравнения (58.24) комплексные, процесс изменения ξ носит колебательный характер. Уменьшение ξ возможно путем увеличения k, но при этом увеличивается перерегулирование в кривой изменения δ. Возможно изменение ξ путем введения в систему различного рода корректирующих последовательных и параллельных устройств, что эквивалентно изменению F и J_Σ.

Широкое распространение получили параллельные корректирующие устройства в виде обратных связей по первой и второй производным от $\varphi_{вых}$.

Связь по первой производной (в виде связи по ω) позволяет изменять ε, но одновременно она либо увеличивает (при отрицательной связи) $\delta_у$, либо уменьшает $\delta_у$ (при положительной связи). При наличии связи по второй производной от $\varphi_{вых}$ (дифференцирование сигнала по ω) изменяется частота колебаний выходного сигнала, что эквивалентно увеличению J_Σ (при отрицательной связи) или уменьшению J_Σ (при положительной связи).

Последовательное корректирующее устройство в виде дифференцирующего звена позволяет существенно изменять ξ, но при этом сохраняется динамическая погрешность. При интегрирующем последовательном звене изменяется ξ, но одновременно в системе ликвидируется сигнал рассогласования по скорости.

Установившийся сигнал рассогласования в системе может быть компенсирован введением связи по возмущающему воздействию.

В следящей системе непрерывного действия сигнал рассогласования δ поступает на вход фазочувствительного выпрямительного устройства, а затем на вход системы управления, которая может быть выполнена с различными корректирующими устройствами, выбираемыми с учетом качества переходных процессов и точности слежения. Возможно применение систем грубого и точного отсчетов.

Виды обратных связей, значения коэффициентов усилителей в системе управления выбираются исходя из динамических и точностных показателей.

Часто используются системы подчиненного регулирования параметров с последовательной коррекцией.

В качестве преобразователей применяются транзисторные, тиристорные однофазные и многофазные, широтно-импульсные преобразователи (ШИП) с соответствующими системами управления СИФУ.

В системах цифрового управления, основанных на аппаратных средствах или реализованных программно с помощью микропроцессоров и микроЭВМ, могут быть заложены те же принципы, что и в непрерывных системах регулирования. Применение цифровых систем управления, особенно микропроцессорных, все более увеличивается, что связано с развитием новой элементной базы. В таких системах точность слежения определяется разрядностью микроЭВМ (или микропроцессора) и датчиков контроля перемещения.

В цифровых системах управления необходим учет явлений квантования по времени и уровню, что, с одной стороны, приближает их к импульсным или релейным системам, с другой стороны — при применении многоразрядных ЭВМ — к непрерывным. Но особенно широкое развитие получили перспективные системы управления — модальные, переменной структуры со скользящими режимами и прогнозируемые.

В релейных СЭП сигнал рассогласования непосредственно или с помощью усилителя подается на вход релейного элемента, представляющего собой систему управления и осуществляющего квантование по уровню непрерывного сигнала. Релейный элемент контролирует заданные значения δ, при достижении которых происходит его включение или переключение. Тем самым включается двигатель (как правило, на полное напряжение) и сигнал рассогласования отрабатывается, приводя систему слежения к состоянию, при котором $\delta = 0$. При этом двигатель отключается.

В качестве релейного элемента используются двух- или трехпозиционные поляризированные или электромагнитные контактные реле. В последнее время чаще применяются бесконтактные элементы типа триггеров, например Шмидта. Возможна и программная реализация релейной системы управления на базе микропроцессоров.

Наличие автоколебаний в релейных СЭП приводит к значительным потерям в исполнительном двигателе. По этой причине, как правило, в таких системах не применяются двигатели постоянного тока независимого возбуждения, а находят применение двигатели постоянного тока последовательного возбуждения с двумя обмотками или одной с выведенной средней точкой.

Широкое распространение получили асинхронные двигатели с короткозамкнутым или полым ротором.

В качестве силовых преобразователей в релейных следящих системах возможно применение магнитополупроводниковых транзисторных или тиристорных усилителей.

В качестве корректирующих устройств используются те же последовательные и параллельные элементы, что и в СЭП непрерывного действия.

Релейные СЭП отличаются простотой, надежностью, экономичностью, быстродействием по сравнению с СЭП непрерывного действия. Однако наличие режима автоколебаний не всегда делает их применение удобным и оправданным.

В импульсных СЭП сигнал, пропорциональный сигналу рассогласования δ, подается на вход импульсного элемента системы управления, на выходе которого вырабатываются разнополярные импульсы прямоугольной формы: скважность (отношение длительности импульсов к периоду их следования) пропорциональна значению сигнала δ, а полярность — его знаку. Исполнительные элементы, выполненные в виде модуляторов, различны по исполнениям для приводов постоянного и переменного токов. В них используются магнитные, полупроводниковые (типа триггеров) переключающие элементы.

Выходным каскадом-преобразователем является импульсный усилитель мощности, выполненный на транзисторных или тиристорных ключах, который вырабатывает напряжение прямоугольной формы в виде однополярных или разнополярных импульсов, подаваемых на вход исполнительного двигателя.

Исполнительные двигатели в таких системах те же, что и в непрерывных. Для двигателя независимого возбуждения используются мостовые схемы питания. Управление обеспечивается подачей импульсного напряжения как на якорь двигателя, так и на обмотку возбуждения. При использовании двигателя переменного тока применяются такие же схемы включения обмоток возбуждения и управления, как и в релейных системах.

В импульсах СЭП используются корректирующие устройства типа рассмотренных ранее в непрерывных системах, включенные до исполнительного элемента.

Могут быть использованы также импульсные последовательные и параллельные корректирующие устройства с включением после исполнительного элемента. При частоте исполнительного элемента выше частоты пропускания непрерывной части ЭП импульсные следящие системы рассматриваются как непрерывные. Если частоты соизмеримы, то динамические режимы определяются работой исполнительного элемента.

К основным требованиям, предъявляемым к СЭП, кроме точности слежения, относятся плавность регулирования скорости, плавность протекания переходных процессов, особенно в случаях значительной инерции механической части, приведенной к валу двигателя. Как правило, СЭП работают в программном или автоматическом режиме. Сюда же можно отнести и общие требования, особенно по надежности (например, для антенных установок), экономичности и т.п.

При проектировании СЭП антенных установок, например радиотелескопов, учитываются такие обстоятельства как использование нескольких приводных двигателей, расставленных по периферии опорно-поворотного устройства, в целях исключения перекосов, снижения массогабаритных показателей и унификации. Для многодвигательных ЭП возможно применение как последовательного, так и параллельного соединения их в целях использования одного преобразователя. Однако наличие зубцовых возмущений [58.13] в местах касания зубьев шестеренок выходных валов редукторов и зубчатого венца делает целесообразным применение индивидуальных преобразователей.

Анализ конструктивных особенностей опорно-поворотного устройства и кинематических цепей антенных установок показывает, что механическая часть их представляет собой многомассовую систему. Так, привод азимутальной оси представляет собой трехмассовую электромеханическую систему

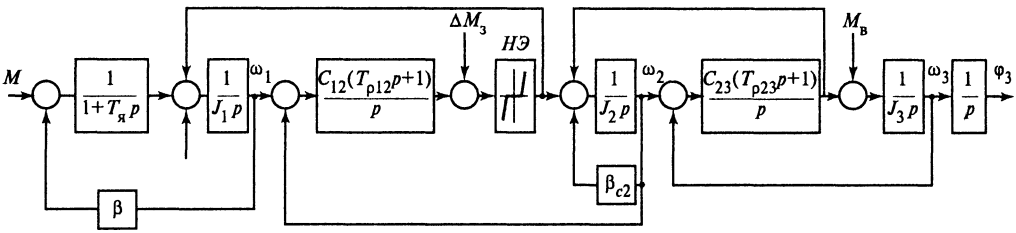


Рис. 58.23. Структурная схема механической части радиотелескопа

(рис. 58.23), где J_1, J_2, J_3 — моменты инерции двигателя, опорно-поворотного устройства и рефлектора; C_{12}, C_{23} — жесткости выходного вала редуктора и стоек рефлектора; $T_{\rho 12}$ и $T_{\rho 23}$ — постоянные времени, пропорциональные вязкому трению; *НЭ* (нелинейный элемент) — зазор; ΔM_3 — зубцовые возмущения; $M_в$ — ветровая нагрузка; φ_3 — угол поворота рефлектора. Принципиально эту электромеханическую схему можно либо усложнить, если учесть наличие контррефлектора, либо упростить, если резонансные частоты жестких опор лежат за пределами частот полосы пропускания СЭП.

Отметим еще одну особенность СЭП антенных устройств, в частности радиотелескопов, обусловленную низкими скоростями исполнительной оси по отношению к двигателю, что делает слабой электромеханическую связь и требует плавности протекания переходных процессов.

В высокочастотных системах для компенсации зазоров применяют люфтовыбирающие устройства типа торсионов или электрические с использованием двигателей.

Сформулированные ранее требования к СЭП полностью распространяются на установки рассматриваемого класса, для которых предпочтительным является использование двигателей постоянного тока независимого возбуждения с питанием от тиристорных преобразователей. Возможно применение тиристорных ЭП, а также преобразователей транзисторных и широтно-импульсных с транзисторными ключами.

При проектировании СЭП его структурная схема выбирается из условия обеспечения заданных точностных показателей. Для этих целей широко используются системы подчиненного регулирования, но с настройкой регулятора положения с необходимыми запасами по фазе и амплитуде. В последние годы применяются системы модального управления с наблюдателями состояний переменных полного или редуцированного вида [58.19], особенно для организации каналов компенсации влияния возмущений типа помех или ветровых, имеющих случайных характер.

Создание новых структур систем регулирования идет в направлении формирования таких законов движения, которые могут обеспечить заданные точностные показатели не только на основе факта наличия сигнала рассогласования при слежении, но и при прогнозировании его значения.

В прогнозирующих системах управления используется информация о значении и темпе развития регулируемой координаты не только на данный момент времени, но и в предшествующие управлению моменты.

Впервые мысль о прогнозировании поведения координат системы была высказана Н. Винером [58.20]. Однако предложенная им теория является сложной и малореализуемой для ЭП и в настоящее время. Исследования, проведенные в 60-е годы, показали, что значительное повышение качества регулирования возможно при учете внешних управляющих и возмущающих воздействий. В [58.21] предложен метод построения регуляторов с учетов корреляционных функций (или спектральных плотностей) помех, внешних возмущающих воздействий и изменений параметров объекта регулирования.

Другой метод описан в [58.22]. Задача прогнозирования решается с помощью робастных, дискретных фильтров при неполной априорной информации о состоянии объекта управления. Наблюдаемый процесс на выходе регулятора (например, положения для СЭП) предлагается подвергнуть обработке вида:

$$\hat{U}_y[k+l] = b_0 U_y[k] + b_1 U_y[k-l] + \ldots + b_m U_y[k-m],$$

где m — допустимая сложность дискретного фильтра; l — глубина прогнозирования; k — дискретный момент времени; $U_y[k - l]$ — действительное напряжение в предшествующий интервал времени.

Задачей синтеза является выбор коэффициентов $\{b_l\}$ так, чтобы сигнал рассогласования при позиционировании δ был не больше допустимого значения при минимальной разности $\hat{U}_y[k+l] - U_y[k+l]$ (где $U_y[k + l]$ — действительное напряжение через интервал l). В [58.22] отмечается, что уже при $m = 1$ задача становится сложной и не полностью отвечающей задаче прогноза, так как не учитывает многих возможных возмущающих воздействий.

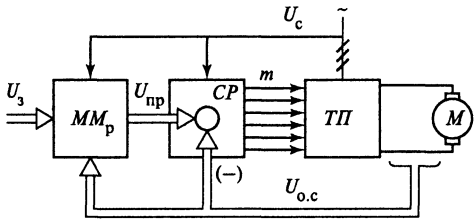


Рис. 58.24. Функциональная схема управления тиристорным преобразователем с прогнозирующей математической моделью в реальном масштабе времени

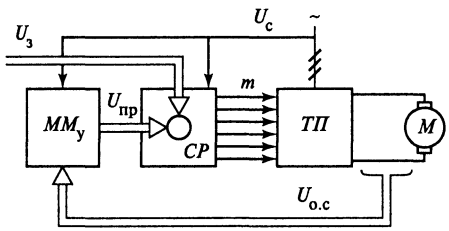


Рис. 58.25. Функциональная схема управления тиристорным преобразователем с прогнозирующей математической моделью в ускоренном масштабе времени

В [58.22] прогнозирование осуществляется с помощью математических моделей, которые выполняют роль регуляторов. Так, угол управления тиристорным преобразователем формируется по результату анализа расчетного (прогнозируемого) состояния системы на очередном интервале проводимости. Модель может быть в реальном $ММ_р$ (рис. 58.24) или ускоренном $ММ_у$ (рис. 58.25) масштабе времени. На рисунках: *СР* — блок сравнения, $U_з$ — входное воздействие (например, ток якоря или скорость). Прогнозируемые (математически вычисленные) значения координат в фиксированные моменты времени сравниваются с текущими их значениями, и при полном совпадении сравниваемых параметров вырабатывается сигнал $U_{пр}$ на открывание очередного тиристора. Отметим, что в последнее время прогнозирующие модели выполняются в виде цифровых фильтров.

Существенное повышение эффективности работы системы управления достигается при введении прогнозирующего устройства [58.24] на входе регулятора интересующей нас координаты (типа пропорционального или интегрально-пропорционального).

Прогнозирующее устройство позволяет относительно просто улучшать свойства ЭП, допустим точность регулирования, без заметного усложнения системы управления. И при этом отметим, что

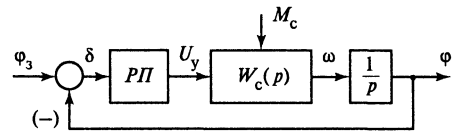


Рис. 58.26. Структура системы управления с прогнозирующим регулятором

методов построения прогнозирующих устройств может быть множество. Их общий смысл в том, что для прогноза используется состояние системы в предшествующие управлению моменты времени.

Лучшие показатели по сравнению с предшествующими имеет принцип прогнозирования, основанный на сознательном возмущении системы ЭП и оценке ее реакции на это действие [58.24].

Алгоритм функционирования прогнозирующего регулятора положения *РП*, включаемого на вход скоростной подсистемы (рис. 58.26), включает в себя следующие позиции:

1) вычисление прогнозируемого сигнала рассогласования $\delta_п[k]$

$$\delta_п = \sum_{i=1}^{n} \Delta\delta[k-i]B_i,$$

где $\Delta\delta[k-i]$ — разность между реальным δ и прогнозируемым $\delta_п$ сигналами в моменты времени $[k-i]$ $(i = 1, 2, \ldots, n)$; B_i — коэффициент пропорциональности, равный отношению сигнала рассогласования в момент времени $[k+i]$ к сигналу рассогласования в момент времени $\delta[k]$, т.е. $B_i = \delta[k+i]/\delta[k]$; n — глубина прогнозирования.

Коэффициент пропорциональности B_i определяется на основании тестовых импульсов единичной амплитуды и длительности ΔT, равной дискретной величине, которая по крайней мере в 2 раза меньше малой постоянной времени системы ЭП [58.24].

2) измерение реального сигнала рассогласования $\delta[k]$ в дискретные моменты времени $k = t/\Delta T$;

3) вычисление разности $\Delta\delta[k] = \delta[k] - \delta_п[k]$;

4) определение напряжения управления

$$U_у = a_b a_у \Delta\delta[k],$$

где $a_у = 1/\varphi_{коп}$ — коэффициент пропорциональности при действии единичного тестового импульса на скоростную подсистему по каналу управления ($M_с = 0$) при разомкнутой по положению системе управления; $\varphi_{коп}$ — установившийся угол поворота выходного вала СЭП; $a_b = \varphi_{коп}/\varphi[k]$ — коэффициент пропорциональности при действии аналогичного импульса по каналу возмущения; $\varphi[k]$ — угол поворота выходного вала СЭП в момент времени $[k]$.

На рис. 58.27 показаны переходные процессы в СЭП при приложении нагрузки $M_с$. Заметно мень-

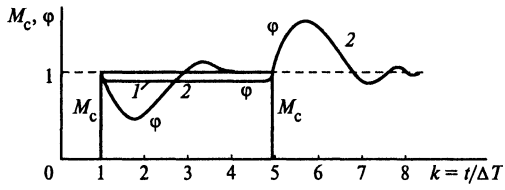


Рис. 58.27. График переходного процесса при действии нагрузки

шее значение сигнала рассогласования (кривая *1*) по сравнению с традиционной системой управления (кривая *2*), в которой в качестве регулятора используется интегрально-пропорциональный регулятор, настроенный на симметричный оптимум. Система имеет небольшой установившийся сигнал рассогласования, который можно уменьшить либо путем увеличения глубины прогнозирования n, либо путем увеличения коэффициента усиления ($a_I a_y$), либо путем изменения алгоритма функционирования, потому что приведенный алгоритм, конечно, является не единственно возможным.

Прогнозирующий регулятор положения не требует больших вычислительных действий и больших объемов памяти.

58.4. СИСТЕМЫ ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Системы подчиненного регулирования координат ЭП характеризуется каскадным включением регуляторов, количество которых соответствует числу N ($N = 1, 2, \ldots, n-1, n$) регулируемых координат ЭП, например тока, напряжения, скорости и положения вала двигателя. На входе каждого из N регуляторов сравниваются сигналы, пропорциональные заданному и действительному значениям выходной координаты данного контура регулирования, а выходной сигнал регулятора является задающим сигналом для последующего контура регулирования, т.е. последующий контур регулирования подчинен предыдущему. Ограничение любой из координат системы обеспечивается ограничением сигнала задания данной координаты. В зависимости от конкретных условий пределы ограничения координат могут быть постоянными либо меняться по заданному закону.

Каждый N-й контур системы регулирования структурно делится на регулятор и объект регулирования переменной, включающий в себя выходное звено данного контура и замкнутый контур регулирования, внутренний по отношению к данному контуру.

При оптимизации статических и динамических свойств замкнутого контура регулирования наибольшие постоянные времени элементов объекта регулирования компенсируют корректирующими звеньями регулятора и вводят интегрирующее звено с постоянной времени T_0. Последнее обеспечивает повышение точности регулирования координат, поскольку контур регулирования приобретает астатизм первого порядка.

Стандартными настройками контуров регулирования ЭП приняты настройки на *модульный* (*технический*) и *симметричный* оптимумы [58.25—58.27].

При настройке контуров регулирования на модульный оптимум передаточная функция разомкнутого N-го контура регулирования преобразуется к виду

$$W_{\text{раз}N}(p) = \frac{1}{a^N T_\mu p (a^{N-1} T_\mu p + 1)}, \quad (58.27)$$

а для замкнутого N-го контура регулирования — к виду

$$W_{\text{з}N}(p) = \frac{1}{a^N T_\mu p (a^{N-1} T_\mu p + 1) + 1}, \quad (58.28)$$

где T_μ — суммарная некомпенсированная постоянная времени первого, внутреннего, контура регулирования; $a = T_0/T_\mu$ — соотношение постоянных контура регулирования, принятое для модульного оптимума $a = 2$.

Графики переходных процессов выходного сигнала $x_N(t)$ при скачке сигнала задания $x_{\text{з}N}$ и нулевых начальных условиях для различных значений a приведены на рис. 58.28. При $a > 4$ переходный процесс имеет апериодический характер. При $a = 4$ переходный процесс граничный, а при $a < 4$ —

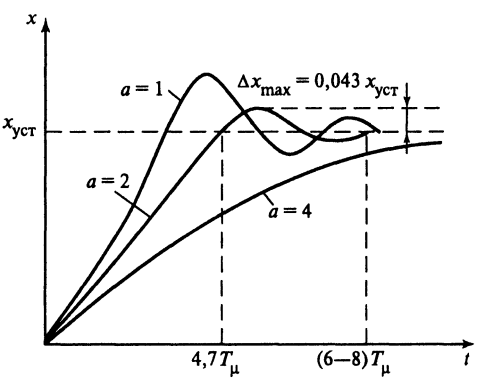


Рис. 58.28. Графики переходных процессов при различных настройках

колебательный. Уменьшение значения a ведет к увеличению колебательности и снижению времени переходного процесса. При $a = 2$ (модульной настройке) перерегулирование Δx_{max} не выше 4,3 % установившегося значения выходного сигнала, а время первого его достижения $t_p = 4{,}7T_\mu$. Коэффициент демпфирования контура регулирования при этом $\xi = \sqrt{a}/2 = \sqrt{2}/2$.

С увеличением номера N контура регулирования его некомпенсированная постоянная времени $T_{\mu N} = 2^{N-1}T_\mu$ возрастает, что влечет за собой снижение быстродействия каждого последующего внешнего контура регулирования.

При настройке контуров регулирования на симметричный оптимум передаточная функция разомкнутого N-го контура регулирования преобразуется к виду

$$W_{\text{раз}.N}(p) = \frac{2^{N+1}T_\mu p + 1}{2^{N+1}T_\mu p} \times \times \frac{1}{2^N T_\mu p(2^{N-1}T_\mu p + 1)}. \qquad (58.29)$$

Разомкнутый контур регулирования при подобной настройке обладает астатизмом второго порядка, перерегулирование в переходном процессе увеличивается до 56 % установившегося значения выходного сигнала, а время первого его достижения уменьшается до $t_p = 3{,}1T_\mu$.

Основные типы регуляторов, применяемых в ЭП, их схемы на основе аналоговых операционных усилителей, передаточные и переходные функции приведены в табл. 58.1.

КОНТУР РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА (МОМЕНТА) В СИСТЕМЕ УПРАВЛЯЕМЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ — ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Наиболее общей функцией ЭП является регулирование его тока или момента. Контур регулирования тока (момента), как внутренний контур системы подчиненного регулирования, определяет настройку и динамические показатели остальных внешних контуров регулирования ЭП.

На рис. 58.29 приведена функциональная схема контура регулирования тока якоря $I_я$ двигателя постоянного тока M независимого возбуждения (обмотка LM). Якорь двигателя подключен на выход управляемого полупроводникового преобразователя UZ. Управление преобразователем осуществляется сигналом U_y с выхода регулятора тока PT, реализованного на основе операционного усилителя $A1$ и операторных резисторов R_1 на входе, R_2 и конденсаторе C_1 в цепи обратной связи усилителя. Сигнал отрицательной обратной связи $U_{о.т}$ по току $I_я$ поступает на $A1$ через резистор R_3 на выходе датчика тока UA, вход которого подключен к измерительному шунту RS в цепи якоря двигателя. Сигнал задания тока якоря двигателя $U_{з.т}$ подается на резистор R_1 регулятора тока.

Структурная схема контура регулирования тока якоря двигателя в соответствии с рис. 58.29 приведена на рис. 58.30, *а*. Аналитические соотношения в схеме соответствуют ряду допущений: ток якорной цепи двигателя принят непрерывным; отсутствует реакция якоря на магнитный поток двигателя; регулировочная характеристика преобразователя линейна; момент инерции, приведенный к валу двигателя, постоянен; не учитывается ввиду ее малости инерционность датчика тока; отсутствует влияние пульсаций тока якоря на характеристики регулятора.

Объектом регулирования являются последовательно включенные преобразователь UZ и двигатель M. Передаточная функция преобразователя между выходной его ЭДС $E_п$ и сигналом управления U_y определяется как

$$W_п(p) = \frac{E_п(p)}{U_y(p)} \approx \frac{K_п}{(T_\mu p + 1)}, \qquad (58.30)$$

где $K_п = E_{п.ном}/U_{у.ном}$ — статический коэффициент усиления преобразователя; T_μ — суммарная некомпенсированная постоянная времени контура регулирования тока.

Структурная схема двигателя включает в себя три взаимосвязанных звена с передаточными функциями:

$$W_{д.т}(p) = \frac{I_я(p)}{E_п(p)} = \frac{1}{R_{я.ц}(T_{я.ц}p + 1)} \qquad (58.31)$$

между током якоря двигателя и ЭДС преобразователя,

$$\frac{\omega(p)}{I_я(p)} = \frac{R_{я.ц}}{k\Phi T_м p} \qquad (58.32)$$

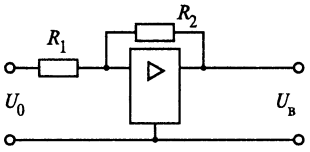
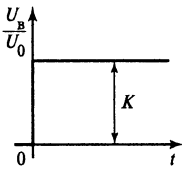
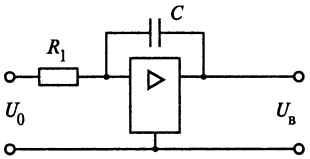
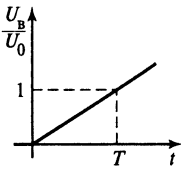
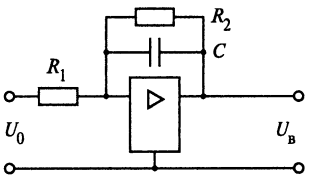
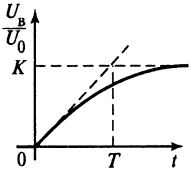
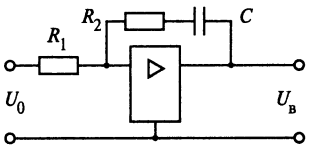
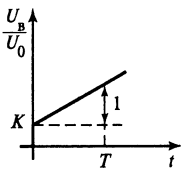
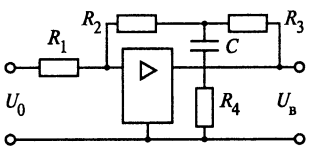
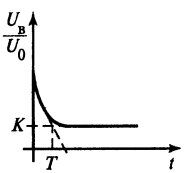
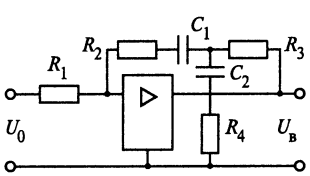
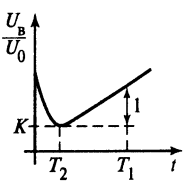
между угловой скоростью двигателя ω и током якоря и

$$W_{де}(p) = \frac{E_д(p)}{\omega(p)} = k\Phi \qquad (58.33)$$

между ЭДС двигателя $E_д$ и угловой его скоростью.

В соотношениях (58.31)—(58.33): $T_{я.ц} = L_{я.ц}/R_{я.ц}$ — суммарная электромагнитная постоянная времени якорной цепи двигателя; $L_{я.ц}$ — суммарная индуктивность якорной цепи двигателя; $R_{я.ц} = R_{я.д} + R_п$ — суммарное сопротивление якорной цепи двигателя; $k = p_п N/(2\pi a)$ — конструктивный коэффициент двигателя; N — число активных проводников; a —

Таблица 58.1. **Характеристики основных типов регуляторов**

№ п/п	Тип регулятора	Схема регулятора	Передаточная функция	Переходная функция
1	Пропорциональный (П)		$W(p) = K = R_2/R_1$	
2	Интегральный (И)		$W(p) = 1/(Tp)$; $T = R_1C$	
3	Инерционный (апериодический)		$W(p) = K/(Tp + 1)$; $K = R_2/R_1$; $T = R_2C$	
4	Пропорционально-интегральный (ПИ)		$W(p) = K + 1/(Tp)$; $K = R_2/R_1$; $T = R_1C$	
5	Пропорционально-дифференциальный (ПД)		$W(p) = K(1 + Tp)$; $K = (R_3 + R_2)/R_1$; $T = \dfrac{R_2R_3}{R_2 + R_3}C$; $R_4 << R_2, R_3$	
6	Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД)		$W(p) = K\dfrac{(1 + T_1p)(1 + T_2p)}{T_1p}$; $K = (R_3 + R_2)/R_1$; $T_1 = (R_2 + R_3)C_1$; $T_2 = \dfrac{R_2R_3}{R_2 + R_3}C_2$; $\dfrac{R_1}{R_2} + \dfrac{C_2}{C_1} >> 1$; $R_4 << R_2, R_3$	

число параллельных ветвей якорной обмотки двигателя; $p_п$ — число пар полюсов; Ф — магнитный поток двигателя; $T_м = J_\Sigma R_{я.ц}/(k\Phi)^2$ — электромеханическая постоянная времени двигателя; J_Σ — суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя.

Передаточная функция цепи обратной связи по току якоря двигателя

$$W_{о.т}(p) = \frac{U_{о.т}(p)}{I_я(p)} = K_{о.т} = K_{RS}K_{д.т}K_{пр},$$

где K_{RS} — коэффициент передачи измерительного шунта RS в цепи якоря двигателя; $K_{д.т}$ — коэффи-

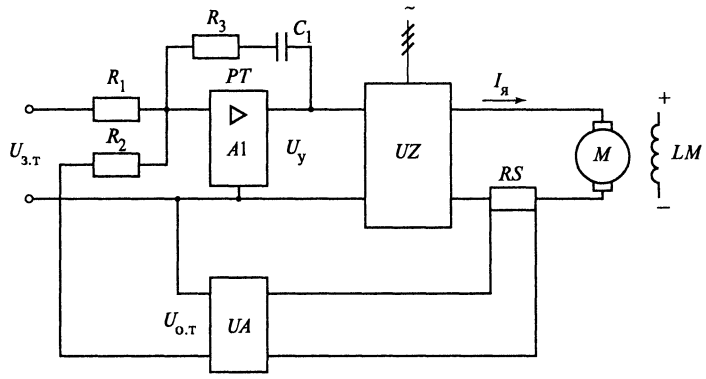


Рис. 58.29. Функциональная схема контура регулирования тока якоря двигателя

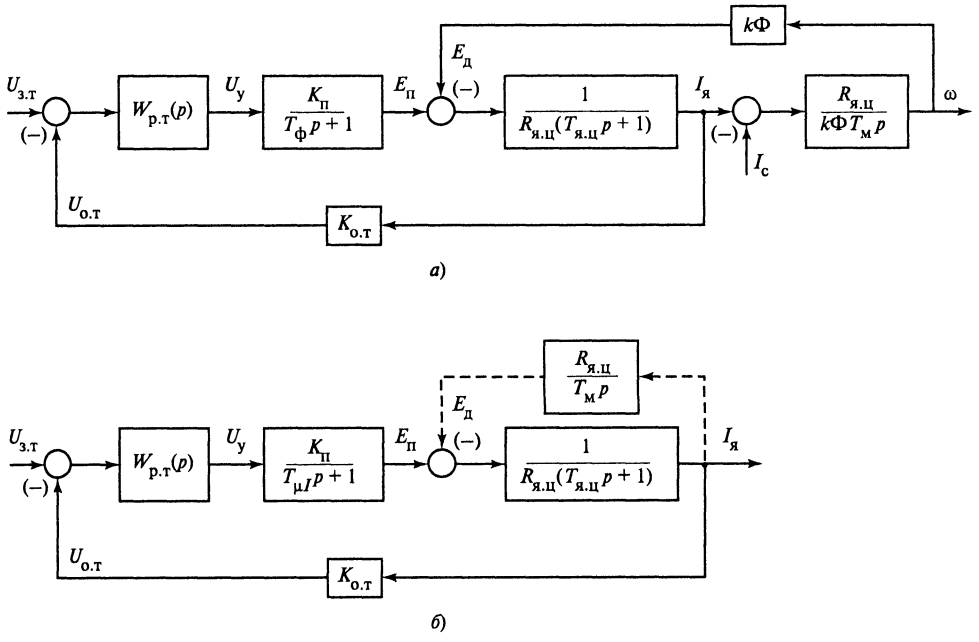


Рис. 58.30. Исходная (*а*) и преобразованная (*б*) структурные схемы контура регулирования тока якоря двигателя

циент усиления датчика тока UA по напряжению; $K_{пр} = R_1/R_2$ — коэффициент приведения напряжения обратной связи по току $U_{о.т}$ к напряжению цепи задающего сигнала $U_{з.т}$ регулятора тока.

При регулировании тока якоря электромеханическая связь, обусловленная влиянием ЭДС двигателя, является возмущающим воздействием, снижающим точность регулирования тока. В инженерной практике часто с учетом $T_м > 4T_{я.ц}$, пренебрегают влиянием указанной связи на динамику контура регулирования тока и его структурную схему представляют в соответствии с рис. 58.30, *б*, где штриховой линией показана отброшенная, но физически существующая связь по ЭДС двигателя.

В соответствии с рис. 58.30, *б* и соотношениями (58.30)—(58.33) передаточная функция объекта регулирования тока

$$W_{о.р.т}(p) = \frac{K_п}{R_{я.ц}(T_μ p + 1)(T_{я.ц}p + 1)}.$$

Отсюда с учетом неединичной ($K_{о.т}$) обратной связи по току передаточная функция регулятора тока определится как

$$W_{\text{р.т}}(p) = \frac{W_{\text{раз г}}(p)}{W_{\text{о.р.т}}(p)} = \frac{T_{\text{я.ц}}p + 1}{T_{\text{и}}p} =$$

$$= K_{\text{р.т}} + \frac{1}{T_{\text{и}}p}, \qquad (58.34)$$

где $T_{\text{и}} = \dfrac{K_{\text{о.т}}K_{\text{п}}}{R_{\text{я.ц}}} a_I T_{\mu}$ — постоянная времени интегрирования ПИ-регулятора; $K_{\text{р.т}} = T_{\text{я.ц}}/T_{\text{и}}$ — коэффициент передачи пропорциональной части регулятора.

Сопротивления резисторов R_1, R_2, R_3 и емкость конденсатора C_1 регулятора тока (см. рис. 58.29) при выбранных $T_{\text{и}}$ и $K_{\text{р.т}}$ могут быть определены по соотношениям, приведенным в п. 4 табл. 58.1.

При выбранном регуляторе передаточная функция замкнутого контура регулирования тока

$$W_{\text{зам.т}}(p) = \frac{I_{\text{я}}(p)}{U_{\text{з.т}}(p)} =$$

$$= \frac{1}{K_{\text{о.т}}|a_I T_{\mu} p(T_{\mu}p + 1) + 1|}. \qquad (58.35)$$

Благодаря интегральной составляющей регулятора тока уравнение электромеханической характеристики двигателя (при $U_{\text{з.т}} = \text{const}$, $p = 0$)

$$I_{\text{я}} = U_{\text{з.т}}/K_{\text{о.т}} = I_{\text{з.я}} = \text{const}$$

соответствует питанию якоря двигателя от источника тока.

На рис. 58.31 представлены электромеханические характеристики двигателя при различных значениях $U_{\text{з.т}}$ (штриховой линией отмечены предельные значения скорости $\omega_0 \le \omega_{0max}$).

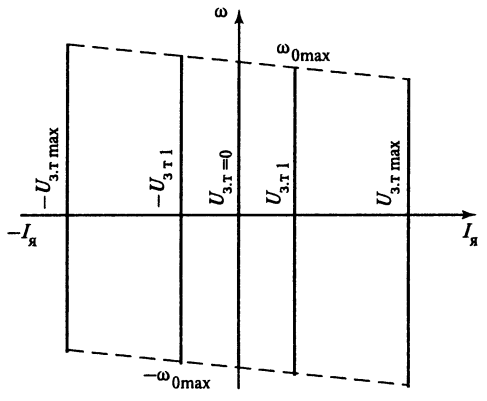


Рис. 58.31. Электромеханические характеристики ЭП с унифицированным контуром тока

Быстродействие контура регулирования тока определяется некомпенсируемой постоянной T_{μ}, значение которой для большинства управляемых полупроводниковых преобразователей не превышает 0,01 с. При этом при модульном оптимуме ($a_I = a = 2$) время достижения заданного значения тока при скачке задающего сигнала $U_{\text{з.т}}$ на входе контура регулирования тока без учета влияния ЭДС двигателя $t_{\text{р}} \le 0{,}05$ с, что достаточно для большинства регулируемых ЭП постоянного тока (кривая *1* на рис. 58.32). В ряде случаев, когда подобный темп нарастания тока нежелателен по техническим причинам, на входе контура регулирования тока может устанавливаться задатчик интенсивности.

Из-за действия внутренней обратной связи по ЭДС двигателя контур регулирования тока при вращении двигателя не является астатическим. Его статизм определяется как [58.28]

$$\delta = 1 - \frac{T_{\text{м}}}{T_{\text{м}} - a_I T_{\mu}}. \qquad (58.36)$$

С учетом (58.36) изменение его тока якоря при скачке задающего сигнала $U_{\text{з.т}}$ на входе контура регулирования тока при $a_I = 2$ будет иметь вид кривой *2* на рис. 58.32.

Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением его электромагнитный момент $M = k\Phi I_{\text{я}}$ при постоянном потоке пропорционален току якоря. Поэтому все показатели регулирования тока якоря и электромагнитного момента двигателя будут аналогичными.

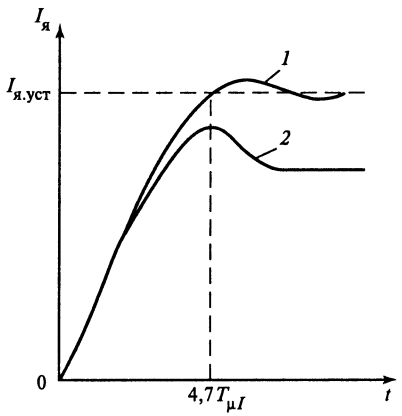


Рис. 58.32. Графики переходных процессов тока якоря без учета (кривая *1*) и с учетом (кривая *2*) влияния ЭДС двигателя

РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЯЕМЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ — ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Функциональная схема системы регулирования скорости двигателя при питании его от управляемого преобразователя постоянного тока приведена на рис. 58.33. Внутренним контуром системы является контур регулирования тока якоря двигателя (см. рис. 58.29), входным сигналом которого является сигнал $U_{р\,с}$ с выхода регулятора скорости *PC*, реализованного на основе операционного усилителя *A2* и операторных резисторов R_4 на входе, R_6 и конденсаторе C_2 в цепи обратной связи усилителя. Сигнал отрицательной обратной связи $U_{о\,с}$ по скорости двигателя ω поступает на *A2* через резистор R_5 на выходе датчика скорости *UV*, вход которого подключен к тахогенератору *BV* на валу двигателя. Сигнал задания скорости двигателя $U_{з\,с}$ подается на резистор R_4 регулятора скорости. Ограничение уровня выходного сигнала $U_{р\,с}$, определяющего максимальный сигнал задания $U_{р\,т\,max} = I_{зmax}/K_{о\,т}$ на входе контура регулирования тока якоря двигателя, осуществляется узлом ограничения *UQ* в цепи обратной связи *PC*.

В соответствии с функциональной схемой рис. 58.33 ее обобщенная структурная схема приведена на рис. 58.34, *а*. Здесь передаточная функция цепи обратной связи по скорости двигателя

$$W_{о\,с}(p) = \frac{U_{о\,с}(p)}{\omega(p)} = K_{о\,с} = K_{BV}K_{UV}K_{пр\,с},$$

где K_{BV} — коэффициент передачи тахогенератора *BV*; K_{UV} — коэффициент усиления датчика скорости *UV* по напряжению; $K_{пр\,с} = R_4/R_5$ — коэффициент приведения напряжения обратной связи по скорости $U_{о\,с}$ к напряжению цепи задающего сигнала $U_{з\,с}$ регулятора скорости.

С учетом передаточной функции замкнутого контура регулирования тока (58.35) обобщенная структурная схема контура регулирования скорости может быть преобразована к виду, показанному на рис. 58.34, *б*. Отсюда передаточная функция объекта регулирования скорости

$$W_{о\,р\,с}(p) = \frac{\omega(p)}{U_{р\,с}(p)} = \frac{R_{я\,ц}}{K_{о\,т}|a_1T_\mu p(T_\mu p+1)+1|k\Phi T_м p} \approx$$

$$\approx \frac{R_{я\,ц}}{K_{о\,т}(a_1T_\mu p + 1)k\Phi T_м p}.$$

В последнем выражении $W_{о\,р\,с}(p)$ ввиду малости пренебрегают членом $a_1T_\mu^2p^2$. Тогда с учетом неединичной ($K_{о\,с}$) обратной связи по скорости передаточная функция регулятора скорости определится как

$$W_{р\,с}(p) = W_{раз\,с}(p)/W_{о\,р\,с}(p) =$$

$$= \frac{K_{о\,т}k\Phi T_м}{R_{я\,ц}K_{о\,с}a_\omega a_1T_\mu} = K_{р\,с}, \qquad (58.37)$$

где $a_\omega = T_{о\,с}/T_{\mu с}$ — соотношение постоянной времени $T_{о\,с}$, вводимой в желаемый разомкнутый контур регулирования интегральной составляющей, и некомпенсированной постоянной времени $T_{\mu с} = a_1T_{\mu 1}$ контура регулирования скорости.

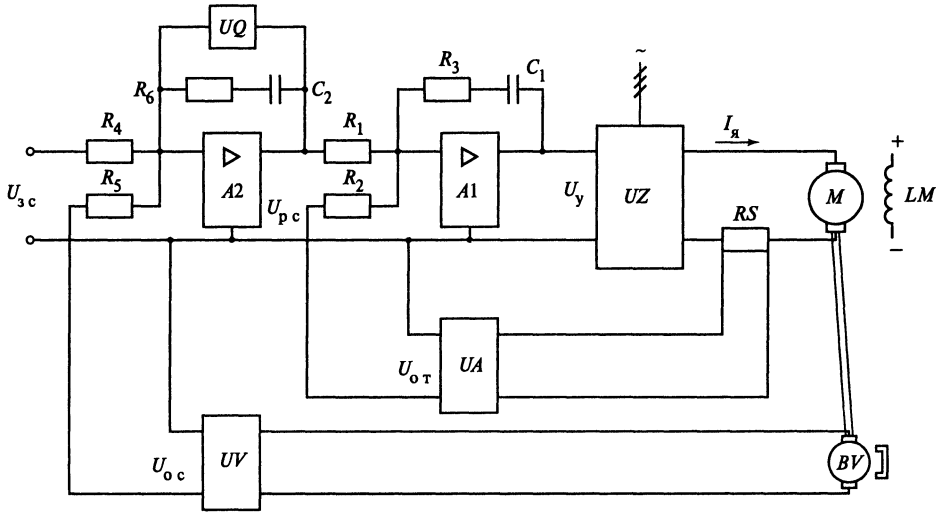


Рис. 58.33. Функциональная схема системы регулирования скорости двигателя постоянного тока

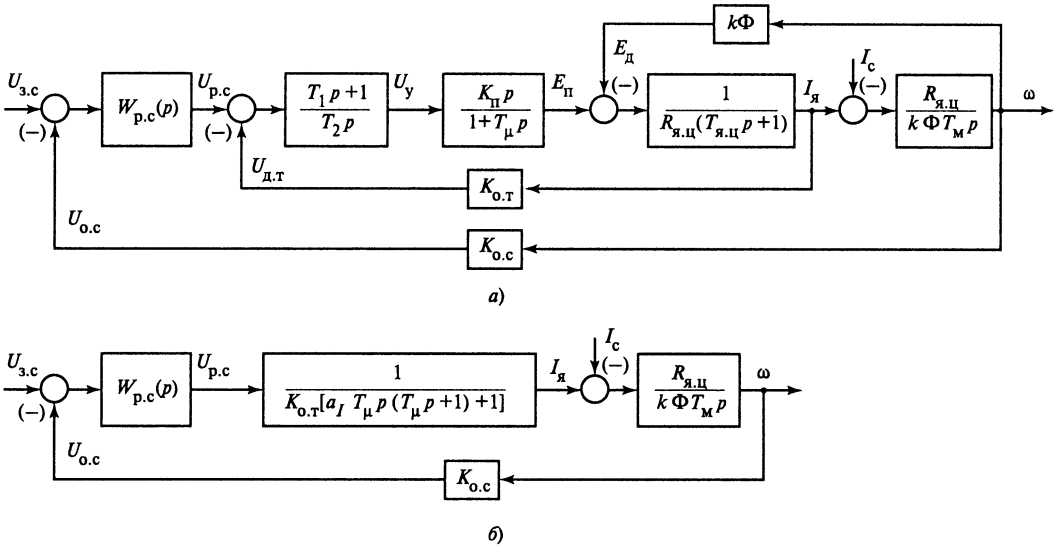


Рис. 58.34. Обобщенная (*а*) и преобразованная (*б*) структурные схемы системы регулирования скорости

В соответствии с (58.37) требуется П-регулятор скорости (конденсатор C_2 на рис. 58.33 закорачивается). При этом передаточная функция замкнутого контура регулирования скорости

$$W_{зам\,с}(p) = \frac{\omega(p)}{U_{з\,с}(p)} =$$

$$= \frac{1}{K_{о\,с}[a_\omega T_{μ\,с} p(T_{μ\,с} p + 1) + 1]}. \quad (58.38)$$

Путем выбора соотношений постоянных времени контура регулирования в пределах $a_\omega = 2...4$ можно получить требуемое по техническим условиям демпфирование колебаний скорости в переходных процессах и ограничить перерегулирование допустимым значением. При настройке на модульный оптимум (при $a_\omega = a_I = a = 2$)

$$W_{зам\,с}(p) = \frac{1}{K_{о\,с}[4T_{μ\,I} p(2T_{μ\,I} p + 1) + 1]}. \quad (58.39)$$

По (58.39) уравнение статической электромеханической характеристики двигателя ($p = 0$) в пределах линейной части характеристики регулятора скорости [58.25] запишется так:

$$\omega = \frac{U_{з.с}}{K_{о.с}} - \frac{4T_{μ\,I} R_{я.ц}}{T_м k Ф} I_я. \quad (58.40)$$

С учетом $M = kФI_я$ статическая механическая характеристика двигателя

$$\omega = \frac{U_{з\,с}}{K_{о.с}} - \frac{4T_{μ\,I} R_{я.ц}}{T_м k Ф^2} M. \quad (58.41)$$

После уменьшения скорости до граничного значения $\omega_{гр}$, при котором выходное напряжение

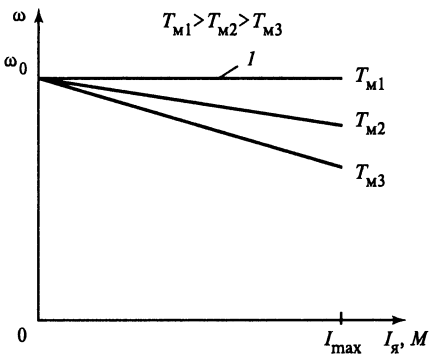


Рис. 58.35. Электромеханические характеристики электропривода

регулятора скорости достигает максимального значения, электромеханическая и механическая характеристики двигателя имеют вид, соответствующий работе лишь контура регулирования тока якоря.

Электромеханические (механические) характеристики ЭП при настройке контура регулирования скорости на модульный оптимум для различных $T_м$ показаны на рис. 58.35. При $T_м > 4T_μ$ жесткость механической характеристики ЭП в замкнутой системе регулирования скорости выше, чем в разомкнутой, при $T_м = 4T_μ$ жесткости обеих систем равны. Для мощных ЭП с малым приведенным моментом инерции ($T_м < 4T_μ$) жесткость механической характеристики в замкнутой системе меньше, чем в разомкнутой.

В соответствии со структурной схемой на рис. 58.34, *б* передаточная функция между током

якоря и сигналом задания скорости в замкнутой системе регулирования скорости

$$W_{\text{з.с.т}}(p) = \frac{I_{\text{я}}(p)}{U_{\text{з.с}}(p)} =$$

$$= \frac{k\Phi T_{\text{м}} p}{R_{\text{я.ц}} K_{\text{о.с}} [a_\omega T_{\mu\text{с}} p(T_{\mu\text{с}} p + 1) + 1]}. \quad (58.42)$$

Переходные функции скорости $\omega(t)$ при ступенчатом задании входного сигнала $U_{\text{з.с}}$ контура регулирования скорости при принятых допущениях и настройке на модульный оптимум будут аналогичны переходным функциям тока, но с другим масштабом времени.

Настройка контура регулирования скорости двигателя на модульный оптимум характеризуется отсутствием статического сигнала рассогласования по управляющему воздействию и наличием сигнала рассогласования при возмущающем со стороны нагрузки воздействии.

Астатизм и по управляющему воздействию, и по нагрузке обеспечивается путем настройки контура регулировании скорости на симметричный оптимум. При этом передаточная функция регулятора скорости выбирается вида

$$W_{\text{р.с}}(p) = K_{\text{р.с}} + \frac{1}{T_{\text{р.с}} p}, \quad (58.43)$$

где $K_{\text{р.с}} = \dfrac{K_{\text{о.т}} k\Phi T_{\text{м}}}{R_{\text{я.ц}} K_{\text{о.с}} a_\omega T_{\mu\text{с}}}$ — коэффициент передачи пропорциональной части регулятора скорости;

$T_{\text{р.с}} = \dfrac{2a_\omega^2 K_{\text{о.с}} R_{\text{я.ц}} T_{\mu\text{с}}^2}{K_{\text{о.т}} k\Phi T_{\text{м}}}$ — постоянная времени интегральной части регулятора скорости.

С учетом (58.43) передаточные функции между скоростью, током двигателя и входным сигналом управления замкнутого контура регулирования скорости определяются как

$$W_{\text{зам.с}}(p) = \frac{\omega(p)}{U_{\text{з.с}}(p)} = \frac{1}{K_{\text{о.с}}(1 + a_\omega T_{\mu\text{с}} p)} \times$$

$$\times \frac{1 + a_\omega^2 T_{\mu\text{с}}}{[a_\omega^2 T_{\mu\text{с}}^2 p^2 + (a_\omega - 1) a_\omega T_{\mu\text{с}} p + 1]}; \quad (58.44)$$

$$W_{\text{з.с.т}}(p) = \frac{I_{\text{я}}(p)}{U_{\text{з.с}}(p)} = \frac{k\Phi T_{\text{м}} p}{R_{\text{я.ц}} K_{\text{о.с}}} \times$$

$$\times \frac{1 + a_\omega^2 T_{\mu\text{с}}}{(1 + a_\omega T_{\mu\text{с}} p)[a_\omega^2 T_{\mu\text{с}}^2 p^2 + (a_\omega - 1) a_\omega T_{\mu\text{с}} p + 1]}. \quad (58.45)$$

Постоянное ускорение ε, обеспечиваемое применением задатчика интенсивности на входе системы регулирования скорости, должно выбираться из условия ограничения тока якоря на уровне, не превышающем его предельно допустимого значения. При этом роль узла ограничения выходного напряжения регулятора скорости сведется к ограничению тока якоря двигателя лишь в ненормальных режимах работы ЭП.

Статические электромеханическая и механическая характеристики двигателя при настройке на симметричный оптимум в пределах линейной части характеристики регулятора скорости соответствуют уравнению

$$\omega = U_{\text{з.с}} / K_{\text{о.с}},$$

т.е. условию абсолютной статической жесткости характеристик (линия *1* на рис. 58.35). Благодаря астатизму второго порядка установившаяся динамическая погрешность скорости при линейном изменении входного сигнала управления отсутствует. Поэтому двухконтурную систему с ПИ-регулятором скорости называют *двукратноинтегрирующей* системой и применяют при необходимости высокой точности отработки изменений сигналов задания и абсолютной статической точности поддержания скорости при нагрузках на валу двигателя.

Характер переходных процессов при ступенчатом изменении задающего сигнала соответствует настройке на симметричный оптимум, при котором перерегулирование скорости может достигать 56 %. В случае неприемлемости подобного перерегулирования на вход замкнутой системы регулирования скорости устанавливается задатчик интенсивности.

При отсутствии жестких требований к точности поддержания скорости и стремлении избежать установки тахогенератора на валу двигателя применяются системы регулирования скорости с обратной связью по напряжению или по ЭДС двигателя за счет сочетания отрицательной обратной связи по напряжению и положительной связи по току двигателя (рис. 58.36). В последнем случае показатели системы регулирования подобны системе с обратной связью по скорости двигателя.

ПОДЧИНЕННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ В СИСТЕМЕ ГЕНЕРАТОР — ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Функциональная схема регулирования скорости в системе генератор—двигатель (Г—Д) представлена на рис. 58.37. Здесь внутренним контуром является контур регулирования тока $I_{\text{в}}$ обмотки возбуждения *LG* генератора *G*, питающего двигатель *M*. Отрицательная обратная связь по току возбуждения генератора через резистор R_2 и датчик тока возбуждения *UAF*, подключенный к шунту *RSF*, поступает на вход регулятора тока возбуждения, реализованного на основе операционного усилителя *A*1, опера-

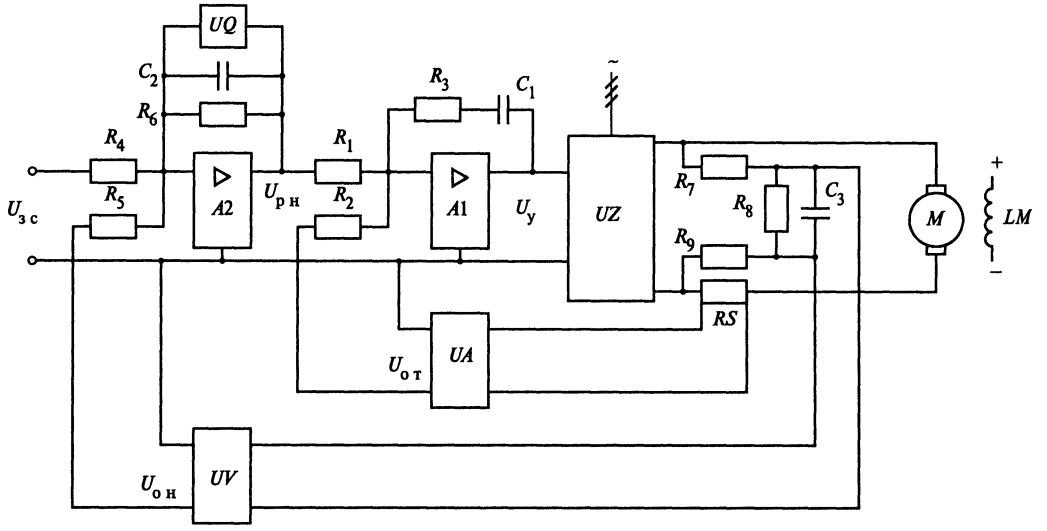


Рис. 58.36. Функциональная схема системы регулирования напряжения двигателя

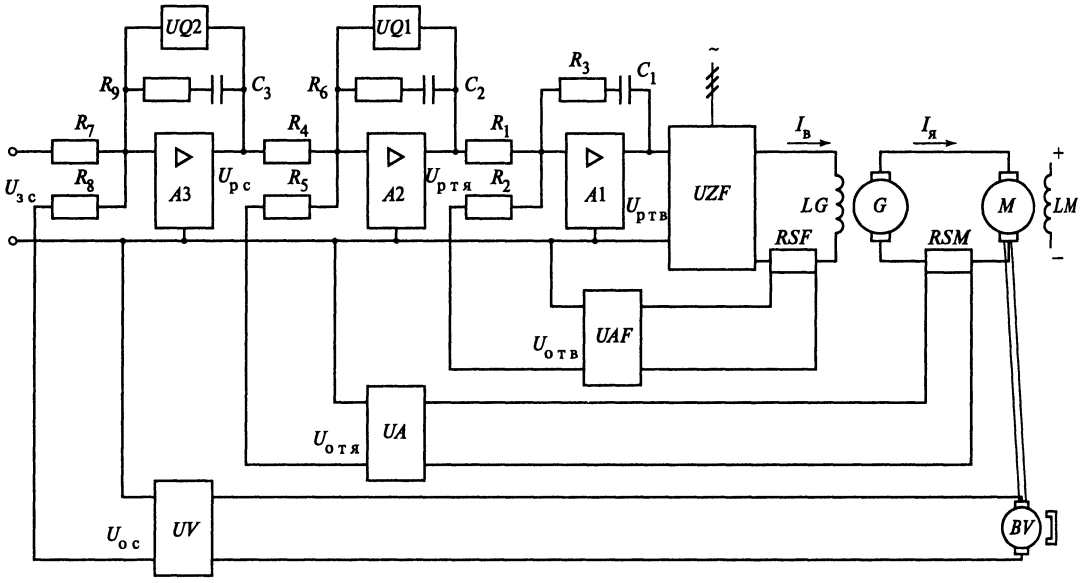


Рис. 58.37. Функциональная схема регулирования скорости в системе Г—Д

торных резисторов R_1, R_3 и конденсатора C_1. Обмотка возбуждения *LG* получает питание от регулируемого полупроводникового преобразователя *UZF*. Внешние контуры регулирования тока и скорости двигателя аналогичны системе преобразователь — двигатель на рис. 58.33. Ограничение выходных сигналов регуляторов тока якоря и скорости двигателя обеспечивается блоками *UQ1* и *UQ2*.

Обобщенная структурная схема регулирования скорости в системе Г—Д без учета вихревых токов в магнитной цепи генератора приведена на рис. 58.38. Здесь $T_{я\,ц} = L_{я\,ц}/R_{я\,ц}$ — суммарная электромагнитная постоянная времени якорной цепи двигателя, $L_{я\,ц}$ — суммарная индуктивность якорной цепи двигателя, $R_{я\,ц}$ — суммарное сопротивление якорной цепи двигателя, $K_г = E_г/I_{в\,г}$ — коэффициент передачи между ЭДС генератора $E_г$ и током его возбуждения $I_{в\,г}$ на линейном участке характеристики намагничивания генератора (без учета гистерезиса) при его номинальной скорости, $T_{ц\,в} = L_{ц\,в}/R_{ц\,в}$ — суммарная электромагнитная по-

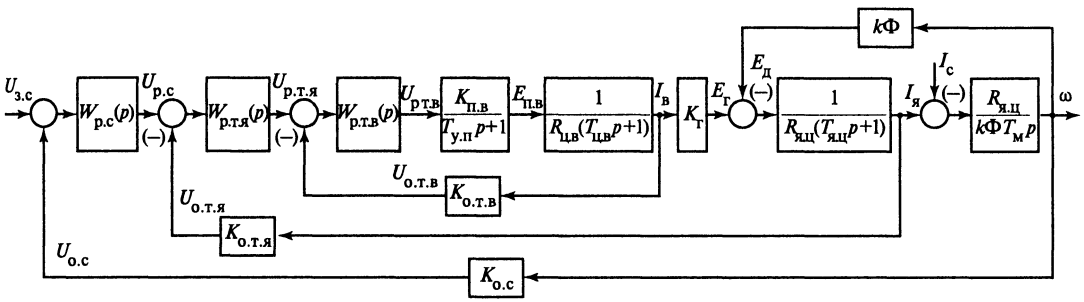


Рис. 58.38. Структурная схема регулирования скорости в системе Г—Д

стоянная времени цепи обмотки возбуждения генератора; $L_{ц.в}$ — суммарная индуктивность цепи обмотки возбуждения генератора; $R_{ц.в}$ — суммарное сопротивление цепи обмотки возбуждения генератора; $K_{п.в}$ — статический коэффициент усиления преобразователя *UZF* по напряжению; $T_{у.п}$ — постоянная времени цепи управления преобразователем *UZF*; $K_{о.т.в}$, $K_{о.т.я}$, $K_{о.с}$ — коэффициенты обратной связи соответственно по току возбуждения генератора, току якорной цепи и по скорости двигателя с учетом коэффициентов приведения сигналов обратных связей к сигналам задания на входе регуляторов.

По (58.27) при настройке внутреннего контура регулирования тока возбуждения генератора передаточная функция его регулятора

$$W_{р.т.в}(p) = K_{р.т.в} + \frac{1}{T_{и.в}p}, \qquad (58.46)$$

где $T_{и.в} = \dfrac{K_{о.т.в}K_{п.в}}{R_{ц.в}} a_{Iв}T_μ$ — постоянная времени интегрирования ПИ-регулятора тока возбуждения; $K_{р.т.в} = T_{ц.в}/T_{и.в}$ — коэффициент передачи пропорциональной части регулятора; $T_μ = T_{у.п}$; $a_{Iв} = 2—4$.

С учетом (58.46) передаточная функция регулятора тока якоря двигателя

$$W_{р.т.я}(p) = K_{р.т.я} + \frac{1}{T_{и.я}p}, \qquad (58.47)$$

где $T_{и.я} = \dfrac{K_{о.т.я}K_г}{K_{о.т.в}R_{я.ц}} a_{Iя}a_{Iв}T_μ$ — постоянная времени интегрирования ПИ-регулятора тока якоря двигателя; $K_{р.т.в} = T_{я.ц}/T_{и.я}$ — коэффициент передачи пропорциональной части регулятора; $a_{Iя} = 2—4$.

При настройке на модульный оптимум передаточная функция регулятора скорости определится подобно (58.37)

$$W_{р.с}(p) = \frac{K_{о.т.я}kФT_м}{R_{я.ц}K_{о.с}a_ω a_{Iя}a_{Iв}T_μ} = K_{р.с}, \qquad (58.48)$$

где $a_ω = 2—4$.

Статические и динамические свойства контуров регулирования системы Г—Д качественно аналогичны системе полупроводниковый преобразователь — двигатель. Отличие в количественных показателях объясняется тем, что увеличено число контуров регулирования и существуют из-за насыщения магнитной цепи генератора ограничения по коэффициентам форсирования его выходной ЭДС.

РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ В СИСТЕМЕ ИСТОЧНИК ТОКА — ДВИГАТЕЛЬ

Функциональная схема регулирования скорости в системе источник тока — двигатель (ИТ-Д) представлена на рис. 58.39. Роль источника тока ИТ может выполнять либо параметрический источник тока на основе индуктивно-емкостного преобразователя [58.29], либо управляемый нереверсивный источник напряжения с отрицательной обратной связью по току (рис. 58.39). Параметры регулятора тока последнего определяются по (58.34). Управление моментом двигателя осуществляется путем воздействия на его магнитный поток посредством изменения тока возбуждения двигателя. Контур регулирования тока возбуждения двигателя аналогичен контуру регулирования тока возбуждения генератора на рис. 58.37, а контур регулирования скорости — системе управляемый преобразователь напряжения — двигатель (см. рис. 58.33).

Структурная схема регулирования скорости в системе ИТ—Д приведена на рис. 58.40. Здесь $T_{ц.в} = L_{ц.в}/R_{ц.в}$ — суммарная электромагнитная постоянная времени цепи обмотки возбуждения двигателя, определяемая так же, как для цепи возбуждения генератора; k — конструктивный коэффициент двигателя; $K_Ф = ΔФ/ΔI_в$ — статический коэффициент, соответствующий линейной части кривой намагничивания двигателя.

Передаточная функция и параметры регулятора тока возбуждения двигателя определяются по (58.46). Передаточная функция регулятора скоро-

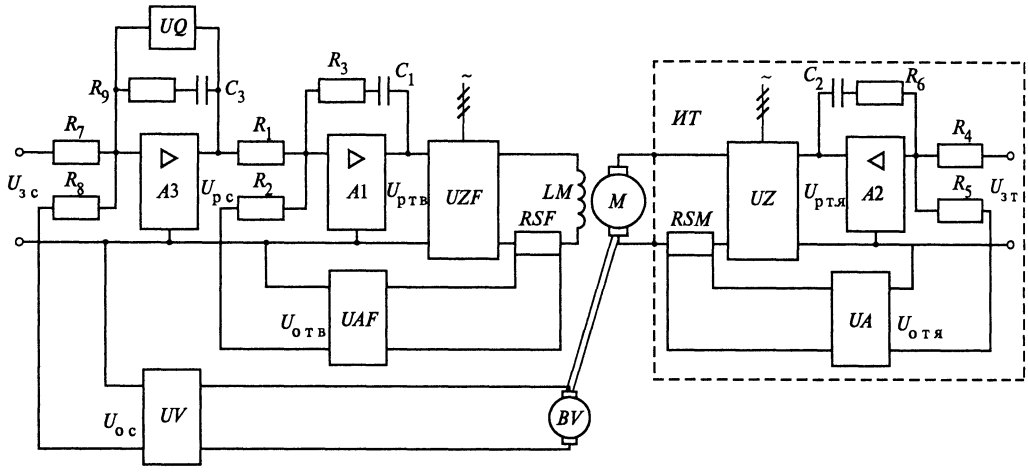


Рис. 58.39. Функциональная схема регулирования скорости в системе ИТ—Д

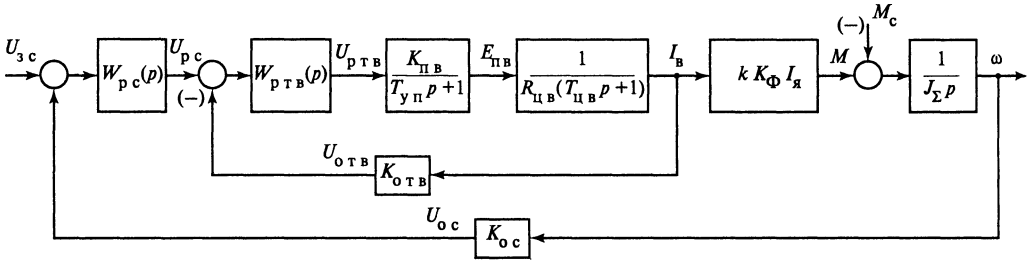


Рис. 58.40. Структурная схема регулирования скорости в системе ИТ—Д

сти при настройке контура регулирования скорости на модульный оптимум

$$W_{рс}(p) = \frac{K_{отв} J_{\Sigma}}{k K_{\Phi} I_{я} a_{\omega} a_{Iв} T_{\mu}} = K_{рст}, \quad (58\ 49)$$

где a_{ω} =2—4

Статические и динамические свойства контуров регулирования системы ИТ—Д качественно близки системе полупроводниковый преобразователь напряжения — двигатель Однако, как и в системе Г—Д, количественные показатели из-за насыщения магнитной цепи двигателя и ограничения по коэффициентам форсирования его магнитного потока будут уступать показателям системы регулирования по якорной цепи двигателя

СИСТЕМА ДВУХЗОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЯ

Для механизмов, у которых работа ЭП на высокой скорости происходит с уменьшенными значениями статического момента на валу двигателя, целесообразно двухзонное регулирование скорости В системах двухзонного регулирования изменение скорости двигателя до ее номинального значения обеспечивается при номинальном потоке возбуждения двигателя путем изменения только напряжения на якоре двигателя, а регулирование выше номинальной скорости — за счет воздействия на поток при постоянном напряжении на якоре или ЭДС двигателя

Функциональная схема ЭП постоянного тока с двухзонным регулированием скорости приведена на рис 58 41 В ее составе две взаимосвязанные системы регулирования скорости с внутренним контуром регулирования тока якоря двигателя и ЭДС двигателя с внутренним контуром регулирования тока возбуждения двигателя Контуры регулирования скорости, токов якоря и возбуждения двигателя реализованы подобно системам с однозонным регулированием скорости (см рис 58 33) и системе Г—Д (см рис 58 38)

Взаимосвязь между контурами выполнена посредством датчика и регулятора ЭДС двигателя, реализованного на основе операционного усилителя *A4*, операторных резисторов R_{10}, R_{11} и конденсатора C_2 Датчик ЭДС выполнен на основе операционного усилителя *A5*, операторных резисторов R_{12},

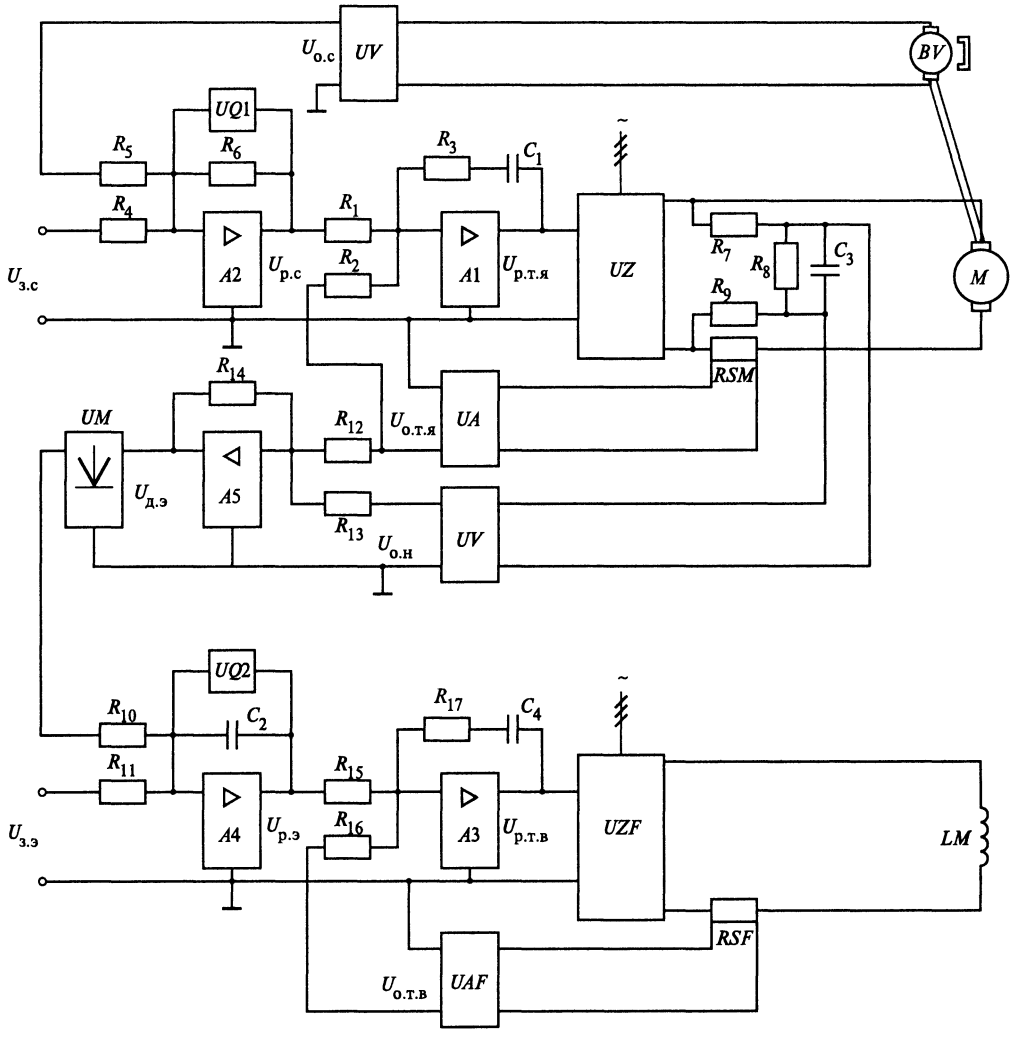


Рис. 58.41. Функциональная схема системы двухзонного регулирования скорости

R_{13}, R_{14}, датчиков тока *UA* и напряжения *UV*. Выбрав постоянную времени инерционного фильтра на основе резисторов R_7, R_8, R_9 и конденсатора C_3 в цепи обратной связи по напряжению якоря двигателя равной $T_ф = T_{я.ц} = T_{д.э}$ и обеспечив равенство $R_{13}K_{д.т.я}/(R_{12}K_{д.п}) = R_{я.ц}$, передаточную функцию датчика ЭДС можно представить как

$$W_{д.э}(p) = \frac{U_{д.э}(p)}{E_д(p)} = \frac{K_{д.э}}{T_{д.э}p + 1}, \qquad (58.50)$$

где $K_{д.э} = K_{д.п}R_{14}/R_{13}$ — статический коэффициент усиления датчика ЭДС; $K_{д.п}$ и $K_{д.т.я}$ — статические коэффициенты усиления соответственно датчиков напряжения *UV* и тока *UA* с учетом делителя напряжения на резисторах R_7, R_8, R_9 и шунта *RSM* в якорной цепи двигателя.

Так как при изменении направления вращения двигателя знак сигнала с выхода датчика ЭДС $U_{д.э}$ меняется на противоположный, в то время как знак сигнала задания на входе регулятора ЭДС $U_{з.э}$ меняться не должен, на выходе датчика ЭДС предусмотрен блок выделения модуля *UM*. Напряжение задания на входе регулятора ЭДС $U_{з.э}$ при равных сопротивлениях резисторов R_{11} и R_{10} выбирается равным выходному напряжению датчика ЭДС при номинальной ЭДС двигателя. Поэтому при скорости двигателя меньше номинального значения выходное напряжение интегрального регулятора ЭДС равно напряжению ограничения, установленному блоком *UQ*2. Последнее выбирается на уровне $U_{р.э.max} \approx K_{д.т.в}I_{в.ном}R_{15}/R_{16}$, где $K_{д.т.в}$ — статиче-

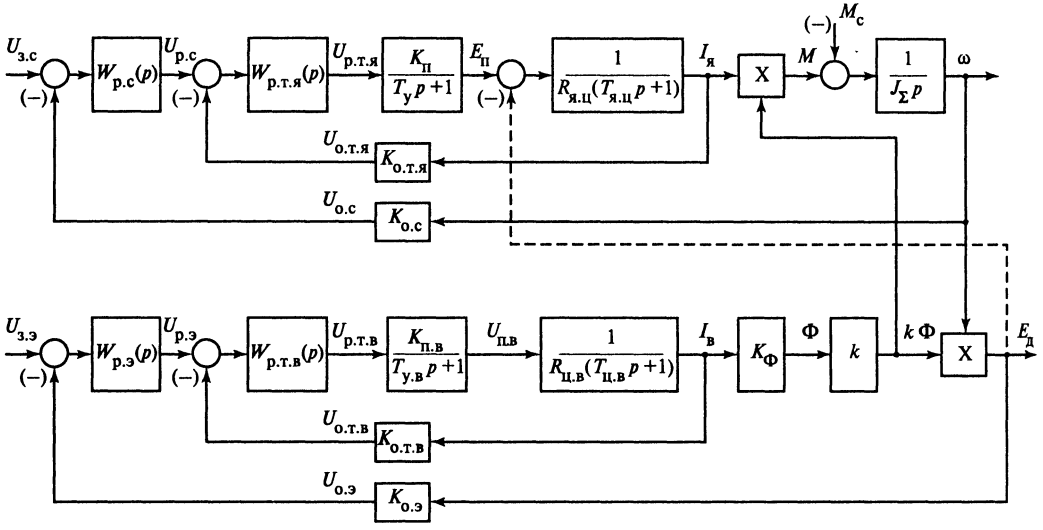


Рис. 58.42. Структурная схема системы двухзонного регулирования скорости

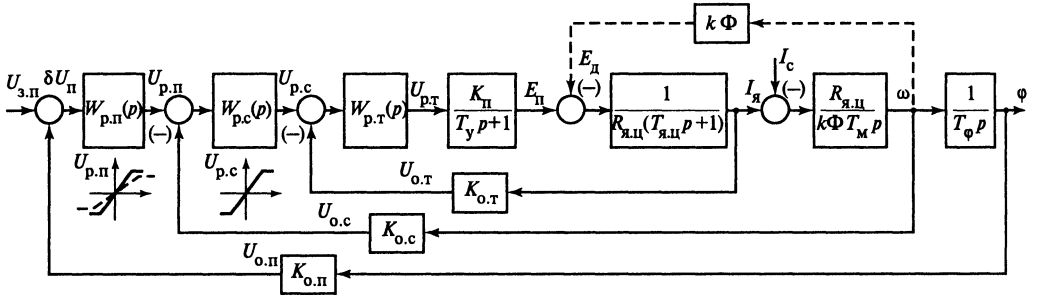


Рис. 58.43. Структурная схема системы регулирования положения

ский коэффициент усиления датчика тока возбуждения двигателя с учетом шунта *RSF*.

Обобщенная структурная схема двухзонной системы регулирования скорости без учета вихревых токов в магнитной цепи двигателя представлена на рис. 58.42. При работе двигателя с номинальным потоком контур регулирования скорости подобен контуру, изображенному на рис. 58.34. При этом типы и параметры регуляторов тока и скорости выбираются так же, как и в однозонной системе (см. рис. 58.33). Выбор типа и параметров внутреннего контура регулирования тока возбуждения двигателя выполняется также, как и в системе ИТ—Д. Принимая во внимание линеаризацию с коэффициентом передачи $K_{Ф max} = \Delta\Phi/\Delta I_в$ кривой намагничивания двигателя в зоне минимального потока двигателя и нелинейности, обусловленной произведением магнитного потока на скорость двигателя, а также учитывая, что $T_{д.э} = T_{я.ц}$ реально много меньше эквивалентной постоянной времени замкнутого контура регулирования тока возбуждения, получаем передаточную функцию регулятора ЭДС при настройке контура регулирования на технический оптимум

$$W_{р.э}(p) = 1/T_{и.э}p,$$

где $T_{и.э} = K_{о.э}kK_{Ф max}\omega_{max}a_э a_{Iв}T_μ/K_{о.т.в}$ — постоянная времени интегрирования регулятора ЭДС; $K_{о.э} = K_{д.э}R_{11}/R_{12}$ — коэффициент обратной связи по ЭДС двигателя с учетом приведения напряжений на входе регулятора ЭДС; ω_{max} — максимальная скорость двигателя при минимально допустимом потоке двигателя; $T_μ = T_{у.в}$; $a_э = 2—4$.

СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ

Структурная схема системы регулирования положения ЭП постоянного тока (рис. 58.43) содержит три контура регулирования: тока якоря и скорости двигателя (см. рис. 58.34) и внешний контур регулирования положения. Последний включает в себя передаточную функцию между скоростью

двигателя и положением рабочего механизма, например углом поворота φ его выходного вала,

$$W_{\varphi}(p) = \varphi(p)/\omega(p) = 1/T_{\varphi}p,$$

где T_{φ} — постоянная времени интегрирования объекта регулирования, канал обратной связи по положению с коэффициентом передачи $K_{\text{о.п}}$ и регулятор положения с передаточной функцией $W_{\text{р.п}}(p)$.

Ограничение выходных сигналов регуляторов скорости и положения обеспечивает ограничение максимального значения тока и скорости двигателя в режимах средних и больших перемещений рабочего механизма.

При задании малых перемещений, когда нет ограничений тока и скорости двигателя, и при настройке на модульный оптимум всех трех контуров регулирования в соответствии с (58.27) передаточная функция регулятора положения

$$W_{\text{р.п}}(p) = K_{\text{о.с}}/K_{\text{о.п}}a_{\text{п}}a_{\omega}a_{I}T_{\mu I} = K_{\text{р.п}}, \quad (58.51)$$

где $a_{\text{п}} = 2—4$; $T_{\mu I} = T_{\text{у}}$.

Передаточная функция замкнутого контура регулирования положения

$$W_{\text{р.п}}(p) = \varphi(p)/U_{\text{з.п}}(p) = 1/[K_{\text{о.п}}a_{\text{п}}a_{\omega}a_{I}T_{\mu I}p \times (a_{\omega}a_{I}T_{\mu I}p + 1) + 1].$$

При подобной настройке отработка малого ступенчатого управляющего воздействия $U_{\text{з.п}}$ на входе контура регулирования положения будет соответствовать кривым на рис. 58.28.

Если система регулирования работает в режиме ограничения скорости, то с учетом статической нагрузки на валу двигателя коэффициент передачи регулятора положения рекомендуется выбирать по соотношению [58.30]:

$$K_{\text{р.п}} = \frac{K_{\text{о.с}}}{K_{\text{о.п}}}\frac{2\varepsilon_{m\,\max}T_{\varphi}}{\omega_{\max}}\left(1 + \frac{I_{\text{ст}}}{I_{\text{я}\,\max}}\right),$$

где $\varepsilon_{m\,\max}$ — ускорение двигателя при максимально допустимом его токе якоря $I_{\text{я}\,\max}$, заданном уровнем ограничения выходного сигнала регулятора скорости; $\omega_{\max}$ — максимальная скорость двигателя, заданная уровнем ограничения выходного сигнала регулятора положения; $I_{\text{ст}}$ — статический ток нагрузки двигателя.

При конечном коэффициенте передачи регулятора скорости $K_{\text{р.с}}$ статическая погрешность контура регулирования положения при нагрузке на валу двигателя

$$\Delta\varphi_{\text{ст}} = I_{\text{ст}}K_{\text{о.т}}/(K_{\text{о.п}}K_{\text{р.п}}K_{\text{р.с}}).$$

Для систем регулирования положения режим малых перемещений не является характерным и выбор передаточной функции регулятора по (58.51) за счет ограничений во внутренних контурах регулирования тока и скорости не может обеспечить оптимальные динамические свойства системы. Поэтому статическая характеристика регулятора выполняется нелинейной с параболической зависимостью его коэффициента передачи от сигнала рассогласования δφ на входе регулятора:

$$U_{\text{р.п}} = K_{\text{о.с}}\sqrt{2\varepsilon_{m\,\max}T_{\varphi}\delta\varphi/K_{\text{о.п}}}.$$

При параболическом регуляторе заданное положение отрабатывается без перерегулирования.

ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Функциональная схема системы регулирования скорости асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором *M* при питании его от преобразователя частоты *UZF*, с управлением по вектору потокосцепления ротора двигателя представлена на рис. 58.44 [58.31]. Подобная система векторного управления (система Transvektor) впервые предложена фирмой

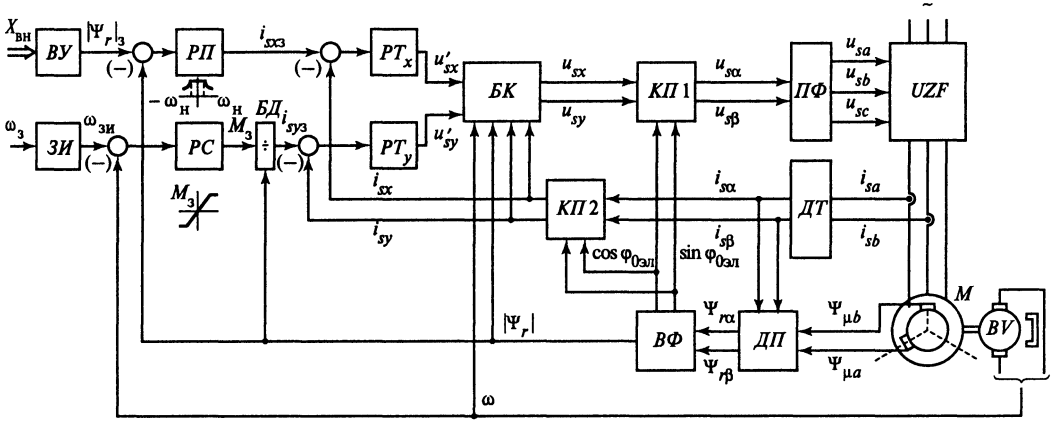


Рис. 58.44. Функциональная схема векторного управления асинхронным двигателем

«Siemens» (ФРГ). Система имеет два внешних контура регулирования: модуля вектора потокосцепления ротора $|\Psi_r|$ и угловой скорости ω ротора, а также два подчиненных им внутренних контура регулирования составляющих тока статора i_{1x} и i_{1y} в осях x и y ортогональной системы координат, вращающейся с синхронной скоростью $\omega_{0эл}$ поля двигателя. Система осуществляет независимое регулирование модуля вектора потокосцепления ротора и скорости ротора при сохранении прямой пропорциональности между моментом двигателя и составляющей намагничивающей силы статора, находящейся в квадратуре с волной потокосцепления ротора. Сигнал задания потокосцепления ротора $|\Psi_r|_3$ формируется в специальном вычислительном устройстве *ВУ*, использующем математическую модель АД и вводимые в нее реальные параметры двигателя: активные и реактивные сопротивления цепей статора и ротора, число пар полюсов, номинальные значения мощности, скорости, напряжения и тока статора, их частоту, КПД и мощности.

На рис. 58.44 вводимые параметры двигателя условно изображены совокупностью внешних сигналов $X_{вн}$ на входе *ВУ*. Внешний сигнал задания скорости двигателя $\omega_з$ подается на вход задатчика интенсивности *ЗИ*, формирующего темп изменения скорости двигателя в соответствии с требуемыми технологическими ограничениями.

Измерение текущих значений скорости, потокосцепления ротора и токов статора АД производится с помощью датчиков скорости (тахогенератор *BV*), потока *ДП* и тока *ДТ*.

Датчик потока преобразует измеренные с помощью датчиков Холла трехфазные мгновенные значения потока в воздушном зазоре $\Psi_{\mu a}$, $\Psi_{\mu b}$ в составляющие потока $\Psi_{\mu\alpha}$, $\Psi_{\mu\beta}$ в осях α, β ортогональной системы координат, жестко связанной с неподвижным статором двигателя, причем ось α совмещается с магнитной осью статорной обмотки фазы *A*:

$$\Psi_{\mu\alpha} = \sqrt{\frac{3}{2}}\Psi_{\mu\alpha};\ \Psi_{\mu\beta} = \sqrt{2}\left(\frac{1}{2}\Psi_{\mu\alpha} + \Psi_{\mu b}\right). \quad (58.52)$$

Кроме того, в *ДП* осуществляется вычисление составляющих потокосцепления ротора согласно соотношениям:

$$\Psi_{r\alpha} = \frac{L_r}{L_m}\Psi_{\mu\alpha} - (L_r - L_m)i_{s\alpha};$$

$$\Psi_{r\beta} = \frac{L_r}{L_m}\Psi_{\mu\beta} - (L_r - L_m)i_{s\beta},$$

где L_r и L_m — соответственно собственная индуктивность обмотки ротора и взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора, приведенные к цепи статора.

Датчик тока измеряет мгновенные значения фазных токов статора $i_{\backslash a}$, $i_{\backslash b}$ и аналогично датчику потока преобразует их в двухфазную систему переменных $i_{\backslash\alpha}$, $i_{\backslash\beta}$.

Преобразование переменных из неподвижной системы координат α, β в систему координат x, y, связанную с потокосцеплением ротора и вращающуюся со скоростью $\omega_{0эл}$, осуществляется вектор-фильтром *ВФ* и координатным преобразователем *КП1*. Вектор-фильтр выделяет модуль вектора потокосцепления ротора

$$|\Psi_r| = \sqrt{\Psi_{r\alpha}^2 + \Psi_{r\beta}^2}$$

и тригонометрические функции

$$\cos\varphi_{0эл} = \Psi_{r\alpha}/|\Psi_r|, \quad \sin\varphi_{0эл} = \Psi_{r\beta}/|\Psi_r|,$$

где $\varphi_{0эл} = \omega_{0эл}t$ — электрический угол поворота ротора относительно статора в осях x, y.

Преобразователь *КП2* осуществляет поворот вектора намагничивающей силы статора на угол $\varphi_{0эл}$ в соответствии с соотношениями, определенными через составляющие тока статора по осям x, y вращающейся системы координат:

$$i_{\backslash x} = i_{\backslash\alpha}\cos\varphi_{0эл} + i_{\backslash\beta}\sin\varphi_{0эл};$$

$$i_{\backslash y} = -i_{\backslash\alpha}\sin\varphi_{0эл} + i_{\backslash\beta}\cos\varphi_{0эл}.$$

Поскольку вектор потокосцепления ротора в системе координат x, y совмещен с действительной его осью x, т.е. $|\Psi_r| = \Psi_{rx}$, $\Psi_{ry} = 0$, то составляющая тока $i_{\backslash x}$ определяет магнитный поток двигателя, что по аналогии с двигателем постоянного тока сравнимо с действием тока в цепи его обмотки возбуждения. Составляющая тока $i_{\backslash y}$ определяет электромагнитный момент двигателя

$$M = \frac{3}{2}p_п\frac{L_m}{L_r}|\Psi_r|i_{\backslash y} \quad (58.53)$$

и подобна току в якорной цепи двигателя постоянного тока.

Задание на электромагнитный момент двигателя формируется выходным сигналом регулятора скорости *РС*, на входе которого сравниваются сигнал задания скорости $\omega_{ЗИ}$ с выхода *ЗИ* и сигнал, пропорциональный реальной скорости ω двигателя. Для поддержания постоянства электромагнитного момента при изменениях модуля потокосцепления ротора введен по (58.53) блок деления *БД* сигнала с выхода регулятора скорости на $|\Psi_r|$. На выходе блока деления формируется сигнал задания $i_{\backslash y з}$ составляющей тока статора $i_{\backslash y}$ по оси y.

Сигнал задания $i_{sxз}$ составляющей тока статора i_{sx} по оси x формируется на выходе регулятора потока *РП*, на входе которого сравниваются сигналы задания и реального значения модуля потокосцепления ротора.

Сигналы задания i_{sx3} и i_{sy3} сравниваются с текущими составляющими токов статора i_{sx} и i_{sy} на входах соответствующих регуляторов токов PT_x и PT_y, выходные сигналы которых определяют задания составляющих напряжений статора u_{sx} и u_{sy} в системе координат x, y.

Система дифференциальных уравнений, характеризующих динамические процессы в асинхронном двигателе при его векторном управлении в системе координат x, y, имеет вид [58.31]:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\mathrm{d}|\Psi_r|}{\mathrm{d}t} + \frac{R_r}{L_r}|\Psi_r| = k_r R_r i_{sx};\\
&(\omega_{0эл} - p_п\omega)|\Psi_r| = k_r R_r i_{sy};\\
&\frac{\mathrm{d}i_{sx}}{\mathrm{d}t} + \frac{R_s + k_r^2 R_r}{\sigma L_s} i_{sx} =\\
&= \omega_{0эл} i_{sy} + \frac{k_r R_r}{\sigma L_s L_r}|\Psi_r| + \frac{1}{\sigma L_s} u_{sx};\\
&\frac{\mathrm{d}i_{sy}}{\mathrm{d}t} + \frac{R_s + k_r^2 R_r}{\sigma L_s} i_{sy} =\\
&= -\omega_{0эл} i_{sx} + p_п\omega\frac{k_r}{\sigma L_s}|\Psi_r| + \frac{1}{\sigma L_s} u_{sy};\\
&J_\Sigma\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \frac{3}{2}p_п k_r|\Psi_r| i_{sy} - M_c,
\end{aligned}\right\} \quad (58.54)$$

где R_s, L_s — активное сопротивление и собственная индуктивность фазы обмотки статора; R_r — активное сопротивление фазы обмотки ротора, приведенное к статорной цепи; $k_r = L_m/L_r$; $k_s = L_m/L_s$; $\sigma = 1 - k_r k_s$.

При компенсации следующих составляющих в правых частях уравнений (58.54) за счет их умножения на σL_s: $\sigma L_s\omega_{0эл} i_{sy}$; $\dfrac{k_r R_r}{L_r}|\Psi_r|$; $-\sigma L_s\omega_{0эл} i_{sx}$ и без учета внутренней обратной связи по ЭДС двигателя (составляющей $p_п\omega k_r|\Psi_r|$), подобно ЭП постоянного тока, уравнение (58.54) может быть преобразовано к виду:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\mathrm{d}|\Psi_r|}{\mathrm{d}t} + \frac{R_r}{L_r}|\Psi_r| = k_r R_r i_{sx};\\
&\frac{\mathrm{d}i_{sx}}{\mathrm{d}t} + \frac{R_s + k_r^2 R_r}{\sigma L_s} i_{sx} = \frac{1}{\sigma L_s} u_{sx};\\
&\frac{\mathrm{d}i_{sy}}{\mathrm{d}t} + \frac{R_s + k_r^2 R_r}{\sigma L_s} i_{sy} = \frac{1}{\sigma L_s} u_{sy}.
\end{aligned}\right\} \quad (58.55)$$

На рис. 58.44 роль подобной компенсации выполняет блок *БК*, в который вводятся переменные i_{sx}, i_{sy}, $|\Psi_r|$, ω и в котором производятся соответствующие функциональные преобразования.

Преобразование составляющих напряжения статора u_{sx}, u_{sy} с выхода *БК* в составляющие $u_{s\alpha}$, $u_{s\beta}$ в осях α, β осуществляется блоком координатных преобразований *КП1* в соответствии с соотношениями:

$$u_{s\alpha} = u_{sx}\cos\varphi_{0эл} - u_{sy}\sin\varphi_{0эл};$$

$$u_{s\beta} = u_{sx}\sin\varphi_{0эл} + u_{sy}\cos\varphi_{0эл}.$$

В преобразователе фаз *ПФ* по соотношениям

$$u_{sa} = \sqrt{\frac{2}{3}}u_{s\alpha}; \quad u_{sb} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(-\frac{1}{\sqrt{3}}u_{s\alpha} + u_{s\beta}\right);$$

$$u_{sc} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(-\frac{1}{\sqrt{3}}u_{s\alpha} - u_{s\beta}\right)$$

формируются трехфазные синусоидальные сигналы u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}, определяющие на выходе преобразователя частоты *UZF* амплитуду и частоту напряжений питания обмоток статора двигателя.

Представив передаточную функцию преобразователя частоты совместно с блоками преобразования координат в виде инерционного звена

$$W_{ПЧ}(p) = U_{sx}(p)/u_{sx}(p) = U_{sy}(p)/u_{sy}(p) = K_п/(T_п p + 1),$$

где $K_п$ — эквивалентный статический коэффициент передачи между составляющими напряжений u_{sx}, u_{sy} управления преобразователем и составляющими в осях x, y выходных напряжений преобразователя U_{sx}, U_{sy}; $T_п$ — эквивалентная постоянная времени цепи управления преобразователем.

Уравнения (58.55) могут быть приведены к виду:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{|\Psi_r|(p)}{i_{sx}(p)} = \frac{k_r L_r}{T_{rэ}p + 1};\\
&\frac{i_{sx}(p)}{u_{sx}(p)} = \frac{K_п}{T_п p + 1}\,\frac{1}{R_\Sigma(T_{sэ}p + 1)};\\
&\frac{i_{sy}(p)}{u_{sy}(p)} = \frac{K_п}{T_п p + 1}\,\frac{1}{R_\Sigma(T_{sэ}p + 1)};\\
&M(p) = \frac{3}{2}p_п k_r|\Psi_r|(p) i_{sy}(p);\\
&\frac{\omega(p)}{M(p) - M_c(p)} = \frac{1}{J_\Sigma p}.
\end{aligned}\right\} \quad (58.56)$$

Здесь $R_\Sigma = R_s + k_r^2 R_r$ — результирующее сопротивление обмотки статора двигателя; $T_{sэ} = \sigma L_s/R_\Sigma$ — электромагнитная постоянная статорной цепи двигателя; $T_{rэ} = L_r/R_r$ — электромагнитная постоянная роторной цепи двигателя.

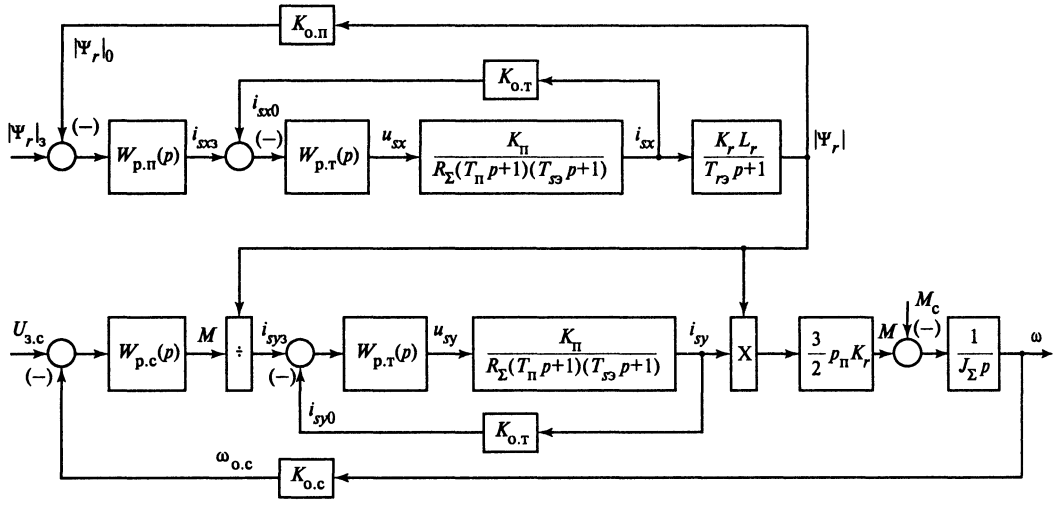


Рис. 58.45. Структурная схема системы векторного управления асинхронным двигателем

Упрощенная структурная схема системы векторного управления частотно-управляемым асинхронным ЭП в соответствии с (58.56) приведена на рис. 58.45. Схема содержит два одинаковых по параметрам внутренних контура регулирования составляющих i_{sx}, i_{sy} тока статора с коэффициентом обратной связи по току $K_{о.т}$, внешний контур регулирования потокосцепления ротора с коэффициентом обратной связи по потокосцеплению $K_{о.п}$ и внешний контур регулирования скорости двигателя с коэффициентом обратной связи по скорости $K_{о.с}$. Структурная схема подобна структурной схеме системы двухзонного регулирования скорости двигателя постоянного тока (см. рис. 58.42), поэтому при настройке контуров регулирования на модульный оптимум определение параметров передаточных функций регуляторов тока $W_{р.т}(p)$, потокосцепления $W_{р.п}(p)$ и скорости $W_{р.с}(p)$ выполняется аналогично:

$$W_{р.т}(p) = K_{р.т} + \frac{1}{T_{иI} p}; \quad W_{р.п}(p) = K_{р.п} + \frac{1}{T_{и.п} p};$$

$$W_{р.т}(p) = K_{р.с},$$

где $T_{иI} = \frac{K_{о.т} K_п}{R_Σ} a_I T_п$ — постоянная времени интегрирования ПИ-регулятора тока; $K_{р.т} = T_{эI} / T_{иI}$ — коэффициент передачи пропорциональной части регулятора тока; $a_I = 2—4$; $T_{и.п} = \frac{K_{о.п} K_r L_r}{K_{о.т}} a_п a_I T_п$ — постоянная времени интегрирования ПИ-регулятора потокосцепления ротора; $K_{р.п} = T_{rэ} / T_{и.п}$ — коэффициент передачи пропорциональной части регулятора потокосцепления ротора; $a_п = 2—4$; $K_{р.с} = 2J_Σ K_{о.т} / (3p_п k_r K_{о.с} a_ω a_I T_п)$ — коэффициент передачи пропорционального регулятора скорости; $a_ω = 2—4$.

58.5. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКОЙ (ФАЗЗИ-ЛОГИКОЙ)

Среди различных систем управления ЭП есть системы, формирующие алгоритм управления, основанный на законах классической логики и реализуемый с помощью релейных элементов и программируемых контроллеров. Такие логические системы управления, вырабатывая внешние команды на выполнение ЭП технологической задачи, относятся к верхнему, технологическому, уровню управления. Отдельные логические узлы могут входить и в состав систем управления ЭП нижнего, внутреннего, уровня, на котором формируются свойства собственно ЭП.

Логические системы управления ЭП верхнего и нижнего уровней управления могут строиться как на традиционной классической, жесткой логике, так и на нетрадиционной, нежесткой, так называемой фаззи-логике. Появившиеся относительно недавно системы с фаззи-логикой расширяют функциональные возможности управления и оказываются более эффективными, чем традиционные системы, в выполнении задач управления для ряда сложных, трудно описываемых, нелинейных объектов управления, среди которых имеют место и ЭП различного назначения.

Фаззи-логика. Получившая развитие в 60—70-х годах фаззи-логика дала новую ветвь управления в различных системах: технических, экономических, экспертных [58.32]. Системы управления, построенные на основе фаззи-логики, получили название ин-

теллектуальных систем управления. В этих системах моделируется не технический объект, а процесс мышления человека — процедура принятия им решения в форме:

ЕСЛИ (условие), ТО (заключение).

Так, процесс мышления водителя транспортного средства можно представить такой лингвистической формулой:

ЕСЛИ остановка *близка* И скорость *большая*, ТО рычаг торможения поставить в положение *сильное*.

Водитель, не зная всего устройства и математического описания поведения такой сложной технической системы, успешно реализует необходимый алгоритм управления ею. Требуемый алгоритм водитель предварительно вырабатывает в процессе обучения, уточняя его в последующем на опыте работы. Интеллектуальная система управления, заменяющая водителя, также должна быть «обучена», т.е. эксперт должен предварительно составить алгоритм управления — набор правил по приведенной выше форме. В приведенной лингвистической формуле отражено свойство ассоциативного мышления человека, в котором объединяются в единое понятие некоторые количественные множества. Так, понятие *большая* (скорость) применительно к городскому трамваю представилась бы водителю не одним конкретным числом, а множеством значений скоростей, возможно, вокруг 40—50 км/ч без четкого начала и конца этого множества. С такими ассоциированными понятиями — лингвистическими переменными имеет дело фаззи-логика, лежащая в основе интеллектуальных систем.

Фаззи-логика (Fuzzy logic), что в переводе с английского языка означает нежесткая, нечеткая, приближенная логика, представляет собой в математическом смысле новую ветвь теории множеств. Классическое понятие множества — это совокупность объектов, каждый из которых должен обладать или не обладать определенным свойством. Такое множество характеризуется только одним показателем для всех объектов и определенной границей. Например, множество значений физической переменной — летней температуры воздуха T в пределах от 4 до 12 °С включительно определено свойством *положительная низкая PS* (рис. 58.46, *а*). Тогда на вопрос: «Температура 11,9 °С есть *положительная низкая*?» следует дать ответ «Да», а для температуры 12,1 °С — ответ «Нет», хотя по существу эти два значения относятся практически к одному и тому же температурному состоянию воздуха. Здесь имеется противоречие между резким различием в качестве (свойстве) — *положительная низкая* (да), *не положительная низкая* (нет) и не резким различием в количестве: 11,9 и 12,1 °С. Фаззи-логика устраняет это противоречие, вводя новое понятие множества — фаззи-множество, являющееся фундаментальным понятием фаззи-логики.



Рис. 58.46. Графическое изображение классического множества (*а*) и фаззи-множества (*б*)

Фаззи-множество, в отличие от классического понятия множества, характеризуется двумя показателями: самим фактом принадлежности объекта (физической переменной) к множеству (свойству) и степенью (мерой) принадлежности к нему объекта. Зависимость $\mu(x)$, определяющая степень принадлежности значений физической переменной x к фаззи-множеству, называется функцией принадлежности. По своему виду $\mu(x)$ напоминает функцию распределения вероятности величины x с максимум плотности в точке $x = c$, где $\mu(c) = 1$, и с плавным уменьшением в обе стороны от 1 до 0, где переменная x теряет свою принадлежность к данному свойству (рис. 58.46, *б*). Фаззи-множества являются переменными фаззи-логики — лингвистическими переменными, называемыми термами, а функции принадлежности — их количественными оценками. На заданном экспертом по условию задачи числовом множестве X располагается ряд термов $A_1, A_2, \ldots, A_n$. Например, термам A_1, A_2, A_3, A_4 будут соответствовать температуры воздуха *нулевая Z*, *положительная низкая PS*, *положительная средняя PM*, *положительная высокая PB* (рис. 58.47). Сама суть фаззи-логики в ее нечеткости и приближенности обусловливает наличие участков перекрытия термов, где нарушается однозначность принадлежности переменной x одному терму. Выбор значения $\mu(x)$ на участке неоднозначности решается на основе принципов объединения фаззи-множеств.

В фаззи-логике используются известные операторы алгебры множеств: усреднение — конъюнкция (логическое И), объединение — дизъюнкция (логическое ИЛИ), инверсия (логическое НЕ). Данные операторы в фаззи-логике определяются через функции принадлежности:

для усреднения

$$K(\mu_1, \mu_2) = \mu_1 \wedge \mu_2 = \min(\mu_1(x), \mu_2(x))$$

— принцип минимума;

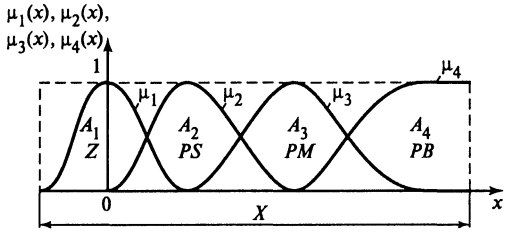


Рис. 58.47. Семейство фаззи-множеств физической переменной x

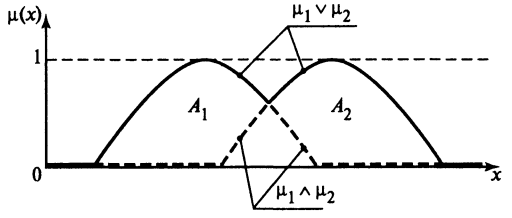


Рис. 58.48. Объединение двух фаззи-множеств по принципам максимума и минимума

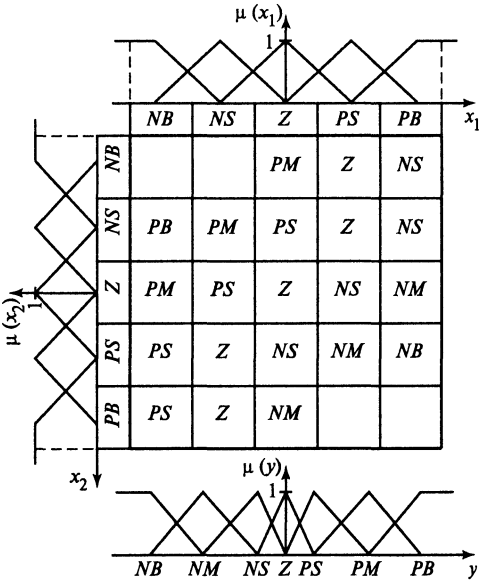


Рис. 58.49. Таблица правил и функции принадлежности входных x_1, x_2 и выходных y переменных

для объединения

$$D(\mu_1, \mu_2) = \mu_1 \vee \mu_2 = \max(\mu_1, \mu_2)$$

— принцип максимума;

для инверсии

$$\bar{\mu}(x) = 1 - \mu(x),$$

где символы $\wedge$, $\vee$, черта над буквой — означают соответственно конъюнкцию, дизъюнкцию, инверсию.

Операторы взаимосвязаны:

$$K(\mu_1, \mu_2) = 1 - D(\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2);$$

$$D(\mu_1, \mu_2) = 1 - K(\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2).$$

На рис. 58.48 сплошной линией отмечен результат объединения, а штриховой линией — усреднения двух фаззи-множеств.

Алгоритмы фаззи-управления и структура фаззи-регулятора. Приведенные выше операторы используются в алгоритмах управления на основе фаззи-логики. В состав алгоритма входит свод правил, в которых определяется взаимосвязь входных физических x и лингвистических A переменных с выходными физическими y и лингвистическими B переменными:

ЕСЛИ x есть A, ТО y есть B;

ЕСЛИ x_1 есть A_1 И x_2 есть A_2, ТО y есть B_i;

ЕСЛИ x_1 есть A_1 ИЛИ x_2 есть A_2, ТО y есть B_j.

Например, ЕСЛИ реактивный ток цеховой подстанции *положительный большой*, ТО ток возбуждения синхронного компенсатора дать *большой*;

ЕСЛИ температура воздуха в помещении *положительная низкая* И влажность *высокая*, ТО ток электронагревателя дать *средний*;

ЕСЛИ в котле давление *выше нормального* ИЛИ температура *очень высокая*, ТО топливный вентиль *закрыть*.

При этом значения функций принадлежности для выходных термов B, B_i, B_j определяются в указанных правилах по функции принадлежности входных термов на основании принципов минимума — максимума [58.33]. При двух входных x_1, x_2 и одной выходной y переменных алгоритм управления может быть представлен матрицей-таблицей и тремя семействами функций принадлежности переменных x_1, x_2, y (рис. 58.49). При n_1 термов для x_1 и n_2 — для x_2 максимальное число правил составит $n_1 n_2$. Пустые клетки в таблице означают отсутствие соответствующих правил. Треугольная и трапецеидальная формы функции принадлежности на рис. 58.49 наиболее часто применяемы из-за простоты описания и реализации. Латинские буквы в обозначениях термов означают: P — положительный, N — отрицательный, B — большой, M — средний, S — небольшой, Z — нулевой.

Процедура формирования управляющего воздействия на примере двух правил с двумя входными переменными представлена на рис. 58.50. Если в некоторый момент времени t_i известны два значения входных переменных $x_1(t_i) = \xi_1$ и $x_2(t_i) = \xi_2$, то по принципу минимума из двух функций при-

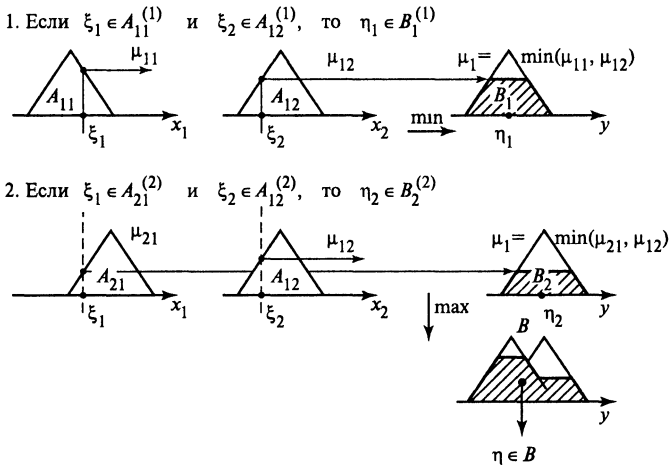


Рис. 58.50. График преобразования пары значений входных переменных в значение управляющего воздействия для двух правил

надлежности правила 1 меньшее значение μ_{12} переносится на выходной терм B_1, а из двух функций принадлежности правила 2 меньшее значение μ_{21} — на терм B_2. Оба выходных терма B_1 и B_2 объединяются по принципу максимума в единое усеченное фаззи-множество B. Значение управляющего сигнала $y(t_l) = \eta$ определяется как абсцисса центра тяжести площади B (правило Mamdani). Приближенно значение η подсчитывается по формуле:

$$\eta \approx \frac{\sum_{l=1}^{k} \mu_l \eta_l}{\sum_{l=1}^{k} \mu_l},$$

где $k \le 4$ — число одновременно действующих правил.

В целом алгоритм управления является законом регулирования для выполнения цели управления некоторым объектом — технической системой. Алгоритм представляет собой в конечном счете некоторую в общем случае нелинейную зависимость управляющего воздействия y от входных физических переменных $x_1, x_2, \ldots, x_n$.

Составление алгоритма выполняется итерационным способом поэтапно [58.34].

На этапе 1 определяется технологическая задача объекта управления и составляется его расчетная динамическая модель. При отсутствии математического описания объекта управления экспериментально оценивается его реакция на тестовые воздействия по каналам управления и возмущений. По результатам тестов составляется приближенная расчетная модель объекта управления. Уточняется задача управления.

На этапе 2 оцениваются возможные диапазоны изменения входных и выходных физических переменных фаззи-регулятора. Для данных диапазонов выделяются фаззи-множества — термы, выбирается их количество. С увеличением их числа качество управления повышается, однако при этом усложняется алгоритм и повышаются требования к быстродействию фаззи-регулятора.

На этапе 3 составляются правила для выполнения поставленной задачи управления.

На этапе 4 выбирается форма и устанавливаются параметры функций принадлежности для выделенных переменных.

На этапе 5 моделируется объект управления с фаззи-регулятором. Процесс отработки системой тестового задания сравнивается с желаемым процессом. Если процесс не намного отклоняется от желаемого, то выполняется тонкая настройка регулятора — корректируются параметры функций принадлежности без изменения правил. При большом отклонении процесса от желаемого может потребоваться грубая настройка регулятора — корректировка правил. После ряда итераций с соответствующей корректировкой, когда процесс отработки системой тестового задания становится близким к желаемому, процесс обучения системы закончен, и параметры алгоритма устанавливаются на действующий фаззи-регулятор.

Структура фаззи-регулятора с двумя входными переменными представлена на рис. 58.51. В отличие от традиционного регулятора в фаззи-регуляторе процесс преобразования физических входных переменных в управляющее воздействие осуществляется через три функциональных блока, работающих в соответствии с фаззи-логикой. Блок фаззификации *Ff* осуществляет преобразование перемен-

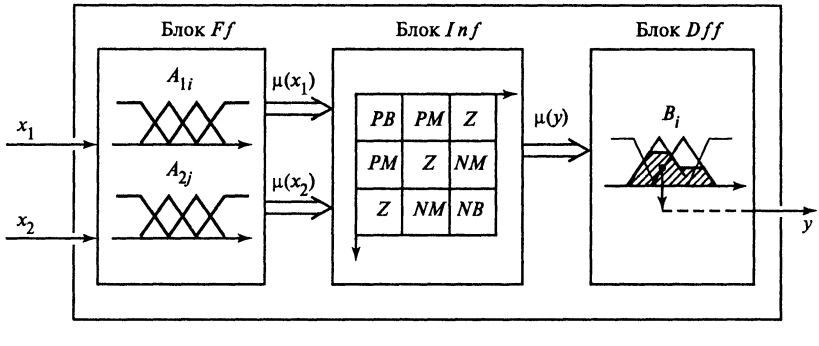


Рис. 58.51. Структурная схема фаззи-регулятора

ных x_1 и x_2 в значения их функций принадлежности $\mu(x_1)$, $\mu(x_2)$ к термам A_1, A_2. Блок логического заключения *Inf* преобразует на основе свода правил, записанных в памяти фаззи-регулятора, входные термы A_1, A_2 в выходные B с определенными значениями функций принадлежности $\mu(y)$. Блок дефаззификации *Dff* осуществляет обратное преобразование выходного терма B в физическое управляющее воздействие y.

Фаззи-управление в электроприводе. Среди особенностей фаззи-логики, характеризующих ее как способ управления, можно выделить следующие.

В фаззи-логике значениями логических переменных служат не отдельные конкретные числа, а числовые массивы — термы, поэтому фаззи-управление следует отнести к категории управления «в большом».

Фаззи-логика имитирует способ мышления человека в лингвистических терминах, поэтому для фаззи-управления не требуется строгое математическое описание объекта.

Принцип приближенности и компромисса в логических заключениях фаззи-логики означает, что фаззи-управление преобразует не приближенные числовые значения переменных (эти переменные могут измеряться с высокой точностью), а осуществляет приближенную стратегию управления.

Фаззи-управление способно создать любой необходимый для цели управления алгоритм, линейный или нелинейный, но он должен быть предварительно составлен экспертом-проектантом.

Отмеченные особенности позволяют очертить круг задач управления, которые могут эффективно решаться на основе фаззи-логики применительно к ЭП.

Фаззи-управление не подходит для построения высокоточных систем регулирования в ЭП. Однако может успешно использоваться для таких систем как дополнительное регулирующее средство в режимах отработки больших воздействий, когда могут проявляться нелинейности в системе и основной регулятор не обеспечивает приемлемое качество данных режимов.

Фаззи-управление целесообразно как средство стабилизации движения сложных нелинейных электромеханических систем, эффективно как средство приближенной параметрической адаптации в установках с изменяющимися параметрами. Более точные традиционные системы параметрической адаптации труднее реализуемы по условиям устойчивости.

Весьма перспективно применение фаззи-управления простыми ЭП регулирующих устройств сложных и трудно описываемых математически технологических процессов. Для таких объектов данное управление, реализуя необходимый алгоритм с учетом множества факторов, влияющих на процесс, позволяет его улучшать по различным показателям.

Управление на основе фаззи-логики, моделируя процесс мышления человека, может заменять его в управлении движением самоходных транспортных средств.

В системах водо-, тепло- и газоснабжения фаззи-управление позиционными ЭП регулирующих вентилей и задвижек оказывается эффективным не только на верхнем, технологическом, уровне, но и на нижнем уровне, обеспечивающем необходимые стабилизацию ЭП и точность позиционирования. Замена релейного трехуровневого управления (–1, 0, +1) с жесткой логикой на трех—пятиуровневое управление с «мягкой» фаззи-логикой повышает устойчивость и компенсирует статическое рассогласование ЭП в режиме позиционирования. В данном ЭП фаззи-регулятор *ФР*1 обеспечивает желаемую степень устойчивости, а *ФР*2 компенсирует статическую погрешность (рис. 58.52).

В структурной схеме ЭП сигнал статического рассогласования δ преобразуется через передаточный коэффициент K_δ во входную переменную рассогласования $x_1 = \Delta x$ и подается на верхние входы *ФР1* и *ФР2*. На нижние входы регуляторов подается сигнал угловой скорости рабочего органа $x_2 = \omega$.

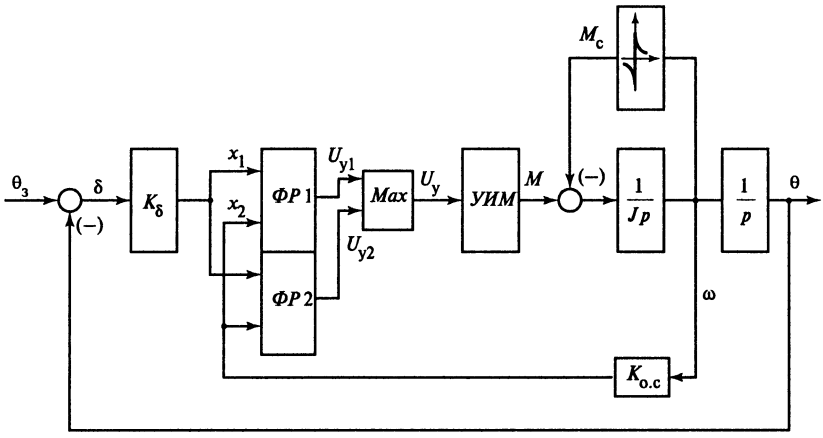


Рис. 58.52. Структурная схема позиционного ЭП с фаззи-управлением

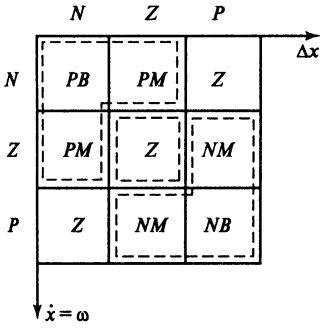
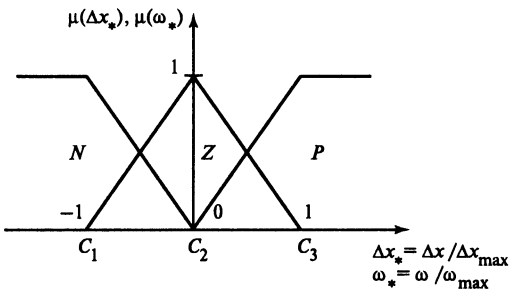
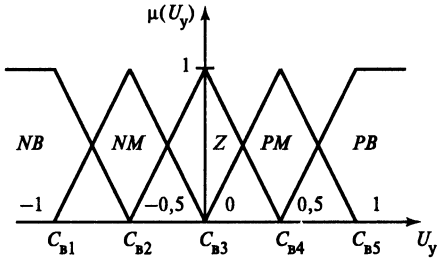


Рис. 58.53. Таблица правил для фаззи-регулятора *ФР*1





→

Рис. 58.54. Функции принадлежности для фаззи-регулятора *ФР*1

Выходные сигналы регуляторов U_{y1} и U_{y2} преобразуются через блок выделения максимума *Max* в управляющее воздействие U_y, подаваемое на вход управляемого источника момента *УИМ*.

Для *ФР*1 таблица правил и функции принадлежности приведены на рис. 58.53 и 58.54. Плавный процесс позиционирования при отсутствии *ФР*2 заканчивался бы при моменте нагрузки $M_c \neq 0$ остаточным рассогласованием, которое может быть значительным для данного класса механизмов с повышенным моментом трогания. Возникновение статического рассогласования при регулировании без интегрирования физически понятно. При подходе рабочего органа к остановке, когда рассогласование еще достаточно большое, а скорость уже весьма мала, рабочий орган останавливается, не доходя до заданного уровня остановки. Фаззи-регулятор *ФР*2 позволяет устранить или существенно уменьшить данное рассогласование. Для этого составленный для *ФР*1 алгоритм можно дополнить очевидным правилом, действующим только в зоне остановки [58.35]:

ЕСЛИ расстояние до остановки $|\Delta x|$ еще *достаточно велико EB* И скорость приближения к остановке ω уже *очень мала VS*, ТО управляющее воздействие U_y *достаточно малое* запрещено.

Для реализации данного правила в *ФР*2 используются фаззи-множества: *NEB* и *PEB* — для переменной Δx, *VS* — для переменной ω и *ES* — для выходной переменной U_{y2} с функциями принадлежностями соответственно $\mu(\Delta x)$, $\mu(\omega)$, $\mu(U_{y2})$ (рис. 58.55).

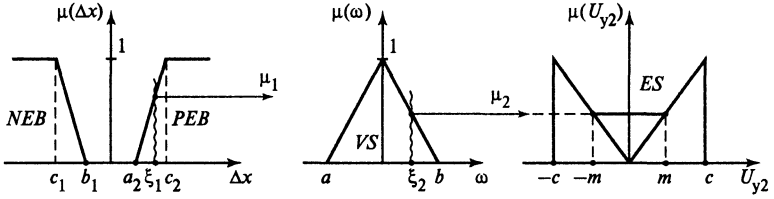


Рис. 58.55. Функции принадлежности для фаззи-регулятора *ФР2*

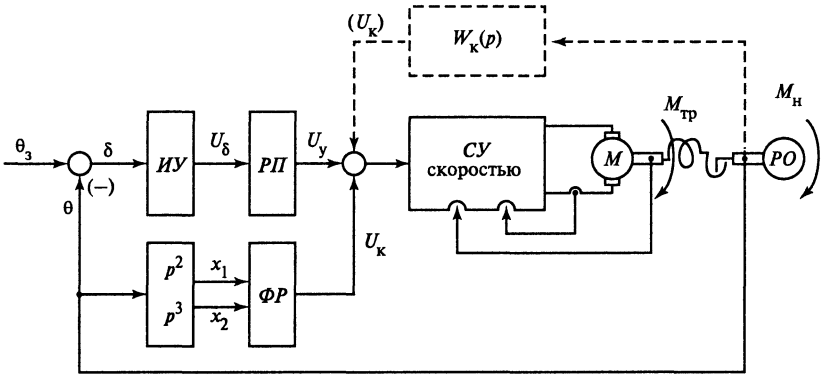


Рис. 58.56. Схема следящего ЭП с корректирующим фаззи-регулятором

В задачах улучшения динамических и точностных показателей электромеханических систем с нелинейностями или с изменяемыми параметрами фаззи-управление используется как дополнительный регулятор к штатному регулятору системы, как адаптивный регулятор, как наблюдающее устройство. В качестве исходного алгоритма для фаззи-регулятора отыскивается алгоритм, решающий поставленную задачу управления, но применительно к линеаризованной структуре системы. Далее алгоритм корректируется в направлении достижения желаемого качества регулирования с помощью итерационного моделирования и устанавливается на фаззи-регуляторе.

Например, используемая в тихоходных нелинейных следящих ЭП типовая структура подчиненного регулирования не обеспечивает стабилизацию режимов отработки больших воздействий, при которых проявляются нелинейности следящего ЭП [58.35]. Для стабилизации указанных режимов оказывается эффективным подключение дополнительно фаззи-регулятора *ФР* в параллель к основному регулятору положения *РП* (рис. 58.56). В основу построения алгоритма *ФР* положена параллельная коррекция $W_k(p)$, которая для линейного следящего ЭП повышает демпфирование резонансных механических колебаний. Свод правил для фаззи-регулятора *ФР* в форме таблицы представлен на рис. 58.57.

x_2 \ x_1	*NB*	*NS*	*Z*	*PS*	*PB*
NB	*PB*	*PB*	*PM*	*Z*	*NS*
NS	*PB*	*PM*	*PS*	*NS*	*NS*
Z	*PM*	*PS*	*Z*	*NS*	*NM*
PS	*PS*	*PS*	*NS*	*NM*	*NB*
PB	*PS*	*NS*	*NM*	*NB*	*NB*

Рис. 58.57. Таблица правил корректирующего фаззи-регулятора

Реализация фаззи-регуляторов. Фаззи-регулятор, реализующий составленный экспертом алгоритм, может быть выполнен одним из трех способов: аппаратным, аппаратно-программным и программным.

Аппаратный фаззи-регулятор, выполняемый на дискретных и аналоговых микросхемах, разрабатывался в основном японскими фирмами на начальном этапе развития фаззи-управления и его применения в некоторых электротехнических устройствах. Достоинство аппаратного фаззи-регулятора —

его высокое быстродействие из-за параллельного принципа действия Обработка одного правила в данном типе фаззи-регулятора на базе микросхем СБИС занимает около 100 нс, т е может быть обработано 10 млн правил за 1 с (например, фаззи-контроллер FUZ M1 фирмы «Omron») Недостатком аппаратного выполнения фаззи-регулятора является большое количество различных микросхем, что повышает его стоимость, а также отсутствие гибкости в управлении, т е невозможность без помощи аппаратных средств изменять алгоритм управления Поэтому вместо аппаратного объектно-ориентированного фаззи-регулятора на практике находит все большее применение более универсальный аппаратно-программный фаззи-регулятор, называемый фаззи-контроллером (FC)

Фаззи-контроллер имеет в своем составе аналоговые параллельные вычислители, а также другие микросхемы — фаззи-чипы (Fuzzy-Chips) — отлитые в кристалле элементы фаззи-логики, которые обеспечивают высокое быстродействие Аппаратно в FC могут выполняться на фаззи-чипах операции фаззификации и дефаззификации, а программно на основе микропроцессора обрабатываются правила, хранящиеся в памяти контроллера Применяемое программирование маскированием позволяет устанавливать необходимый алгоритм управления Быстродействие FC уступает быстродействию аппаратного фаззи-регулятора и составляет около 35 мкс на обработку одного правила (FC 110 фирмы «Togai» с процессором 80386 с частотой 10 МГц) Такое быстродействие FC свойственно разработкам 90-х годов С появлением процессоров нового поколения быстродействие FC существенно возрастает Выполняются FC ограниченно универсальными с конечным числом входов, выходов и правил Они находят применение для управления в различных технических системах, в том числе в некоторых транспортных установках, в бытовых машинах и приборах

Программный фаззи-регулятор выполняется на базе персонального компьютера (PC) с необходимым интерфейсом Такой фаззи-регулятор может рассматриваться как полностью универсальный фаззи-контроллер с произвольным числом входов, выходов и правил, он позволяет сформировать любой алгоритм Быстродействие программного фаззи-регулятора определяется временными возможностями собственно компьютера PC и его интерфейса Данный фаззи-регулятор, превосходя FC по универсальности, уступает ему по быстродействию Представляется целесообразным и перспективным использование программного фаззи-регулятора в тех технических системах, которые ориентированы на применение программного способа управления с цифровой ЭВМ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

58 1 **Елисеев В.А.** Релейно-контакторные системы управления электропривода М Изд-во МЭИ, 1995

58 2 **Справочник** по автоматизированному электроприводу / Под ред В А Елисеева и А В Шинянского М Энергоатомиздат, 1988

58 3 **Машиностроение.** Т IV-7 Металлорежущие станки и деревообрабатывающее оборудование Разд 4 Расчет и конструирование машин Энциклопедия / Под ред Б И Черпакова Отв ред П Н Белянин М Машиностроение, 1999

58 4 **Промежуточные** реле Справочник М Информэлектро, 1996

58 5 **Контакторы:** Справочник М Информэлектро, 1996

58 6 **Контакторы** и магнитные пускатели Справочник М Информэлектро, 1994

58 7 **Электромагнитные** пускатели Справочник М Информэлектро, 1996

58 8 **Выбор** электрических аппаратов для управления и защиты асинхронных двигателей / Е Г Акимов, Ю С Коробков, А А Чунихин и др М Изд-во МЭИ, 1997

58 9 **Выбор** электрических аппаратов для электропривода, электрического транспорта и электроснабжения промышленных предприятий / Е Г Акимов, Ю С Коробков, А В Савельев и др , Под ред А А Чунихина, Ю С Коробкова М Изд-во МЭИ, 1990

58 10 **Электротехнический** справочник В 4 т Т2 Электротехнические изделия и устройства / Под общ ред профессоров МЭИ В Г Герасимова и др — 8-е изд испр и доп М Изд-во МЭИ, 1998

58 11 **Каталоги** 07 12 20-97 и 07 12 21-97 М Информэлектро, 1997

58 12 **Ильинский Н.Ф.** Основы электропривода Учеб пособие для вузов М Изд-во МЭИ, 2000

58 13 **Ключев В.И., Терехов В.М.** Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов М Энергия, 1980

58 14 **Теория** систем с переменной структурой / С В Емельянов, В И Уткин, В А Таран и др М Наука, 1970

58 15 **Уткин В.И.** Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления М Наука, 1981

58 16 **Любимов А.Э.** Точное позиционирование в электроприводах с переменной структурой // Вестник МЭИ 1996 № 5 С 43—46

58 17 **Борцов Ю.А., Юнгер И.Б.** Автоматические системы с разрывным управлением Л Энергоатомиздат, 1986

58 18 **Политехнический** словарь / Гл ред И И Артоболевский М Советская энциклопедия, 1977

58 19 **Куо Б.** Теория и проектирование цифровых систем управления Пер с англ М Машиностроение 1986

58 20 **Wiener N.** Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series New York J Wiley, 1949

58.21. **Петров Ю.П.** Некоторые возможности систем управления и автоматизированного электропривода // Электричество. 1991. № 6. С. 73—76.

58.22. **Бесекерский В.А., Небылов А.В.** Робастные системы автоматического управления. М.: Наука, 1983.

58.23. **Ладыгин А.Н.** Управление тиристорными электроприводами постоянного тока с использованием прогнозирующих моделей // Электротехника. 1990. № 11. С. 19—23.

58.24. **Алферов В.Г., Ишханов П.Э., Хусаинов Р.М.** Введение прогнозирования в системы управления электроприводов позиционных механизмов // Вестник МЭИ. 1996. № 2. С. 23—28.

58.25. **Ключев В.И.** Теория электропривода: Учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1998.

58.26. **Унифицированные** системы автоуправления электроприводом в металлургии / В.К. Гарнов, В.Б. Рабинович, Л.М. Вишневецкий. М.: Металлургия, 1977.

58.27. **Рудаков В.В., Мартикайнен Р.П.** Синтез электроприводов с последовательной коррекцией. Л.: Энергия, 1972.

58.28. **Управление** вентильными электроприводами постоянного тока / Е.Д. Лебедев, В.Е. Неймарк, М. Я. Пистрак, О.В. Слежановский. М.: Энергия, 1970.

58.29. **Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф.** Общий курс электропривода: Учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1992.

58.30. **Решмин Б.И., Ямпольский Д.С.** Проектирование и наладка систем подчиненного регулирования электроприводов. М.: Энергия, 1975.

58.31. **Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г.** Управление электроприводами: Учебн. пособие для вузов. Л.: Энергоатомиздат, 1982.

58.32. **Терехов В.М., Владимирова Е.С.** Некоторые аспекты применения фаззи-управления в электроприводах // Электричество. 1999. № 9. С. 34—38.

58.33. **Mamdani E.H.** Application of Fuzzy Logic of Approximate Reasoning Using Linguistic Syntesis // IEEE Transactions on Computers, 1977, Vol. C-26, № 12. P. 1182—1194.

58.34. **Владимирова Е.С.** Синтез фаззи-регуляторов положения следящих и позиционных электроприводов // Электротехника. 2000. № 9. С. 9—14.

58.35. **Kiendl H., Scheel T.** Regelunstechnische Anwendung zweistrangiger Fuzzy-Regler: Fuzzy Logik. Teorie und Praxis. Berlin: Schpringerverlag. 1994. S. 413—421.

Раздел 59

ЭЛЕМЕНТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРИМЕРЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ (ЭП)

СОДЕРЖАНИЕ

59.1. Выбор основных компонентов электроприводов (ЭП) 225
59.2. Компьютерная поддержка проектирования 229
Общие положения (229). Прикладные программные пакеты (232).
59.3. Сертификация электроприводов 234
59.4. Промышленные электроприводы циклического действия 237
Общие сведения (237). Крановый электропривод (245). Электропривод лифтов (248). Электропривод экскаваторов (251).
59.5. Промышленные электроприводы непрерывного действия 252
Электропривод конвейеров (252). Определение статических нагрузок (253). Электропривод насосов, вентиляторов, компрессоров (259).
59.6. Электропривод систем транспортировки длинномерных гибких изделий 268
59.7. Вентильно-индукторный электропривод. 269
59.8. Электропривод бытовой техники 271
Общие положения (271). Особенности выбора и основные требования к электроприводам (272).
59.9. Энергосбережение в электроприводе и средствами электропривода 277
Список литературы 281

59.1. ВЫБОР ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ (ЭП)

Основой для проектирования электроприводов (ЭП), как и любого технического объекта, является техническое задание. В нем определяются назначение проектируемого ЭП, его показатели качества с соответствующими весовыми коэффициентами, а также условия и ограничения, которым должны соответствовать параметры и характеристики создаваемого ЭП.

Проектирование ЭП в общем случае представляет собой многовариантную задачу. Большое число ее решений определяется разнообразием возможных технических реализаций отдельных компонентов ЭП, структуры и параметров его системы управления и рядом других факторов. Наилучшее решение должно находиться с учетом интегральных показателей качества и опыта проектирования и эксплуатации аналогичных ЭП (прототипов).

Расчет мощности и выбор электродвигателей. Исходными данными для расчета мощности и выбора двигателей являются:

1) заданные нагрузочная диаграмма и диаграмма скорости движения (тахограмма) исполнительного органа рабочей машины. *Нагрузочная диаграмма* представляет собой зависимость от времени создаваемого исполнительным органом при своем движении момента $M_{и.о}(t)$ или усилия $F_{и.о}(t)$, а *диаграмма скорости* — требуемый график его скорости $\omega_{и.о}(t)$ или $\upsilon_{и.о}(t)$ при выполнении им технологической операции;

2) данные о моменте инерции или массе исполнительного органа рабочей машины;

3) условия окружающей среды;

4) условия компоновки электродвигателя с исполнительным органом рабочей машины;

5) вид, характер и параметры напряжения источника электроэнергии.

Расчет мощности и выбор двигателя должны производиться одновременно с выбором типа механической передачи и ее параметров. При этом за счет оптимизации передаточного отношения (радиуса приведения) механической передачи в некоторых случаях могут быть получены более высокие массогабаритные показатели ЭП, достигнуто максимальное ускорение движения исполнительного органа рабочей машины и решен ряд других задач [59.1—59.3]. В настоящем разделе рассматривается только расчет мощности и выбор двигателя при известных заранее (заданных) виде и параметрах механической передачи.

Выбор двигателя в общем случае представляет собой итерационный процесс и состоит из следующих этапов:

первый этап — расчет мощности двигателя;

второй этап — предварительный выбор двигателя и его проверка по перегрузке и условиям пуска;

третий этап — проверка выбранного двигателя по нагреву.

Сущность итерационного процесса состоит в том, что если параметры предварительно выбранного двигателя не соответствуют какому-либо из условий проверки, то производится выбор другого, как правило более мощного, двигателя и процесс выбора продолжается.

Первый этап. Расчетная мощность двигателя определяется по формуле:

$$P_{расч} = k_з M_{с.э} \omega_{уст},$$

где $M_{с.э}$ — эквивалентный приведенный к валу двигателя момент (статический) нагрузки; $k_з$ — коэффициент запаса, учитывающий динамические режимы электродвигателя; $\omega_{уст}$ — установившаяся скорость двигателя, соответствующая скорости движения исполнительного органа рабочей машины. Значения $M_{с.э}$ и $\omega_{уст}$ определяются по нагрузочной диаграмме и тахограмме движения исполнительного органа рабочей машины с помощью операции приведения (см. разд. 55 настоящего справочника).

Если момент нагрузки $M_с$ изменяется во времени и нагрузочная диаграмма имеет несколько участков, то $M_{с.э}$ определяется как среднеквадратическая величина

$$M_{с.э} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (M_{ci}^2 t_i)/t_ц},$$

где M_{ci}, t_i — соответственно момент и длительность i-го участка нагрузочной диаграммы; $t_ц$ — время рабочего цикла двигателя.

Второй этап. По каталогу выбирается двигатель ближайшей большей мощности и скорости. Выбираемый двигатель при этом должен по роду и значению напряжения соответствовать параметрам сетей переменного или постоянного тока или силовых преобразователей, к которым он подключается; по конструктивному исполнению — условиям его компоновки с исполнительным органом рабочей машины (ИОРМ) и способам крепления на рабочей машине, а по способу вентиляции и защиты от действия окружающей среды — условиям его работы.

Выбранный двигатель проверяется по перегрузочной способности. Для этого рассчитывается зависимость момента двигателя от времени $M(t)$, называемая *нагрузочной диаграммой двигателя*. Она строится с помощью уравнения механического движения, записанного в виде

$$M = M_с + J\,d\omega/dt = M_с + M_{дин}.$$

Динамический момент $M_{дин}$ определяется суммарным приведенным моментом инерции J и заданными ускорением на участке разгона и замедлением на участке торможения диаграммы скорости $\omega(t)$.

Далее производится сопоставление полученного из диаграммы требуемого максимального момента двигателя M_1 с максимально допустимым моментом двигателя M_{max}. Если выполняется соотношение $M_{max} \geq M_1$, то двигатель обеспечит заданный график скорости, если нет, то двигатель не способен реализовать заданный график скорости на участках переходного процесса.

Для двигателя постоянного тока обычного исполнения и синхронного двигателя $M_{max} = M_{доп} = (1{,}5—2{,}5)M_{ном}$, для асинхронного двигателя (АД) с фазным ротором этот момент может быть принят примерно равным критическому.

Выбор АД с короткозамкнутым ротором и синхронных двигателей должен сопровождаться также их проверкой по условиям пуска. Для этого производится сопоставление пускового момента двигателя $M_п$ с моментом нагрузки при пуске $M_{с.п}$. При выполнении условия $M_п > M_{с.п}$ пуск двигателя в ход возможен.

Если выбранный двигатель удовлетворяет всем перечисленным условиям, то далее осуществляется его проверка по нагреву.

Третий этап. Проверка двигателя по нагреву состоит в сопоставлении допустимой для него температуры с той, которую он имеет при работе. В современных двигателях применяются несколько классов изоляции, допустимая (нормативная) температура нагрева которой составляет: для класса А — до 105 °С, Е — до 120 °С, В — до 130 °С, F — до 155 °С, Н — до 180 °С, С — свыше 180 °С. Основными применяемыми в настоящее время классами изоляции являются В, F и Н.

При проверке двигателя по нагреву обычно оценивается не абсолютная его температура, а так называемый *перегрев* τ, который представляет собой разность температур двигателя $t°$ и окружающей среды $t°_{о.с} = 40$ °С:

$$\tau = t° - t°_{о.с}.$$

Двигатель будет работать в допустимом тепловом режиме при выполнении условия

$$\tau_{раб} < \tau_{доп},$$

где $\tau_{доп}$ — допустимый (нормативный) перегрев двигателя, определяемый классом его изоляции; $\tau_{раб}$ — перегрев при работе двигателя, в качестве которого при проверке выбирается средний или максимальный перегрев за время (цикл) работы двигателя.

Проверка этого условия может быть выполнена прямым или косвенными методами.

Прямой метод. Использование прямого метода предусматривает получение зависимости изменения перегрева двигателя во времени при его работе, для чего используются различные модели теплового режима двигателя. При использовании так называемой *одноступенчатой теории (модели) нагрева* двигатель рассматривается как однородное тело, имеющее бесконечно большую теплопроводность и одинаковую температуру во всех точках; теплоотдача во внешнюю среду принимается пропорциональной первой степени разности температур двигателя и окружающей среды; окружающая среда обладает бесконечно большой теплоемкостью, а теплоемкость двигателя и его теплоотдача не зависят от температуры. При этих условиях изменение перегрева

двигателя происходит по экспоненциальному закону в соответствии с выражением

$$\tau = (\tau_{нач} - \tau_{уст}) e^{-t/T_т} + \tau_{уст},$$

где $\tau_{уст} = \Delta P/A$ — установившееся превышение температуры двигателя, °С; ΔP — потери мощности в двигателе, Вт; A — теплоотдача двигателя, Дж/(с · °С); $T_т = C/A$ — тепловая постоянная времени нагрева или охлаждения двигателя, с; C — теплоемкость двигателя, Дж/°С; $\tau_{нач}$ — начальный перегрев двигателя, °С.

Процессы нагрева и охлаждения двигателей в общем случае характеризуются различными тепловыми постоянными времени, что определяется различными условиями теплоотдачи двигателя при его работе и отключении.

Постоянная времени охлаждения двигателя $T_о$ связана с постоянной времени нагрева $T_н$ следующим соотношением:

$$T_о = T_н/\beta_0,$$

где $\beta_0 = A_0/A$ — коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном роторе (якоре); A_0, A — теплоотдача соответственно при неподвижном двигателе и номинальной частоте его вращения.

Примерные значения коэффициента β_0 для двигателей:

с независимой вентиляцией	1,0
без принудительного охлаждения	0,95—0,98
самовентилирусмых	0,45—0,55
защищенных самовентилирусмых	0,25—0,35

Обычно постоянная времени нагрева двигателей лежит в пределах от нескольких минут до нескольких часов.

Из построенной по приведенным соотношениям кривой перегрева $\tau(t)$ находится его максимальное или среднее значение и проверяется выполнение условия нормального нагрева двигателя.

Косвенные методы не требуют построения графика $\tau(t)$ и предусматривают оценку теплового режима двигателя по косвенным показателям — средним потерям или эквивалентным величинам.

Сущность *метода средних потерь* заключается в определении средних потерь мощности $\Delta P_{ср}$ за цикл работы двигателя и сопоставлении их с номинальными потерями мощности $\Delta P_{ном}$. При выполнении условия

$$\Delta P_{ср} \le \Delta P_{ном}$$

средний перегрев двигателя не превысит допустимого. Номинальные потери мощности рассчитываются по формуле

$$\Delta P_{ном} = P_{ном}(1 - \eta_{ном})/\eta_{ном},$$

где $\eta_{ном}$ — номинальный КПД двигателя, а средние потери мощности — по формуле

$$\Delta P_{ср} = \frac{1}{t_ц} \sum_1^n \Delta P_i t_i,$$

где ΔP_i — потери мощности двигателя на i-м участке рабочего цикла; t_i — длительность i-го участка рабочего цикла; $t_ц$ — длительность рабочего цикла; n — количество участков в цикле.

Методы эквивалентных величин — тока, момента и мощности — основываются на методе средних потерь. *Метод эквивалентного тока* целесообразно использовать в том случае, когда известен график изменения тока двигателя во времени, который может быть получен расчетным путем или экспериментально.

Проверка двигателя по нагреву методом эквивалентного тока производится по формуле

$$\sqrt{\sum_1^n (I_i^2 t_i)/t_ц} = I_{экв} \le I_{ном},$$

где I_i — ток на i-м участке рабочего цикла.

Эта формула дает точную оценку среднего перегрева двигателя в случае, если постоянные потери не изменяются за цикл работы, а сопротивления электрических цепей двигателя остаются неизменными в цикле работы.

Проверка двигателей по нагреву методами *эквивалентных момента и мощности* производится соответственно по выражениям:

$$\sqrt{\sum_1^n (M_i^2 t_i)/t_ц} = M_{экв} \le M_{ном};$$

$$\sqrt{\sum_1^n (P_i^2 t_i)/t_ц} = M_{экв}\omega_{ном} = P_{экв} \le P_{ном},$$

где M_i, P_i — соответственно момент и мощность двигателя на i-м участке рабочего цикла.

В дополнение к указанным условиям применимости метода эквивалентного тока при использовании метода эквивалентного момента должно соблюдаться условие постоянства магнитного потока двигателя во всем цикле работы, а при использовании метода эквивалентной мощности — еще и постоянства скорости.

Работа двигателей по характеру изменения нагрузки на их валу, а значит, по виду их нагрева и охлаждения подразделяется на восемь режимов с условными обозначениями от S1 до S8. Основными являются режимы S1, S2 и S3.

Продолжительный номинальный режим работы S1 двигателя характеризуется неизменной нагрузкой в течение времени, за которое перегрев всех его частей достигает установившегося значения. Признаком режима S1 является выполнение условия $t_р > 3T_н$, где $t_р$ — время работы (включе-

ния) двигателя. Работа двигателя в режиме S1 может происходить с постоянной или переменной циклической нагрузкой.

Кратковременный номинальный режим S2 характеризуется чередованием периодов неизменной нагрузки с периодами отключения двигателя; при этом за время включения $t_р$ превышение температуры не достигает установившегося уровня, а за время отключения (паузы) $t_о$ все части двигателя охлаждаются до температуры окружающей среды. Стандартные значения продолжительности рабочего периода составляют 10, 30, 60 и 90 мин. Режим *S2* соответствует условиям $t_р < 3T_н$, $t_о > 3T_о$.

Промышленность выпускает специальные электродвигатели, рассчитанные для кратковременного режима работы. Основная их особенность заключается в повышенной перегрузочной способности, что позволяет полнее использовать их по нагреву.

Время работы этих двигателей нормируется и составляет 10, 30, 60 и 90 мин. Необходимо отметить, что двигатели, предназначенные для кратковременного режима работы, нецелесообразно использовать в продолжительном режиме из-за присущих им повышенных постоянных потерь мощности.

Повторно-кратковременный номинальный режим работы S3 характеризуется периодами $t_р$ нагрузки (рабочие периоды), которые чередуются с периодами $t_о$ отключения двигателя (паузами), причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышения температуры могли достигнуть установившихся значений. Этому режиму соответствуют условия $t_р < 3T_н$, $t_о < 3T_о$.

Этот режим характеризуется относительной продолжительностью включения двигателя, %,

$$ПВ = t_р/(t_р + t_о)100 = (t_р/t_ц)100.$$

Для повторно-кратковременного режима работы выпускаются специальные серии двигателей. В каталогах для них указывается номинальная мощность $P_{ном}$ при нормативной продолжительности включения $ПВ_{ном}$ = 15, 25, 40, 60 и 100 %. Длительность рабочего цикла $t_ц$ для них не должна превышать 10 мин, в противном случае двигатель считается работающим в продолжительном режиме.

Подробно проверка двигателей по нагреву для различных режимов их работы рассмотрена в [59.1, 59.2, 59.4, 59.5].

Выбор и проверка по нагреву резисторов в силовых цепях двигателей. Резистор выбирается по двум основным параметрам — сопротивлению и току, при этом его сопротивление должно равняться расчетному, а его номинальный ток соответствовать току двигателя при его работе.

Проверка резистора по нагреву обычно производится методом эквивалентного тока. Если расчетный эквивалентный ток не превышает номинального тока резистора, то его температура будет находиться в допустимых пределах. Подробно методы выбора и проверки резисторов по нагреву рассмотрены в [59.6, 59.7].

Выбор аппаратов коммутации, управления и защит. *Автоматические выключатели.* Эти аппараты выбираются по номинальным току и напряжению, роду тока, предельной коммутационной способности, электродинамической и термической стойкости, собственному времени включения. Все параметры автоматических выключателей должны соответствовать работе ЭП как в обычном, так и в аварийном режиме, а их конструктивное исполнение — условиям размещения.

При наличии в автоматических выключателях тепловой и максимальной защит, обеспечиваемых с помощью различного рода расцепителей, их уставка должна соответствовать уровням токов двигателя. Максимальная токовая защита не должна срабатывать при пуске двигателя, для чего ее уставка $I_{у.max}$ выбирается по соотношению

$$I_{у.max} \geq kI_{пуск},$$

где $I_{пуск}$ — пусковой ток двигателя; k = 1,5—2,2 — коэффициент, учитывающий вид расцепителя и возможный разброс тока его срабатывания относительно уставки.

Защита от перегрузки (тепловая защита) считается эффективной при следующем соотношении ее тока уставки $I_{у.т}$ и номинального тока двигателя $I_{ном}$:

$$I_{у.т} = (1{,}2—1{,}4)I_{ном}.$$

Предельной коммутационной способностью автоматического выключателя называют максимальное значение тока короткого замыкания, которое он способен отключить несколько раз, оставаясь исправным.

Электродинамическая стойкость характеризуется амплитудой ударного тока короткого замыкания, который автоматический выключатель способен пропустить, не получив повреждения.

Термическая стойкость характеризуется допустимым количеством теплоты, которое может быть выделено в автоматическом выключателе за время действия тока короткого замыкания.

Для определения соответствия этих параметров автоматических выключателей условиям работы ЭП должны быть предварительно определены токи короткого замыкания.

Электромагнитные аппараты (контакторы, реле, магнитные пускатели). К числу показателей, по которым они выбираются, относятся вид и значение напряжений главной цепи и цепи управления (включающих обмоток); коммутационная способность контактов и их количество; допустимая частота включений; режим работы; категория раз-

мещения; степень защиты от воздействия окружающей среды.

Дополнительно к этому реле, выполняющие функции управления и защиты, выбираются по роду входной воздействующей величины (ток, напряжение, мощность), выдержке времени (реле времени), коэффициенту возврата, времени срабатывания и отпускания.

Выключатели и переключатели. Эти аппараты выбираются по роду и значению напряжения, току нагрузки, количеству переключений, которое они допускают по условиям механической и электрической износостойкости, а также по конструктивному исполнению.

Кнопки и ключи управления выбираются по роду и уровню напряжения, значению коммутируемого тока, количеству коммутируемых цепей, степени защиты и климатическому исполнению, электрической и механической износостойкости.

Предохранители. Выбор плавкой вставки предохранителя производится по отношению ее тока к пусковому току двигателя, которое должно быть таким, чтобы вставка не перегорала при его пуске. Для АД с короткозамкнутым ротором ток плавкой вставки $I_{п.в}$ при времени пуска до 5 с должен быть равен:

$$I_{п.в} = I_{пуск}/2{,}5,$$

а при времени пуска больше 5 с

$$I_{п.в} = I_{пуск}/(1{,}6—2).$$

Для АД с фазным ротором и двигателей постоянного тока (ДПТ) обычного исполнения ток плавкой вставки рассчитывается по отношению к номинальному току:

$$I_{п.в} \geq (1—1{,}25)I_{ном}.$$

Для защиты цепей управления ток плавкой вставки выбирается из условия

$$I_{п.в} = 2{,}5I_{с},$$

где $I_{с}$ — суммарный ток обмоток максимального количества одновременно включенных аппаратов в схеме управления.

Реле максимального тока. Уставка тока при защите АД с короткозамкнутым ротором выбирается из соотношения:

$$I_{у.т} = (1{,}2—1{,}3)I_{пуск},$$

а для АД с фазным ротором и ДПТ

$$I_{у.т} = (2—2{,}5)I_{ном}.$$

Силовые полупроводниковые преобразователи. Эти электротехнические устройства выбираются по характеру и номиналу входного и выходного напряжения; диапазону регулируемой переменной на выходе преобразователя (напряжения, частоты); допустимой перегрузке по току. Конструктивное исполнение преобразователя должно обеспечивать требуемую степень защиты от воздействий окружающей среды, соответствовать категории его размещения, температуре и влажности окружающего воздуха, уровням вибрации и высоте над уровнем моря. Подробнее выбор силовых преобразователей рассмотрен в последующих разделах настоящего справочника.

59.2. КОМПЬЮТЕРНАЯ ПОДДЕРЖКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Проектирование электропривода в общем случае представляет собой сложную задачу, успешное решение которой зависит от правильного выбора всех его составляющих. Проектирование системы управления (СУ) является отдельным этапом проектирования, и после ее выбора на основании технико-экономических расчетов определяются ее параметры, выбираются обратные связи и определяются коэффициенты усиления, выбираются датчики, регуляторы и т.д. Этап проектирования СУ включает в себя также формирование электромеханических (механических) характеристик ЭП с замкнутой СУ, формирование динамических характеристик ЭП, разработку принципиальной схемы управления, схем электрических соединений и подключений и т.д. При проектировании СУ ЭП особое место занимает анализ динамических режимов, который позволяет определить временные зависимости координат электропривода, время и характер протекания переходных процессов в отношении соответствия их технологическому режиму работы механизма; оценить допустимость возникающих в динамических режимах значений момента, ускорения, тока, которые определяют механические и электрические перегрузки в электроприводе; произвести правильный выбор мощности двигателя и аппаратуры управления и т.д.

Анализ динамических режимов как линейных, так и нелинейных СУ ЭП производится с помощью дифференциальных уравнений, составленных по звеньям системы или по передаточной функции, полученной из структурной эквивалентной схемы.

Если в качестве управляющего устройства в СУ ЭП используется микроЭВМ или микропроцессорная система, т.е. когда в канале управления хотя бы один сигнал становится цифровым, необходим переход к анализу модели, которая описывается системой уравнений, связывающих между собой дискретные входные и выходные переменные. При этом получение дискретной модели СУ ЭП основано на непосредственном переходе от системы дифференциальных уравнений, описывающих непрерывную систему, к системе разностных уравнений, что возможно в случае, если интервал дискретиза-

ции по времени на порядок меньше самой малой постоянной времени непрерывнои системы

Существует большое разнообразие методов решения дифференциальных уравнений любого порядка классический, частотный, графоаналитический и т д Но наиболее эффективным и наглядным и с минимальными затратами времени для получения результатов является метод анализа динамических режимов СУ ЭП с использованием ЭВМ

Для решения дифференциальных уравнений на компьютере используются языки высокого уровня Fortran, C, Pascal и т д Как правило, все задачи, связанные с анализом динамических режимов системы ЭП, сводятся к решению задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений Инструментарием решения системы дифференциальных уравнений различного порядка являются либо метод Эйлера, либо широко распространенный метод Рунге—Кутта с фиксированным шагом интегрирования Несмотря на то что метод Рунге—Кутта не самый быстрый, программа с его использованием почти всегда справляется с поставленной задачей Главным преимуществом использования языков высокого уровня при анализе динамических режимов СУ ЭП является «прозрачность» программы, полное соответствие математического описания системы строкам программы, на которых это описание отражено Вместе с тем необходимость знания того или иного языка, причем на достаточно высоком уровне, тонкостей программирования, сложность задания и изменения начальных условий при отладке (что иногда требует использования дополнительных подпрограмм) вызывает затруднения при использовании универсальных языков И, наконец, еще одна, пожалуй, важнейшая проблема Во всех случаях при анализе динамики ЭП интерес представляет не только количественная оценка эффективности системы, но и ее поведение в тех или иных условиях Для такого наблюдения исследователь должен располагать соответствующими «смотровыми окнами», которые можно было бы при необходимости закрыть, перенести на другое место, изменить масштаб и форму представления наблюдаемых характеристик и т д , причем не дожидаясь окончания текущего модельного эксперимента

Реализация таких возможностей на универсальном языке программирования — дело очень непростое

Вместе с тем в настоящее время для эффективного решения указанных проблем все чаще и чаще используются продукты компьютерных технологий специальные математические программы типа Mathematika, MatLab, Mapl, Simnon, MatCad, Gauss и др [59 8—59 12] Математические пакеты MatLab, MatCad, Simnon (наиболее популярные из перечисленного списка) позволяют специалистам в любой научно-технической области вообще и в электроприводе в частности освоить работу на компьютере и реализовать на них различные математические модели, не вдаваясь в тонкости программирования на традиционных языках высокого уровня

MatCad (программный продукт фирмы «MathSoft») — полноценное Windows-приложение, позволяющее решать довольно широкий круг проблем без вызова внешних процедур, в том числе выполнять

решение алгебраических уравнений и систем (линейных и нелинейных),

решение обыкновенных дифференциальных уравнений и систем (задача Коши и краевая задача),

решение дифференциальных уравнений в частных производных,

статистическую обработку данных (интерполяция, экстраполяция, аппроксимация и т д),

работу с векторами и матрицами (линейная алгебра),

поиск максимумов и минимумов функциональных зависимостей

По желанию пользователя можно воспользоваться справочником по основным математическим и физико-химическим формулам и константам с автоматическим их переносом в документ Кроме того, система MatCad предоставляет пользователю средства анимации, что позволяет реализовать исследуемые модели не только в статике (файлы результатов, таблицы, графики), но и в динамике (анимационные клипы) Особенностью среды MatCad является запись математических выражений в их общепринятой нотации числитель находится вверху, а знаменатель — внизу, пределы интегрирования в интеграле также расположены на своих привычных местах, что делает программу понятной не только для компьютера, но и для пользователя И, пожалуй, еще одной особенностью характеризуется среда MatCad процесс создания программы идет параллельно с ее отладкой Пользователь, введя в документ новое выражение, может не только сразу вычислить, чему оно равно при заданных значениях переменных, но и построить график или поверхность, анализ которых может показать, где кроется ошибка, если она была допущена при вводе формул или при создании самой модели объекта исследования И, наконец, в систему MatCad интегрированы средства символьной математики, что позволяет решать задачу или ее часть не только численно, но и аналитически

Simnon (программный продукт шведской фирмы SSPA System) — универсальный пакет для решения самых разнообразных задач в области математики, электротехники, механики и др , который постоянно совершенствовался от версии к версии Simnon широко применяется во всем мире в промышленности для моделирования систем управле-

ния. Типичные проблемы — это позиционирование, управление электродвигателями, энергосистемами, АСУ ТП, робототехника и т.п.

Начальная версия Simnon была разработана Hilding Elmqvist (Department of Automatiq Control, Lund, Швеция) в 1972 г. Сегодня Simnon существует в двух глобальных версиях: для MS-DOS и Windows.

Simnon — это программа, которая предназначена для решения:

алгебраических уравнений и систем (линейных и нелинейных);

обыкновенных дифференциальных уравнений и систем (задача Коши и краевая задача);

дифференциальных уравнений в частных производных;

разностных уравнений, записанных в рекуррентной форме через значения функций или их разности и др.

Simnon распространяется в нескольких вариантах, каждый их которых предназначен для определенного круга пользователей. Например, Regular — наиболее общая и полная версия, способная решать объемные задачи. A Student Version функционально совпадает с первой, но имеет ограничения по вычислительной мощности и служит для решения задач обучения в школах и университетах. Real Time Capability, поддерживающая аналогово-цифровой ввод-вывод в реальном времени, позволяет реализовать обмен данными с реальными системами, управление процессами и техническими средствами или моделирование физических процессов. Современные версии Simnon позволяют обмениваться данными с пакетами MatLab и MatCad.

При моделировании динамических систем последние описываются как взаимосвязные подсистемы, поведение которых может быть описано дифференциальными или разностными уравнениями. Simnon поддерживает три типа систем:

1. Непрерывные (дифференциальные и алгебраические уравнения). Простые дифференциальные уравнения — простейшая форма представления динамических систем. Общая форма записи таких уравнений, как известно, имеет вид

$$\mathrm{d}\boldsymbol{x}/\mathrm{d}t = f(\boldsymbol{x}, t),$$

где $\boldsymbol{x}$ — вектор статических переменных.

2. Дискретные (разностные и алгебраические уравнения). Общая форма записи разностных уравнений может быть представлена следующим известным выражением:

$$\boldsymbol{x}(t_{k+1}) = f(\boldsymbol{x}(t_k), t_k), \quad k = 1, 2, \ldots,$$

где t_k, $k = 1, 2, \ldots$, — последовательность дискретных моментов времени (времена выборки); $\boldsymbol{x}$ — вектор статических переменных.

3. Системы связи, соединяющие входы и выходы подсистем модели в любом их сочетании. Общая форма записи непрерывной системы

$$\mathrm{d}\boldsymbol{x}/\mathrm{d}t = f(\boldsymbol{x}, t),$$

$$\boldsymbol{y} = g(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}, t),$$

где $\boldsymbol{u}$ — вектор входов; $\boldsymbol{y}$ — вектор выходов и $\boldsymbol{x}$ — вектор статических переменных.

Представленная система описывается в Simnon как Continuous System.

Аналогичная форма для дискретных систем:

$$\boldsymbol{x}(t_{k+1}) = f(\boldsymbol{x}(t_k), t_k),$$

$$\boldsymbol{y}(t_k) = g(\boldsymbol{x}(t_k), \boldsymbol{u}(t_k), t_k),$$

$$k = 1, 2, \ldots$$

Подобная система описывается как Discrete System. В Simnon статические переменные дискретных систем представляются как кусочно-непрерывные функции времени, которые изменяют значения в моменты, соответствующие временам выборок.

Связь между подсистемами, представленными выше, описывается в Simnon как Connecting System.

Инструментарием для решения дифференциальных уравнений (систем) различного порядка в Simnon являются известные методы: Дерманда—Принса, Эйлера и Рунге—Кутта. За исключением метода Эйлера, два других имеют автоматический контроль шага (у метода Эйлера фиксированный шаг интегрирования). По умолчанию используется метод Рунге—Кутта. Важной особенностью пакета является возможность моделирования и анализа различного рода нелинейностей, которые довольно часто встречаются в математическом описании систем управления.

Simnon имеет интерактивное исполнение, которое позволяет пользователю легко работать с системой. Пользователь общается с системой посредством команд. Параметры, начальные условия и описания системы могут быть изменены интерактивно. Результаты представляются в графическом или цифровом виде с сохранением данных в виде файлов с таблицами. Формат может быть легко модифицирован, а результаты сохранены в виде жесткой копии. Естественно, Simnon можно использовать и для простых случаев нахождения решений соответствующих уравнений.

MatLab (сокращение от Matrix Laboratory — матричная лаборатория) разработана фирмой «The MathWorks, Inc.» (США, г. Нейтик, штат Массачусетс). MatLab является интерактивной системой для выполнения инженерных и научных расчетов, ориентированной на работу с массивами данных и предназначена:

для выполнения операций с векторами, матрицами и массивами данных;

для реализации сингулярного и спектрального разложения,

для вычисления ранга и чисел обусловленности матриц,

для поддержки работы с алгебраическими полиномами,

для решения нелинейных уравнений и задач оптимизации, интегрирования в квадратурах,

для решения дифференциальных и разностных уравнений,

для построения различных видов графиков, трехмерных поверхностей и линий уровня

Первоначальная версия системы была написана в начале 80-х годов на языке Fortran Современная версия системы MatLab разработана и поддерживается фирмой «The MathWorks, Inc » По мере ее усовершенствования система помимо выполнения функций матричной лаборатории стала служить мощным средством решения разнообразных прикладных задач, причем структура пакета позволяет эффективно сочетать два основных подхода к созданию модели — аналитический и имитационный MatLab предоставляет пользователю богатейшую библиотеку функций и инструментальных приложений (как стандартных решение дифференциальных и алгебраических уравнений, интегральное исчисление, символьные вычисления, так и нетрадиционных средства цифровой обработки изображений, поиск решений на основе нечеткой логики, аппарат построения и анализа нейронных сетей и т д) Особенностью пакета является динамический обмен данными между системой MatLab и популярными офисными продуктами фирмы «Microsoft» — MS Word и MS Excel

Особое место среди инструментальных приложений занимает система визуального моделирования *Simulink*, которую в принципе можно рассматривать как самостоятельный продукт фирмы «The MathWorks, Inc », однако он работает только при наличии пакета MatLab и использует многие функции, входящие в его состав

В качестве составляющих для построения S-модели используются модули, хранящиеся в библиотеке Simulink Блоки, включаемые в создаваемую модель, могут быть связаны как по информации, так и по управлению Тип связи зависит от типа блока и логики работы модели Данные, которыми обмениваются блоки, могут быть скалярными величинами, векторами или матрицами произвольной размерности Наряду с другими параметрами моделирования пользователь может задавать способ изменения времени при исследовании модели (с постоянным или переменным шагом), а также условия окончания моделирования В ходе моделирования пакет предоставляет пользователю возможность наблюдать за процессами, происходящими в системе Любые характеристики модели, интересующие пользователя, могут быть представлены как в числовой, так и в графической форме

ПРИКЛАДНЫЕ ПРОГРАММНЫЕ ПАКЕТЫ

Наряду с мощными универсальными компьютерными программами, поддерживающими широкий спектр инженерно-технических задач, существует большое количество прикладных объектно-направленных программных пакетов, ориентированных на разные стороны инженерной деятельности в области электропривода Такие пакеты относятся к электрическим двигателям, трансмиссиям (ременные передачи, соединительные муфты и др), подшипниковым узлам, преобразователям частоты и др

Назначение подобных программ в области электрического привода можно разделить на следующие основные группы

проектирование компонентов электропривода,

выбор компонентов электропривода,

оценка эффективности эксплуатации электропривода и его отдельных узлов

Проектирование компонентов электропривода. К этой группе относятся программные пакеты, разрабатываемые с использованием универсальных программ Применение их оказывается полезным в случае разработки компонентов электропривода нового типа (двигателей, механических передач и пр), отвечающих заданным техническим требованиям

Пример. *Программа ВИП-дизайн* — проектирование вентильно-индукторного электропривода Разработанная в МЭИ в конце 90-х годов программа предназначена для разработки эскизных проектов вентильно-индукторного привода различного назначения в диапазоне мощностей 0,5—50 кВт и включает в себя этапы

предварительного выбора основных размеров,

уточнения геометрии магнитной системы и параметров обмотки,

моделирования процессов на такте коммутации с целью уточнения средних значений выходных величин,

расчета нагрузочных и регулировочных характеристик электропривода с возможностью корректировки закона управления,

выбора варианта силовой схемы и номиналов ее основных элементов

Выбор компонентов электропривода. Большая часть программ, относящихся к этой группе, предназначена для оптимального выбора оборудования, входящего в электропривод

Программы содержат большие базы данных по основным параметрам оборудования, а также условия оптимального выбора — критерии, ограничения и т п Ниже приводятся примеры таких программ

Примеры. Американская программа MotorMaster, инициированная в начале 90-х годов производителями энергоэффективных двигателей, имеющих за счет увеличения массы активных материалов при соответственно большей стоимости повышенный на 1—5 % номинальный КПД Программа, выпущенная в 1992 г при поддержке Министерства энергетики США (версия 1 0 DOS) [59 13], содержала каталог двигателей, выпускаемых ее инициаторами, и позволяла оценить целесообразность их использования (срок окупаемости) вместо стандартных двигателей

Выпущенная в 1996 г новая версия программы (MotorMaster+, версия 1 0 Windows) имеет прежние цели, но существенно расширена (двигатели мощностью 1—300 кВт) и более удобна в применении Она предназначена для пользователей электродвигателей, фирм, торгующих двигателями, разработчиков двигателей и оборудования с их использованием, а также государственных организаций, связанных с энергосбережением

Известны и другие попытки создания аналогичных пакетов программ

пакет фирмы «VEM Antriebstechnik» (Германия) для выбора двигателя и других компонентов электропривода,

пакет OPAL (Швейцария) для выбора двигателей и расчета режимов привода, предполагающий сложные процедуры моделирования и идентификации,

пакет CTSizing (фирма «Control Techniques», США), позволяющий инженерам определить главные характеристики механической системы привода, а также осуществить правильный выбор соответствующих компонентов привода для любого конкретного применения Программа содержит базы данных двигателей (0,37—15 кВт) и преобразователей (0,75—110 кВт) и включает в себя этапы

определение элементов механической части привода и условий работы,

определение свойств выбранных элементов,

определение связей между элементами,

задание диаграммы движения, характерного для данного применения,

анализ результатов

Программа позволяет инженерам воспроизвести конфигурацию системы электропривода, используя стандартные инструменты рабочей панели Параметры выбранных компонентов могут быть легко заданы с помощью соответствующих диалоговых окон и сохранены в отдельных файлах

В 90-х годах по заказу европейской фирмы IMOFA (Нидерланды) в России в МЭИ разработан пакет прикладных программ, рационализирующий проектирование новых и проверку уже установленных электроприводов с асинхронными короткозамкнутыми двигателями мощностью 0,37—18,5 кВт, выполненными по европейскому стандарту DIN (серия АИС) [59 14] Пакет содержит несколько программ, краткая характеристика которых приведена ниже

Выбор двигателей IMOFA (IMOFA Motor Selection, версия DOS) Данная программа рассматривает двух- и четырехполюсные асинхронные электродвигатели общего назначения в соответствии со стандартом DIN мощностью 0,5—18,5 кВт, содержит электронные каталоги, функциональные, энергетические, тепловые и другие характеристики двигателей при различных условиях эксплуатации, отвечает на вопросы «что, если», позволяет правильно выбрать двигатель для конкретного практического применения и осуществить проверку установленного двигателя, отличается специально организованной базой данных, полученной на основе проведенных испытаний, высокой надежностью результатов и дружественным пользовательским интерфейсом Программа может быть использована в профессиональной практике для оптимального выбора и проверки электродвигателей

Подшипники в асинхронных двигателях (Bearings in AC Motors, версия Windows) Профессиональная программа, построенная на базе экспериментальных моделей электродвигателей, а также соответствующих каталогов и справочников

Программа содержит краткий каталог по трехфазным асинхронным короткозамкнутым двигателям общего применения мощностью 0,5—18,5 кВт и радиальным подшипникам фирмы FAG, алгоритмы выбора подшипников для заданных конфигурации механической части привода и условий работы, а также оценки их срока службы по металлу и по смазке в любых условиях эксплуатации — при известных нагрузках, скоростях, напряжениях, температурах окружающей среды, вибрациях

Программа предназначена для производителей двигателей и приводов, дилеров двигателей и подшипников, производителей подшипников, студентов электротехнических специальностей, а также консалтинговых фирм в области привода

Клиноременные передачи (V-belt Transmissions, версия Windows) В основу программы положена методика экспериментального исследования потерь в клиноременной передаче, на базе которой синтезирована ее энергетическая модель

Программа содержит

каталожные данные ремней (на примере фирмы «Optibelt»),

современный алгоритм проектирования клиноременных передач (с частотой вращения вала от 500 до 6000 об/мин и диапазоном передаваемой мощности от 0,5 до 20 кВт)

Программа позволяет

выбрать параметры передачи,

произвести сравнение вариантов для заданных условий работы по критерию минимума потерь в передаче,

осуществить проверку работоспособности и эффективности передачи в любых эксплуатационных условиях.

Программа может быть использована в профессиональной практике, а также для учебных целей.

Оценка эффективности эксплуатации электропривода или отдельных его узлов. Эта группа программ появилась на рынке благодаря резко возросшей необходимости энерго- и ресурсосбережения, обусловленной существенным увеличением стоимости ресурсов. Программы разработаны для оценки необходимости внедрения новой техники с точки зрения экономической эффективности ее использования. Характерной особенностью этих программ является простота интерфейса, поскольку они предназначены в основном не столько для технического, сколько для обслуживающего и менеджерского персонала.

Примеры. *Центробежные вентиляторы Управление производительностью и экономия энергии* (FANS. Duty Control & Energy Saving).

Программа позволяет·

по заданным максимальным давлению и расходу воздуха, обеспечиваемым вентилятором, и известному типу вентилятора для диаметров колеса 200—1000 мм (одно- или двухрядный, с лопастями, загнутыми вперед или назад) выбрать конкретный типоразмер вентилятора и наилучший двигатель для него;

по заданной диаграмме «расход — время» оценить экономически целесообразный способ управления подачей вентилятора — дросселирование или частотное регулирование скорости двигателя.

В основу выбора вентилятора положена методика, широко используемая в европейской и отечественной практике и основанная на критерии максимального КПД вентилятора в заданной рабочей точке (максимальные давление и расход). По находящимся в базе данных кривым, характеризующим связь типоразмера с требуемым давлением и расходом, выбирается типоразмер вентилятора, а по характеристикам данного типоразмера с учетом потенциально подходящих двигателей — детали режима (скорость, мощность и пр.)

Критерии выбора двигателя и компоновки всего агрегата — минимальные мощность, масса и габариты.

После завершения этапа выбора основного оборудования — вентилятора, передачи и двигателя — пользователь задает ожидаемую диаграмму работы, а программа с помощью находящихся в базе данных зависимостей потребляемой мощности от расхода для выбранного режима работы оценивает затраты энергии при регулировании расхода дросселированием или изменением частоты вращения. Завершающим этапом работы, реализуемым программой, является оценка срока окупаемости дополнительного оборудования при заданном числе часов работы в году и известной цене электроэнергии.

Оценка экономической эффективности частотно-регулируемого электропривода насосов (версия Windows). Программа построена на основе разработанной в МЭИ в середине 90-х годов методики оценки экономической эффективности применения частотно-регулируемого электропривода в системах водоснабжения зданий, вошедшей в нормативный документ [59.15], согласованный с Главгосэнергонадзором и утвержденный Минтопэнерго РФ.

Программа выполнена в среде Windows 3.1 и предназначена для использования на стадии принятия решения о реконструкции действующих систем водоснабжения зданий посредством перехода к частотно-регулируемому электроприводу насосов.

Программа отражает основные аспекты энерго- и ресурсосбережения в насосных установках средствами электропривода и позволяет делать предварительные оценки экономии электроэнергии, воды и теплоты в действующих системах водоснабжения зданий при применении современных преобразователей частоты в электроприводе насосов без каких-либо изменений в основном оборудовании и в технологических схемах.

В качестве «главного экрана» программа предлагает «Протокол оценки эффективности», в котором после ввода пользователем необходимого минимума данных (характеристика центрального теплового пункта, номиналы установленного оборудования, измерения напора и расхода, режим работы) содержатся основные результаты расчета эффективности применения частотно-регулируемого электропривода в конкретной системе водоснабжения.

59.3. СЕРТИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Сертификация — деятельность третьей стороны по подтверждению соответствия продукции требованиям стандартов или других нормативных документов.

С позиций заинтересованных сторон сертификация имеет следующие цели.

С позиции государства:

обеспечение безопасности жизни и здоровья населения;

создание условий производителям для цивилизованной работы на внутреннем и внешнем рынках.

С позиции потребителя подтверждение показателей качества, заявленных изготовителем.

С позиции изготовителя:

выполнение обязательных требований законов государства;

повышение конкурентоспособности продукции путем подтверждения заявленных показателей качества.

Таблица 59.1

Признаки	Сертификация	
	обязательная	добровольная
Требования, соответствие которым подтверждается	Требования, предусмотренные законом как обязательные	Требования, не являющиеся обязательными
Статус исполнителей	Исполнители аккредитованы государством	Исполнители только регистрируются государством

Сертификация может иметь обязательный и добровольный характер. Основные признаки этих двух типов сертификации представлены в табл. 59.1.

Работы по обязательной сертификации регулируются законодательными актами и постановлениями Правительства Российской Федерации [59.16]. Перечень продукции, подлежащей обязательной сертификации, определяется документом, который называется «Номенклатура продукции и услуг (работ), в отношении которых законодательными актами Правительства Российской Федерации предусмотрена их обязательная сертификация». Кроме перечня конкретных видов продукции в этом документе перечислены нормативные документы, на соответствие которым должна проводиться обязательная сертификация.

В названном перечне содержатся практически все электротехнические компоненты электропривода, таким образом на них распространяются требования обязательной сертификации.

Деятельность третьей стороны по подтверждению соответствия означает, что сертификацию осуществляет орган по сертификации (ОС), признанный независимым от сторон, заинтересованных в результатах сертификации. Объектом сертификации может быть серия или партия продукции, а также отдельное изделие.

Результатом положительной сертификации является выдача заявителю (изготовителю продукции или ее поставщику) *сертификата соответствия* и *лицензии* (права) на использование знака соответствия.

Сертификат соответствия является основным документом, подтверждающим соответствие продукции установленным нормативным требованиям. При сертификации партии или отдельного изделия срок действия сертификата не устанавливается. При сертификации серийного выпуска продукции сертификат выдается на срок, устанавливаемый решением ОС, но не более чем на три года.

Сертификационные органы действуют в рамках системы сертификации, которая создается для обеспечения работ по сертификации однородной продукции. Однородная продукция — это несколько групп продукции, близкой по своему функциональному назначению, конструктивно-технологическому решению и номенклатуре показателей качества.

Для сертификации электрооборудования как однородной продукции в рамках системы сертификации ГОСТ Р действует система сертификации электрооборудования (ССЭ), в которой электрооборудование понимается как совокупность электротехнических изделий и (или) электротехнических устройств, предназначенных для выполнения заданной работы. Перечень групп однородной продукции, принятой для сертификации в ССЭ, представлен ниже (ряд групп продукции охватывает все электротехнические компоненты электропривода, что позволяет считать ССЭ основным средством сертификации электроприводов):

Бытовые и аналогичные электрические приборы.

Кабели, провода и шнуры.

Переключатели приборные и автоматические.

Установочные комплектующие и соединительные устройства.

Светотехнические изделия.

Материалы электроизоляционные.

Установочное защитное оборудование.

Низковольтная аппаратура.

Трансформаторы малой мощности и аналогичное оборудование.

Оборудование электросварочное бытовое.

Передвижные электростанции.

Машины ручные электрические.

Химические источники тока.

Электродвигатели малой и средней мощности.

Измерительные приборы.

Системы сигнализации.

Электронная аппаратура.

Автоматы игровые.

Информационная техника и конторское оборудование.

Кино- и фототехника и принадлежности.

Средства радиосвязи.

Аппараты телефонные, АТС и фототелеграфные.

Средства радиосвязи, радиовещания и телевидения общего применения.

Комплектные устройства низкого напряжения (до 1000 В).

Трансформаторы и аппаратура высокого напряжения.

Оборудование электротермическое промышленное.

Медицинские изделия.

Нетрадиционные источники электроэнергии.

Любая система сертификации, в том числе ССЭ, представляет собой совокупность участников сертификации, реализующих процедуры (действия) сертификации по правилам, установленным в системе сертификации в соответствии с государ-

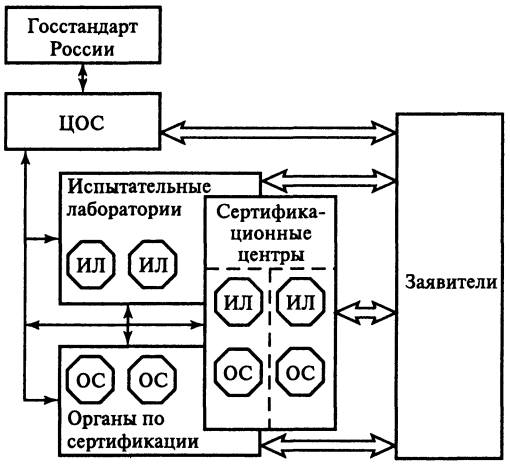


Рис. 59.1. Структура системы сертификации электрооборудования

ственными законами. Участники ССЭ и структура их взаимодействия представлены на рис. 59.1.

Испытательные лаборатории (ИЛ), проводящие испытания при обязательной сертификации в системе ССЭ, должны быть аккредитованы Госстандартом России. Сертификационными центрами называются организации, располагающие одновременно ОС и одной или несколькими ИЛ.

Центральный орган по сертификации электрооборудования (ЦОС) организует работы по формированию ССЭ и осуществляет руководство системой. Этим органом рассматриваются апелляции заявителей по поводу действия ОС или ИЛ, ведется учет выданных сертификатов и лицензий на использование знака соответствия. В ССЭ функции ЦОС выполняет отдел информатики, электротехники и приборостроения Госстандарта России.

Документ, устанавливающий правила, процедуры и порядок проведения обязательной и добровольной сертификации в системе ССЭ, называется «Правила проведения сертификации электрооборудования» (в дальнейшем изложении — Правила) [59.17].

Процедуры (способы и формы действий) сертификации называются в Правилах и других документах схемами сертификации.

Правилами установлено, что при обязательной сертификации в ССЭ используются семь стандартных схем: 3, 3а, 5, 7, 9, 9а,10а, обозначение и содержание которых соответствуют принятому в системе сертификации ГОСТ Р документу «Порядок проведения сертификации продукции в Российской Федерации». Правилами детально оговариваются условия применения каждой из семи схем, набор и последовательность действий по ним. Наглядное представление о каждой из семи схем дает табл. 59.2.

Любая схема сертификации содержит основной этап — работы по установлению соответствия продукции требованиям стандартов. Результатом этого этапа является решение ОС о выдаче сертификата. В зависимости от схемы сертификации это решение может основываться либо на результатах испытаний образцов продукции, либо на результатах анализа декларации заявителя о соответствии прилагаемым к ней документам. Кроме того, четыре схемы предполагают принятие решения с проведением анализа состояния производства, причем по схеме 5 предполагается наличие у изготовителя сертификата на систему качества производства.

Четыре схемы сертификации предусматривают наличие этапа инспекционного контроля за качеством сертифицированной продукции. Процедура инспекционного контроля аналогична процедуре основного этапа, но может иметь сокращенный объем работ.

При выборе схемы сертификации определяющим является признак «кто заявитель».

Самые простые схемы сертификации (7 или 9) применяются, если заявитель — поставщик (продавец). Причем при малом размере партии продукции или единичных изделиях используется схема 9.

Таблица 59.2. **Схемы сертификации**

Схема	Объект сертификации, заявитель	Этап сертификации и действия на нем			
		Установление соответствия		Инспекционный контроль	
3	Серия, изготовитель	Испытания образцов	—	Испытания образцов	—
3а			Анализ производства		Анализ производства
5			Сертификат на систему качества		Сертификат на систему качества
7	Партия, поставщик		—	—	—
9		Анализ декларации и документов заявителя	—	—	—
9а	Малая серия, изготовитель		Анализ производства	—	—
10а				Испытания образцов	Анализ производства

Таблица 59.3. **Действия участников сертификации**

Участник	Последовательность действий при получении сертификата				
Заявитель	Заявка	Выбор ИЛ. Предоставление образцов и документов. Оформление договоров с ОС и ИЛ	—	—	Маркирование продукции
Орган по сертификации	Решение по заявке	Оформление договора с заявителем	Анализ состояния производства	Экспертиза документов. Решение о выдаче сертификата	Оформление сертификата и лицензии
Испытательная лаборатория	—	Оформление договора с заявителем или с органом по сертификации. Отбор образцов	Испытания образцов. Оформление протоколов испытаний	—	—

Если заявителем является изготовитель продукции, то далее определяющим является признак «серийность изготовления».

При массовом и стабильном серийном выпуске продукции она сертифицируется по схемам 3, 3а, 5. Причем схема 5 применяется при наличии у изготовителя сертификата на систему качества производства.

Выбор между схемами 3 и 3а определяет признак «представительность выборки образцов». При малой выборке и большой номенклатуре модификаций изделий применяется схема 3а.

При выпуске продукции малыми сериями применяются схемы 9а и 10а. Причем применение схемы 9а возможно, если изготовитель находится на этапе освоения серийного выпуска.

Последовательность действий участников сертификации конкретной продукции от оформления заявки до выдачи сертификата отражает табл. 59.3.

59.4. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Типичными представителями этой группы электроприводов являются электроприводы кранов, подъемников периодического действия и экскаваторов.

Подъемный кран представляет собой грузоподъемную машину, работающую повторяющимися циклами и предназначенную для перемещения грузов в пространстве. По конструктивным признакам различают мостовые краны, мостовые перегружатели, башенные, портальные, козловые, кабельные и другие типы кранов. Краны содержат механизмы подъема и механизмы горизонтального перемещения грузов (тележка, мост, механизмы поворота и т.д.).

Подъемник является грузоподъемной машиной, служащей для подъема и спуска людей или грузов в специальных подъемных кабинах, которые движутся по жестким вертикальным (или наклонным) направляющим. Преимущественное распространение получили канатные подъемники, в которых подъемные кабины подвешиваются на стальных канатах, огибающих канатоведущие шкивы или навиваемых на барабаны. К подъемникам циклического действия относят лифты, шахтные подъемники (клетевые и скиповые) и др.

Экскаватор — основной тип выемочно-погрузочных машин, применяемых для производства земляных работ и для добычи полезных ископаемых при открытой разработке месторождений. С помощью рабочего органа экскаватора (ковша) осуществляется копание грунтов или горных пород. К экскаваторам с циклическим характером работы относят одноковшовые экскаваторы с различным рабочим оборудованием: экскаватор-лопату, у которого ковш имеет жесткое сочленение со стрелой, и экскаватор-драглайн, у которого ковш подвешен на канатах.

Определение статических нагрузок для подъемных устройств. На рис. 59.2 приведены расчетные схемы подъемных устройств: механизмов подъема крана, шахтного подъемника с двумя подъемными кабинами и лифтового подъемника.

Момент сопротивления для каждого из этих устройств при работе приводной электрической машины в двигательном или тормозном режиме определяется соответственно следующими формулами:

$$M_c = F_c D / 2 i_м \eta,$$

$$M_c = F_c D \eta / 2 i_м,$$

где F_c — статическое усилие на окружности диаметром D (барабана на рис. 59.2, *а* и *б* или канатоведущего шкива на рис. 59.2, *в*), равное натяжению каната на рис. 59.2, *а* или разности натяжений поднимающейся и опускающейся ветвей каната на рис. 59.2, *б* и *в*; $i_м$ — передаточное отношение подъемного механизма, равное отношению угловых скоростей приводного двигателя и барабана

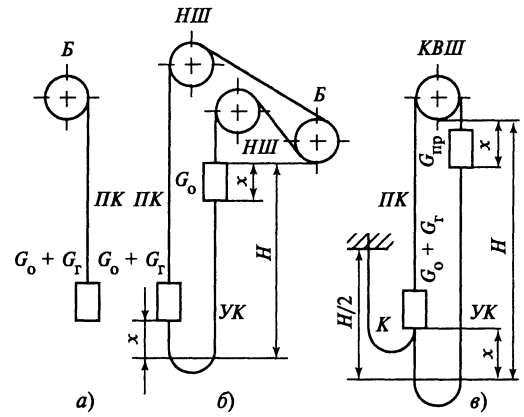


Рис. 59.2. Расчетные схемы подъемных устройств:

а — для мсханизма подъсма крана; *б* — для подъемника с двумя подъсмными кабинами; *в* — для лифта; *Б* — барабан; *ПК* и *УК* — подъсмный и уравновсшивающий канаты; *К* — гибкий кабсль; *НШ* и *КВШ* — направляющий и канатовсдущий шкивы

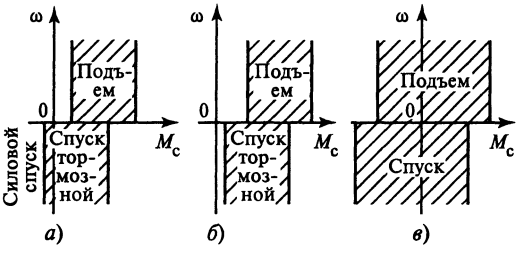


Рис. 59.3. Области изменения моментов сопротивления при транспортировке различных грузов:

а и *б* — для мсханизма подъсма крана соотвстствснно с лсгким и тяжслым грузозахватным органом; *в* — для лифтового подъемника

(или канатоведущего шкива); η — КПД подъемного механизма.

Момент сопротивления можно представить в виде

$$M_с = M_{тр} + M_г,$$

где $M_{тр}$ — реактивный момент, создаваемый силами трения подъемного устройства; $M_г$ — активный момент, создаваемый перемещаемым грузом и не зависящий от трения.

На рис. 59.3 показаны области изменения $M_с$ для механизма подъема крана (рис. 59.3, *а* и *б*) и лифтового подъемника (рис. 59.3, *в*) при изменении веса груза $G_г$ от нуля до номинального (см. рис. 59.2).

Для *механизмов подъема кранов* в случае легкого грузозахватного органа (рис. 59.3, *а*) $M_с$ при спуске грузов изменяется от отрицательных значений, когда вес груза небольшой (силовой спуск), до положительных при спуске более тяжелых грузов, когда знак $M_с$ при спуске такой же, как и при подъеме (тормозной спуск). Когда грузозахватный орган сравнительно тяжелый (грейфер, ковш экскаватора), при изменении веса груза от нуля до номинального имеет место только тормозной спуск, как показано на рис. 59.3, *б*. При расчетах трение в механизме подъема учитывают с помощью КПД. В этом случае

$$F_с = G_0 + G_г,$$

где G_0 — вес грузозахватного органа.

Значение КПД $\eta_п$ при подъеме груза, отличного от номинального, может быть определено из графиков на рис. 59.4, а при спуске — по формуле [59.19]

$$\eta_с = 2 - 1/\eta_п.$$

Для *шахтных подъемников* в случае двух подъемных кабин и цилиндрических барабанов (см. рис. 59.2, *б*)

$$F_с = k_ш G_г + (q_т - q_у)(H - 2x),$$

где $q_т$ и $q_у$ — вес 1 м подъемного (тягового) и уравновешивающего канатов; H и x — глубина шахты и текущее расстояние подъемной кабины весом G_0 с грузом весом $G_г$ от начальной точки движения (рис. 59.2, *б*); $k_ш$ — коэффициент, учитывающий вредные сопротивления в шахте подъемника, при расчетах принимается $k_ш$ = 1,2 для клетей, $k_ш$ = = 1,15 для скипов и $k_ш$ = 1,1 для многоканатных установок [59.27].

В случае однокабинных подъемных установок с противовесом

$$F_с = k_ш G_г + G_0 - G_{пр} + (q_т - q_у)(H - 2x),$$

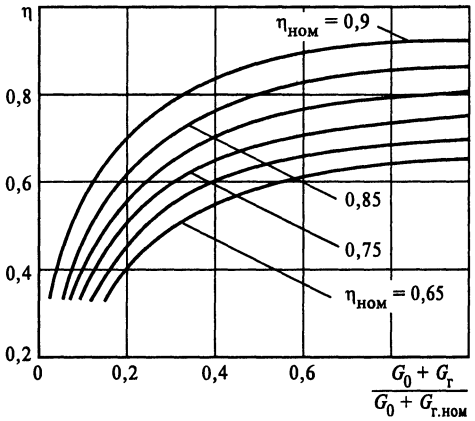


Рис. 59.4. Кривые КПД механизма при различных загрузках:

$\eta_{ном}$ — номинальный КПД; $G_{г.ном}$ — номинальный вес груза

где $G_о$ и $G_{пр}$ — вес подъемной кабины (скипа или клети) и противовеса.

Использование уравновешивающих канатов для подъемников позволяет уменьшить мощность их приводного электродвигателя. Исследования шахтных подъемников показывают, что если вес подъемных канатов больше половины веса полезного груза и уравновешивающий канат отсутствует, то мощность электродвигателя возрастает более чем на 15 %, а КПД подъемника уменьшается более чем на 10 %. Для двухкабинных шахтных подъемников уравновешивающие канаты не применяются при глубине подъема менее 450 м, а для подъемников с противовесом — при глубине шахты менее 250 м [59.27].

Для *лифтовых подъемников* при использовании распространенной расчетной схемы, показанной на рис. 59.2, *в*, КПД редуктора для расчетных загрузок кабины определяется по кривым, аналогичным приведенным на рис. 59.4, а $F_с$ находится с помощью выражения:

$$F_с = G_г + G_о - G_{пр} + (q_т - q_у)(H - 2x) + \\ + 1/2\, q_{каб}\, x \pm F_ш,$$

где $G_г$, $G_о$ и $G_{пр}$ — вес полезного груза в кабине, кабины и противовеса; $q_{каб}$ — вес 1 м гибкого кабеля; $F_ш$ — сила сопротивления шахты.

Обычно

$$G_{пр} = G_о + (0{,}4—0{,}6)G_{г.ном},$$

где $G_{г.ном}$ — номинальный вес груза для лифтовой установки.

Согласно [59.27] при работе лифтов с башмаками скольжения можно рассчитывать вредные силы сопротивления $F_ш$ как 10 % полезного груза, а при роликовых башмаках — 2 %.

Для уменьшения мощности приводного электродвигателя используют уравновешивающие канаты или цепи. В лифтовых установках статическое уравновешивание применяют тогда, когда вес канатов превышает $0{,}1G_{г.ном}$, что обычно имеет место при высоте подъема более 45 м [59.27].

Определение статических нагрузок для механизмов горизонтального передвижения груза. Для *механизмов передвижения с приводными колесами* (тележки и мосты мостовых кранов и т.д.) сила статического сопротивления передвижению на рельсовом пути

$$F_с = F_{тр} \pm F_у \pm F_в,$$

где

$$F_{тр} = k_р \frac{(G_м + G_1)(f_к + \mu_с d_ц/2)}{D_к/2}$$

— сила сопротивления от трения качения колеса по рельсу и трения скольжения в опорах колеса; $G_м$ — вес механизма; $f_к$ = 0,0003—0,0015 м — коэффициент (плечо) трения качения; $\mu_с$ = 0,06—0,12 — коэффициент трения скольжения; $D_к$ и $d_ц$ — диаметры колеса и его цапфы; $k_р$ = 1,2—2,5 — коэффициент, учитывающий трение реборд ходовых колес о рельсы; $F_у = (G_м + G_г)\sin\alpha$ — сила сопротивления передвижению от уклона пути на угол α; $F_в = p_в s_в$ — сила ветровой нагрузки, определяемая удельной ветровой нагрузкой $p_в$, воздействующей на расчетную площадь $s_в$, на которую действует давление ветра под углом 90° [59.19].

Перед $F_у$ знак «+» берется при движении на подъем, знак «–» — при спуске под уклон, а перед $F_в$ знак «+» — при движении против ветра, знак «–» — при движении по ветру.

Момент сопротивления механизма, приведенный к валу двигателя, определяется по формулам:

при двигательном режиме работы приводной электрической машины

$$M_с = F_с D_к / 2 i_м \eta_м;$$

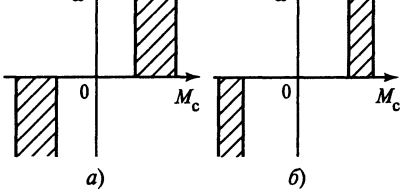
при генераторном режиме

$$M_с = F_с D_к \eta_м / 2 i_м,$$

где $i_м$ и $\eta_м$ — передаточное отношение и КПД редуктора механизма.

На рис. 59.5, *а* и *б* для механизмов передвижения крана приведены области изменения моментов сопротивления при передвижении грузов и учете только сил трения. Эти области для различных направлений движения симметричны относительно начала координат. Если учитывать обусловленные уклоном и ветром активные составляющие $M_с$, то указанные области для различных направлений движения могут отличаться.

Для *механизмов передвижения с канатной или цепной тягой*, а также для *механизмов поворо-*



а *б*

Рис. 59.5. Области изменения моментов сопротивления (при учете только сил трения) при передвижении грузов различного веса (заштрихованная область):

а — для тслсжки; *б* — для моста мостового крана

та моменты сопротивления можно рассчитать согласно [59.19].

Для механизмов поворота без учета уклона и ветра области изменения M_c при грузах различного веса имеют вид, аналогичный областям на рис. 59.5, *б*.

При приближенных практических расчетах согласно [59.21] для механизмов передвижения моста или тележки крана без учета уклона и ветра можно исходить из того, что сила сопротивления движению в расчете на 1 т перемещаемой конструкции равна 80 Н (при качении колес по рельсам и подшипникам качения, а также при нормальном состоянии подкранового пути), а для механизма поворота 65 Н.

Влияние динамических нагрузок. Механизмы грузоподъемных машин содержат зазоры, упругие передачи (валы, канаты) и различные инерционные массы (муфты, зубчатые колеса и т.д.), которые взаимодействуют в установившихся и переходных режимах. Принципиально такие механизмы представляют собой динамические системы высокого порядка. Однако исследования показывают, что реальные системы можно привести к упрощенным расчетным динамическим схемам. В большинстве случаев реальные многомассовые системы допустимо заменять расчетными системами с двумя-тремя массами.

Механизмы подъема часто представляются в виде двухмассовой системы (рис. 59.6, *а* и *б*), в которой масса m_1 груза соединена упругой связью, характеризующейся коэффициентом жесткости c, с массой m_2 механизма. Масса m_2 пропорциональна моменту инерции вращающихся масс ЭП (ротор двигателя, редуктор, барабан). Показанный на рис. 59.6, *б* расчетный зазор Δ_c отражает слабину каната подъемного механизма. Жесткость упругой связи определяется жесткостью конструкции моста и жесткостью подъемного каната [59.20].

Различные расчетные схемы подъемников приведены в [59.27]. Одна из этих схем показана на рис. 59.6, *в*. На этой схеме обозначено: m_1 и m_3 — массы, связанные с поднимающейся и опускающей-

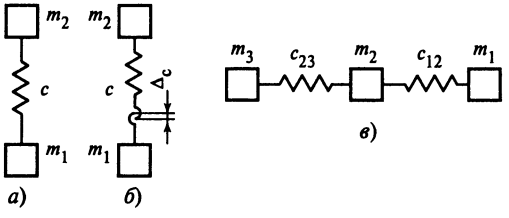


Рис. 59.6. Расчетные динамические схемы подъемных устройств:

а — для механизма подъема при отсутствии слабины кранов; *б* — то же при наличии слабины; *в* — для подъемника

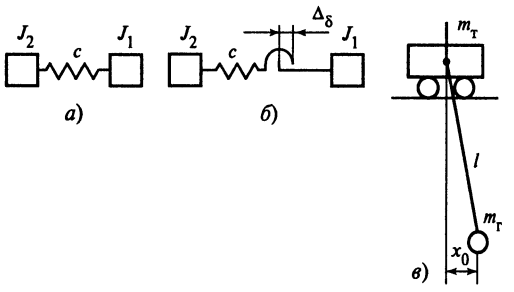


Рис. 59.7. Расчетные динамические схемы для механизмов горизонтального передвижения грузов:

а — с одной упругостью; *б* — с одной упругостью и зазором; *в* — с гибкой подвесной груза; x_0 — отклонение центра тяжести груза от вертикали

ся ветвями каната с коэффициентами жесткости c_{12} и c_{23}; m_2 — приведенная масса вращающихся частей механизма, включая барабан или канатоведущий шкив, редуктор, ротор двигателя и т.д.

Для *механизмов передвижения и поворота* расчетные схемы чаще всего представляются в виде двух-трехмассовых систем [59.25]. На рис. 59.7, *а* и *б* представлены двухмассовые варианты расчетных схем, причем в схеме рис. 59.7, *б* показан угловой зазор Δ_δ. Для механизма передвижения J_1 и J_2 — соответственно приведенные моменты инерции вращающихся и поступательно движущихся частей механизма, а c — общий коэффициент жесткости, с учетом валов и упругих муфт [59.19]. Для механизма поворота J_1 — приведенный момент инерции поворотной части механизма; J_2 — приведенная масса груза и металлической конструкции, к которой подвешен груз; c — эквивалентный коэффициент жесткости металлической конструкции механизма.

Приведенные на рис. 59.7, *а* и *б* расчетные схемы не учитывают явление раскачивания подвешенного к механизму передвижения груза, что справедливо при жесткой подвеске груза или в случае, когда груз высоко поднят, так что жесткость канатной связи оказывается весьма высокой.

На рис. 59.7, *в* показана двухмассовая расчетная схема для тележки массой $m_т$ (в значении $m_т$ учитывается и момент инерции двигателя) с подвешенным к ней с помощью каната длиной l грузом массой $m_г$. Эта схема чаще всего используется для анализа колебаний подвешенного на канате груза.

Трехмассовая расчетная схема механизма передвижения имеет такой же вид, как на рис. 59.6, *в*. Ее используют для анализа механизмов тележки с канатной тягой, а также передвижения с учетом конечной жесткости металлоконструкции механизма и колебаний подвешенного на канате груза [59.25].

Для механизма передвижения в схеме рис. 59.6, *в* m_1 — масса груза; m_2 — масса тележки; m_3 — приведенная масса вращающихся частей механизма (с учетом момента инерции двигателя); c_{12} — приведенная жесткость каната, учитывающая колебания груза, Н/м:

$$c_{12} = g m_г / l = G_г / l,$$

где g — ускорение свободного падения; l — длина каната; c_{23} — жесткость механизма с учетом жесткости тяговых канатов для тележки с канатной тягой или приведенной жесткости металлоконструкции механизма.

Важной количественной характеристикой ЭП является его момент инерции. Для рассматриваемых ЭП отношение $J_\Sigma / J_{дв}$ (где J_Σ — полный момент инерции ЭП, приведенный к валу приводного двигателя; $J_{дв}$ — момент инерции ротора двигателя) ориентировочно находится в следующих границах:

Для механизмов подъема	1,1—1,5
Для подъемников	2—10
Для механизмов передвижения тележки	5—20
Для механизмов передвижения мостов, кранов, механизмов поворота	20—100

Если принять, что конструкция механизма подъема абсолютно жесткая, и учесть только жесткость каната, то для расчетной схемы рис. 59.6, *а* частота собственных колебаний выражается в виде

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{c(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}}.$$

Поскольку для механизмов подъема $m_2 >> m_1$, то

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{c}{m_1}}.$$

Жесткость c каната определяется его длиной, сечением и пропорциональна номинальной массе груза. При этом для массы грузов, близкой к номинальной, справедлива следующая приближенная формула:

$$f_0 \approx 10 / \sqrt{l},$$

где l — длина каната, м.

В соответствии с этой формулой для механизмов подъема кранов можно принять $f_0 \approx 1$—5 Гц; для механизмов подъема мощных экскаваторов $f_0 \approx 0{,}3$—1 Гц [59.30], а для их механизмов поворота $f_0 \approx 2$—3 Гц. Для портальных кранов частота собственных колебаний их стрел в горизонтальной плоскости лежит в пределах 0,5—5 Гц.

Наименьшая частота f_0 собственных колебаний получается для процесса раскачивания груза с неподвижной точкой подвеса каната:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}} = \frac{0{,}5}{\sqrt{l}}.$$

При $l = 100$—5 м $f_0 = 0{,}05$—0,22 Гц.

При подъеме «с веса», т.е. когда в начале подъема натяжение каната равно весу груза $G_г$, а начальные скорости движения масс m_1 и m_2 (см. рис. 59.6, *а*) равны, и в случае постоянства момента $M_п$ приводного двигателя коэффициент динамичности, под которым понимают отношение максимальной нагрузки упругой связи к нагрузке в ней в стационарном напряженном состоянии,

$$k_д = \frac{S_{max}}{G_г} = 1 + 2\,\frac{m_1}{m_1 + m_2}\,\frac{M_п - M_с}{M_с},$$

где S_{max} — наибольшая сила натяжения каната; $M_с$ — момент сопротивления механизма подъема, пропорциональный весу груза $G_г$ и приведенный к валу двигателя.

При $M_п \approx 2M_с$ и условии, что наибольшие отношения масс m_1 и $(m_1 + m_2)$ не превосходят 0,2,

$$k_д \approx 1{,}2—1{,}4.$$

Следовательно, коэффициент динамичности для механизмов подъема небольшой, откуда следует важный для проектирования электропривода вывод: при переходных процессах подъема «с веса» вполне приемлемым для практики является формирование постоянного во времени момента приводного двигателя механизма.

При подъеме «с подхватом» (под которым понимается подъем при наличии слабины в канате, см. рис. 59.6, *б*) в случае постоянства момента двигателя и при учете справедливого для механизмов подъема неравенства $m_1 << m_2$ коэффициент динамичности представляется в виде

$$k_д = \frac{S_{max}}{G_г} = 1 + \Delta v_0\,\frac{\sqrt{c m_1}}{G_г},$$

где $\Delta v_0 = v_2(0) - v_1(0)$ — разность скоростей по окончании выбора слабины каната (здесь v_2 — скорость верхней части каната, связанной с барабаном механизма подъема; v_1 — скорость нижней части каната, связанной с поднимаемым грузом).

Таким образом, для уменьшения коэффициента динамичности необходимо обеспечить выбор слабины каната при небольшом значении Δv_0, что наиболее целесообразно осуществить средствами электропривода. Для обеспечения выбора слабины каната при малой скорости можно создать жесткую механическую характеристику приводного

двигателя при его пониженных угловых скоростях или создать сравнительно мягкую (например, реостатную) характеристику, пусковой момент на которой равен примерно $(0{,}7—0{,}85)M_{\text{с.ном}}$, где $M_{\text{с ном}}$ — момент сопротивления при подъеме груза номинального веса.

При пуске механизмов передвижения или поворота при наличии зазора (рис. 59.7, *б*) и в случае постоянства момента $M_{\text{п}}$ приводного двигателя, а также с учетом того, что для этих механизмов момент инерции ротора двигателя обычно составляет небольшую долю общего момента инерции ЭП, коэффициент динамичности можно записать следующим образом:

$$k_{\text{д}} = \frac{M_{\text{уп max}}}{M_{\text{п}}} = 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{c\Delta\omega_0}{\Omega_0 M_{\text{п}}}\right)^2},$$

где $M_{\text{уп max}}$ — наибольшее значение момента в упругом элементе; c — коэффициент жесткости упругого элемента; $\Delta\omega_0$ — разность скоростей инерционных масс J_1 и J_2 в момент выбора зазоров;

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{c(J_1 + J_2)}{J_1 J_2}}$$

— частота собственных колебаний механической системы.

Следовательно, для уменьшения коэффициента динамичности целесообразно уменьшать начальную разность скоростей инерционных масс. Для этого, так же как и для механизмов подъема, необходимо иметь жесткую механическую характеристику приводного двигателя при малых его скоростях или осуществить выбор зазоров при пониженных ускорениях двигателя, как это принято в ЭП экскаваторов. В случаях больших начальных зазоров и значительных разностей скоростей $\Delta\omega_0$ может иметь место многократное образование зазоров.

Коэффициент динамичности у инерционных механизмов (передвижения или поворота) больше, чем у малоинерционных механизмов (подъема), даже при отсутствии зазоров в механических передачах. Для уменьшения $k_{\text{д}}$ целесообразно момент приводного двигателя такого механизма при переходных процессах изменять плавно во времени.

Большие динамические нагрузки возникают *при стопорении механизмов*. Анализ этого процесса особенно важен в тех случаях, когда он происходит часто, например в копающих механизмах экскаваторов (механизмах подъема, напора, тяги), где при внезапной встрече ковша с валуном или участком невзорванной скалы ковш останавливается практически мгновенно (за время менее 0,1 с [59.31]). Для расчета процесса стопорения используют приведенную на рис. 59.7, *а* расчетную схему, в которой левый конец упругого элемента защемлен, т.е. принимают $J_2 = \infty$. При условии постоянства момента приводного двигателя в процессе стопорения коэффициент динамичности представляется в виде

$$k_{\text{д}} = \frac{M_{\text{уп.max}}}{M_{\text{стоп}}} = 1 + \frac{\omega_{\text{нач}}\sqrt{J_1 c}}{M_{\text{стоп}}},$$

где $M_{\text{уп.max}}$ — максимальное значение момента в упругой связи (пропорциональное наибольшему натяжению подъемного каната механизма); $M_{\text{стоп}}$ — стопорное значение момента двигателя; $\omega_{\text{нач}}$ — начальная угловая скорость двигателя при стопорении.

При заданной рабочей скорости копания и заданном коэффициенте c жесткости механизма коэффициент динамичности может быть уменьшен путем снижения приведенного суммарного момента инерции, основную долю в котором составляет момент инерции двигателя. Поэтому для копающих механизмов стремятся использовать безредукторные ЭП с тихоходными двигателями или редукторы с небольшим передаточным отношением. Практически для приводов подъема и напора экскаваторов-лопат $k_{\text{д}} = 1{,}6—2{,}8$, а для привода тяги экскаваторов-драглайнов $k_{\text{д}} = 2—4$ [59.30, 59.31].

Для анализа колебаний груза относительно положения равновесия обычно используется расчетная схема рис. 59.7, *в*, уравнения которой при малых углах отклонения груза имеют вид:

$$\frac{\mathrm{d}v_{\text{т}}}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}^2 x_0}{\mathrm{d}t^2} + \omega_{0\text{г}}^2 x_0 = 0;$$

$$\frac{\mathrm{d}v_{\text{т}}}{\mathrm{d}t} - \frac{m_{\text{г}}}{m_{\text{т}}}\omega_{0\text{г}}^2 x_0 - \frac{1}{\rho m_{\text{т}}}(M - M_{\text{с}}) = 0,$$

где $v_{\text{т}}$ — скорость тележки; M — момент приводного двигателя; ρ — радиус приведения скорости тележки к валу двигателя; $\omega_{0\text{г}} = \sqrt{g/l}$ — угловая частота собственных колебаний груза.

При разгоне и торможении тележки (равно как и другого механизма горизонтального передвижения) всегда возникают колебания груза относительно его положения равновесия. Для ограничения амплитуды и времени этих колебаний используют различные способы:

а) способы, основанные на ручном управлении и заключающиеся в том, что крановщик определенным образом маневрирует механизмами крана. Опытные крановщики гасят колебания груза, управляя двигателем следующим образом: при разгоне осуществляют операции пуск—торможение—пуск, а при торможении — операции торможение—пуск—торможение. При ручном управлении система ЭП может быть сравнительно простой, однако работа крановщика оказывается в этих случаях ин-

тенсивной и напряженной, а сам крановщик должен быть достаточно опытным;

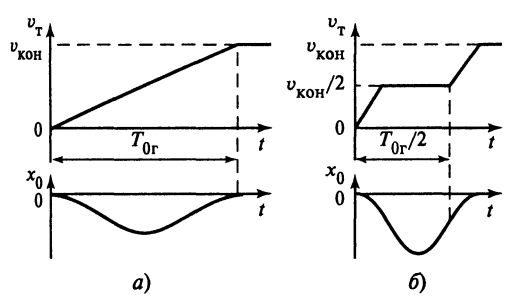
б) механические, основанные на создании дополнительных устройств, усложняющих конструкцию кранов и не связанных с ЭП (дополнительные оттяжные канаты с подвижным противовесом внутри стрелы, широкий разнос блоков в узлах подвески груза и т.д. [59.25]);

в) электрические, основанные на использовании автоматизированного ЭП со специальными свойствами, обеспечивающими автоматическое гашение колебаний груза. При этом крановщик дает только начальный командный импульс, а дальнейшее движение тележки автоматически формируется системой управления ЭП. Электрические способы, в свою очередь, можно разделить на две группы: автоматическое управление колебаниями груза с ненулевыми, т.е. произвольными, его отклонениями в начале переходного процесса и с нулевыми начальными отклонениями груза.

Один из способов обеспечения автоматического гашения колебаний груза при нулевых начальных отклонениях заключается в следующем. При переходных процессах обеспечивают движение тележки с постоянным ускорением (рис. 59.8, *а*), причем время изменения скорости от начальной до конечной выбирают равным периоду собственных колебаний груза:

$$T_{0г} = 2\pi\sqrt{l/g}\ .$$

Другой способ состоит в том, что обеспечивают движение тележки при ее переходных процессах в три этапа (рис. 59.8, *б*): на первом этапе формируют движение с постоянным ускорением и изменяют скорость тележки от начальной до средней между начальной и конечной $v_{кон}$ скоростями, на втором обеспечивают равномерное движение тележки, причем общее время первого и второго этапов выбирают равным $T_{0г}/2$, как показано на рис. 59.8, *б*, а на третьем вновь формируют движение с постоянным ускорением и изменяют скорость тележки до заданного конечного значения.



а) *б*)

Рис. 59.8. Зависимости скорости $v_т$ тележки и отклонения x_0 груза от времени (для расчетной схемы рис. 59.7, *в*) для случаев пуска тележки при одноступенчатом (*а*) и двухступенчатом (*б*) законах изменения скорости

Для осуществления таких способов необходимо иметь датчик длины l подвески каната и определять значение $T_{0г}$. На вход системы ЭП должен быть подан сигнал задания, изменение которого во времени пропорционально необходимой зависимости $v_т(t)$ (рис. 59.8, *а* и *б*). При этом система ЭП должна обладать следующим свойством: скорость тележки должна с небольшой динамической погрешностью изменяться во времени, так же как и входной сигнал. Такими свойствами обладают системы с двигателями постоянного или переменного тока с последовательной коррекцией и подчиненным регулированием параметров.

Практически для всех рассматриваемых механизмов требуется точная остановка рабочего органа (точная посадка груза, точная остановка подъемных кабин у подъемников, точная установка грузов механизмами передвижения и т.д.). Для достижения требуемой точности остановки часто используется предварительное снижение скорости рабочих органов механизмов. В [59.26, 59.32] приведены формулы для расчета параметров механических характеристик, обеспечивающих пониженную скорость движения механизмов.

Особенности механизмов, влияющие на выбор их электроприводов. Особенности статических и динамических нагрузок рассматриваемого класса механизмов определяют выбор систем ЭП и требования к ним. Основные из этих особенностей следующие:

1. Широкий диапазон изменения моментов сопротивления.

2. Необходимость реверсирования.

3. Ограничение момента в элементах механизмов.

4. Обеспечение работы на пониженной скорости (реализуется путем формирования механических характеристик для пониженной скорости).

5. Ограничение ускорений:

а) при выборе зазоров в передачах или при выборе слабины канатов для уменьшения скорости в момент замыкания всей механической системы;

б) для уменьшения амплитуды колебаний груза, перемещаемого краном на гибком подвесе;

в) для обеспечения требуемого характера работы механизмов (например, ускорение кабины лифтов должно быть ограничено значением 2 м/с^2 по условиям комфортности, обусловленным необходимостью обеспечения нормального самочувствия перевозимых в кабине пассажиров);

г) по условиям обеспечения надежного сцепления колес механизмов передвижения с рельсами [59.18];

д) по условиям обеспечения надежного сцепления канатов со шкивами трения в подъемниках [59.27];

е) для исключения затруднений при управлении механизмами, например экскаватором [59.31].

6. Формирование переходных процессов, исходя из допустимых ускорений и моментов и обеспечения максимальной производительности работы механизмов.

Средние значения ускорений, м/с^2, для механизмов кранов следующие:

Механизмы подъема, осуществляющие монтажные операции и работающие с жидким металлом	0,1
Механизмы подъема кранов механосборочных цехов	0,2
Механизмы подъема кранов металлургических цехов	0,5
Механизмы подъема, перегружающие сыпучие грузы	0,8
Механизмы передвижения мостовых перегружателей	0,05
Механизмы передвижения кранов и тележек, транспортирующих жидкий металл, козловых кранов	0,1
Механизмы передвижения монтажных кранов и их тележек при гибкой (жесткой) подвеске груза	0,2 (0,3)
Грейферные тележки мостовых перегружателей	0,8
Механизмы вращения кранов	0,6

Максимальные значения ускорений, м/с^2, для подъемников:

Лифты пассажирские (кроме больничных)	2
Лифты больничные	1
Шахтные подъемники клетевые	0,6—0,75
Шахтные подъемники скиповые	0,8—1,2

Для лифтов, кроме того, ограничивается производная ускорения (рывок) в пределах 3—10 м/с^3.

Среднее время переходных процессов для механизмов подъема составляет 1—2 с, а для механизмов передвижения и поворота 4—10 с.

Требования к механическим характеристикам электроприводов. *Желаемые механические характеристики для механизмов подъема* приведены на рис. 59.9. Характеристика *1п* используется для подъема грузов с пониженной скоростью и предназначена для выбора слабины канатов и точной установки груза при некоторых монтажных операциях. Характеристики *2п* и *3п* служат для подъема грузов с промежуточной и номинальной скоростями. Характеристика *4п* требуется для

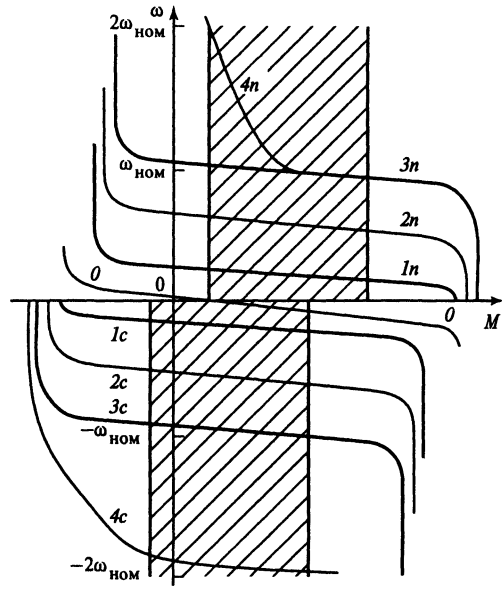


Рис. 59.9. Желаемые механические характеристики для механизмов подъема

подъема малых грузов с повышенной скоростью с целью повышения производительности работы кранов, в частности путем подъема пустого грузозахватного органа (например, крюка) со скоростью, примерно в 2 раза превышающей номинальную.

Характеристика *1с* служит для спуска грузов с малой скоростью, что требуется для точной его установки при спуске. Характеристики *2с* и *3с* используются для спуска грузов с промежуточной и номинальной скоростями, а характеристика *4с* — для спуска легких грузов с повышенной скоростью, что, как и в случае подъема, целесообразно по условиям повышения производительности работы кранов.

Показанные на рис. 59.9 вертикальные участки характеристик требуются для ограничения моментов и ускорений при пусках и торможениях механизма.

На рис. 59.9 показана характеристика *0*, которая обычно не используется в крановых механизмах, но широко используется для механизмов экскаваторов. В экскаваторах торможение обычно осуществляется электродвигателем, а тормоза применяются для аварийного торможения. При этом используется механическая характеристика *0* (так называемая характеристика «удерживания ковша»), обеспечивающая малую скорость движения ковша, которая требуется для маневровых и вспомогательных операций.

Следует отметить, что семейство характеристик, представленных на рис. 59.9, можно получить при использовании сравнительно сложных систем ЭП. Для подъемников обычно не требуются меха-

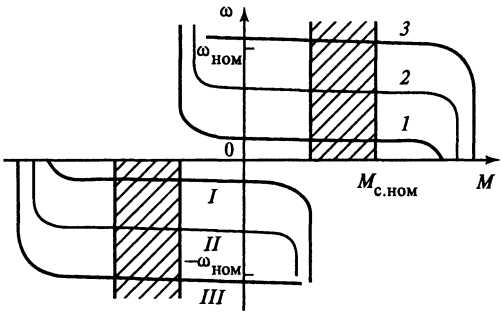


Рис. 59.10. Желаемые механические характеристики для механизмов передвижения и поворота

нические характеристики типа *4n*, *2n*, *0*, *2c* и *4c*. В ЭП подъемников используются показанные на рис. 59.9 жирными линиями характеристики *3n* и *3c* (для подъема и спуска грузов с номинальной скоростью), а также *1n* и *1c* (для получения так называемой «ревизионной скорости» и обеспечения точной остановки подъемных кабин около заданного уровня). Однако в отличие от характеристик, показанных на рис. 59.9, для подъема и спуска в подъемниках формируются одинаковые характеристики, что объясняется примерно одинаковыми значениями моментов сопротивления при подъеме и спуске грузов (см. рис. 59.3, *в*).

Для механизмов передвижения и поворота требуются изображенные на рис. 59.10 механические характеристики. Механические характеристики ЭП одинаковы для обоих направлений движения механизмов, что определяется одинаковыми моментами сопротивления при различных знаках скорости. Характеристики *1* и *I* требуются для выбора зазоров в передачах механизмов и обеспечения точной их остановки, характеристики *2* и *II* являются промежуточными, а характеристики *3* и *III* служат для движения механизмов с номинальной скоростью.

В ЭП подъемников и экскаваторов понижение скорости обычно получают путем формирования специальных механических характеристик (см. рис. 59.9 и 59.10). Для крановых механизмов часто применяют асинхронные ЭП с реостатным регулированием, которые не обеспечивают характеристик вида *1* на рис. 59.9 и 59.10.

КРАНОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Для электропривода крановых механизмов выпускаются специальные двигатели постоянного тока серии Д и асинхронные двигатели серии МТF и МТН. Наиболее широко используются АД, которые составляют до 90 % общего числа двигателей, а с учетом двигателей некранового назначения (на электроталях) число АД превышает 95 % [59.26].

В крановом ЭП используют электродвигатели следующих типов:

1) АД с фазным ротором, с короткозамкнутым ротором, а также многоскоростные (с двумя или тремя обмотками статора с соотношением полюсов до 6:1);

2) ДПТ с последовательным или независимым возбуждением.

По способу управления крановые ЭП подразделяются на три группы:

1) с управлением от силовых кулачковых контроллеров (при мощности двигателей до 30 кВт), когда процесс управления, включая выбор ускорений, осуществляется самим оператором;

2) с управлением от кнопочных постов, при этом возможности управления ограничены схемными особенностями поста;

3) с управлением от сложных комплектных устройств — магнитных контроллеров (с использованием преобразователя электроэнергии или без него); в этом случае оператор с помощью командоконтроллера только выбирает необходимые скорости, а переходные процессы и промежуточные переключения осуществляются автоматически.

Требования к электроприводу. Основные требования к крановым ЭП обусловлены описанными выше особенностями статических и динамических нагрузок. Эти требования таковы:

1) регулирование скорости и момента двигателей в соответствии с определенным набором механических характеристик (см. рис. 59.9 и 59.10);

2) ограничение динамических нагрузок в элементах механической части электропривода (ускорений и моментов);

3) повышенная надежность и безопасность работы крановых установок. Для защиты ЭП крановых механизмов используют специальные комплектные устройства — защитные панели [59.26], осуществляющие максимальную, нулевую и конечную защиту, а также нулевую блокировку;

4) использование по возможности максимально простых схем ЭП, что обусловлено массовостью крановых установок и стремлением поддерживать невысокую стоимость их эксплуатации. Вместе с тем характерными особенностями развития массовых крановых установок является повышение их производительности путем увеличения средних скоростей движения при одновременном снижении установочных скоростей для повышения точности остановки. Это обусловливает увеличение диапазона регулирования скорости. Согласно [59.26] в 1960 г. удовлетворительным считался диапазон регулирования 4:1, а в настоящее время ставится задача получения для большинства кранов диапазона (8—10):1;

5) упрощение управления краном с целью уменьшения утомляемости крановщиков. При использовании максимально простых систем ЭП с реостатным регулированием и релейно-контакторным управлением из-за неудовлетворительного вида механических характеристик крановщику приходится производить большое количество дополнительных переключений, что повышает число включений элементов электрооборудования, увеличивает износ аппаратуры и интенсифицирует труд крановщика. При использовании более сложных ЭП, обеспечивающих характеристики, показанные на рис. 59.9 и 59.10, число переключений при управлении краном резко уменьшается. При этом эффективность работы ЭП повышается, если обеспечивается высокая надежность его работы;

6) формирование специальных динамических режимов некоторых кранов (автоматическое гашение колебаний грузов на перегружателях и башенных кранах, синхронизация опор крупных козловых кранов и т.д.);

7) повышенная точность остановки для ряда крановых установок (краны-штабелеры, контейнерные краны), для обеспечения которой в ряде случаев необходимо применение позиционных ЭП.

Системы электроприводов. Наиболее массовое распространение для крановых механизмов получил простейший асинхронный ЭП с силовыми кулачковыми контроллерами, в котором используется реостатное регулирование по несимметричной или симметричной схеме в цепи ротора двигателя. Типовые механические характеристики такого ЭП [59.26] значительно отличаются от требуемых (см. рис. 59.9 и 59.10). ЭП с кулачковыми контроллерами имеют следующие недостатки: невысокие регулировочные свойства из-за отсутствия посадочных скоростей, низкие энергетические показатели. Несколько более высокие показатели имеют асинхронные ЭП с кулачковым контроллером при использовании схемы динамического торможения с самовозбуждением. Такие ЭП (рис. 59.11) используются для механизмов подъема и обеспечивают при спуске диапазон регулирования до 8:1.

ЭП постоянного тока с кулачковыми контроллерами находят ограниченное применение (в тех случаях, когда электроснабжение крана осуществляется на постоянном токе).

ЭП с магнитными контроллерами применяют для систем как переменного, так и постоянного тока. На постоянном токе такие ЭП выполнены аналогично системам с кулачковыми контроллерами и базируются на использовании различных схем регулирования скорости двигателей постоянного тока последовательного возбуждения (реостатное регулирование, схема с шунтированием обмотки якоря, схема безопасного спуска). На переменном токе используются системы управления с одно- и двухскоростными короткозамкнутыми двигателями [59.26] и двигателями с фазным ротором. Короткозамкнутыми двигателями обычно управляют с помощью кнопок.

При использовании магнитных контроллеров для управления АД с фазным ротором применяются следующие системы ЭП:

1) система с реостатным регулированием в цепи ротора и использованием режима торможения противовключением. Система ЭП проста, но не обеспечивает устойчивых пониженных скоростей перемещения груза;

2) система с реостатным регулированием при использовании схемы динамического торможения с самовозбуждением. Механические характеристи-

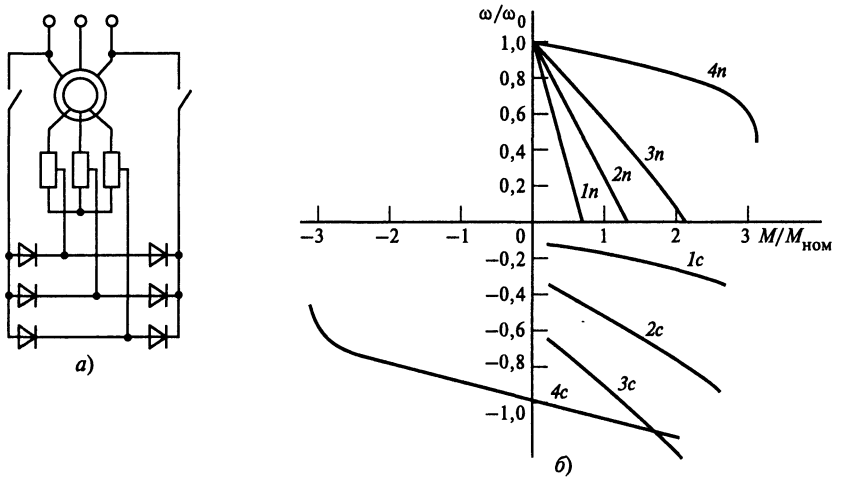


Рис. 59.11. Схема динамического торможения АД с самовозбуждением (*а*) и получаемые с ее помощью механические характеристики ЭП с кулачковым контроллером (*б*)

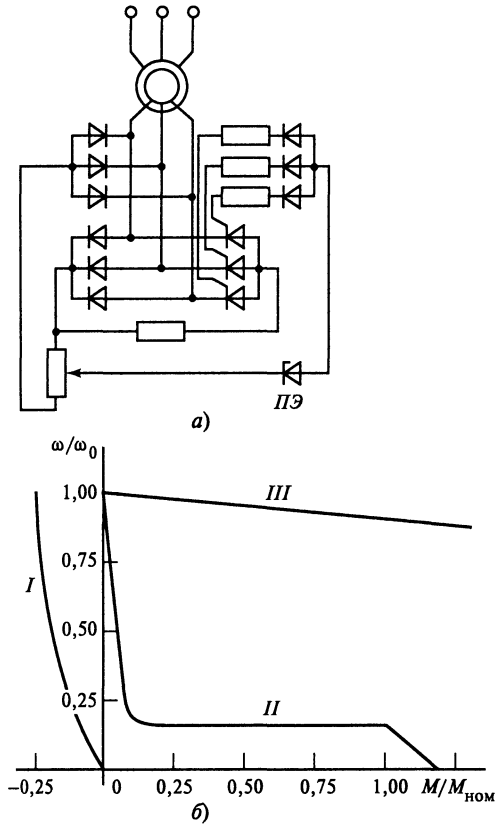


Рис. 59.12. Схема импульсно-ключевого включения асинхронного двигателя (*а*) и получаемые с ее помощью механические характеристики (*б*)

ки этой системы аналогичны приведенным на рис. 59.11, *б*. Такой ЭП используется только для механизмов подъема, поскольку режим динамического торможения возможен при активном моменте сопротивления;

3) система с так называемым импульсно-ключевым способом регулирования скорости, предназначенная для механизмов передвижения. На рис. 59.12, *а* и *б* показаны соответственно схема импульсно-ключевого управления и механические характеристики ЭП. Принцип действия схемы заключается в сравнении выпрямленного напряжения ротора двигателя с напряжением порогового элемента *ПЭ* (например, стабилитрона) и автоматическом включении тиристорного полууправляемого моста в случае, если первое из этих напряжений больше, чем второе, либо при отключении его в противном случае. При таком управлении обеспечивается характеристика *II*, имеющая участок стабильной работы на пониженной скорости. Характеристика *I* получается в схеме динамического торможения и обеспечивает работу механизма передвижения в тормозном режиме, а естественная характеристика *III* определяет номинальную скорость механизма.

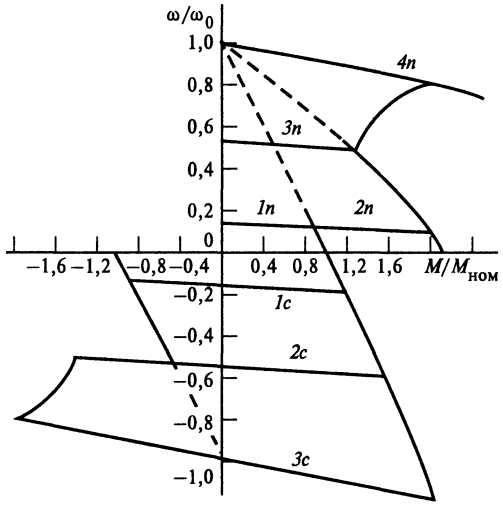


Рис. 59.13. Механические характеристики асинхронного электропривода с тиристорным преобразователем напряжения для механизма подъема

В крановых ЭП переменного тока все большее распространение находят полупроводниковые преобразователи. Для АД с фазным ротором используют включаемые в цепи статора тиристорные преобразователи (ТП) напряжения. С целью получения малых скоростей механизмов предусмотрена обратная связь по скорости с помощью тахогенератора.

Такие ЭП используются как для механизмов подъема, так и для механизмов передвижения. На рис. 59.13 приведены механические характеристики для ЭП механизма подъема. Для крановых механизмов промышленностью освоен ЭП — преобразователь частоты с непосредственной связью — АД. Такая система с двухскоростными АД обеспечивает большие возможности по регулированию скорости.

В крановых ЭП постоянного тока получила распространение система генератор—двигатель (Г—Д), которая в настоящее время все более заменяется системой тиристорный преобразователь—двигатель (ТП—Д).

В настоящее время разрабатываются асинхронные крановые ЭП с квазичастотным управлением, с импульсным регулированием в цепи ротора двигателя при использовании тиристорных и транзисторных коммутаторов, с частотным управлением при использовании автономных инверторов.

В табл. 59.4 приведены основные технические данные выпускаемых промышленностью крановых ЭП переменного и постоянного тока.

Таблица 59.4. **Системы крановых электроприводов**

Электропривод	Диапазон мощностей, кВт	Диапазон регулирования скорости D	
		ниже номинальной	выше номинальной
Асинхронный с кулачковым контроллером, регулирование скорости реостатное	2—30	3:1	—
То же при использовании схемы динамического торможения с самовозбуждением	5—30	7:1	—
Асинхронный с магнитным контроллером, регулирование скорости реостатное	2—180	4:1	—
То же при использовании схемы динамического торможения с самовозбуждением	20—180	8:1	—
Асинхронный с импульсно-ключевым управлением	2—30	10:1	—
Асинхронный с тиристорным преобразователем напряжения статора и резисторами в роторе	2—180	10:1	—
С многоскоростным АД и преобразователем частоты с непосредственной связью	2—60	40:1	—
Постоянного тока с кулачковым контроллером, регулирование скорости реостатное и с использованием потенциометрических схем	3—15	4:1	2:1
Постоянного тока с магнитным контроллером, регулирование скорости реостатное и с использованием потенциометрических схем	3—180	6:1	2:1
Постоянного тока по системе Г—Д	20—180	10:1	2,5—1
Постоянного тока по системе ТП—Д	50—300	10:1	2,5—1

ЭЛЕКТРОПРИВОД ЛИФТОВ

Особенности схем управления. Схемы управления лифтовыми установками содержат определенный набор устройств или блоков, каждый из которых предназначен для выполнения определенных функций. В общем случае структурную схему лифтовой установки можно представить в виде, показанном на рис. 59.14. В соответствии с этой схемой лифтовая установка работает следующим образом.

Команда на начало движения лифта подается с помощью кнопочного устройства приказов и вызовов в узел, который осуществляет запоминание и последующее снятие соответствующих команд после их выполнения. Одним из наиболее сложных и ответственных узлов схемы управления лифтовой установки является позиционно-согласующее устройство (ПСУ), которое служит для определения положения кабины в шахте и выдачи сигналов для движения кабины в нужном направлении и ее остановки. Конструктивно ПСУ выполняют в виде набора электромеханических переключателей, размещаемых в шахте или смонтированных в специальных приборах — копировальном аппарате или селекторе, которые находятся в машинном помеще-



Рис. 59.14. Структурная схема лифтовой установки

нии и связаны с кабиной механической или электрической связью.

Сигналами с выхода ПСУ осуществляется управление электроприводом подъемной лебедки и механическим тормозом с электромагнитным приводом. Узел точной остановки осуществляет перевод кабины на пониженную скорость или введение в систему ЭП контура регулирования положения. После остановки кабины автоматически включается ЭП дверей кабины и шахты. В лифтах с ручным управлением дверей этот узел отсутствует.

Узел защиты и блокировки обеспечивает безопасность работы лифта. Этот узел исключает возможность движения кабины при открытых или незаблокированных замками дверях и открывания дверей шахты при отсутствии кабины на данном этаже, осуществляет остановку кабины при обрыве канатов, превышении допустимой скорости, нажатии аварийной кнопки «Стоп» и срабатывании защиты.

Схема управления лифта включает также устройства сигнализации и освещения кабины. Вызывная сигнализация предназначена для извещения пассажиров о занятости кабины, направлении ее движения, принятии вызова, а также для извещения обслуживающего персонала о состоянии схемы вызывных устройств.

Позиционная световая сигнализация предназначена для извещения пассажиров и обслуживающего персонала о местонахождении кабины в данный момент.

Требования к электроприводу. Основные требования к ЭП лифтов следующие:

надежность в работе, обеспечение безопасности при пользовании лифтовой установкой;

малошумность (для лифтов используют специальные электродвигатели, обеспечивающие пониженный уровень шума);

удобство и простота в эксплуатации и обслуживании;

ограничение ускорений кабины (по условиям комфортности для пассажирских лифтов и отсутствия проскальзывания каната относительно канатоведущего шкива для грузовых лифтов);

обеспечение плавных переходных процессов пуска и торможения при широких пределах изменения момента сопротивления (см. рис. 59.3, *в*). На рис. 59.15 приведены зависимости скорости, ускорения и рывка для кабины лифта. Эти зависимости построены исходя из ограничения ускорений и рывков на допустимом уровне;

наличие ревизионной пониженной скорости $v_{рев} \le 0{,}36$ м/с для лифтов с основной рейсовой скоростью более 0,71 м/с;

обеспечение точности остановки кабины относительно уровня этажной площадки (10—20 мм для скоростных и больничных лифтов, 35—50 мм для

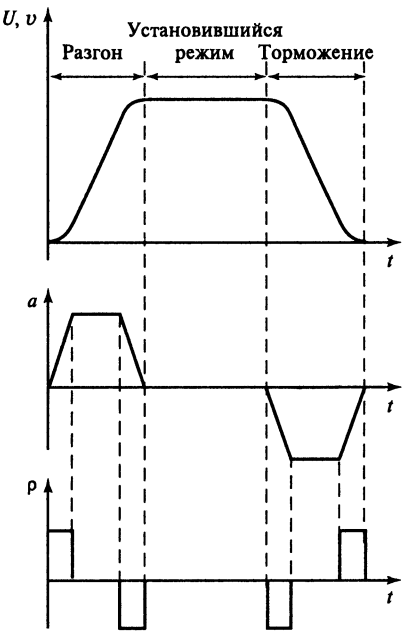


Рис. 59.15. Желаемые зависимости от времени скорости *v*, ускорения *a* и рывка ρ кабины лифта

остальных лифтов). Для лифтов с номинальной скоростью кабины не выше 1,4 м/с указанные ревизионная скорость и точность остановки реализуются путем создания механической характеристики ЭП лифта при пониженной скорости;

оборудование лифтовой лебедки автоматически действующим тормозом нормально замкнутого типа.

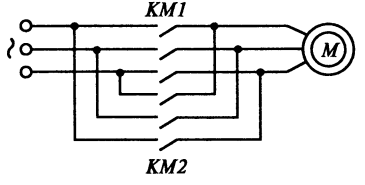
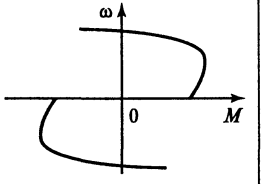
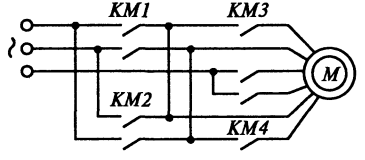
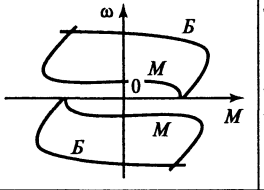
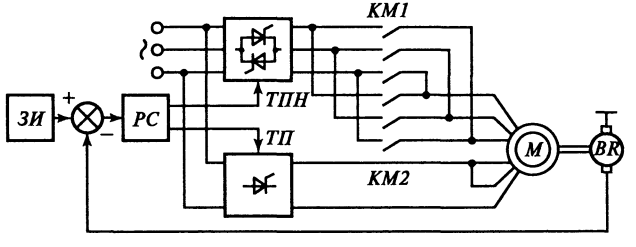
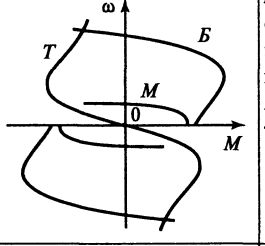
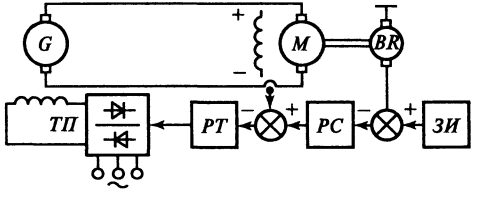
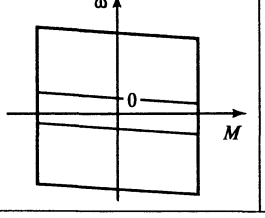
Системы электроприводов. Для лифтов используют ЭП переменного тока с односкоростными и двухскоростными короткозамкнутыми АД и ЭП постоянного тока с управляемыми ТП.

Наиболее распространенные схемы ЭП лифтовых лебедок для различных рабочих скоростей движения кабины приведены в табл. 59.5.

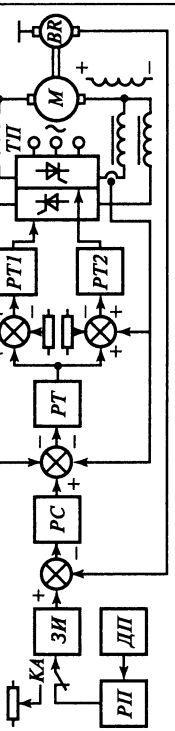
Для лифтов со скоростью движения до 0,5 м/с применяется простейшая схема ЭП с короткозамкнутым АД. Ограничение ускорений в этом случае производится путем преднамеренного увеличения момента инерции ЭП лифтовой лебедки за счет применения специальных лифтовых двигателей с повышенным моментом инерции и дополнительных маховиков, устанавливаемых на валу двигателя.

При скорости кабины выше 0,5 м/с необходимо иметь дополнительную механическую характеристику, обеспечивающую возможность работы двигателя на пониженной скорости. Эта характеристика нужна для движения кабины с ревизионной скоростью и обеспечения требуемой точности остановки. Для лифтов со скоростью движения кабины не выше 1,4 м/с наиболее распространенным явля-

Таблица 59.5. **Системы электроприводов пассажирских лифтов**

Скорость кабины, м/с	Принципиальная схема	Механические характеристики	Примечания
0,5			Скорость не регулируется. Ограничение ускорений параметрическое. Торможение при замедлении механическое. *КМ1*, *КМ2* — реверсивные контакторы
1,4			Диапазон регулирования D = (3—4):1. Ограничение ускорений параметрическое. Разгон при пуске и движение с номинальной скоростью — по характеристике *Б*. Дотягивание и ревизия — на характеристиках *М*. *КМ3*, *КМ4* — контакторы большой (*Б*) и малой (*М*) скорости
2,0			D = 10:1. Разгон при пуске и движение с номинальной скоростью — по характеристикам *Б*. Торможение при замедлении — по характеристикам *Т* (питание обмотки малой скорости от *ТП*). Ревизия — на характеристиках *М* (цепи питания обмотки малой скорости переменным током на схеме не показаны)
2,0			D = 10:1. Ограничение ускорений и рывков с помощью задатчика *ЗИ*. Регуляторы: скорости *РС* — пропорциональный с ограничением, тока *РТ* — пропорционально-интегральный

Окончание табл. 59.5

Скорость кабины, м/с	Принципиальная схема	Механические характеристики	Примечания
2—4			D = 10:1. Ограничение ускорений и рывков с помощью задатчика *ЗИ*. Регуляторы: скорости *РС* и тока *РТ* — пропорционально-интегральные (*РС* с ограничением), уравнительных токов *РТ1*, *РТ2* и положения *РП* — пропорциональные; *ДП* — датчик положения

ется ЭП с двухскоростным асинхронным двигателем и контакторным управлением. Ограничение ускорений в переходных процессах в этом случае производится таким же образом, как и в предыдущем случае.

Использование двухскоростных АД с независимыми обмотками, управляемых от ТП, позволяет увеличить скорость движения кабины до 2 м/с. Ограничение ускорений и рывков в такой системе ЭП осуществляется в одноконтурной замкнутой системе регулирования скорости путем формирования оптимальной тахограммы движения.

В табл. 59.5 показана схема с двухскоростным АД, обмотка большой скорости которого питается от ТП переменного напряжения ТПН, а обмотка малой скорости используется для получения ревизионной скорости и формирования режима динамического торможения АД при питании от управляемого выпрямителя ТП.

При скорости движения кабины более 2 м/с используются ЭП постоянного тока по системе Г—Д и ТП—Д. Эти ЭП помимо контуров регулирования скорости имеют контуры регулирования тока. Точность остановки кабины осуществляется контуром положения, который включается при подходе кабины к зоне точной остановки. Линейные механические характеристики в системе ТП—Д обеспечиваются путем исключения работы ЭП в зоне прерывистых токов за счет введения в систему регулирования дополнительных регуляторов тока *РТ1* и *РТ2*, предназначенных для поддержания на требуемом уровне уравнительных токов.

ЭЛЕКТРОПРИВОД ЭКСКАВАТОРОВ

В настоящее время для управления основными механизмами одноковшовых экскаваторов преимущественное распространение имеет система Г—Д с возбуждением генератора от магнитных усилителей или ТП [59.30, 59.31]. На рис. 59.16 приведена структурная схема такой системы, которая представляет собой двухконтурную систему подчиненного регулирования с внутренним контуром регулирования момента (тока) и внешним контуром регулирования напряжения двигателя. Особенностью внутреннего контура является наличие интегрального регулятора тока *РТ*, представляющего собой генератор постоянного тока (с критическим самовозбуждением при питании обмотки возбуждения от магнитных усилителей или критической обратной связью по ЭДС при возбуждении от ТП), и звена ограничения *ЗО*, подключенного на вход *РТ*. Регулятор напряжения *РН* с коэффициентом $k_{р.н}$ выполнен в виде пропорционального звена с ограничением.

Основными положительными качествами структуры на рис. 59.16 являются ее сравнительная

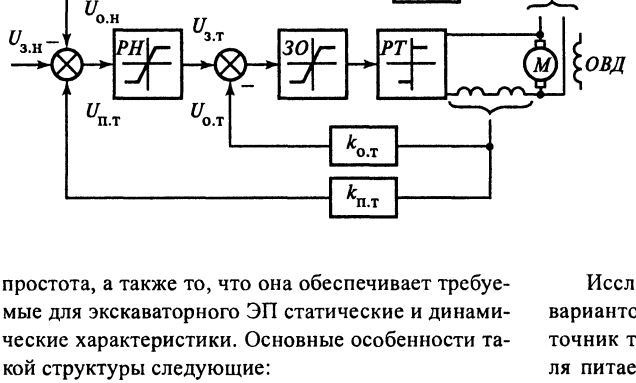


Рис. 59.16. Структурная схема экскаваторного электропривода постоянного тока:

$U_{з.н}$ — напряжение задания на входе регулятора напряжения; $U_{о.н}$ — сигнал отрицательной обратной связи по напряжению; $U_{п.т}$ и $U_{о.т}$ — сигналы положительной и отрицательной обратных связей по току; $U_{з.т}$ — напряжение задания на входе контура регулирования тока; ОВД — обмотка возбуждения двигателя

простота, а также то, что она обеспечивает требуемые для экскаваторного ЭП статические и динамические характеристики. Основные особенности такой структуры следующие:

1) обеспечиваются требуемые «экскаваторные» механические характеристики ЭП. Действительно, наличие интегрального *РТ* и ограничение сигнала на входе контура тока, а также отрицательная связь по току якоря с коэффициентом $k_{о.т}$ обеспечивают вертикальный участок механической характеристики при заданном моменте стопорения, а наличие отрицательной обратной связи по напряжению двигателя с коэффициентом $k_{о.н}$ и положительной обратной связью по току якоря с коэффициентом $k_{п.т} = k_{о.т} / k_{р.н}$, где $k_{р.н}$ — коэффициент усиления регулятора *РН*, обеспечивает требуемую жесткость на рабочем участке механической характеристики;

2) требуемые для экскаваторных ЭП характеристики «удерживания ковша» (см. характеристику *0* на рис. 59.9) в схеме рис. 59.16 формируются автоматически при $U_{з.н} = 0$;

3) в схеме отсутствует тахогенератор, что улучшает эксплуатацию ЭП. Наличие контура регулирования напряжения (а не скорости) двигателя обеспечивает жесткость рабочих участков механических характеристик на уровне примерно естественной характеристики, что приемлемо для экскаваторов;

4) схема обеспечивает ограничение тока и момента двигателя в динамике на уровне, определяемом ограничением сигнала на выходе регулятора *РН*;

5) наличие звена ограничения *ЗО* обеспечивает ограничение темпа изменения ЭДС генератора, а вместе с тем ограничивает и ускорение двигателя;

6) при всех моментах сопротивления любой переходный процесс пуска или торможения имеет равномерный характер с ограниченными моментами и ускорениями, что требуется для экскаваторов.

В настоящее время для механизмов экскаваторов ведутся интенсивные работы по внедрению ЭП по системе ТП—Д и частотно-управляемых асинхронных ЭП.

Исследования показали, что перспективным вариантом системы ТП—Д является система источник тока—двигатель, в которой якорь двигателя питается от нереверсивного ТП, работающего в режиме регулируемого источника тока. В этой системе используется реверсивный полупроводниковый преобразователь для возбуждения двигателя. При воздействии на возбуждение двигателя обеспечивается управление знаком и значением момента и скорости ЭП.

В частотно-регулируемых экскаваторных ЭП наиболее перспективными являются два типа преобразователей частоты: с непосредственной связью и с промежуточным звеном постоянного тока при использовании инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией.

59.5. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Типичные представители этой группы электроприводов — электроприводы конвейеров, насосов, вентиляторов и компрессоров.

ЭЛЕКТРОПРИВОД КОНВЕЙЕРОВ

Общие сведения. Конвейер, транспортер — это машина непрерывного действия для перемещения сыпучих, кусковых или штучных грузов. По типу тягового органа различают конвейеры с ленточным, цепным, канатным и другими тяговыми органами и конвейеры без тягового органа (винтовые, инерционные, вибрационные, роликовые). По типу грузонесущего органа различают ленточные, пластинчатые, скребковые, подвесные грузонесущие, толкающие, тележечные, ковшовые и люлечные, а также винтовые, инерционные, вибрационные, роликовые конвейеры.

Конвейеры находят применение во всех отраслях народного хозяйства для выполнения погрузочно-разгрузочных работ, обеспечения непрерывности технологического процесса, выполнения ряда последовательных операций в поточном производстве. Наряду с обеспечением транспортно-технологических функций конвейеры являются основными средствами комплексной механизации и автомати-

зации погрузочно-разгрузочных и складских операций. Современное производство немыслимо без конвейеров, которые определяют темп производства, его ритмичность, способствуют повышению производительности труда и выпуска продукции.

Конвейеры с гибким тяговым элементом состоят из следующих частей: грузонесущего органа, который непосредственно несет на себе транспортируемый груз; тягового органа, передающего движение грузонесущему органу; ходовых опорных устройств (катков, роликов, кареток и т.п.), с помощью которых перемещаются грузонесущий и тяговый органы; натяжного устройства, обеспечивающего необходимое первоначальное натяжение тягового органа; приводного устройства, сообщающего движение тяговому органу; поддерживающей металлоконструкции конвейера, включающей в себя и направляющие пути. У отдельных конвейеров тяговый и грузонесущий орган совмещены (например, лента в ленточных конвейерах).

Основными элементами приводных устройств являются приводной барабан, редуктор и электродвигатель. По числу барабанов различают одно-, двух- и трехбарабанные приводы. Электродвигатель с редуктором, муфтой, тормозом образует приводной блок, в состав которого могут входить также отклоняющие барабаны и приспособление для очистки барабанов и ленты.

Основным элементом натяжного устройства является натяжной барабан, перемещающийся на тележке или в направляющих неподвижной рамы. Натяжное устройство предпочтительно располагать в точке минимального натяжения тягового органа. Обычно его устанавливают на сбегающей с ЭП ветви тягового органа, а при ограниченной длине конвейера — в его хвостовой части.

Основным критерием выбора наивыгоднейшего места для приводного устройства является достижение минимального значения наибольшего натяжения тягового органа из всех возможных вариантов установки ЭП. Уменьшение натяжения гибкого органа экономически выгодно, так как приводит к снижению капитальных затрат на конвейерную установку. Приводная станция конвейера может устанавливаться как в верхней, так и в нижней части конвейеров в зависимости от условий эксплуатации. Обычно установка ЭП предпочтительнее вверху. Для определения места установки приводного устройства в общем случае производят сравнение вариантов расчетов, однако в зависимости от конструкции конвейеров эти места в ряде случаев определены [59.33].

Конвейерная лента является основным элементом ленточного конвейера. Ее стоимость составляет 30—50 % общей стоимости конвейера [59.33]. Поэтому правильный выбор ленты и типа привода существенно влияет на технико-экономические показатели конвейерного транспорта.

Технические характеристики конвейеров отличаются большим разнообразием по мощности приводных двигателей, скорости, массе перемещаемых грузов и т.п.

Основные параметры распространенных ленточных конвейеров общего назначения следующие [59.33]:

Ширина ленты, мм	400—3000
Скорость движения ленты, м/с	0,4—6,3
Тип ленты	Резино-тканевая, резино-тросовая
Диаметр барабана, мм	160—2000
Диаметр опорных роликов, мм	63—245
Мощность двигателей, кВт	0,37—2100

Характерные общие параметры подвесных конвейеров следующее:

Скорость транспортирования, м/с	0,01—0,70
Длина транспортирования, м	5—500
Мощность двигателя, кВт	1—18
Масса груза, кг	1—8000
Длина груза наибольшая, м	12

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Статическая нагрузка конвейера определяется силами трения в элементах конвейера (подшипниках, опорных роликах, в тяговых элементах при его изгибах и т.д.), а также составляющими сил тяжести транспортируемого груза на наклонных участках трассы конвейера. Результирующая сила сопротивления (тяговая сила) F_c определяется путем последовательного обхода трассы конвейера при учете всех сил сопротивления на каждом его участке.

Мощность приводного двигателя конвейера

$$P = k_з F_c \upsilon / \eta,$$

где F_c — тяговая сила конвейера; υ — скорость тягового органа; η — КПД приводного механизма, учитывающий потери в барабане или звездочке и редукторе; $k_з$ = 1,1—1,35 — коэффициент запаса, определяемый типом конвейера [59.33].

Значение тяговой силы определяется с помощью тягового расчета конвейера.

Тяговый расчет конвейера. Контур (трассу) конвейера разбивают на отдельные расчетные участки, в пределах каждого из которых сила сопротивления характеризуется какой-либо одной функцией. Все силы сопротивлений, имеющиеся в конвейере, разделяют на сопротивления, не зависящие от натяжения гибкого органа (сопротивление

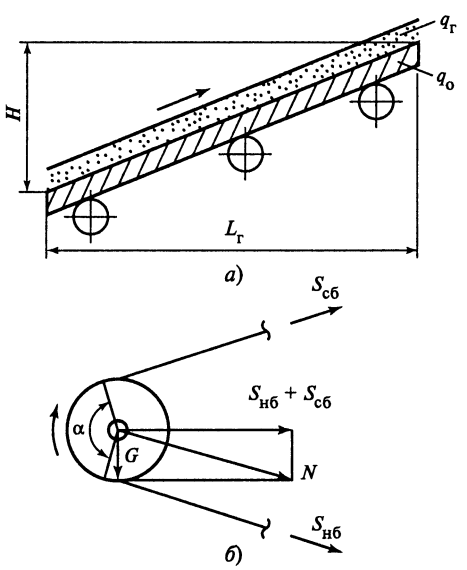


Рис. 59.17. К определению сил сопротивления конвейера:

а — на прямолинсйных участках; *б* — на участках изгиба тягового органа

группы роликовых опор, сопротивление от веса ленты и груза), и на сопротивления, зависящие от натяжения тягового органа (в опорах барабанов и звездочек, на криволинейных участках).

Силы сопротивления на прямолинейном участке трассы конвейера (рис. 59.17)

$$\Delta F_п = \Delta F_р + \Delta F_г,$$

где $\Delta F_р = (q_г + q_о) w L_г$ — сила сопротивления роликовых опор, определяемая расчетной линейной нагрузкой от транспортируемого груза $q_г$ и тягового органа $q_о$; $L_г$ — горизонтальная проекция рассматриваемого прямолинейного участка; w — коэффициент сопротивления на данном участке конвейера.

Для катков с цилиндрическими или сферическими ободами

$$w = \frac{\mu \dfrac{d_ц}{2} + f}{D_к / 2} k_р,$$

т.е. коэффициент сопротивления определяется так же, как и для механизма передвижения с приводными колесами (см. § 59.4),

$$\Delta F_г = \pm (q_г + q_о) H$$

— сопротивление силы тяжести груза и тягового органа для высоты H данного участка конвейера.

Знак «+» берется в случае, если на данном участке конвейер работает на подъем, и знак «–» — в противном случае

На криволинейных участках сила сопротивления движению определяется двумя составляющими: силой от изгиба тягового органа и силой трения в подшипниках блоков или роликов, определяемой равнодействующей силой N (рис. 59.17, *б*). Сопротивления сбегающей ветви $S_{сб}$ для таких участков зависят от натяжения тягового органа и определяются в виде произведения натяжения набегающей ветви $S_{нб}$ на коэффициент изгиба тягового органа $k_и > 1$, т.е.

$$S_{сб} = S_{нб} k_и.$$

Согласно [59 35] при приближенных расчетах в зависимости от диаметра барабана и звездочки и условий работы при углах охвата тяговым органом 90 и 180° можно принять $k_и$ = 1,02—1,03 и $k_и$ = = 1,03—1,07 соответственно.

Силы сопротивления для различных участков трассы конвейеров самых разнообразных видов можно определить по методикам, изложенным в специальной литературе по конвейерным установкам [59.33—59 36].

Для определения тяговой силы и натяжения тягового органа в различных точках конвейера используют метод последовательного обхода по контуру (т.е. обхода по точкам сопряжений прямолинейных и криволинейных участков конвейера) Пронумеровав точки сопряжений, начиная от точки сбегания тягового органа с приводного барабана или звездочки, находят последовательно натяжения во всех этих точках и по разности натяжений на набегающей и сбегающей ветвях определяют тяговую силу.

В случае ленточного конвейера при указанном тяговом расчете получается связь между $S_{нб}$ и $S_{сб}$ в виде двучлена [59.18]:

$$S_{нб} = X S_{сб} + Y.$$

Кроме того, $S_{нб}$ и $S_{сб}$ связаны формулой Эйлера, выражающей условие отсутствия скольжения ленты по барабану:

$$S_{нб} = S_{сб} e^{\alpha\mu},$$

где α — угол охвата приводного барабана лентой, μ — коэффициент трения между тяговым органом и барабаном.

Решая совместно два последних уравнения, находим

$$S_{нб} = \frac{Y e^{\alpha\mu}}{e^{\alpha\mu} - X}; \quad S_{сб} = \frac{Y}{e^{\alpha\mu} - X},$$

после чего можно рассчитать натяжение тягового органа в любой точке конвейера, его тяговую силу $F_с = S_{нб} - S_{сб}$ и мощность приводного электродвигателя.

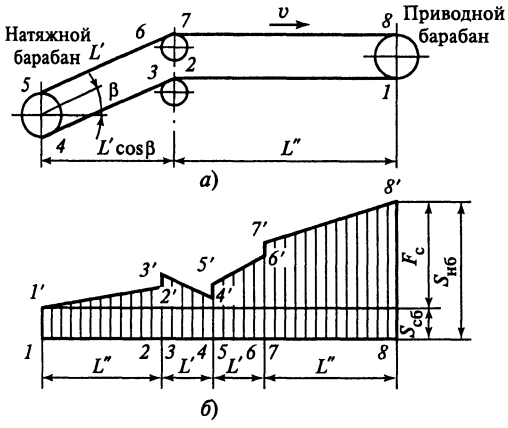


Рис. 59.18. Схема трассы (*а*) и график натяжения тягового органа (*б*) конвейера

В случае цепного конвейера задают минимальное натяжение цепи (300—500 Н и более в зависимости от типа конвейера) и далее, проводя тяговый расчет, находят $S_{нб}$, $S_{сб}$, тяговую силу $F_с = S_{нб} - S_{сб}$ и мощность приводного электродвигателя. На рис. 59.18 приведены пример схемы трассы конвейера и график натяжения его тягового органа. Конвейер предназначен для транспортировки груза от точки *5* к точке *8*. Приводной барабан расположен в головной, а натяжной — в хвостовой части конвейера. Прямолинейные участки конвейеров соединены отклоняющими барабанами (или звездочками). Вся трасса конвейера отмечена точками *1*, *2*, ..., *8*, которые отделяют прямолинейные участки трассы от криволинейных.

Многодвигательный электропривод конвейеров. Для привода конвейеров значительное распространение получили два типа многодвигательного ЭП.

Первый тип, применяемый как для ленточных, так и для цепных конвейеров, содержит две или более приводные станции, расположенные в промежуточных точках трассы. Применение нескольких ЭП позволяет снизить максимальное натяжение тягового органа. При определении рационального места установки приводов по трассе конвейера исходят из стремления в наибольшей степени снизить натяжение тягового органа и использовать одинаковые электродвигатели. Практически при установке n приводов снижается максимальное натяжение тягового органа несколько больше, чем в n раз [59.35]. Многодвигательные конвейеры рассматриваемого типа применяются в случае ленточных конвейеров при длине трассы 5—20 км по горизонтали и 1—2 км по наклону, а в случае цепных конвейеров — при длине трассы от 500 м до нескольких километров [59.33].

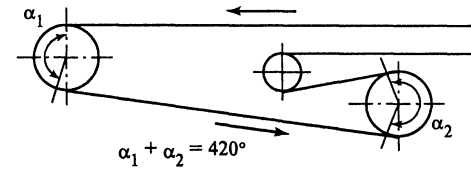


Рис. 59.19. Пример схемы двухбарабанного привода конвейера

Второй тип многодвигательного ЭП характерен для ленточных конвейеров, где могут использоваться двухбарабанные и трехбарабанные ЭП. В тех случаях, когда нежелательно увеличение натяжения ленты, но требуется повысить тяговое усилие конвейера, используют двухбарабанный ЭП, в котором обеспечивается увеличенный угол α охвата лентой барабана (рис. 59.19). Увеличение этого угла повышает тяговое усилие конвейера согласно выражению [59.33]

$$F_с = S_{сб}[e^{\mu(\alpha_1 + \alpha_2)} - 1].$$

Влияние динамических нагрузок. Электроприводы конвейеров имеют продолжительный режим работы, для которого характерны длительный период движения ходовой части с постоянной скоростью и кратковременные переходные режимы пуска и торможения. Несмотря на относительно малое время переходных процессов, их анализ является важной задачей, так как конвейер представляет собой систему масс, соединенных упругими связями (цепью или лентой). При переходных процессах в ЭП эти упругие связи деформируются и в тяговых элементах конвейера появляются значительные динамические нагрузки, которые в ряде случаев имеют колебательный характер.

Основным средством ограничения динамических нагрузок является снижение пускового динамического усилия путем увеличения времени пуска. Для конвейеров рекомендуется ограничивать ускорение движения ходовой части на уровне $a_{доп} = 0{,}1—0{,}2$ м/с^2 [59.33].

Следует отметить, что конвейеры принадлежат к инерционным механизмам, в которых момент инерции двигателя составляет лишь $(0{,}03—0{,}1)J_к$, где $J_к$ — суммарный момент инерции конвейера.

Для цепных конвейеров характерна неравномерность движения, вызываемая периодическими изменениями мгновенного радиуса навивки цепи на ведущую звездочку. Неравномерность движения тяговых цепей вызывает возникновение в них динамических усилий, которые снижаются с уменьшением шага цепей. Динамические усилия в существующих цепных конвейерах редко превышают 20—25 % статического натяжения цепи. При числе зубьев

приводной звездочки $z = 13$—20 и скорости движения $v \le 0{,}3$ м/с эти нагрузки сравнительно незначительны и учитываются соответствующим коэффициентом при выборе запаса прочности цепи [59.33].

Для ленточных конвейеров динамические нагрузки имеют характерные особенности и проявляются более значительно, чем в цепных конвейерах. При переходных процессах в ленточных конвейерах важно учитывать следующее [59.34]:

возрастают наибольшие усилия в ленте. Однако динамические нагрузки в ленте не настолько велики, чтобы их дополнительно учитывать при прочностном расчете ленты, тем более что они, как правило, учитываются в суммарном коэффициенте запаса прочности,

из-за действия динамических нагрузок происходит изменение натяжения ленты, что может привести к ее пробуксовке. Пробуксовка нежелательна, так как вызывает интенсивный износ нижней обкладки ленты, резкое уменьшение сцепления ленты с барабаном, что затрудняет дальнейший разгон и нормальную работу конвейера. Поэтому основной задачей динамических режимов является установление условий беспробуксовочного пуска и торможения.

Расчет динамики ленточного конвейера вызывает значительные трудности, поскольку механическая часть конвейера является сложной системой с распределенными по его длине параметрами. При этом продольная жесткость ленты определяется не только ее упругими деформациями, но также формой и размером провисания между роликоопорами и нелинейно зависит от натяжения ленты. Кроме того, лента обладает значительным внутренним трением.

Анализ вопросов динамики пуска приобретает особое значение при увеличении производительности (до 20 000 т/ч) и длины (до 11км) конвейеров и необходимости ограничения коэффициента динамичности ленты в процессе пуска до 1,4—1,6. Согласно [59.36] такой коэффициент динамичности может быть достигнут, если окружное усилие приводного барабана $F_{пр}$ при пуске формировать из двух участков: на первом участке ($0 \le t \le t_{тр}$) значение $F_{пр}$ изменяется по линейному закону, а на втором участке ($t_{тр} \le t \le t_{п}$) $F_{пр}$ поддерживается постоянным и равным максимальному значению $F_{max} = F_{с} + m_{\Sigma к} a_{доп}$, где $m_{\Sigma к}$ — приведенная к окружности барабана суммарная масса механизма конвейера. Время трогания $t_{тр}$ представляет собой время распространения фронта волны упругих деформаций от левого сечения тягового органа до конечного правого и обратно.

Значительные динамические усилия возникают не только при пуске, но и при торможении конвейера. В тормозных режимах также необходимо ограничивать динамические усилия, чтобы исключить пробуксовку ленты относительно барабана С этой целью применяют плавное нарастание тормозного момента путем включения нескольких тормозных устройств с некоторым интервалом и использования электрического торможения приводного двигателя.

Требования к электроприводам. Требования к ЭП конвейеров обусловлены необходимостью получения его трех основных режимов (пуска, установившегося движения, торможения) и ряда вспомогательных и наладочных режимов, а также обеспечения надежной и бесперебойной работы конвейерных установок. Основные требования, предъявляемые к ЭП конвейеров, следующие.

1. Обеспечение плавного пуска двигателей с ограниченными значениями моментов и ускорений с целью:

безударного выбора зазоров в зубчатых передачах в начальный период трогания;

ограничения динамических усилий тягового органа;

получения надежного сцепления ленты с барабанами в ленточных конвейерах;

ограничения раскачивания грузонесущих органов (люлек, кабин) в подвесных конвейерах;

создания требуемых комфортных условий в конвейерах, предназначенных для перевозки людей (эскалаторы, канатные дороги).

2. Обеспечение больших моментов при трогании конвейера в начале его пуска, поскольку сопротивления трения в покое примерно в 1,5 раза превышают сопротивления трения при движении [59.33], а также из-за возможного наличия грязи в ходовых частях механизмов, застывания смазки при морозах и т.п.

3. Обеспечение установившегося режима с заданной скоростью движения рабочего органа. Период установившегося движения занимает основное время в конвейерных установках, поэтому их ЭП характеризуется продолжительным режимом работы. Чаще всего в установившихся режимах конвейеры работают с одной скоростью, однако в ряде случаев требуется регулирование скорости, в частности в приводах конвейеров с относительно высокой скоростью движения ленты, которые должны обеспечивать дополнительную небольшую скорость для проведения осмотра ленты при ее ревизии, ремонтных работах (при этом конвейер переводится в режим местного управления) и т.д Кроме того, в случаях изменения грузопотока конвейеров лента значительное время может работать

с недогрузкой. При этом рационально уменьшить скорость конвейера, чтобы лента работала с полной нагрузкой. Тогда увеличивается срок службы ленты, так как соответственно уменьшается число оборотов. В этих случаях в зависимости от количества поступающего на конвейер груза целесообразно обеспечить автоматическое регулирование скорости ленты с плавным переходом от одного уровня скорости к другому.

4. Необходимость равномерного распределения нагрузки между двигателями в многодвигательных ЭП конвейеров из-за различия в жесткости характеристик отдельных двигателей. Эксперименты показали, что для асинхронных ЭП с номинальным скольжением двигателей 4—6 % отклонение в нагрузках разных двигателей достигает 15—30 %. Для выравнивания нагрузок используют следующие способы:

применяют АД с повышенным скольжением;

в случае применения короткозамкнутых АД нормального исполнения дополнительно используют гидромуфты или электромагнитные муфты скольжения;

в случае применения АД с фазным ротором жесткости механических характеристик отдельных двигателей выравнивают путем включения резисторов в их роторные цепи.

5. Использование двух режимов: дистанционного и местного управления.

При дистанционном автоматизированном управлении пуск производится кратковременным нажатием пусковой кнопки и во избежание завалов ленты осуществляется в определенной последовательности, а именно против направления потока груза. Плановая остановка конвейерной линии производится в обратном порядке, т.е. последовательно по направлению потока.

Для монтажа, наладки и текущего профилактического ремонта обеспечивают перевод всех механизмов конвейера на местное управление.

В режиме местного управления предусматривается управление с пульта, расположенного вблизи каждой приводной станции. В этом режиме привод должен обеспечивать реверсирование и пониженную скорость конвейера.

6. Согласование движения конвейера для сборочных операций с целью выполнения строго согласованных технологических операций с грузами, перемещающимися по разным конвейерным линиям. Мощности двигателей таких конвейеров относительно небольшие, однако используются достаточно сложные позиционные ЭП (асинхронные ЭП по схеме электрического вала, следящие ЭП постоянного тока с тиристорными преобразователями).

Системы электроприводов. Системы ЭП, применяемые для конвейеров, указаны в табл. 59.6. В ленточных конвейерах длиной до 300 м и мощностью до 100 кВт, как правило, используются ЭП с асинхронным короткозамкнутым двигателем. Достоинство таких ЭП — простота и относительно низкая стоимость, недостатки — повышенный пусковой момент и, следовательно, возможность появления больших натяжений и пробуксовки ленты.

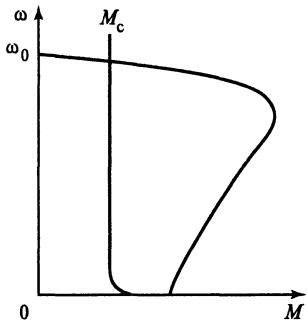
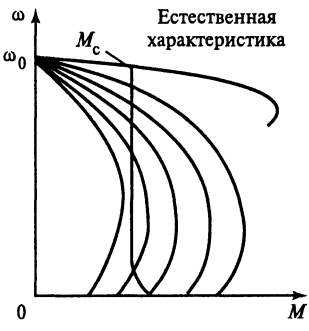
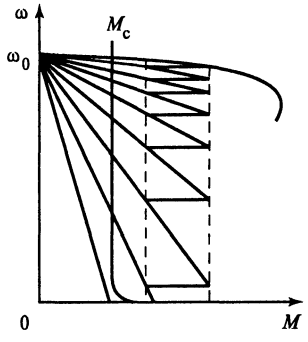
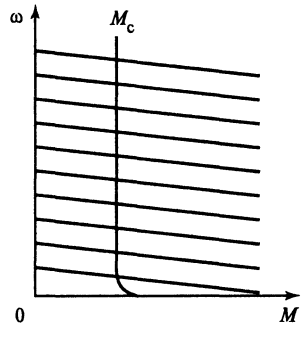
В ЭП конвейеров значительное распространение получили асинхронные ЭП с муфтами скольжения (гидромуфты, электромагнитные муфты). Такие ЭП обеспечивают равномерное распределение нагрузки между двигателями в многодвигательном ЭП и плавный пуск конвейера. В зарубежной практике находит применение двухдвигательный ЭП, в котором кроме главного двигателя устанавливается и вспомогательный меньшей мощности, который обеспечивает плавный разгон конвейерной ленты с уменьшенным ускорением. С помощью таких мероприятий область применения ЭП с короткозамкнутым АД расширяется до 200 кВт [59.34].

Для более мощных ЭП ленточных конвейеров наибольшее распространение получили АД с фазным ротором. При включении резисторов в роторные цепи АД обеспечивается плавный пуск конвейера, а в случае многодвигательного ЭП — равномерное распределение нагрузки между двигателями. В качестве роторных резисторов используют металлические реостаты с большим количеством пусковых ступеней (20—25), а также жидкостные реостаты с ручным или автоматическим управлением при помощи исполнительного ЭП. Такие ЭП широко используют при мощности 200—900 кВт в одном блоке. Суммарная мощность этих ЭП достигает тысяч киловатт.

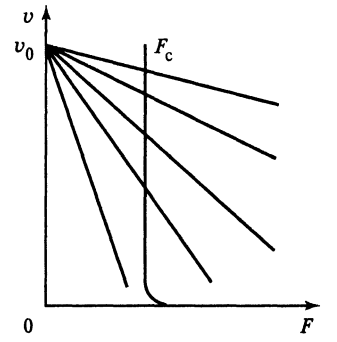
В приводе конвейеров получают распространение асинхронные ЭП с индукционными резисторами в цепи ротора АД [59.34]. Активное сопротивление таких резисторов определяется частотой протекающего через них тока. Такие ЭП при простой схеме обеспечивают примерно постоянный момент АД при пуске и ограничивают ускорение конвейеров.

В последнее время установлено, что для конвейеров во многих случаях следует использовать регулируемые ЭП, в качестве которых перспективными являются системы асинхронного ЭП с частотным управлением, асинхронные вентильные каскады, ЭП постоянного тока с ТП. Для конвейерных установок также перспективным является применение линейных АД. Они позволяют ликвидировать сложные и металлоемкие редукторные механические передачи и создать бесконтактные и безредукторные ЭП [59.34].

Таблица 59.6. **Системы ЭП конвейеров**

Тип	Механические характеристики	Примечание
С короткозамкнутым АД		Нерегулируемый ЭП, $P_{ном} < 100$ кВт
С короткозамкнутым АД и муфтами скольжения (электромагнитными, гидравлическими)		Плавный пуск, $P_{ном} < 200$ кВт
С фазным АД и управлением с помощью металлических и жидкостных реостатов		Плавный пуск, $P_{ном} < 3000$ кВт Дополнительный микропривод для пониженной скорости ленты
Частотно-управляемый асинхронный; асинхронный вентильный каскад; ТП—Д постоянного тока		Перспективные ЭП. Плавный пуск, регулирование скорости

Окончание тал. 59.6

Тип	Механические характеристики	Примечание
С линейным АД		Перспективные ЭП. Упрощенные механические передаточные устройства

ЭЛЕКТРОПРИВОД НАСОСОВ, ВЕНТИЛЯТОРОВ, КОМПРЕССОРОВ

Общие сведения. В современной технике используется большой класс машин для подачи жидкостей и газов, которые подразделяются на насосы (Н), вентиляторы (В), компрессоры (К) и нагнетатели. Насосы предназначены для перемещения жидкостей и сообщения им энергии; вентиляторы — это машины, перемещающие газовые среды при степени повышения давления до 1,15 (степенью повышения давления называется отношение давления газа на выходе из машины к давлению на ее входе). Нагнетатели (машины с естественным охлаждением) и компрессоры (машины с искусственным охлаждением) используются при степени повышения давления газовых сред более 1,15.

Наличие вращающегося рабочего колеса с лопастями является отличительным признаком лопастных машин (в технической литературе такие машины часто называют турбомеханизмами). Схемы лопастных машин приведены на рис. 59.20. Поток жидкости или газа, проходя через рабочее колесо *1* с лопастями *2* машин центробежного (ЦМ) типа, изменяет свое направление под углом 90°, в осевых машинах (ОМ) он перемещается вдоль оси рабочего колеса *3* с лопастями *4*, а в вихревых (ВМ) — по периферии рабочего колеса *5* с лопастями *6*.

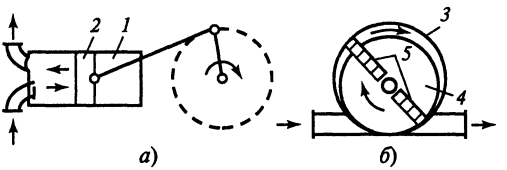


Рис. 59.21. Схемы объемных машин:

а — поршневого типа (одностороннего действия); *б* — роторного типа (с двумя пластинами)

Работа объемных машин (рис. 59.21) основана на всасывании и вытеснении жидкости или газа твердыми телами, движущимися в рабочих полостях. В машинах поршневого типа (ПМ) изменение объема рабочей полости (цилиндра *1*) осуществляется за счет возвратно-поступательного движения поршня *2*. В роторных машинах (РМ) внутри рабочей полости (корпуса *3*) вращается эксцентрично расположенный ротор *4* с пластинами *5*, которые под действием центробежных сил прижимаются к внутренней поверхности корпуса.

Наибольшее распространение в практике имеют ЦМ, ОМ и ПМ. При этом ОМ предпочтительны там, где требуется обеспечить высокую подачу при

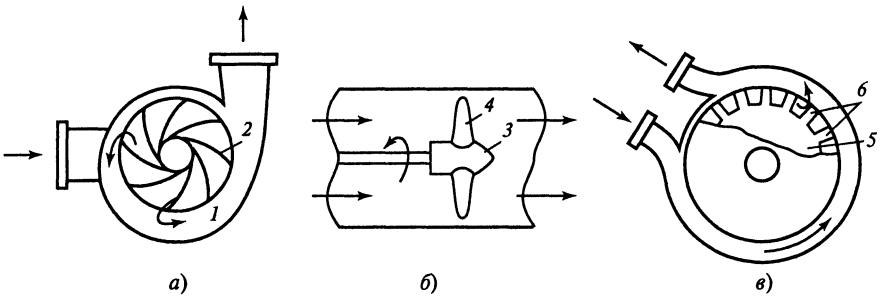


Рис. 59.20. Схемы лопастных машин:

а — центробежного типа; *б* — осевого типа; *в* — вихревого типа

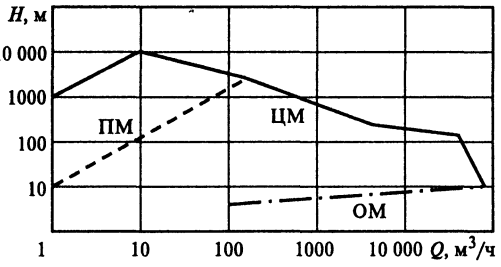


Рис. 59.22. График подачи и напоров водяных насосов различных типов

Таблица 59.7. **Ориентировочные значения основных параметров компрессоров и вентиляторов**

Рабочая машина	Тип	Подача, $м^3$/мин	Степень повышения давления
К	Поршневые	Не более 500	2,5—1000
	Роторные	Не более 500	3—12
	Центробежные	100—4000	3—20
	Осевые	100—15 000	2—20
В	Центробежные	Не более 6000	1—1,15
	Осевые	50—10 000	1—1,04

низком напоре. ВМ позволяют обеспечить наиболее высокий напор среди турбомеханизмов, однако они не нашли широкого распространения, так как характеризуются более низким КПД по сравнению с объемными машинами, обеспечивающими практически такие же значения напора и подачи, как и ВМ. Среди машин объемного типа наибольшее распространение имеют поршневые Н и К, которые используются в основном в тех случаях, когда необходимо обеспечить высокий напор при небольших значениях подачи.

На рис. 59.22 показаны области применения водяных Н различных типов в зависимости от развиваемых ими значений напора H и подачи Q [59.39]. Ориентировочные значения основных параметров К и В приведены в табл. 59.7.

Характеристики машин для подачи жидкостей и газов. Основными параметрами, характеризующими работу машин для подачи жидкостей и газов, являются создаваемые ими подача, давление и напор, а также энергия, сообщаемая потоку их рабочими органами.

Подача — это количество жидкости или газа, перемещаемое машиной в единицу времени. При измерении подачи в единицах объема ее называют объемной и обозначают обычно Q. Используется также понятие массовой подачи M_γ — массы жидкости или газа, подаваемой машиной в единицу времени,

$$M_\gamma = \gamma Q,$$

где γ — плотность среды, кг/$м^3$; Q — объемная подача, $м^3$/с.

Подачу можно определять на входе либо на выходе машины. Массовые подачи на входе и выходе машины любого типа одинаковы. Объемные же одинаковы только в Н — машинах, подающих практически несжимаемую среду, и приблизительно одинаковы в В. Объемная подача в К на выходе меньше, чем на входе, вследствие существенного изменения удельного объема при повышении давления газа. В расчетах принято исчислять объемную подачу К на их входе.

Давление насоса определяется зависимостью:

$$p = p_к - p_п + \gamma \frac{c_к^2 - c_п^2}{2} + \gamma g(z_к - z_п),$$

где $p_к$ и $p_п$ — соответственно давление на выходе (конечное) и на входе (начальное), Па; $c_к$ и $c_п$ — скорости потока жидкости на выходе и входе Н, м/с; $z_к$ и $z_п$ — высоты расположения центров тяжести выходного и входного сечений Н, м; $g = 9{,}81$ м/$с^2$.

Полный напор, развиваемый Н, м,

$$H = p/(\gamma g).$$

Напор, создаваемый В, выражают иногда в миллиметрах водяного столба: $h = p/g$, мм. вод. ст.

Давление в К измеряют по степени его повышения $\varepsilon = p_к / p_п$.

Важным параметром, характеризующим работу машин рассматриваемого типа с энергетической стороны, является удельная полезная работа. Для Н и В она определяется зависимостью $L_п = p/\gamma$, Дж/кг. Удельная работа К вычисляется более сложно с учетом вида термодинамического процесса [59.39].

Полезную мощность $P_п$, Вт, передаваемую машиной потоку жидкости или газа, можно определить следующим образом:

$$P_п = M_\gamma L_п = Qp = M_\gamma gH = \gamma gHQ.$$

Мощность, кВт, на валу Н, В, К

$$P = P_п / 1000\eta,$$

где η — КПД машины.

Значения КПД Н, В, К, приведенные в [59.39], указаны ниже. Часто для увеличения производительности эти машины изготавливают в виде блока, содержащего несколько последовательно соединенных ступеней. КПД таких многоступенчатых машин может быть определен по данным, приведенным ниже, как произведение КПД отдельных ступеней.

Коэффициенты полезного действия насосов, вентиляторов, компрессоров:

Центробежные насосы, вентиляторы, компрессоры большой мощности	0,75—0,92
Центробежные насосы малой и средней мощности	0,6—0,75
Осевые насосы и вентиляторы	0,7—0,9
Осевые компрессоры	0,8—0,9
Вихревые насосы	0,3—0,5
Поршневые насосы	0,65—0,85
Поршневые компрессоры	0,5—0,8
Роторные насосы	0,6—0,9
Роторные компрессоры	0,5—0,7

Характеристиками машин для подачи жидкостей и газов называют графически изображенные зависимости, отражающие характер изменения напора H (давления p), подачи Q, мощности P и КПД η машины при изменении ее режима работы.

Для лопастных Н и В характеристики изображают в виде зависимостей напора, мощности и КПД от подачи (рис. 59.23). В объемных машинах подача почти не зависит от напора. Поэтому в качестве аргумента здесь иногда используют давление или напор (рис. 59.24). Для К характеристики имеют такой же вид, как на рис. 59.23 и 59.24, с тем отличием, что вместо напора указывается степень повышения давления ε, а подача измеряется в единицах массы.

Основные типы напорных характеристик $H = f(Q)$ Н, В, К показаны на рис. 59.25.

Вид характеристик ЦМ зависит от коэффициента быстроходности n_s [59.38], который определяется по номинальным данным машины. Для центробежных Н коэффициент быстроходности находится по выражению

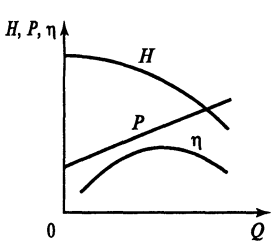


Рис. 59.23. Характеристики центробежной машины

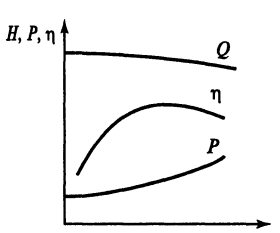


Рис. 59.24. Характеристики объемной машины

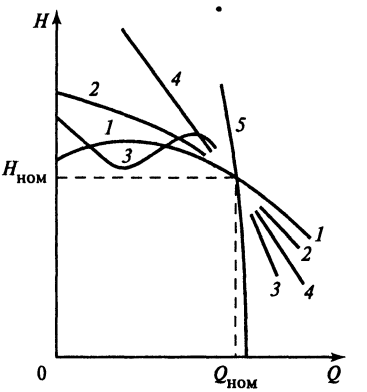


Рис. 59.25. Напорные характеристики машин для подачи жидкостей и газов:

1 — центробежной тихоходной; *2* — центробежной быстроходной; *3* — осевой; *4* — вихревой; *5* — объемной (поршневой и роторной)

$$n_s = \frac{3{,}65\, n_{\text{ном}} \sqrt{Q_{\text{ном}}}}{H_{\text{ном}}^{3/4}}.$$

Входящие в это выражение номинальные величины соответствуют режиму работы Н с максимальным КПД. Для многоступенчатых машин n_s подсчитывают, исходя из напора на одну ступень. На рис. 59.26 показаны характеристики центробежных Н с двусторонним входом при различных значениях n_s [59.38]. Для Н с односторонним входом характеристики имеют такой же вид, как на рис. 59.26, при условии, что n_s рассчитывается при двойном значении подачи $Q_{\text{ном}}$.

Пользуясь законами подобия, можно по известным характеристикам для номинальной скорости построить характеристики для скоростей, отличных от номинальной.

Законы подобия лопастных машин при изменении их угловой скорости ω выражаются следующими соотношениями:

$$Q_1/Q_2 = \omega_1/\omega_2;$$

$$H_1/H_2 = (\omega_1/\omega_2)^2;$$

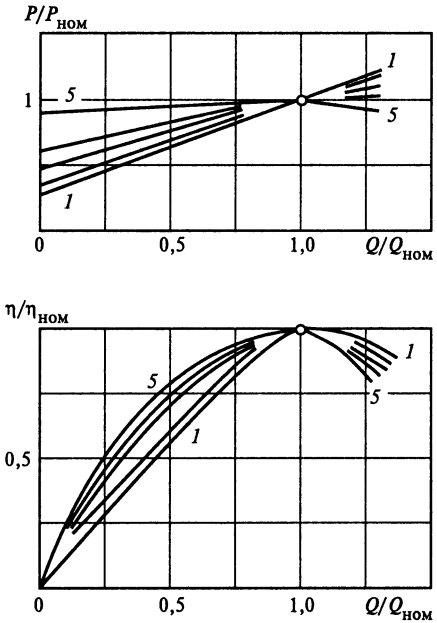
$$P_1/P_2 = (\omega_1/\omega_2)^3.$$

В объемных машинах напор не зависит от скорости. Поэтому для них законы подобия имеют вид

$$Q_1/Q_2 = \omega_1/\omega_2;$$

$$P_1/P_2 = \omega_1/\omega_2.$$

Приведенные соотношения основаны на допущении, что при изменении скорости КПД для подобных точек характеристик остается постоянным.



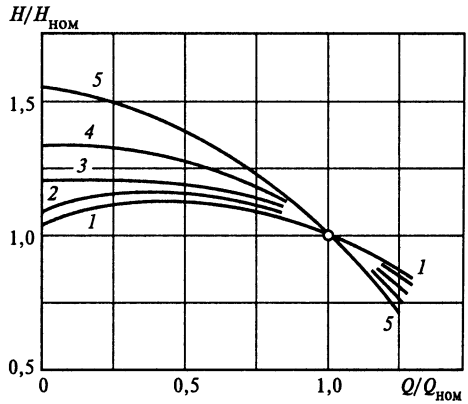


Рис. 59.26. Характеристики центробежных насосов при различных значениях коэффициента быстроходности n_s:

1 — n_s = 64; *2* — 106; *3* — 155; *4* — 212; *5* — 282

В действительности со снижением скорости КПД машин уменьшается, поэтому законы подобия для мощности справедливы в ограниченном диапазоне изменения подачи и напора.

На рис. 59.27 показаны характеристики для ЦМ, построенные для скоростей, равных 0,8 и $0{,}6\omega_{ном}$. Точки, получающиеся в результате пересчета по законам подобия, лежат на квадратичных параболах $H = aQ^2$ для напорных характеристик и на кубических параболах $P = bQ^3$ для характеристик мощности, где a и b — постоянные коэффициенты. Предполагается, что все точки характеристик, расположенные на одной параболе, имеют одинаковые значения КПД, соответствующие номинальной скорости машины.

В соответствии с законами подобия характеристики объемных машин получают путем пересчета значений подачи и мощности пропорционально первой степени скорости.

Совместная работа Н, В, К и магистрали в установившемся режиме работы этих машин определяется точкой пересечения ее напорной характеристики и характеристики магистрали, подключенной к машине. Характеристика магистрали описывается выражением

$$H_{маг} = H_{ст} + k_{маг} Q^2,$$

где $H_{маг}$ — полный напор в магистрали; $H_{ст}$ — статическая составляющая напора; $k_{маг}$ — коэффициент гидро- или аэродинамического сопротивления магистрали.

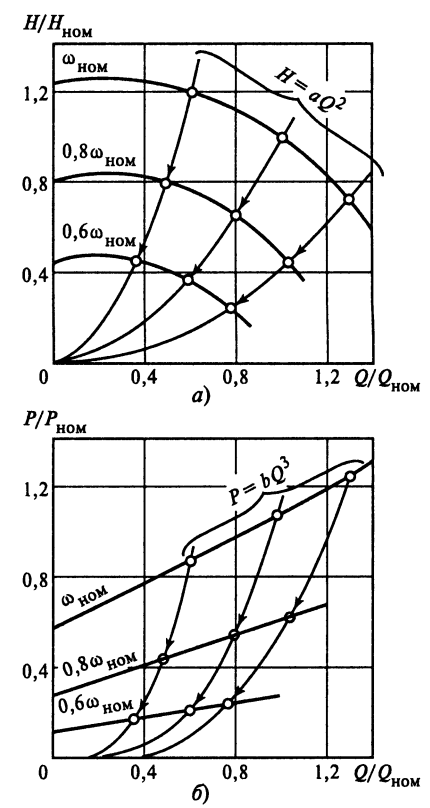


Рис. 59.27. Характеристики ЦМ для различных значений скорости:

а — напорные; *б* — мощности

Напор $H_{ст}$ имеет положительный знак, если направлен навстречу напору, создаваемому машиной, и отрицательный знак в противоположном случае. Значение $H_{ст}$ определяется: для Н — напором на его входе и геодезической разностью уровней потребителя и Н; для В — естественной тягой; для нагнетателей и К — давлением сжатого газа в магистрали (резервуаре).

Регулирование производительности Н, В, К осуществляется двумя способами: воздействием на характеристику магистрали или характеристики машин. Наиболее распространенный первый способ — дросселирование с помощью заслонки на выходе машины — приводит к изменению коэффициента сопротивления магистрали.

Изменение характеристики машины производится плавным либо ступенчатым регулированием ее скорости. При совместной работе нескольких машин регулирование их режимов может осуществляться за счет изменения количества работающих машин, одновременного регулирования скорости всех машин, комбинации количества работающих машин и регулирования скорости одной (или нескольких) машин.

Требуемый диапазон регулирования скорости определяется минимальными значениями подачи или напора:

$$D = \omega_{max}/\omega_{min} = Q_{max}/Q_{min} = \sqrt{H_{max}/H_{min}}.$$

Значения Q_{max} и H_{max} для лопастных машин, работающих на магистраль без статической составляющей напора, определяются пересечением характеристик магистрали и машины при максимальной скорости (если регулирование производится вниз от номинальной скорости, то $\omega_{max} = \omega_{ном}$). При наличии $H_{ст}$ значения Q_{max} и H_{max} определяются пересечением напорной характеристики машины при максимальной скорости и квадратичной параболы, проходящей через точку с координатами Q_{min} и H_{min} (рис. 59.28).

Для объемных машин напор (давление) не зависит от скорости, поэтому требуемый диапазон ее регулирования определяется по максимальному и минимальному значениям подачи.

Механические характеристики. Особенностью механических характеристик лопастных машин является функциональная зависимость момента от скорости. Вид зависимости $\omega(M)$ определяется режимом работы машины на магистраль и их характеристиками.

Машины для подачи жидкостей и газов могут работать на магистраль с постоянными или переменными параметрами. В практике очень часто В и особенно Н работают на магистраль с переменными параметрами, например параметры магистрали Н, работающих в системах водоснабжения, зависят

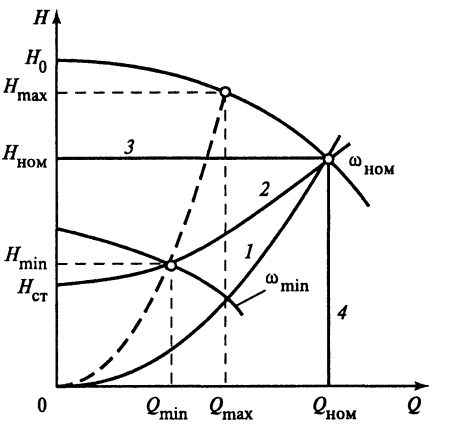


Рис. 59.28. Режимы работы лопастных машин на магистраль:

1 — $H_{ст} = 0$; *2* — $H_{ст} > 0$; 3 — $H = H_{ном} = \text{const}$; *4* — $Q = Q_{ном} = \text{const}$

от режимов водопотребления. В этих случаях однозначно определить механическую характеристику нельзя, а можно вести речь лишь о некотором поле режимов (в координатах Q, H или M, ω), в котором может работать машина.

Механическая характеристика определяется однозначно при работе машины на магистраль с постоянными параметрами и в системах автоматического регулирования выходных параметров машины, например стабилизации напора или подачи. Аналитическое выражение для расчета момента на валу лопастных машин любого типа имеет сравнительно простой вид лишь при $H_{ст} = 0$ (характеристика *1* на рис. 59.28):

$$M = M_{тр} + (M_{ном} - M_{тр})(\omega/\omega_{ном})^2,$$

где $M_{тр}$ — момент трения, который обычно не превышает 10 % номинального момента $M_{ном} = P_{ном}/\omega_{ном}$.

Для расчета момента ЦМ с монотонно падающими напорными характеристиками (типа кривой *2* на рис. 59.25) пригодно выражение, которое не учитывает момент трения,

$$M = [M_0 + (M_{ном} - M_0)c](\omega/\omega_{ном})^2,$$

где $M_0 = P_0/\omega_{ном}$ — момент ЦМ при закрытой задвижке, который определяется по каталожной характеристике потребляемой мощности $P = f(Q)$ при $Q = 0$. Значения c в зависимости от режима работы ЦМ приведены ниже:

при $H_{ст} = 0$ $\quad c = 1$;

при $H_{ст} > 0$ $\quad c = \sqrt{\dfrac{H_0 - H_{ст}(\omega_{ном}/\omega)^2}{H_0 - H_{ст}}}$;

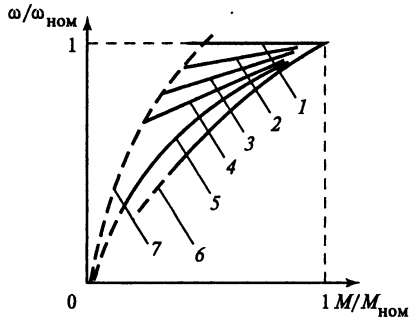


Рис. 59.29. Механические характеристики центробежных машин:

1 — ω = const; *2* — *H* = const; *3* — $H_{ст} \approx 0{,}8H_{ном}$; *4* — $H_{ст} \approx 0{,}5H_{ном}$; *5* — $H_{ст} = 0$; *6* — *Q* = const; *7* — при закрытой задвижкс

при $H = H_{ном} = \text{const}$

$$c = \sqrt{\frac{H_0 - H_{ном}(\omega_{ном}/\omega)^2}{H_0 - H_{ном}}};$$

при $Q = Q_{ном} = \text{const}$ $c = \omega_{ном}/\omega$,

где H_0 — напор, создаваемый машиной при ω = $= \omega_{ном}$ и $Q = 0$.

В общем случае аналитический расчет момента лопастных машин представляет большие трудности, поэтому на практике находит применение графоаналитический метод с использованием законов подобия и характеристик машин $H = f(Q)$ и η = $= f(Q)$, которые приводятся в каталогах для номинальной скорости машины.

Механические характеристики ЦМ при различных условиях работы показаны на рис. 59.29. Характеристика *7* при работе машины с закрытой задвижкой имеет вид квадратичной параболы с моментом M_0 при скорости $\omega_{ном}$. Вышеприведенные способы расчета механических характеристик не учитывают изменения КПД машины при изменении ее скорости, поэтому они применимы в небольшом диапазоне ее изменения, ограниченном снизу минимальными значениями подачи $Q_{min} =$ $= (0{,}35—0{,}4)Q_{ном}$ и напора $H_{min} = (0{,}25—0{,}3)H_{ном}$.

Момент на валу объемных машин имеет пульсирующий характер:

$$M \approx M_{ср} + M_{пер} \sin n\omega t,$$

где $M_{ср}$ — среднее значение момента; $M_{пер}$ — амплитуда переменной составляющей момента; ω — угловая скорость вала машины; *n* — целое число, определяемое конструкцией машины (количеством поршней или пластин, ступеней и др.).

Среднее значение момента объемной машины $M_{ср}$ не зависит от скорости, т.е. объемные машины являются механизмами с постоянным моментом сопротивления на валу. Частота пульсаций переменной составляющей пропорциональна скорости, а ее амплитуда тем меньше, чем больше *n*. Например, при $n = 1$ $M_{пер} \approx 1{,}5M_{ср}$, а при $n = 3$ $M_{пер} \approx 0{,}25M_{ср}$.

Особенности машин для подачи жидкостей и газов, определяющие требования к электроприводу. Основными свойствами машин для подачи жидкостей и газов, которые определяют требования к ЭП, являются:

1) продолжительный режим работы со спокойной нагрузкой;

2) широкий диапазон мощностей — от сотен ватт до нескольких десятков мегаватт;

3) целесообразность регулирования скорости по технологическим и энергетическим соображениям;

4) как правило, небольшой диапазон регулирования скорости $D \le (2—3):1$;

5) отсутствие необходимости реверсирования в силу особенностей конструкции и условий технологического процесса (исключение составляют ОМ, для которых реверсирование скорости позволяет изменять направление подачи);

6) отсутствие генераторного режима.

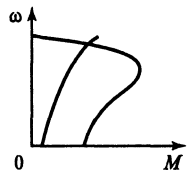
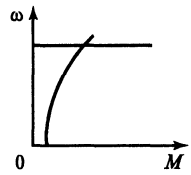
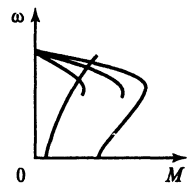
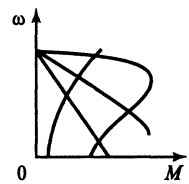
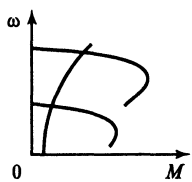
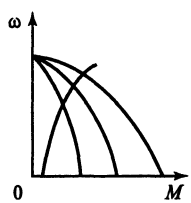
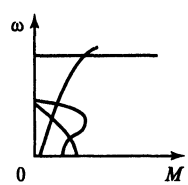
Для возникновения генераторных режимов Н, В, К необходимо создание условий, при которых направление подачи изменяется, т.е. жидкость или газ должны перетекать с выхода на вход машины. Такие режимы являются нежелательными, а иногда и аварийными, поэтому во избежание их появления на стороне выхода устанавливают обратный клапан, который автоматически закрывается, если указанные условия возникают.

Характерными особенностями лопастных машин являются существенное снижение момента при уменьшении скорости, возможность облегченного пуска при закрытой задвижке, большой момент инерции центробежных В. Спецификой объемных машин являются пульсации момента на валу с постоянным, не зависящим от скорости средним его значением и невозможность пуска при закрытой задвижке.

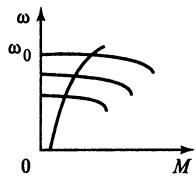
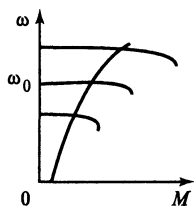
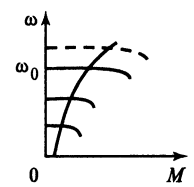
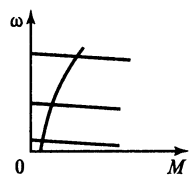
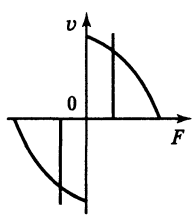
Указанные выше особенности, в первую очередь широкий диапазон мощностей Н, В, К и целесообразность регулирования скорости, определяют многообразие систем ЭП, применяемых для этих машин.

Системы электроприводов. Типы применяемых в настоящее время и перспективных систем ЭП Н, В, К показаны в табл. 59.8. Как правило, для этих машин применяются ЭП переменного тока. ЭП с двигателями постоянного тока используются редко, для единичных установок. Подробно свойства систем ЭП переменного тока рассмотрены в [59.37]. Укажем главные особенности.

Таблица 59.8. **Системы ЭП насосов, вентиляторов, компрессоров**

Тип	Механическая характеристика двигателя и нагрузки	Примечания
С короткозамкнутым АД		Скорость не регулируется, $P_{ном} < 1000$ кВт
С синхронным двигателем (СД)		Скорость не регулируется, $P_{ном} < 30$ МВт
С короткозамкнутым АД и преобразователем переменного напряжения		Двигатель с повышенным скольжением, $P_{ном} < 100$ кВт; $D = (1{,}2—1{,}5):1$
С АД с фазным ротором и реостатным управлением		Используется преимущественно при тяжелых пусковых режимах, $P_{ном} < 5000$ кВт; $D = (1{,}5—2):1$
С двухскоростным (многоскоростным) АД		$P_{ном} < 1400$ кВт; $D = (1{,}5—3):1$
С короткозамкнутым АД (или СД) и муфтой скольжения (электромагнитной, гидравлической)		$P_{ном} < 200$ кВт; $D = (1{,}5—2):1$
Двухдвигательный синхронно-асинхронный ЭП (см. рис. 59.30)		Используется при тяжелых пусковых режимах, $P_{ном} < 30$ МВт; $D = 2:1$

Окончание табл. 59.8

Тип	Механическая характеристика двигателя и нагрузки	Примечания
Асинхронный вентильный каскад		Необходимы дополнительные пусковые устройства, $P_{ном} < 5000$ кВт; $D = (1{,}5—2):1$
С АД двойного питания		Необходимы дополнительные пусковые устройства, $P_{ном} < 5000$ кВт; $D = 2:1$
С АД (СД) и преобразователем частоты		$P_{ном} < 5000$ кВт; $D = 10:1$
С двигателем постоянного тока и тиристорным преобразователем		$P_{max}\omega_{max} \leq 125 \cdot 10^3$ кВт/с; $D = 10:1$
С бесконтактным двигателем постоянного тока (вентильный ЭП)		Перспективная система ЭП большой мощности, $P_{ном} < 30$ МВт; $D = 10:1$
С линейным АД		Перспективная система ЭП для поршневых машин

Для нерегулируемых ЭП большой мощности целесообразно применять синхронные двигатели, так как они могут работать в режиме компенсации реактивной мощности.

Регулируемые системы ЭП, как правило, применяются для ЦМ. Эти ЭП можно разделить на четыре группы со следующими признаками:

1) со ступенчатым регулированием скорости — АД с реостатным управлением, многоскоростные АД, синхронно-асинхронный ЭП (рис. 59.30);

2) с рекуперацией энергии скольжения — асинхронный вентильный каскад и двигатель двойного питания при однозонном регулировании скорости вниз от скорости холостого хода;

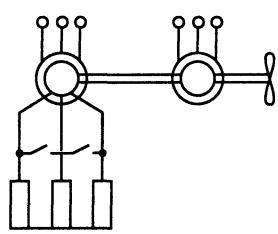


Рис. 59.30. Схема синхронно-асинхронного ЭП

3) с двухзонным регулированием скорости — двигатель двойного питания, АД и СД с частотным управлением;

4) с потерями энергии скольжения — АД с реостатным управлением, с преобразователем пе-

ременного напряжения, индукционной муфтой скольжения.

Системы ЭП со ступенчатым регулированием скорости обычно применяют тогда, когда требуется облегчить условия пуска или обеспечить пониженную производительность Н и В в нерабочее время (ночные смены, праздничные дни и т.п.). Двухдвигательный синхронно-асинхронный ЭП целесообразен для крупных В с тяжелыми условиями пуска.

Достоинством ЭП с рекуперацией энергии скольжения является то, что мощность преобразователя, включенного в цепь ротора, пропорциональна номинальной мощности АД и диапазону регулирования его скорости. Это свойство ЭП с рекуперацией энергии скольжения определяет целесообразность их использования для Н, В, К большой мощности при неглубоком регулировании скорости. Характеристики и свойства ЭП с рекуперацией энергии скольжения описаны в [59.37]. К недостаткам этих систем ЭП следует отнести необходимость применения дополнительных пусковых устройств и низкий $\cos\varphi$ (0,2—0,7) вентильных каскадов. Двигатели двойного питания позволяют поддерживать $\cos\varphi = 1$, а при некотором увеличении габаритных размеров преобразователя и двигателя — работать с опережающим коэффициентом мощности.

В двигателях двойного питания можно регулировать скорость вверх от скорости холостого хода ω_0, при этом энергия скольжения не рекуперируется, а потребляется из сети, т.е. момент на валу АД создается за счет суммарной мощности, потребляемой из сети по цепям статора и ротора. Двухзонное регулирование скорости (вверх и вниз относительно $\omega_{0ном}$) обеспечивается также при частотном управлении АД и СД. Максимальное значение скорости в этих случаях определяется предельной частотой преобразователя и допустимой скоростью двигателей. Мощность серийных полупроводниковых преобразователей частоты достигает сотен киловатт, а выходная частота — сотен герц. Максимальная частота вращения короткозамкнутого АД общепромышленного исполнения ограничивается значением 3000 об/мин, а для СД должна согласовываться с заводом-изготовителем.

При регулировании скорости выше ω_0 необходимо учитывать, что момент на валу двигателей возрастает, поэтому их мощность P_{max} необходимо рассчитывать при максимальной скорости ω_{max}, а затем приводить к номинальной скорости $P_{ном} = P_{max}\omega_{ном}/\omega_{max}$. При соответствующих законах управления в системах ЭП с частотным управлением и с двигателями двойного питания можно минимизировать (уменьшить на 10—20 %) потери в двигателях.

Значительное уменьшение момента при снижении скорости определяет целесообразность использования для лопастных машин малой и средней мощности асинхронных ЭП с потерями энергии скольжения. В ЭП с реостатным управлением и муфтой скольжения мощность приводного двигателя завышать не требуется, так как потери скольжения при регулировании скорости выделяются в резисторах и муфте.

При регулировании напряжения мощность короткозамкнутого АД необходимо выбирать таким образом, чтобы потери скольжения не вызывали его повышенного нагрева.

В последние годы во всех развитых странах мира интенсивно ведутся разработки по использованию для Н, В, К асинхронных и синхронных ЭП с полупроводниковыми преобразователями частоты. Мощность единичных установок достигла 1—1,5 МВт. Ведутся также разработки вентильных ЭП на базе СД и машин специального исполнения, которые целесообразно использовать для Н, В, К большой мощности.

Для поршневых машин ведутся работы по созданию ЭП с линейным АД. Имеются сведения о таком ЭП для плунжерных Н, предназначенных для откачки нефти из скважин глубиной 2,5—4 км

Мощность двигателей для Н, В, К рассчитывается по соотношению

$$P_д = k_з k_р P/\eta_п,$$

где P — мощность на валу Н, В, К при максимальной скорости машины, $\eta_п$ — КПД передаточного устройства; $k_з$ — коэффициент запаса, учитывающий неточности расчета P (при $P > 5$ кВт $k_з \approx 1{,}1$, для $P < 5$ кВт значения $k_з$ приведены на рис. 59.31), $k_р$ — коэффициент, уточняющий мощность двигателей в регулируемых системах ЭП (для нерегулируемых ЭП $k_р = 1$).

Значения $k_р$, а также пределы регулирования скорости различных систем ЭП приведены в табл. 59.9.

Значения $k_р$, приведенные в табл. 59.9, не учитывают изменение теплоотдачи двигателей при регулировании их скорости. Однако вследствие снижения момента двигателя при уменьшении скоро-

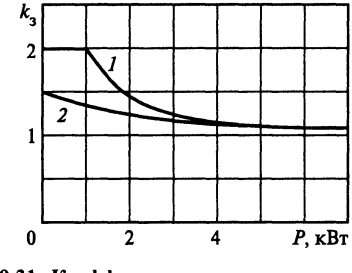


Рис. 59.31. Коэффициент запаса для центробежных машин:

1 — для вентиляторов; *2* — для насосов

Таблица 59.9. **Пределы регулирования скорости и значения $k_р$ регулируемых систем ЭП для Н, В, К**

Система ЭП	Пределы регулирования скорости	$k_р$
АД с частотным управлением	$0{,}1\omega_{ном}$—314 1/с	$1{,}1\omega_{ном}/\omega_{max}$
СД с частотным управлением	$0{,}1\omega_{ном}$—$\omega_{доп}$	$1{,}1\omega_{ном}/\omega_{max}$
Вентильный каскад	$(0{,}5—1)\omega_{ном}$	1,1
Двигатель двойного питания	$(0{,}65—1{,}35)\omega_{ном}$	$\omega_{ном}/\omega_{max}$
АД с регулирование напряжения	$(0{,}5—1)\omega_{ном}$	$\Delta P_{2max}/(P_{ном}s_{ном})$
АД с реостатным управлением, муфтой скольжения	$(0{,}5—1)\omega_{ном}$	1
Двигатель постоянного тока	$(0{,}1—1)\omega_{ном}$	1
Вентильный двигатель	$0{,}1\omega_{ном}$—$\omega_{доп}$	$1{,}1\omega_{ном}/\omega_{max}$

сти ухудшение теплоотдачи не приводит к увеличению нагрева двигателей. Исключение составляют короткозамкнутый АД с регулированием напряжения, когда потери скольжения выделяются внутри двигателя. В этих случаях достаточно учесть ухудшение теплоотдачи на скорости, при которой потери скольжения максимальны.

59.6. ЭЛЕКТРОПРИВОД СИСТЕМ ТРАНСПОРТИРОВКИ ДЛИННОМЕРНЫХ ГИБКИХ ИЗДЕЛИЙ

В ряде установок в различных отраслях промышленности, например в кабельной, металлургической и др., технологический процесс связан с перемоткой (или намоткой) длинномерных гибких изделий (нитей, жил, лент, полос и т.п.) с требуемыми скоростями и натяжениями перематываемого материала.

Электропривод таких установок должен обеспечивать плавное регулирование скорости и натяжения в широких пределах при отсутствии жестких требований к быстродействию и, напротив, при гарантированном ограничении рывка и динамической составляющей натяжения.

Традиционный принцип построения электропривода устройств перемотки длинномерных изделий показан на рис. 59.32. Изделие (нить, жила, лента) перематывается с отдающего барабана *ОБ* на приемный *ПБ* при заданных скорости v и силе натяжения F. Отдающий и приемный барабаны снабжены каждый регулируемым электроприводом, один из которых, например электропривод отдающего барабана, задает скорость перемотки обычными средствами, другой поддерживает неизменным натяжение изделия с помощью датчика натяжения *ДН*. В качестве датчика натяжения часто используют компенсатор — устройство, представляющее собой систему роликов, охватываемых нитью, с грузом на нижнем ролике. Груз задает натяжение, и при отклонении груза от некоторого равновесного состояния изменяется частота вращения двигателя таким образом, чтобы положение равновесия восстановилось.

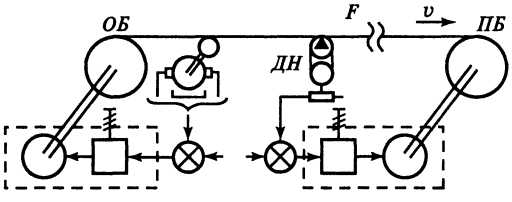


Рис. 59.32. Традиционный принцип построения электропривода устройств перемотки

Недостатки традиционного решения:

необходимость использования датчика натяжения, что приводит либо к значительному удорожанию системы в случае применения хорошего датчика, либо нетехнологично в случае применения компенсатора, так как компенсатор не позволяет изменить натяжение без остановки устройства и замены груза и вызывает дополнительные, часто нежелательные, перегибы транспортируемого материала;

склонность системы к колебаниям, в связи с чем для обеспечения удовлетворительного процесса перемотки требуются системы регулирования очень высокого качества;

выполнение каждого из электроприводов, включая силовые преобразователи, на полную мощность, и использование одного из них для торможения, следствием чего является либо необходимость рекуперации энергии, либо значительное увеличение потерь.

Альтернативное решение, позволяющее изменить принцип создания заданного натяжения и избавиться от указанных недостатков, показано на рис. 59.33. Это решение может быть реализовано только с помощью двигателей постоянного тока с обмоткой возбуждения. При поддержании тока в обмотке якоря такого двигателя постоянным, не зависящим от частоты вращения двигатель приобретает свойства управляемого по цепи возбуждения «источника момента» или при определенных

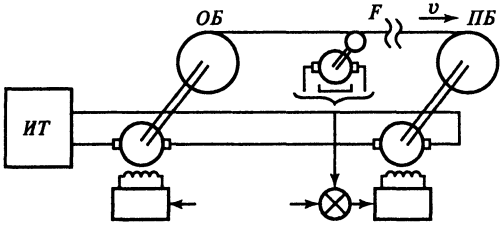


Рис. 59.33. Электропривод по системе источник тока — двигатель

условиях «источника силы» [59.41]. Формирование же практически любых механических характеристик возможно при использовании различных обратных связей. Например, отрицательная обратная связь по скорости позволяет получить семейство достаточно жестких механических характеристик в широком диапазоне изменения скорости, отрицательная обратная связь по ЭДС — семейство гипербол [59.41]. На рис. 59.33 якори двух машин постоянного тока соединены последовательно и подключены к источнику тока *ИТ*. Двигатель отдающего барабана задает момент, т.е. силу натяжения F, а двигатель приемного барабана — скорости ω и v. Данная структура устраняет практически все недостатки, указанные для традиционного решения:

датчик натяжения принципиально не нужен;

перемотка осуществляется без колебаний, а динамические режимы протекают плавно благодаря инерционности цепей возбуждения в управляющих каналах, демпфирующей рывки;

силовой преобразователь (источник тока) выполнен на мощность, существенно меньшую суммы мощностей двух двигателей, так как один из них работает в генераторном, а другой — в двигательном режиме и ЭДС в них действуют встречно.

Электропривод, построенный по структуре рис. 59.33, можно как упростить, так и развить. В простейшем, но вполне работоспособном варианте отсутствуют усилители в цепях управления, а роль мощного тахогенератора для двигателя, задающего скорость перемотки, выполняет двигатель, задающий натяжение. В развитых структурах помимо датчиков линейной скорости нити возможно использование датчиков радиуса намотки, контроллеров, которые задают уставки скорости и натяжения в соответствии с требованиями технологии, осуществляют диагностику, контроль за ходом процесса и т.п.

Наиболее полно преимущества указанного решения реализуются при использовании для питания якорных цепей двигателей так называемых параметрических источников тока [59.39, 59.40] — индуктивно-емкостных преобразователей, обеспечивающих при равенстве реактивных сопротивлений дросселей и конденсаторов постоянство тока на выходе. Такие источники просты, надежны, имеют высокий (около 98 %) КПД, коэффициент мощности по первой гармонике, равный единице, минимально влияют на сеть. Их недостаток — реакторы с требуемым реактивным сопротивлением.

При нежестких требованиях к неизменности тока возможно использование совсем простого неидеального источника тока — вентильно-емкостного преобразователя [59.40].

Примеры применения:

многодвигательные системы для перемотки нити, ленты или полосы, в секциях которых производятся различные технологические операции — наложение изоляции, ее обработка, снятие окалины, сушка, окраска и т.п.;

барабаны или шпули, принимающие проволоку или ленту после обработки;

устройства для намотки с заданным натяжением различных катушек, обмоток электрических машин и т.п.;

лебедки для буксировки судов на волнах или для поддержания в натянутом состоянии ведущего троса при передаче груза с корабля на корабль в условиях волнения моря;

нагружающие устройства в установках для испытания различных двигателей, позволяющие изменять по программе момент на валу двигателя;

устройства для испытания передач, муфт и других механизмов.

59.7. ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Вентильно-индукторный электропривод (ВИП) (рис. 59.34) состоит из собственно двигателя — индукторной машины *ИМ*, электронного коммутатора *К*, подключенного к выпрямителю *В* параллельно с конденсатором *С* и управляемого обычно датчиком положения ротора *Д* через схему управления *СУ*. В *ИМ* имеется явнополюсный статор, например, с $n = 6$ полюсами, несущий сосредоточенные обмотки — катушки, и явнополюсный пассивный ротор, число полюсов которого отличается от числа полюсов статора, например $m = 4$. Катушки связаны с электронным коммутатором, на каждую из $n/2$ фаз которого приходятся в рассматриваемом примере два ключа — транзистора и два диода (на рис. 59.34 показана только одна фаза *АХ*).

Принцип действия ВИП состоит в притяжении металлического тела зубца ротора к возбужденному полюсу статора. В изображенном на рис. 59.34 состоянии возбуждена фаза *АХ* и к полюсам *а* статора притянуты зубцы α ротора. При отключении фазы *АХ* (конденсатор *С* позволяет это сделать без ослож-

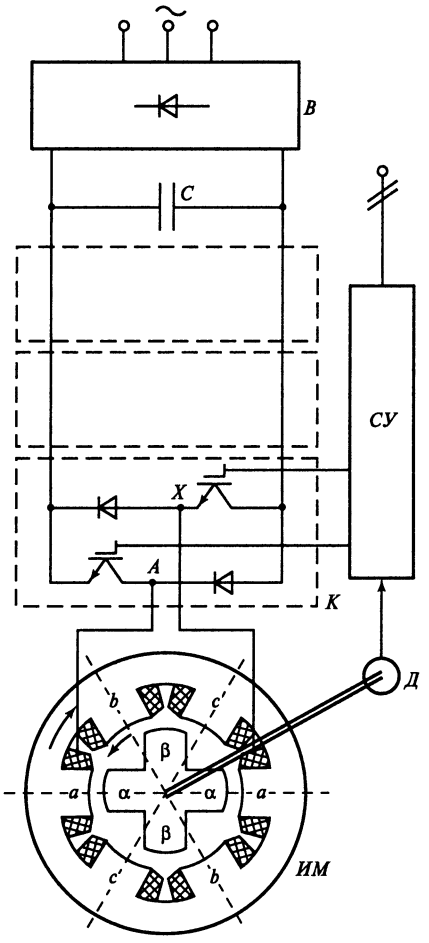


Рис. 59.34. Функциональная схема вентильно-индукторного электропривода

нений) и включении фазы *BY* (на рис. не показана) к возбужденным теперь зубцам *b* статора притянутся ближайшие зубцы ротора β. Поле повернется по часовой стрелке на угол $2\pi/n$, а ротор — против часовой стрелки на угол $2\pi/m - 2\pi/n = 2\pi(n-m)/mn$. Если повторять указанный процесс коммутаций, ротор будет перемещаться. Управление движением — выбор моментов включения и отключения фаз, формирование нужных импульсов тока и т.п. осуществляется схемой управления *СУ*.

Схема управления получает сигналы о фактическом положении ротора в данный момент и формирует на этом основании с учетом параметров и режимов привода воздействие на ключи коммутатора.

В качестве основы для схемы управления приводом используются современные микропроцессорные средства, организующие посредством ШИМ задание нужного напряжения, а также токоограничение, формирование импульсов тока требуемой формы.

Интерес к вентильно-индукторному приводу, проявившийся в последние годы, обусловлен его особенностями.

Во-первых, это предельно простая, технологичная, дешевая и надежная конструкция собственно двигателя *ИМ*. В нем не используются существенно усложняющие технологию производства постоянные магниты, цена которых иногда составляет около половины цены всего привода. Отсутствует технологическая операция заливки ротора, неизбежная при производстве короткозамкнутых асинхронных двигателей. Обмотки (катушки) статора хорошо приспособлены к машинному производству, просты сборка и, что важно при массовых применениях, разборка для ремонта или утилизации. Пропитка осуществляется только собственно катушек, а не статора в целом, как у других типов машин, что также снижает долю технологических затрат. Электрическая машина в ВИП позволяет преодолеть устойчивую тенденцию роста на 10—12 % в год цены основных типов электрических машин. ее цена может быть в 2 раза и более ниже цены самого дешевого короткозамкнутого асинхронного двигателя.

Во-вторых, электронный коммутатор *К* должен обеспечивать подачу на фазы *ИМ* однополярных импульсов тока, что позволяет выполнить его более надежным в сравнении с аналогичным преобразователем частоты для асинхронного электропривода — ликвидируется опасность сквозных коротких замыканий, упрощается защита. Среди большого числа исполнений коммутатора, разработанных ранее для дискретного электропривода, удается найти варианты с наименьшим количеством дорогих ключей — транзисторов, снизив в итоге его стоимость.

В-третьих, по основным массогабаритным и энергетическим показателям ВИП не уступает и даже превосходит, например, частотно-регулируемый асинхронный привод. Интересной и важной особенностью *ИМ* может служить полезное использование насыщения магнитной цепи.

В-четвертых, благоприятные функциональные особенности ВИП — большие моменты при низких скоростях и небольших токах, гибкое управление скоростью, простота реализации тормозных режимов и т.п. делают этот привод весьма привлекательным для широких применений.

В-пятых, большое разнообразие структур *ИМ* (различные отношения n/m = 4/2, 6/4, 8/6 и др., различные способы коммутации фаз) делают этот привод хорошо применимым как в низкоскоростных (сотни оборотов в минуту), так и в высокоскоростных (десятки тысяч оборотов в минуту) версиях. ВИП может стать конкурентом всех современных регулируемых электроприводов без ограничения по мощности, скорости и т.п.

59.8. ЭЛЕКТРОПРИВОД БЫТОВОЙ ТЕХНИКИ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В очень многих бытовых приборах и устройствах (стиральных и швейных машинах, видеомагнитофонах и пылесосах, кофемолках и музыкальных центрах) используются электроприводы. Условно все устройства бытовой техники можно разделить на четыре подобласти (табл. 59.10).

Системы электропривода удобно разделить на классы по типу используемого электромеханического преобразователя:

с асинхронными двигателями;

с коллекторными двигателями постоянного и переменного тока;

с вентильными двигателями;

с синхронными двигателями;

с шаговыми двигателями;

с двигателями нетрадиционных конструкций.

Например, в стиральных машинах и холодильниках нашли широкое применение асинхронные однофазные двигатели (ДХМ, ДГ, ДАО, ЭД, ЭДП, КД); в аудио- и видеотехнике активно используются электроприводы с синхронными двигателями, ротор которых возбуждается постоянным магнитом, а статор получает питание от инвертора с коммутацией ключей по сигналам датчика положения ротора (ДС, ДСК, ДСГ, ДП, ДПУ); в устройствах вычислительной техники часто используются электроприводы с шаговыми двигателями (ШДМ, ШДР, ДШ, ДША); в пылесосах, швейных и стиральных машинах — так называемые универсальные коллекторные двигатели (УВ 041/042-ПС, УВ 051/052-ПС, УВ 061/062-ПС, УВ 041/042-Ш, УВ 051/052-Ц).

Универсальными двигатели делает способность их работать от сети как постоянного, так и переменного тока. Универсальный коллекторный двигатель, являясь двигателем с последовательным возбуждением, имеет мягкую механическую характеристику, благодаря которой при больших нагрузках происходит естественное ограничение скорости, что благоприятно для электропривода многих бытовых устройств. Важным достоинством является возможность получения при общедоступной частоте переменного тока 50 Гц практически любых частот вращения — от 3000 до 30 000 об/мин, чего в электроприводах с традиционными асинхронными и синхронными машинами без специальных преобразователей частоты получить нельзя.

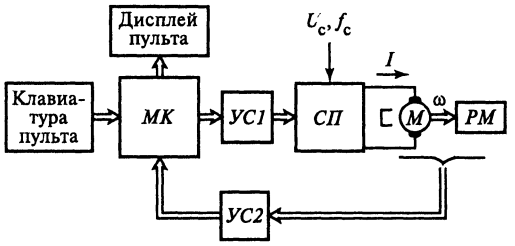


Рис. 59.35. Современная структура электропривода бытового устройства

В последние годы возрос интерес к вентильно-индукторному электроприводу [59.44]. Простой и надежный индукторный двигатель — основа такого электропривода — известен давно, но активное его использование началось именно сейчас благодаря успехам в области микропроцессорной техники и силовой электроники.

В зависимости от решаемых задач электропривод в каждом конкретном устройстве может быть выполнен в разомкнутой или замкнутой структуре (рис. 59.35) [59.45, 59.46].

В типовую современную структуру обычно входят: электрическая машина *M* (в качестве примера изображена машина постоянного тока), вращающая рабочий механизм *РМ* со скоростью ω, силовой преобразователь *СП*, микроконтроллер («мозг» устройства) *МК* и относящиеся к нему устройства сопряжения *УС1* и *УС2* (драйверы связи). Как правило, все «интеллектуальные» бытовые устройства имеют встроенный пульт управления с клавиатурой и дисплеем. Структура может гибко изменяться «под управляемый объект», эти изменения реализуются внутри *МК* на программном уровне. Существуют более гибкие структуры, в которых *МК* — это «содружество» нескольких процессоров, решающих общую задачу в рамках мультипроцессорной системы управления.

Таблица 59.10. **Устройства бытовой техники**

Устройства общехозяйственного назначения (внутри помещений)	Устройства радиоэлектронной аппаратуры	Устройства вычислительной техники	Устройства для дачных участков, сельской местности (часто используются вне помещений)
Стиральные машины Холодильники Швейные машины Пылесосы и т.п.	Магнитофоны Видеомагнитофоны Музыкальные центры Видеокамеры и т.п.	Дисководы Винчестеры Принтеры CD-ROM и т.п.	Насосы Электродрели Электропилы и т.п.

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОПРИВОДАМ

Наиболее характерной и распространенной нагрузкой бытовых устройств является вентиляторная. Чаще других используются режимы работы: продолжительный S1 (различные вентиляторы, фены, увлажнители, кондиционеры, сушилки и т.п.) и повторно-кратковременный S3 (активаторы и насосы стиральных машин, кофемолки, миксеры и т.п.). Принципиально выбор двигателя для электропривода бытового устройства ничем не отличается от аналогичного выбора для промышленных устройств. Однако, поскольку большинство бытовых устройств имеет небольшие размеры, проблемы компоновки двигателя более остры. Стремление увеличить мощность при снижении массы и габаритов двигателя приводит к использованию высокоскоростных машин, что выдвигает повышенные требования к элементам их конструкции: подшипникам, коллектору, изоляции. Более того, в отдельных устройствах, например в видеомагнитофонах, двигатель нужно располагать в корпусе так, чтобы тепловые излучения не изменяли рабочих свойств магнитной ленты, чтобы электромагнитные излучения не генерировали помех-паразитов, а, например, в стиральных машинах необходимо учитывать повышенную влажность и температуру, химически активную среду и значительные вибрации в режиме отжима.

При выборе силового преобразователя также нет принципиальных отличий. Особенностью является то, что абсолютное большинство преобразователей получает питание от однофазной сети и при этом возможны кратковременные изменения напряжения сети, вызванные включением таких мощных бытовых устройств, как холодильник, электроплита и т.п. Поэтому силовой преобразователь электропривода должен быть малочувствителен к этим колебаниям. Для обеспечения этого в состав источника питания обычно вводят стабилизатор, причем чаще используют импульсные источники питания с разделительным трансформатором, работающим на частоте в несколько килогерц, что уменьшает его габариты и массу. Кроме того, из-за замкнутости и ограниченности пространства более острыми становятся проблемы отвода теплоты и защиты от помех.

При выборе микроконтроллера, который является основой информационной части системы электропривода, также нет принципиальных отличий. Естественно, производительность микроконтроллера должна быть достаточной, чтобы, во-первых, реализовать все режимы работы бытового устройства, во-вторых, иметь ресурс для диагностики и для возможной модернизации технологических циклов. Увеличения производительности микроконтроллера добиваются путем совершенствования его архитектуры, оптимизации выполняемых команд процессора, увеличения пропускной способности шины данных как по формату, так и по частоте. Понятно, что идеология улучшения производительности за счет увеличения формата передаваемых данных для бытовых устройств отстает от других направлений. В настоящее время наиболее часто используются микроконтроллеры с 8-разрядной шиной данных.

Следует заметить, что в условиях стремления к минимизации бытовых устройств усугубляются проблемы борьбы с электромагнитными помехами, влияние которых сопряжено с уменьшением уровней полезных сигналов в информационной части системы управления.

Выбор структуры электропривода определяется показателями и характеристиками, которыми должно обладать бытовое устройство. Обеспечение необходимых режимов работы в условиях характерных особенностей и определяет основные требования к бытовым электроприводам.

Безопасность — показатель, который должен быть надежно обеспечен, учитывая массовый характер использования бытовых устройств и низкую электротехническую квалификацию пользователей. Очевидно, для решения вопроса электротехнической безопасности нельзя исходить из минимальных затрат: затраты должны быть такими, чтобы исключить возможность поражения электрическим током любого пользователя. Именно поэтому для большинства бытовых устройств характерно использование двойной изоляции — основной и дополнительной.

Экологическая безопасность бытового устройства. При конструктивном решении не должны использоваться материалы, вредные для здоровья человека; необходимо использовать технические решения, при которых были бы минимальны раздражающие шумы и вредные излучения. Так, например, в холодильниках, в которых компрессор является основным регулируемым рабочим органом электропривода, намечается переход на озонобезопасные хладагенты — от фреона на изобутан и флюроэтан.

Техническая надежность в течение всего гарантированного срока службы устройства. На рис. 59.36 представлены результаты анализа надежности бытовой техники по статистике Ассоциации британских потребителей [59.47].

Из представленной диаграммы видно, что особенно остры проблемы надежности стиральных машин. В основном это обусловлено повышенными влажностью и температурой, химически активной средой и значительными вибрациями в режиме отжима. Эти факторы необходимо обязательно учитывать, так как, если техническая надежность не обеспечивается, для потребителя вопрос о качестве бытового устройства становится во многом бессмысленным.

Точность управления основной координатой электропривода. Наиболее часто в качестве основной координаты принимается скорость ω в условиях изменения нагрузки M на исполнительном орга-

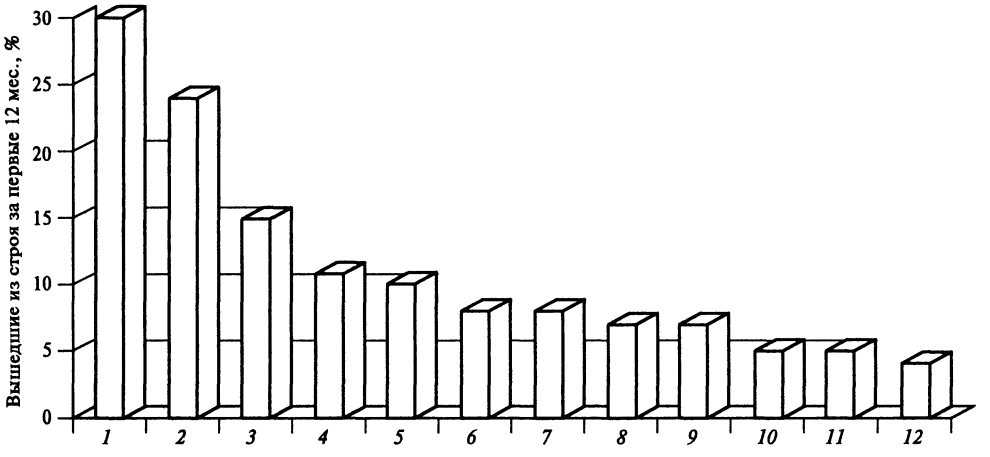


Рис. 59.36. Надежность бытовой техники

1 — стиральные машины с сушилкой; *2* — стиральные машины; *3* — посудомоечные машины; *4* — видеомагнитофоны; *5* — факсы; *6* — цветные телевизоры; *7* — барабанные сушилки; *8* — видеокамеры; *9* — пылесосы; *10* — автоответчики; *11* — холодильники; *12* — микроволновые печи

не бытового устройства. От точности поддержания регулируемой координаты напрямую зависит качество бытового устройства, будь то видеомагнитофон, музыкальный центр или швейная машина. Эффективность регулирования скорости ω (или иной координаты электропривода) во многом определяется точностью ее измерения. В микропроцессорных системах электропривода наблюдается тенденция унификации организации обратных связей: или просто используется импульсный датчик, или сигнал аналогового датчика преобразуется в последовательность импульсов частотой *f*. Так, в структуре электропривода на рис. 58.35 возможна реализация устройства сопряжения *УС2* на основе стандартного трехканального таймера. Это позволяет организовать измерение скорости различными способами (рис. 59.37—59.39) [59.52]. При этом используются два прерывания процессора *Inter1* и *Inter2*.

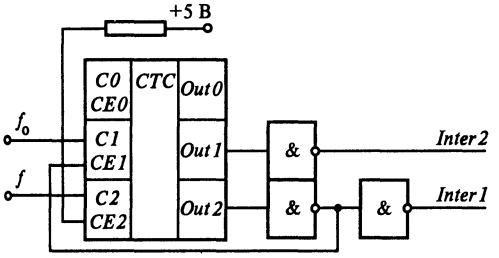


Рис. 59.37. Схема реализации первого способа измерения скорости

CTC — таймер; *C0—C2* — токовые входы; *CE0—CE2* — разрешение выхода каналов таймера; *Out0—Out2* — выходы таймера; *Inter1* — переполнение счетчика таймера, *Inter2* — конец измерения

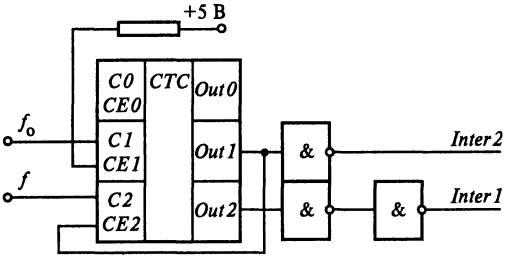


Рис. 59.38. Схема реализации второго способа измерения скорости

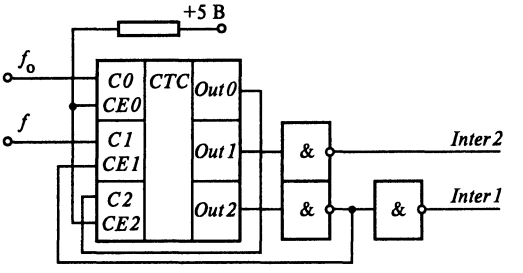


Рис. 59.39. Схема реализации третьего способа измерения скорости

При выборе одного из трех способов измерения решающую роль играют время и погрешность измерения. Соответствующие расчетные формулы, по которым можно определить требуемый параметр, представлены в табл. 59.11.

Диапазон регулирования скорости. Для многих бытовых устройств: видеомагнитофонов, видеокамер, CD-ROM (Compact Disk — Read Only Memory), DVD (Digital Versatige Disk), винчестеров (HDD — Hard Disk Drive), современных стираль-

Таблица 59.11. **Расчетные формулы**

Параметр	Первый способ	Второй способ	Третий способ
Время измерения, с	$T = a/kn$	$T = F/f_0$	$T = aF/kn$
Абсолютная погрешность, об/мин	$\Delta = kn^2/af_0$	$\Delta = af_0/kF$	$\Delta = kn^2/af_0F$
Относительная погрешность, %	$\delta = kn \cdot 100/af_0$	$\delta = af_0 \cdot 100/knF$	$\delta = kn \cdot 100/af_0F$

Обозначения: a — коэффициент преобразования минут в секунды, с/мин; k — коэффициент датчика скорости, имп/об; f_0 — опорная частота, Гц; n — частота вращения, об/мин; F — коэффициент деления таймера.

ных машин и т.п. требуется обеспечить нужную точность поддержания параметров в заданном диапазоне регулирования. Например, для обычного бытового видеомагнитофона типично требование точности поддержания скорости на уровне 0,2 %, а диапазона (74—37):1, исключая режим покадрового просмотра. Пределы регулирования сверху ограничиваются допустимым значением переменной, а снизу — точностью. Для оценки последней введено понятие статизма, %:

$$\delta_c = (\Delta\omega_c/\omega_0)100,$$

где $\Delta\omega_c$ — отклонение реальной установившейся скорости ω от скорости в режиме холостого хода ω_0.

Нестабильность скорости перемещения магнитной ленты в видеомагнитофонах приводит к детонации — искажению звука. Допустимый статизм связан с детонацией, %:

$$\delta_д = (\Delta\omega_c/\omega_{ном})100,$$

где $\omega_{ном}$ — номинальная скорость.

Минимально допустимый статизм

$$\delta_{с.доп} = (\omega_{ном}/\omega_0)\delta_д = K_д\delta_д,$$

где $K_д = (\omega_{ном}/\omega_0) \le 1$.

Допустимый коэффициент детонации $\delta_д$ задается для каждого класса приборов. Так, согласно [59.48, 59.49] для высококачественных магнитофонов $\delta_д$ = 0,02—0,03 %, а для обычных — $\delta_д$ = = 0,1—0,4 %.

В табл. 59.12 приведены технические показатели ряда бытовых устройств (диапазоны мощности и скорости регулирования).

Плавность движения. Это разрешающая способность электропривода бытового устройства обеспечить в требуемом диапазоне регулирования нужное число характеристик (чем больше, тем лучше). Оценить качество электропривода по данному показателю можно с помощью коэффициента плавности, который определяется выражением

$$K_{пл} = \omega_i/(\omega_i - \omega_{i-1}) = \omega_i/\Delta\omega_i,$$

где ω_i, ω_{i-1} — соответственно текущая скорость и скорость на предыдущей ступени регулирования.

Таблица 59.12. **Технические показатели электроприводов бытовых устройств**

Электроприводы	Диапазон		
	мощности, Вт	регулирования скорости	
		ниже номинальной	выше номинальной
Стиральных машин	90—220	20:1	2:1
Холодильников	60—250	3:1	—
Пылесосов	300—1500	6:1	2:1
Видеомагнитофонов*	0,5—5,0	2:1	37:1
Винчестеров	0,1—2,5	5:1	2:1
Электродрелей	300—1000	10:1	2:1
Вентиляторов	2—20	5:1	—

* Исключен режим покадрового просмотра, а за номинальную принята скорость в режиме SP(Standart Play).

Этот показатель особенно важен для сложных бытовых устройств типа видеомагнитофонов, видеокамер, DVD. Однако даже простой микроконтроллер с 8-разрядной выходной шиной данных обеспечивает разрядность управления 1/256, которой в большинстве бытовых устройств вполне достаточно.

Быстродействие — динамический показатель, для удовлетворения которого требуется решение компромиссной задачи. Так, электроприводы видеомагнитофона или видеокамеры, с одной стороны, должны иметь как можно большую динамическую добротность, с другой стороны, требуется ограничение их быстродействия с тем, чтобы не разорвать магнитную ленту и не сделать их неработоспособными. Возможность необратимой деформации магнитной ленты должна быть исключена, и натяжение в системе электропривода ведущего вала должно быть в пределах 0,3—0,8 Н.

Перерегулирование — это оценка качества регулирования — динамической точности. Оптимиза-

ция алгоритмов управления для электропривода каждого бытового устройства должна быть своя. Так, например, для электроприводов видеомагнитофона и видеокамеры алгоритмы управления должны быть такими, чтобы исключить перерегулирование, иначе оно ухудшит качество изображения.

Колебательность также связана с оценкой качества регулирования. Характер переходных процессов любой регулируемой координаты может быть апериодическим или колебательным. В качестве показателя для оценки колебательности в электромеханической системе введено понятие логарифмического декремента

$$\lambda = 2\pi\alpha/\Omega_р,$$

где α и $\Omega_р$ — коэффициент затухания и резонансная частота соответственно.

Как было упомянуто выше, в видеомагнитофоне, например, необходимо так формировать алгоритм управления, чтобы исключить колебательность. Для более простых бытовых устройств (фенов, кофемолок, вентиляторов и т.п.) с разомкнутыми системами регулирования в паспорте обычно оговариваются условия нормальной работы, и пользователю предоставляется возможность проводить «неосознанную» параметрическую оптимизацию электропривода. Доля такой оптимизации сейчас существенно сокращается, так как цена «интеллектуализации» бытовых устройств неуклонно падает.

Экономичность — комплексный показатель, состоящий из многих компонентов. Часто под экономичностью понимают энергетическую эффективность устройства, т.е. цикловой КПД, или отношение произведенной механической работы $A_{мех}$ к затраченной электрической энергии $A_{э.э}$:

$$\eta_ц = A_{мех}/A_{э.э}.$$

Если на рассматриваемом участке мощности постоянны, то КПД можно оценить по отношению механической мощности $P_{мех}$ к электрической $P_{э.э}$:

$$\eta = P_{мех}/P_{э.э}.$$

Для всей электромеханической системы бытового устройства КПД

$$\eta = \eta_{с.п}\,\eta_{эм.п}\,\eta_{к.п},$$

где $\eta_{с.п}$, $\eta_{эм.п}$, $\eta_{к.п}$ — соответственно КПД силового, электромеханического и кинематического преобразователя.

Следует отметить, что $\eta_{с.п}$ и $\eta_{к.п}$ примерно такие же, как и в промышленных электроприводах, тогда как $\eta_{эм.п}$, как правило, значительно ниже: 0,10—0,60 (табл. 59.13 и 59.14), поскольку минимизация потерь в микромашинах часто не считалась главной проблемой и они изготовлялись не из лучших материалов. Например, в асинхронных двигателях бытового назначения (в классе бытовых электромеханических преобразователей они занимают около 70 %) для листов статора и ротора используют слаболегированные стали марок 1211, 1212 и холоднокатаные малотекстурованные стали марок 2011, 2013 и 2111. Обмотки статора выполняют проводом круглого сечения, и коэффициент заполнения паза не превышает 0,68. Однако с учетом того, что бытовые устройства производятся в больших количествах, фактор повышения энергетической эффективности за счет минимизации потерь в электромеханическом преобразователе оставлять без внимания нельзя.

Таблица 59.13. **Основные показатели электроприводов с асинхронными двигателями**

Тип двигателя	$P_{ном}$, Вт	$\omega_{ном}$, рад/с	$M_п$, Н · м	$M_п/M_{ном}$	$M_{max}/M_{ном}$	КПД, %	Масса, кг
ДВ	1,00—16,00	128,10—283,50	0,0016—0,0573	0,30—0,63	1,30—1,68	9,00—23,50	0,35—1,48
АД (p = 1)	0,60—25,00	245,70—279,30	0,0017—0,0545	0,42—0,67	1,40—2,16	8,20—65,00	0,28—1,61
АД (p = 2)	2,50—25,00	134,40—139,65	0,55—0,80	0,25—0,36	1,40—1,60	11,00—24,00	0,58—2,51

Примечание. $M_п$ — пусковой момент.

Таблица 59.14. **Основные показатели электроприводов с асинхронными конденсаторными двигателями**

Тип двигателя	$P_{ном}$, Вт	$\omega_п$, рад/с	$M_п/M_{ном}$	$M_{max}/M_{ном}$	КПД, %	$C_р$, мкФ	Масса, кг
КД (p = 1)	4,00—25,00	257,25—284,55	0,26—0,35	1,20—1,70	16,00—37,00	0,50—1,50	0,50—1,13
КД (p = 1)	25,00—60,00	288,75—294,00	0,45—0,79	1,45—2,04	34,00—60,00	2,00—12,00	1,10—2,40
КД (p = 2)	2,50—46,00	141,75—149,10	0,03—1,26	1,53—2,48	15,00—47,00	1,00—27,00	0,75—2,65

Примечание. $C_р$ — рабочая емкость; КД — конденсаторный двигатель.

Массогабаритные показатели электропривода бытового устройства имеют особое значение, поскольку современное бытовое устройство должно быть компактным, эргономичным, легко транспортируемым и т.п. Для сравнительной оценки электроприводов по данному показателю можно использовать следующий коэффициент [58.46]:

$$q = G_{\text{эм.с}} / G_{\Sigma},$$

где $G_{\text{эм.с}}$, G_{Σ} — вес соответственно электромеханической части и общий вес устройства. Чем ближе этот показатель к единице, тем в большей степени интегрирована система электропривода в бытовое устройство и тем меньшей конструктивной избыточностью оно обладает.

Электромагнитная совместимость — важный показатель для оценки качества электромеханической системы бытового устройства, которая одновременно является источником и приемником помех. Этот фактор усугубляется стремлением выполнить бытовое устройство все более компактным, что вынуждает располагать в непосредственной близости элементы силовой и информационной частей электропривода. В условиях динамичности работы электропривода этот фактор проявляется еще более жестко. Для ослабления влияния электромагнитных помех обычно используют следующие меры: экранирование, фильтрацию, симметрирование и т.п. Разработчикам бытовых устройств для обеспечения их конкурентоспособности необходимо ориентироваться на соблюдение требований международных стандартов.

Относительная стоимость электромеханической части устройства — отношение $G_{\text{эм.с}}$ к его общей стоимости G_{Σ} [59.46]:

$$c_{\text{ст}} = G_{\text{эм.с}} / G_{\Sigma}.$$

С одной стороны, чем $c_{\text{ст}}$ ближе к единице, тем больше значение системы электропривода, а с другой стороны, разработчик должен так проектировать систему, чтобы стоимость $G_{\text{эм.с}}$ уменьшалась, что увеличит желаемый спрос на бытовое устройство.

В качестве конкретного примера электропривода бытовых устройств на рис. 59.40 приведена электромеханическая система автоматического регулирования (САР) бытового видеомагнитофона [59.49].

Ее основными компонентами являются системы регулирования частоты вращения блока видеоголовок — *САРБВГ* и скорости движения магнитной ленты — *САРМЛ*. Эти системы являются астатическими. Они обеспечивают прецизионное движение видеоголовок и магнитной ленты в соответствии с заданным форматом сигналограммы. Каждая из этих систем содержит грубый (частотный) и точный (фазовый) каналы.

Грубый канал *САРБВГ* содержит частотный дискриминатор *1*, воспринимающий сигнал перенастраиваемого задающего генератора *2*, усилитель мощности *3* и электродвигатель *БВГ*. Информация о скорости вращения диска *БВГ* формируется датчиком частоты вращения, установленным на двигателе, и соответствующий сигнал поступает на

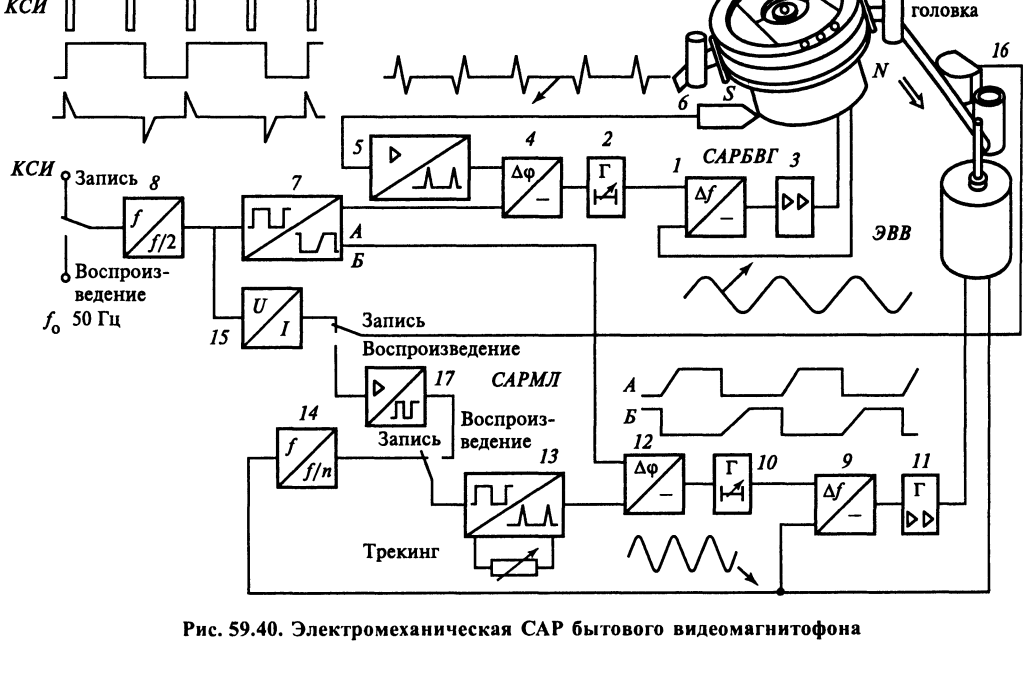


Рис. 59.40. Электромеханическая САР бытового видеомагнитофона

второй вход дискриминатора Грубый канал осуществляет управление электродвигателем *БВГ* в системе, замкнутой отрицательной обратной связью по скорости

Точный канал *САРБВГ* включает в себя фазовый дискриминатор *4*, на вход которого поступает сигнал от формирователя *5*, преобразующего импульсные сигналы от магнитной головки *6* в стробирующие импульсы Задающий сигнал трапецеидальной формы поступает на второй вход дискриминатора *4* от формирователя *7* Импульсный сигнал от магнитной головки возникает в моменты прохождения мимо ее рабочего зазора вращающихся постоянных магнитов Так как частота вращения *БВГ* для стандарта VHS (Video Home System) составляет 1500 об/мин, то частота импульсного сигнала в синхронном режиме составляет 25 Гц Астатизм точного канала *САРБВГ* по частоте вращения обеспечивается тем, что положение стробирующих импульсов сравнивается с положением наклонных фронтов трапецеидального сигнала с последующим изменением входного сигнала генератора частоты *2*, так как любая погрешность по частоте порождает накапливающуюся на выходе дискриминатора *4* погрешность по фазе

Аналогично строится канал *САРМЛ*, управляющий электродвигателем ведущего вала *ЭВВ* Грубый канал выполнен на частотном дискриминаторе *9*, задающем генераторе *10* и усилителе мощности *11*, регулирующем питание *ЭВВ* Точный канал *САРМЛ* содержит фазовый дискриминатор *12*, воспринимающий задающий сигнал *Б* формирователя *7* Этот сигнал имеет трапецеидальную форму, но сдвинут по времени на половину периода относительно сигнала *А* Сигнал обратной связи образуется на выходе формирователя *13*

Особенностью *САРМЛ* является формирование сигнала обратной связи по положению (фазе) В режиме записи для этого используется сигнал встроенного в двигатель частотного датчика путем уменьшения его частоты до 25 Гц делителем *14* и последующего его преобразования формирователем *13* в стробирующие импульсы Одновременно усилителем записи *15* обеспечивается преобразование прямоугольного выходного сигнала делителя *8* в ток записи, поступающий на универсальную головку управления *16* В результате на управляющую дорожку магнитной ленты записывается управляющий импульсный сигнал, содержащий информацию о положении *БВГ* относительно магнитной ленты

В режиме воспроизведения управляющий сигнал с магнитной ленты и головки *16* поступает на вход усилителя-формирователя *17*, где преобразуется в сигнал прямоугольной формы, поступающий на вход формирователя *13* При этом с помощью регулятора «Трекинг» можно изменять временную задержку между воспроизводимыми импульсами управления и стробирующими импульсами, обеспечивая лучшее совмещение траектории движения видеоголовок со строчками записи В режиме записи этот регулятор отключается

Данный принцип построения точного канала *САРМЛ* обеспечивает автоматическую подстройку положения магнитной ленты относительно видеоголовки с учетом возможного проскальзывания магнитной ленты в узле ведущего вала Действительно, так как положение импульсов управления относительно строчек записи и кадровых синхронизирующих импульсов *КСИ* на магнитной ленте задано форматом сигналограммы и при настройке видеомагнитофона оно подлежит точной регулировке, всякое проскальзывание ленты приводит к сдвигу по времени между воспроизводимыми импульсами управления и опорным сигналом 25 Гц трапецеидальной формы Следовательно, возникает фазовая погрешность, которая в режиме воспроизведения отрабатывается *САРМЛ* При этом необходимость в оперативной подстройке регулятором «Трекинг» может возникнуть только в том случае, когда запись воспроизводится на другом видеомагнитофоне и сигналограммы отличаются существенно

59.9. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ И СРЕДСТВАМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Энергосбережение, точнее рационализация производства, распределения и использования всех видов энергии, стало в последние 10—15 лет наряду с информатизацией и компьютеризацией одним из основных, приоритетных направлений технической политики во всех развитых странах мира Это связано, во-первых, с ограниченностью, невозобновляемостью всех основных энергоресурсов, во-вторых, с непрерывно возрастающими сложностями их добычи, в третьих, с глобальными экологическими проблемами, обозначившимися в последнее время

Энергосбережение в любой сфере сводится, по существу, к снижению потерь энергии Анализ структуры потерь в сфере производства, распределения и потребления электроэнергии показывает, что определяющая доля потерь (до 90 %) приходится на сферу энергопотребления, тогда как потери при передаче электроэнергии составляют лишь 9—10 % (в США — 8 %, в Германии и Японии — 4—5 %) Очевидно, что основные усилия по энергосбережению должны быть сконцентрированы именно в сфере потребления электроэнергии

Из общепринятой структуры потребителей электроэнергии, где электропривод занимает 60 %, электрический транспорт — 9 %, электротермия и электротехнология — 10 %, освещение и прочие

потребители — 21 %, следует, что основной эффект энергосбережения может быть получен в наиболее энергоемкой сфере — сфере электропривода.

Из всей электроэнергии, потребляемой электроприводом, 40 % приходится на электроприводы насосов и вентиляторов; примерно половина потребляется электроприводами мощностью до 100 кВт. Это определяет наиболее перспективное направление энергосбережения в сфере электропривода: установки мощностью до 100 кВт, главным образом насосы и вентиляторы. Последняя область особенно перспективна, поскольку здесь заключены громадные резервы экономии электроэнергии и других ресурсов.

По данным европейских экспертов цена электроэнергии, потребляемой ежегодно средним двигателем в промышленности, в 5 раз превышает цену двигателя [59.13]. Очевидно, что за время службы двигателя (10—20 лет) энергетическая составляющая в десятки раз превысит составляющую, связанную с капитальными затратами, в связи с чем забота об оптимизации именно энергетической составляющей является особенно важной.

Ежегодное потребление электроэнергии электроприводом в Западной Европе должно вырасти с 630 ТВт · ч в 1992 г. до 870 ТВт · ч в 2010 г., однако предполагается, что более 60 % ожидаемого прироста — 150 ТВт · ч будет покрыто за счет энергосбережения, в основном при переходе к регулируемому электроприводу [59.13]. Экспертные оценки показывают, что регулируемый электропривод экономически эффективен в 25—50 % всех технологических установок, хотя используется сейчас лишь в 10 % [59.13].

Диаграмма передачи мощности от источника (например, трансформаторной подстанции) к потребителю (например, системе водоснабжения здания) в сильно упрощенном виде, отражающем лишь главные черты энергетического процесса, представлена на рис. 59.41, *а*. В энергетический канал входит несколько обязательных элементов:

питающий трансформатор *Тр* со счетчиком отпускаемой энергии *Сч.эн.*;

подводящая линия *Лин.*;

электродвигатель *Дв.*;

рабочая машина (насос) *Нас.*;

технологический орган (гидравлическая магистраль *Маг.*) с измерителями потребляемой энергии — расходомером *Расх.* и манометром *Ман.*

Каждая ступень преобразования и передачи энергии независимо от способа реализации сопровождается потерями ΔP, значение которых существенно зависит от конкретного оборудования и режимов его работы.

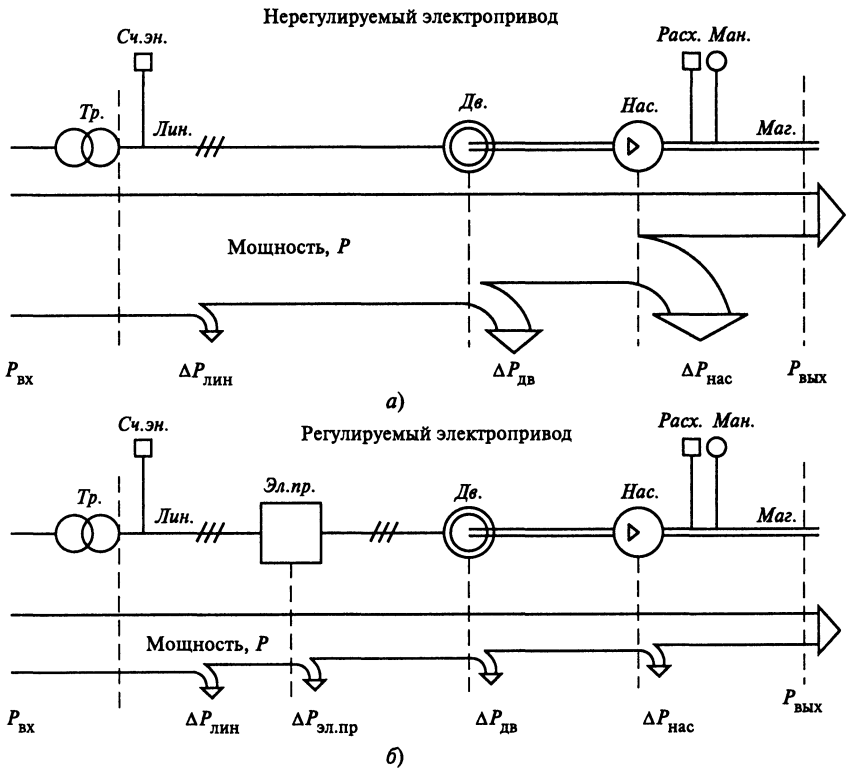


Рис. 59.41. Энергетическая диаграмма

Эффективность любого энергетического процесса определяется двумя факторами

соответствием задаваемой у потребителя регулируемой координаты требованиям оптимального технологического процесса (в примере — насколько удачно выбрано давление на входе системы его должно хватать для комфортного водопотребления в любой квартире, и оно не должно быть сильно избыточным во избежание лишнего потребления мощности, разрывов труб, лишних утечек воды и т п),

потерями, сопровождающими процесс (в примере — в нерегулируемом электродвигателе насоса потери при малом расходе могут быть в ночные часы относительно невелики, поскольку КПД двигателя в широком диапазоне нагрузки на валу высок — 86—91 %, тогда как потери в насосе, бесполезно перемешивающем воду, очень большие)

Полную оценку фактической энергетической эффективности любой системы можно сделать только сравнением необходимой полезно использованной энергии за некоторый срок $W_{\text{пол}}$ с энергией, потребленной от источника за это же время $W_{\text{потр}}$, в качестве времени оценки при циклических процессах удобно брать время цикла (в примере — сутки, месяц, год), т е

$$\text{КПД}_{\text{ц}} = \eta_{\text{ц}} = \frac{W_{\text{пол ц}}}{W_{\text{потр ц}}} = \frac{W_{\text{пол ц}}}{W_{\text{пол ц}} + \Delta W_{\text{ц}}},$$

где $\Delta W_{\text{ц}}$ — потери энергии за цикл

Отметим, что в ряде случаев непросто оценить необходимую полезную энергию, и приходится пользоваться лишь фактической оценкой, которую удается получить по измерительным приборам на входе и выходе и которая может отличаться от необходимой (в примере — неверно выбранное давление на выходе насоса)

Оценки энергетической эффективности усложняются при неоднонаправленных потоках энергии (подъем — спуск, разгон — торможение и т п)

Рассмотренная энергетическая диаграмма, характерная для любого процесса преобразования и потребления энергии, указывает пути энергосбережения

подача конечному потребителю энергии (в примере — вход водопроводной системы), необходимой в данный момент (или оптимальной) мощности $P_{\text{вых}}$,

выбор рационального с технической и экономической точек зрения способа управления координатами, образующими потребляемую технологическими машинами мощность Так, можно управлять давлением в гидросистеме путем дросселирования или путем регулирования частоты вращения вала насоса Энергетическое различие в этих способах радикальное потери в насосе $\Delta P_{\text{нас}}$ и потребление электрической мощности могут отличаться в несколько раз,

выбор рационального с технической и экономической точек зрения типа регулируемого электропривода, позволяющего управлять скоростью в нужном диапазоне с минимизацией потерь $\Delta P_{\text{дв}}$ и прочих затрат

В электроприводе насосов в рассматриваемом примере обычно используется короткозамкнутый асинхронный электродвигатель, скорость которого, как известно, целесообразно регулировать, влияя на частоту и амплитуду питающего напряжения (частотное регулирование)

Указанные три пути энергосбережения, вообще говоря, не зависят от конкретных технических реализаций энергетического канала и вида конечного технологического процесса, поскольку сводятся к снижению энергетических затрат на сам процесс и уменьшению сопровождающих процесс потерь в рабочей машине (насосе) и вращающем ее электродвигателе

Кроме того, иногда удается реализовать энергосберегающие мероприятия, связанные с конкретной технической реализацией энергетического канала К таким мероприятиям относится правильный выбор силового оборудования — исключение неоправданного завышения установленной мощности, уменьшающего КПД агрегата, а также ее занижения, снижающего надежность При использовании асинхронного электропривода иногда удается снизить потери в нерегулируемом по скорости двигателе и в питающей линии, снижая при малых нагрузках на валу напряжение, приложенное к двигателю, используя приемы компенсации реактивной мощности и т п Эти и подобные полезные приемы не могут, разумеется, заменить рассмотренные выше основные направления энергосбережения

Следует подчеркнуть также, что наибольший реальный эффект может быть достигнут лишь при комплексном подходе к решению каждой задачи с учетом технических, экономических, надежностных и других критериев Практически бесполезно экономить в одном месте, не заботясь о том, что происходит в других звеньях энергетического канала

По аналогии с диаграммой на рис 58 41, *а* можно представить идеально решенную задачу преобразования и использования энергии в технологических целях в виде аналогичной диаграммы на рис 58 41, *б*, в которой двигатель питается от электрического преобразователя *Эл пр* , благодаря чему $P_{\text{вых}}(t) \approx P_{\text{опт}}(t)$, а все потери $\Delta P \to \Delta P_{\min}$, т е $P_{\text{вых}}(t)/P_{\text{вх}}(t) \to \max$ при всех режимах и для любого момента времени

Итак, целесообразным подходом к энергосбережению во всех технологиях, в которых использу-

ется электромеханическое преобразование энергии, следует считать применение регулируемого электропривода, поскольку при этом реализуются все основные пути энергосбережения при одновременной оптимизации основного технологического процесса. Именно этот подход и используется традиционно в технологиях, неосуществимых без регулирования технологических координат (металлургия, металлообработка, кабельное, текстильное производство и др.)

Вместе с тем более 50 % всей электроэнергии преобразуется в механическую работу посредством самого массового нерегулируемого электропривода с короткозамкнутыми асинхронными электродвигателями (насосы, вентиляторы, компрессоры, транспортеры, конвейеры, агрегаты пищевой промышленности и т.п.). В этой сфере основным направлением энергосбережения является переход от нерегулируемого электропривода к регулируемому [59.50, 59.51]. Это направление интенсивно развивается, чему способствуют два совпавших по времени события: наметившийся дефицит и ощутимый рост стоимости энергоресурсов в мире и успехи силовой электроники и микроэлектроники, обусловившие появление в последние годы на мировом и отечественном рынках совершенных и доступных электронных преобразователей электрической энергии.

До середины 80-х годов, по существу, единственным доступным решением регулируемого электропривода был электропривод постоянного тока. Его общеизвестные недостатки — дорогая машина и необходимость в обслуживании — ограничивали использование случаями, когда без регулируемого электропривода обойтись было нельзя, — в станках, металлургических агрегатах, мощных экскаваторах и т.п. Электропривод постоянного тока практически не использовался в массовых агрегатах (насосах, вентиляторах и т.п.) — там абсолютно преобладал нерегулируемый электропривод с короткозамкнутыми асинхронными двигателями.

Сейчас ситуация радикально изменилась: на широком рынке появились совершенные и доступные электронные преобразователи частоты. Именно эти устройства произвели переворот в современном электроприводе: резко (до 15 %) снизили долю электроприводов постоянного тока в общем парке регулируемых электроприводов, стали основным и пока практически единственным средством, реализующим высококачественный регулируемый асинхронный электропривод в областях массового применения.

Становятся мало эффективными и многоскоростные асинхронные двигатели — они тяжелы, дороги, требуют много контактной аппаратуры, стоимость привода соизмерима, а иногда и больше стоимости системы преобразователь частоты — серийный двигатель.

Итак, система электронный преобразователь частоты — короткозамкнутый асинхронный двигатель становится главным на ближайшие годы техническим решением массового регулируемого электропривода. Она особенно привлекательна на стадии модернизации: сохраняется все существующее оборудование, но между сетью и двигателем включается новый элемент — преобразователь частоты, радикально меняющий весь технический и экономический облик системы.

Интенсивно развивается новый тип регулируемого электропривода — вентильно-индукторный электропривод, имеющий очень простую, технологичную, дешевую и надежную машину, простой и надежный в сравнении с преобразователем частоты электронный коммутатор, что позволяет этому приводу превосходить по основным свойствам электроприводы других типов.

Наряду с изложенным выше основным направлением энергосбережения средствами электропривода в мировой практике с середины 70-х годов существует и другое — использование энергосберегающих двигателей (Energy Efficient Motors — EEM) [59.13].

Идея этого энергосберегающего мероприятия состоит в следующем: в короткозамкнутый асинхронный двигатель закладывается на 25—30 % больше активных материалов (железа, меди, алюминия), за счет чего на 30 % снижаются потери и возрастает КПД — на 5 % в небольших двигателях (единицы киловатт) и на 1 % в двигателях мощностью 70—100 кВт. Цена двигателя увеличивается на 20—30 %, срок окупаемости по данным европейских экспертов составляет около 2 лет.

Особенно широкий размах кампания по продвижению EEM на рынок приобрела в последние годы в США. Десятки фирм — производителей EEM используют развитую прикладную компьютерную программу «Motor Master+», облегчающую пользователям выбор нужных энергосберегающих двигателей для замены установленных или использования в новых разработках [59.13]. Широко рекламируется достигаемый эффект — экономия около 5 % электроэнергии.

Вместе с тем это направление содержит ряд неочевидных обстоятельств. Во-первых, речь идет о нерегулируемом электроприводе, т.е. при экономии в несколько процентов на потерях в двигателе в электроприводе, применяемом в самых массовых и энергоемких областях (насосы, вентиляторы и т.п.), потери энергии окажутся в десятки раз больше.

Во-вторых, расчетная экономия будет достигаться лишь при мало меняющейся и близкой к номинальной нагрузке. При резкопеременной нагрузке, например при значительной доле холостого хода в цикле, экономия будет существенно меньше расчетной.

И, в-третьих, экономия может быть заметной (рекламируемые 4—5 %) лишь в том случае, если все элементы силового канала правильно выбраны и настроены. Так, потери в ременной передаче, часто используемой, например, в электроприводе вентиляторов, варьируются от 5 до 12 % только за счет нерационального выбора параметров передачи и могут резко возрастать при неверно выбранном натяжении ремней.

Еще один аспект энергосбережения связан с потерями в электрических сетях, питающих электропривод. Проблема возникает из-за низкого, особенно при малых нагрузках, коэффициента мощности.

Для компенсации реактивной мощности применяются различные технические решения (переключаемые конденсаторные батареи, синхронные компенсаторы, фильтрокомпенсирующие устройства и т.п.), однако большинство этих приемов ориентировано на нерегулируемый, а иногда и сильно недогруженный электропривод с короткозамкнутыми асинхронными двигателями. Достигаемый эффект может оказаться несопоставимо меньше показанных выше убытков от использования нерегулируемого электропривода.

Важным и еще очень мало использованным резервом энергосбережения служит правильный выбор основного электрооборудования в простейшем, самом массовом и энергоемком нерегулируемом электроприводе.

Европейские эксперты считают, что средний коэффициент использования двигателей (отношение средней мощности за цикл к номинальной) составляет 0,6 [59.13].

Существенный эффект в подобных случаях может дать замена оборудования (двигателей). Для решения подобных задач эффективны прикладные компьютерные программы, ориентированные на широкий круг специалистов, связанных с электроприводом, и способствующие принятию рациональных решений.

Основная идея энергосбережения — переход в массовых применениях от нерегулируемого электропривода к регулируемому — продемонстрирована на насосных станциях центральных тепловых пунктов.

Выбор насосных агрегатов системы водоснабжения зданий в качестве первоочередных объектов энергосбережения был обусловлен, во-первых, их массовостью, во-вторых, непрерывной круглогодичной работой, в-третьих, экономией не только электроэнергии, но также воды и теплоты. Результаты работ показывают, что экономия электроэнергии может составить 50 %, воды около 25 %, теплоты около 10 %.

Изложенная концепция энергосбережения, реализованная в ряде проектов Госэнергонадзора Минтопэнерго РФ, была использована при разработке Федерального закона «Об энергосбережении» и получившая развитие в деятельности хозяйственных служб Москвы, нашла отражение в нормативных документах [59.15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

59.1. **Голован А.Т.** Основы электропривода. М.: Госэнергоиздат, 1959.

59.2. **Основы** автоматизированного электропривода / М.Г. Чиликин, М.М. Соколов, В.М. Терехов, А.В. Шинянский. М.: Энергия, 1974.

59.3. **Чиликин М.Г., Сандлер А.С.** Общий курс электропривода. М.: Энергоиздат, 1981.

59.4. **Ключев В.И.** Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1998.

59.5. **Москаленко В.В.** Автоматизированный электропривод. М.: Энергоатомиздат, 1986.

59.6. **Вешеневский С.Н.** Характеристики двигателей в электроприводе. М.: Энергия, 1977.

59.7. **Москаленко В.В.** Электрический привод: Учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования. М.: Мастерство. Высшая школа, 2000.

59.8. **Гультяев А.К.** MATLAB5.2. Имитационное моделирование в среде Windows: Практическое пособие. СПб.: КОРОНАпринт, 1999.

59.9. **Дьяконов В.П.** Mathcad 7.0 в математике, физике и в Internet. М.: «Нолидж», 1998.

59.10. **Очков В.Ф.** Mathcad 8 Pro для студентов и инженеров. М.: Компьютерпресс, 1999.

59.11. **Плис А.И., Сливина Н.А.** Mathcad 2000. Математический практикум для экономистов и инженеров: Учебн. пособие. М.: Финансы и статистика, 2000.

59.12. **Потемкин В.Г.** Система MatLab5 для студентов. М.: Диалог-МИФИ, 1998.

59.13. **Energy** Efficiency Improvements in Electric Motors and Drives / Anibal de Almeida (ed.). Springer, 1997.

59.14. **Energy** Business & Technology Sourcebook // Proc. of the 19th World Energy Engineering Congress. Nov. 6—8. 1996.

59.15. **Инструкция** по расчету экономической эффективности применения частотно-регулируемого электропривода / Минтопэнерго РФ. Главгосэнергонадзор, 1997.

59.16. **Закон** РФ от 10 июля 1993 г. № 5151-1 «О сертификации продукции и услуг».

59.17. **Правила** проведения сертификации электрооборудования // Вестник Госстандарта России. М., 1999.

59.18. **Александров В.П.** Подъемно-транспортные машины. М.: Машиностроение, 1979.

59.19. **Вайнсон А.А.** Подъемно-транспортные машины. М.: Машиностроение, 1975.

59.20. **Казак С.А.** Динамика мостовых кранов. М.: Машиностроение, 1968.

59.21. **Крановое** электрооборудование: Справочник / Ю.В. Алексеев, А.П. Богословский, Е.М. Певзнер и др.; Под ред. А.А. Рабиновича. М.: Энергия, 1979.

59.22. **Масандилов Л.Б.** Электропривод подъем-

59.23. **Справочник** по кранам: В 2 т. Т. 2 / М.П. Александров, М.М. Гохберг, А.А. Ковин и др.; Под общ. ред. М.М. Гохберга. М.: Машиностроение, 1988.

59.24. **Яуре А.Г., Певзнер Е.М.** Крановый электропривод: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1988.

59.25. **Шеффлер М., Дресиг Х., Курт Ф.** Грузоподъемные краны. В 2-х кн. Кн. 2: Пер. с нем. М.: Машиностроение, 1981.

59.26. **Электрооборудование** кранов /А.П. Богословский, Е.М. Певзнер, Н.Ф. Семерня и др. М.: Машиностроение, 1983.

59.27. **Федорова З.М., Лукин И.Ф., Нестеров А.П.** Подъемники. Киев: Вища школа, 1976.

59.28. **Лифты** / Г.Г. Архангельский, Д.П. Волков, Э.А. Горбунов и др.; Под общ. ред. Д.П. Волкова. М.: Изд-во АСВ, 1999.

59.29. **Чутчиков П.И., Алексеев Н.И., Прокофьев А.К.** Электрооборудование лифтов массового применения. М.: Машиностроение, 1983.

59.30. **Вуль В.Я, Ключев В.И., Седаков Л.В.** Наладка электроприводов экскаваторов. М.: Недра, 1975.

59.31. **Одноковшовые** экскаваторы НКМЗ / В.Я. Вуль, Ю.Т. Калашников, А.В. Сапилов, И.М. Харалаш. М.: Недра, 1978.

59.32. **Соколов М.М.** Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов. М.: Энергия, 1976.

59.33. **Конвейеры**: Справочник / Р.А. Волков, А.Н. Гнутов, В.К. Дьячков и др.; Под ред. Ю.А. Пертена. Л.: Машиностроение, 1984.

59.34. **Ленточные** конвейеры в горной промышленности / В.А. Дьяков, Л.Г. Шахмейстер, В.Г. Дмитриев и др.; Под ред. А.О. Спиваковского. М.: Недра, 1982.

59.35. **Спиваковский А.О., Дьячков В.К.** Транспортирующие машины. М.: Машиностроение, 1983.

59.36. **Червоненко А.Г., Раздольский А.Г., Заболотный Ю.В.** Динамика протяженных горных транспортных машин. Киев: Наукова думка, 1983.

59.37. **Онищенко Г.Б., Юньков М.Г.** Электропривод турбомеханизмов. М.: Энергия, 1972.

59.38. **Степанов С.И.** Центробежные и водные насосы. М.: Машгиз, 1960.

59.39. **Черкасский В.М.** Насосы, вентиляторы, компрессоры. М.: Энергоатомиздат, 1984.

59.40. **Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф.** Общий курс электропривода: Учебн. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1992.

59.41. **Ильинский Н.Ф.** Электроприводы постоянного тока с управляемым моментом. М.: Энергоатомиздат, 1981.

59.42. **Бычков М.Г.** Элементы теории вентильно-индукторного электропривода // Электричество. 1997. № 8. С. 35—44.

59.43. **Бычков М.Г.** Анализ вентильно-индукторного электропривода с учетом локального насыщения магнитной системы // Электричество. 1998. № 6. С. 50—53.

59.44. **Ильинский Н.Ф.** Перспективы применения вентильно-индукторного электропривода в современных технологиях // Электротехника. 1997. № 2. С. 1—3.

59.45. **Мельников Н.В.** Электроприводы в бытовой технике // Привод и управление. 2000. № 3. С. 13—17.

59.46. **Мельников Н.В.** Особенности электропривода устройств бытовой техники // Вестник МЭИ. 2000. № 2. С. 104—107.

59.47. **Бытовая** техника. Журнал-каталог № 4. 1996.

59.48. **Афанасьев А.П., Самохин В.П.** Бытовые видеомагнитофоны. М.: Радио и связь, 1989.

59.49. **Пескин А.Е., Коннов А.А.** Зарубежные видеомагнитофоны и видеоплейеры. Устройство, регулировка, ремонт. М.: ТОО «Солон», 1997.

59.50. **Ильинский Н.Ф.** Электропривод и энергосбережение (опыт кафедры АЭП МЭИ) // Электротехника. 1995. № 9. С. 24—27.

59.51. **Ильинский Н.Ф.** Регулируемый электропривод и энергоресурсосбережение // Приводная техника. 1997. № 3. С. 21—23.

59.52. **Мельников Н.В., Пушманн Т., Лезер С.** Способы измерения скорости в микропроцессорной системе электропривода // Вестник МЭИ. 1994. № 2. С. 25—26.

Раздел 60

ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ

60.1. Электрические печи сопротивления (резистивные печи) 283
Классификация и основные характеристики электропечей сопротивления (283). Электрические нагревательные элементы (291). Электрические печи и устройства прямого нагрева (294).

60.2. Установки бытового нагрева 296
Электроприборы для приготовления пищи (297). Электроприборы для отопления (300). Электроприборы для нагрева воды (301). Различные бытовые электронагревательные приборы (303). Рекомендации по выбору ТЭН для бытовых электронагревательных приборов (305).

60.3. Дуговые печи 305
Области применения дуговых печей (305). Дуговые сталеплавильные печи (307). Дуговые печи постоянного тока (312). Агрегаты комплексной обработки стали (312). Рудовосстановительные электропечи (314). Вакуумные дуговые печи (320). Установки электрошлакового переплава (326).

60.4. Установки индукционного и диэлектрического нагрева 330
Общие сведения (330). Индукционные канальные печи (331). Индукционные тигельные печи (334). Индукционные установки для сквозного нагрева (337). Индукционные установки для поверхностной закалки (338). Установки диэлектрического нагрева (340).

60.5. Установки электронно-лучевого и плазменного нагрева и лазерные 341
Установки электронно-лучевого нагрева (341). Электронно-лучевые пушки технологического назначения (344). Установки плазменного нагрева (346). Высокочастотные индукционные плазмотроны (351). Плазмохимические процессы и аппараты (352). Лазерное оборудование (353).

60.6. Системы управления электротермическими установками 359
Общие сведения (359). Регуляторы температуры (361). Системы управления дуговыми сталеплавильными печами (365). Системы управления рудовосстановительными печами (373). Системы управления печами постоянного тока, плазменными установками и вакуумными дуговыми печами (374). Системы управления печами электрошлакового переплава (376). Системы управления индукционными установками (379).

60.7. Характеристики специальных материалов для электрических печей 379

60.8. Оборудование для электротехнологии ... 379
Электрофизико-химические методы размерной обработки (379). Электроэрозионные копировально-прошивочные станки (390). Электрохимические установки (394). Ультразвуковые станки (396). Электрогидравлические установки (398). Магнитно-импульсная обработка материалов (406). Электронно-ионная (аэрозольная) технология (411). Электрофильтры (417). Электроокраска (419). Сепарация материалов (424). Электрография (426).

60.9. Оборудование для сварки 433
Источники питания сварочной дуги (433). Технологическое оборудование для сварки (443). Оборудование для контактной сварки (444).

Список литературы 455

60.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ (РЕЗИСТИВНЫЕ ПЕЧИ)

КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ

По методу нагрева электропечи сопротивления разделяются на печи прямого и косвенного нагрева. К печам *прямого нагрева* относятся электропечи сопротивления, в которых преобразование электрической энергии в тепловую происходит за счет прохождения тока непосредственно через нагреваемый материал, включенный в электрическую печь. К печам *косвенного нагрева* относятся электропечи сопротивления, в которых преобразование электрической энергии в тепловую происходит в электронагревателе печи сопротивления [60.1].

По режиму работы электропечи сопротивления принято разделять на электропечи периодического действия (садочные) — в них садка (материал или изделие, одновременно подвергаемые нагреву) в процессе нагрева или охлаждения перемещается только при загрузке и выгрузке, и электропечи непрерывного действия (методические), в которых садка в процессе нагрева или охлаждения непрерывно перемещается от места загрузки к месту выгрузки

По количеству электропечи сопротивления составляют до 90 % всех электропечей, применяемых в различных отраслях промышленности

По мощности электропечи сопротивления занимают диапазон от единиц киловатт до десятков мегаватт

В буквенных обозначениях типовых печей сопротивления первая буква — С обозначает метод нагрева — сопротивлением (резистивный нагрев), вторая буква определяет конструкцию электропечи Н — камерная, Ш — шахтная, К — конвейерная, Б — барабанная, Т — толкательная, Р — рольганговая, В — ванна, П — протяжная, Э — элеваторная и т д Третья буква обозначает характер среды О — окислительная, З — защитная, Ц — цементационный газ, С — соль и щелочь, Р — агрессивная среда, К — компрессия (повышенное давление в печи) В цифрах, следующих за буквенным обозначением, числитель дает размеры рабочего пространства в дециметрах, а знаменатель — максимальную температуру печи в сотнях градусов Цельсия

Электропитание печей сопротивления осуществляется трехфазным переменным током промышленной частоты в основном напряжением 380 В Коэффициент мощности электропечей сопротивления близок к единице, за исключением печей, у которых наличие понижающего трансформатора, тиристорного источника питания, токоподводов на большие токи (печи прямого нагрева) приводит к увеличенному потреблению реактивной мощности

Электропечи сопротивления прямого нагрева — однофазные, печи косвенного нагрева при мощности свыше 30 кВт, как правило, имеют трехфазный нагреватель График нагрузки печей сопротивления зависит от типа применяемого регулятора мощности и от технологического процесса При одновременной эксплуатации нескольких печей и временном сдвиге в их технологическом процессе печи для системы электроснабжения представляют спокойную, равномерную нагрузку В табл 60 1 приведены усредненные значения коэффициентов нагрузок электропечей сопротивления как электроприемников

Таблица 60 1 **Расчетные коэффициенты нагрузок электропечей сопротивления как электроприемников**

Нагрузка	Коэффициент использования $K_и = P_{сред}/P_{ном}$	Коэффициент спроса активной мощности $K_с = P_{потр}/P_{ном}$	Коэффициент мощности $\cos\varphi$
Электропечь сопротивления периодического действия	0,6	0,8	0,85—0,95
Электропечь сопротивления непрерывного действия	0,65—0,8	0,85	0,95—0,98*

* При применении тиристорных регуляторов напряжения коэффициент мощности может снижаться до 0,85

В электрических печах сопротивления косвенного действия электрическая энергия преобразуется в тепловую в нагревательных элементах и от них теплота путем излучения, конвекции и теплопроводности передается нагреваемому телу

В печах периодического действия нагреваемая загрузка неподвижна в течение всего времени пребывания в печи Печи могут работать круглосуточно (при циклично чередующейся загрузке и выгрузке), посменно или эпизодически — по мере надобности По конструктивному признаку эти печи разделяются на следующие основные типы камерные, шахтные, колпаковые, ванны

Камерные печи являются универсальными по назначению В них производится нагрев для различных видов термической и термохимической обработки изделий из черных и цветных металлов Камерная печь (рис 60 1, табл 60 2) представляет футерованную камеру На внутренних поверхностях печной камеры монтируются нагревательные элементы из специальных жаростойких сплавов высокого сопротивления в виде проволочных зигзагов из ленты, а для печей с рабочей температурой 1200—1350 °С применяются стержневые нагреватели из карборунда

Футеровка печи выполняется в кожухе из листовой и профилированной стали Загрузка и выгрузка изделий производится через дверцу, имеющую ручной или электромеханический привод

Разновидностями камерных печей являются печи с *выдвижным подом* (табл 60 2) и *элеваторные* Под печи с выдвижным подом представляет собой футерованную тележку, которая имеет электромеханический привод Элеваторная печь имеет также подвижный под — тележку (на одну печь их может быть две-три), которая поднимается в печную камеру специальным подъемным столом Элеваторные

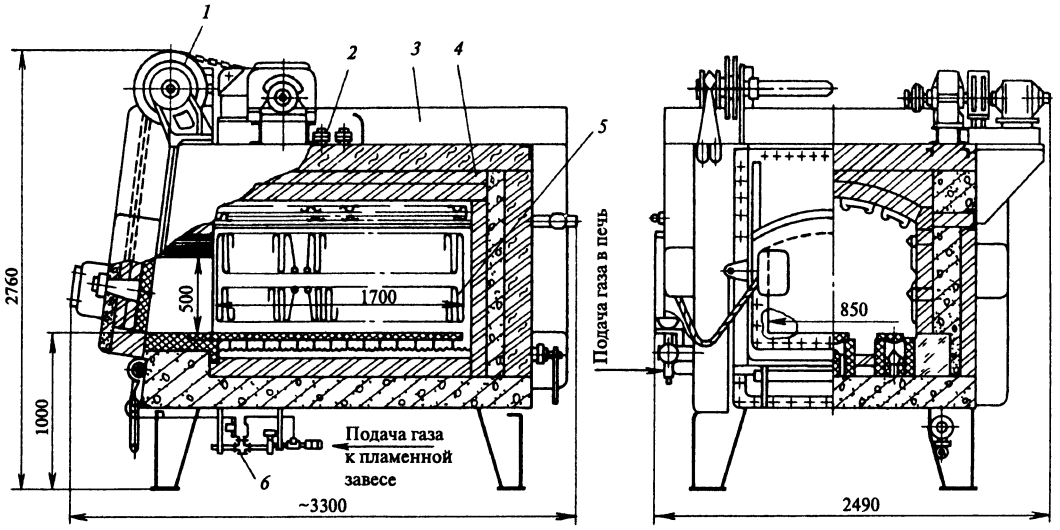


Рис. 60.1. Камерная электропечь:

1 — механизм подъема дверцы, *2* — выводы нагревателей, *3* — кожух, *4* — футеровка, *5* — нагреватели, *6* — газоподвод

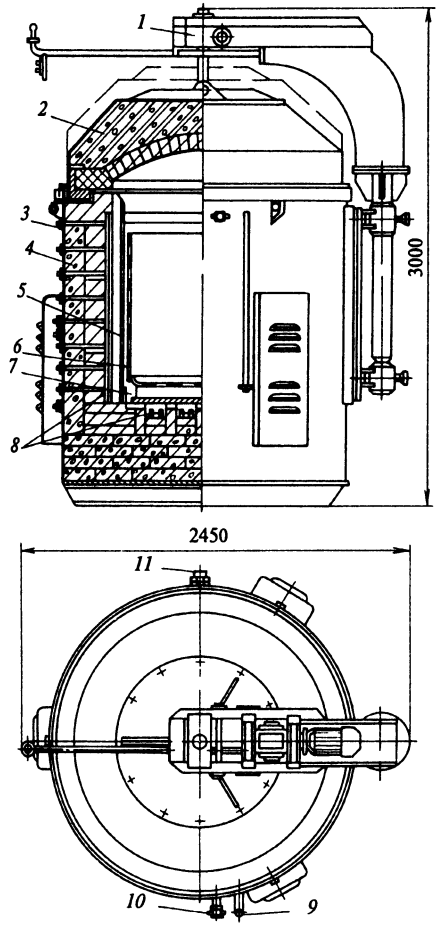


Рис. 60.2. Шахтная электрическая печь:

1 — механизм подъема и поворота крышки, *2* — крышка, *3* — кожух печи, *4* — футеровка, *5* — направляющие, *6* — корзина, *7* — подовая плита, *8* — нагреватели, *9* — контрольная газовая свеча, *10* — патрубок ввода газа, *11* — ввод термоэлектрического термометра

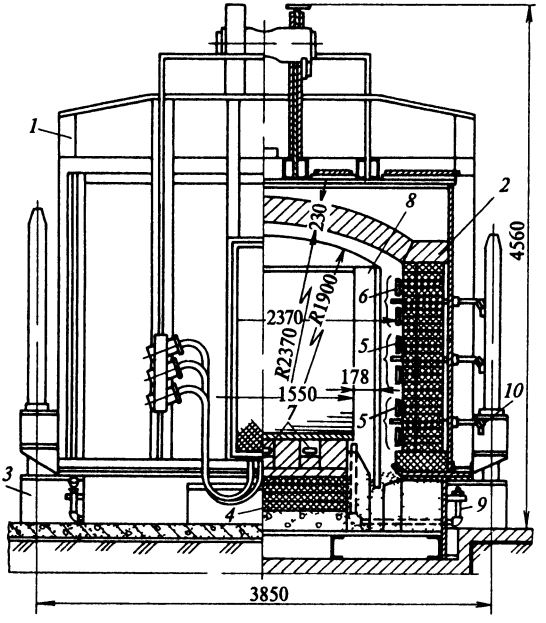


Рис. 60.3. Колпаковая электрическая печь:

1 — каркас колпака, *2* — футеровка колпака, *3* — каркас стенда, *4* — футеровка стенда, *5*, *6* — нагреватели колпака, *7* — нагреватель стенда, *8* — муфель, *9* — подвод газа, *10* — термоэлектрический термометр

Таблица 60.2. **Технические данные некоторых печей сопротивления периодического действия**

Наименование и основное назначение	Тип	Мощность, кВт	Напряжение на нагревателях, В	Число фаз	Максимальная рабочая температура, °С	Мощность холостого хода, кВт	Число тепловых зон	Мощность тепловых зон, кВт	Габаритные размеры (длина × ширину × высоту), мм	Масса, т	Примечание
Камерная с обычной атмосферой (воздух) различного назначения	СНО-3.6.2/10	14	72	1	1000	4,4	1	—	1575×1040×1570	1,1	—
	СНО-6.12.4/10	58	103	3	1000	9,5	1	—	2850×1820×2455	4,2	—
Камерная с обычной атмосферой высокотемпературная	СНО-3,2.6.2,5/15	26	26—20	1	1500	8,0	1	—	1930×1380×1950	4,3	Нагреватели из дисилицида молибдена
Камерная с защитной атмосферой различного назначения	СНЗ-3.6.2/10	14	72	1	1000	6,0	1	—	1575×1150×1570	1,1	—
	СНЗ-6.12.4/10	58	103	3	1000	14,0	1	—	2850×2055×2455	4,2	—
Шахтная для нагрева под закалку, отжиг и нормализацию в обычной атмосфере	СШО-6.6/10	70	65—55	3	1000	10,0	2	I—40; II—30	2600×2470×3330	2,5	—
	СШО-6.20/10	100	65—55	3	1000	17,0	3	I—40; II—30; III—30	2600×2470×4750	3,8	—
	СШО-10.10/10	110	56—47	3	1000	16,0	2	I—55; II—55	4070×3060×3730	4,6	—
Шахтная того же назначения с защитной атмосферой	СШЗ-6.30/10	130	65—37	3	1000	21,6	4	I—40; II—30; III—30; IV—30	2600×2470×5770	5,5	—
	СШЗ-10.10/10	110	56—47	3	1000	16,0	2	I—55; II—55	4070×3060×3730	4,6	—
Шахтная для нагрева под высокий отпуск в защитной атмосфере	СШЗ-6.6/7	35	220	3	700	8,0	1	I-35; II-35; III-35	2600×2380×2820	2,4	С циркуляцией печной атмосферы
	СШЗ-6.30/7	105	220	3	700	16,6	3		2600×2380×5950	5,7	
Шахтная для цементации и других видов термообработки в защитной атмосфере	СШЦМ-6.6/9	70	65—55	3	900	9,0	2	I—40; II—30	2720×2580×3015	3,4	То же
	СШЦМ-6.12/9	85	65—60	3	900	11,6	2	I—45; II—40	2720×2580×3045	4,2	»
	СШЦМ-6.20/9	100	65—37	3	900	14,0	3	I—40; II—30; III—30	2720×2580×4335	4,7	»
Камерная с выдвижным подом для нагрева заготовок	СДО-10.20.80/8	300	380	3	800	—	3	I—105; II—105; III—00	9800×2900×1300	27	—
	СДО-18.56.20/12	1100	500	3	1200	—	3		25 000×7050×9520	150	—
Колпаковая для отжига	СГО-40.50.25/7	570	380	3	750	—	—	—	7600×7000×6540	88,5	—
Колпаковая для светлого отжига бунтов проволоки	СГЗ-10.56.10/10	436	380	3	950	38	3	—	28 125×3570×4470	87	—
	СГЗ-18.38.19/8,5	600	380	3	850	45	3	—	6360×4580×4850	94	—

печи чаще всего применяются для специального отжига чугунных деталей (в процессе получения ковкого чугуна).

Шахтные печи (рис. 60.2, табл. 60.2) в основном предназначаются для термообработки изделий при мелкосерийном производстве.

Колпаковые печи (рис. 60.3, табл. 60.2) применяются преимущественно для светлого отжига пакетов листовой стали, рулонов ленты и бунтов проволоки. Колпаковая печь состоит из неподвижного футерованного стенда, на который устанавливается загрузка, накрываемая жароупорным муфелем, и колпака. Колпак, несущий основную часть нагревательных элементов печи, может перемещаться с помощью мостового крана с одного стенда на другой. Так как при отжиге требуется длительное охлаждение изделий, на один колпак предусматривается два-четыре стенда. Нагрев и охлаждение изделий осуществляются под жароупорным муфелем в атмосфере защитного газа или в вакууме. Форма колпака, стенда и муфеля в зависимости от конфигурации загрузки может быть цилиндрической, эллиптической или прямоугольной.

Электрические ванны представляют собой широкую группу печей сопротивления, отличающихся как по назначению, так и по конструкции.

Наиболее распространенными видами электрических ванн являются:

а) электродные соляные ванны;

б) соляные и масляные ванны с внешним или внутренним обогревом нагревательными элементами.

В электродных соляных ваннах (рис. 60.4) тепловая энергия выделяется в расплавленной соли за счет протекающих в ней токов, а нагреваемая загрузка получает теплоту от жидкого теплоносителя — соли посредством конвекции.

Основным назначением электродных соляных ванн является нагрев стальных деталей под термическую обработку при температурах до 1300 °С. Электродные соляные ванны питаются от электрической сети через специальные понижающие трансформаторы, обеспечивающие возможность получения на электродах рабочего напряжения 6,5—20 В.

Примерами электродных соляных ванн отечественного производства являются ванны СВС-1.3/13 и СВС-2.3/13 на максимальную рабочую температуру 1300 °С с трансформаторами мощностью соответственно 63 и 160 кВ · А.

Для различных видов химико-термической обработки при температурах до 900 °С (цементация, цианирование и др.) применяются ванны с металлическими тиглями, обогреваемыми снаружи нагревательными элементами. Нагрев загрузки осуществляется в расплавленных солях. Для нагрева деталей под закалку в таких ваннах в качестве жидкого теплоносителя иногда используется расплавленный свинец.

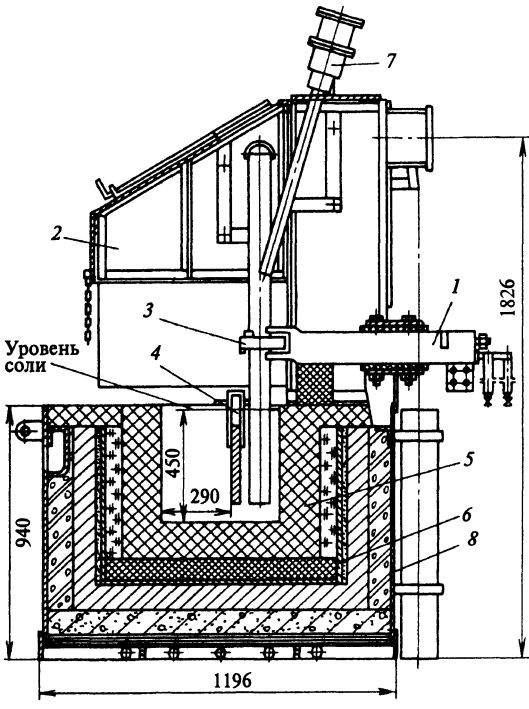


Рис. 60.4. Электродная соляная ванна:

1 — токопровод; *2* — зонт; *3* — электродная группа, *4* — перегородка; *5* — футеровка, *6* — внутренний кожух; *7* — пирометр; *8* — наружный кожух

Для химико-термической обработки стальных изделий применяются электрические ванны СВГ-1,5.2/8,5, СВГ-2,5.3,5-/8,5 и СВГ-3,5.4/8,5 на максимальную рабочую температуру 850 °С мощностью соответственно 12, 22 и 34 кВт.

В печах непрерывного действия нагреваемые изделия непрерывно или циклично перемещаются от загрузочного окна печи к разгрузочному. Печи применяются в серийном и поточном производствах. Низкотемпературные печи имеют вентиляторы или калориферные устройства, которые создают принудительную циркуляцию атмосферы внутри рабочей камеры для интенсификации процесса нагрева и выравнивания температуры. Название печи, как правило, определяется типом транспортирующего механизма.

Конвейерные печи (рис. 60.5). Перемещение изделий внутри печной камеры осуществляется конвейерным механизмом. Лента или цепь конвейера в печах с рабочей температурой выше 500 °С выполняется из жароупорной стали, марка которой выбирается в зависимости от рабочей температуры печи и механической нагрузки конвейера. Электромеханический привод конвейера монтируется око-

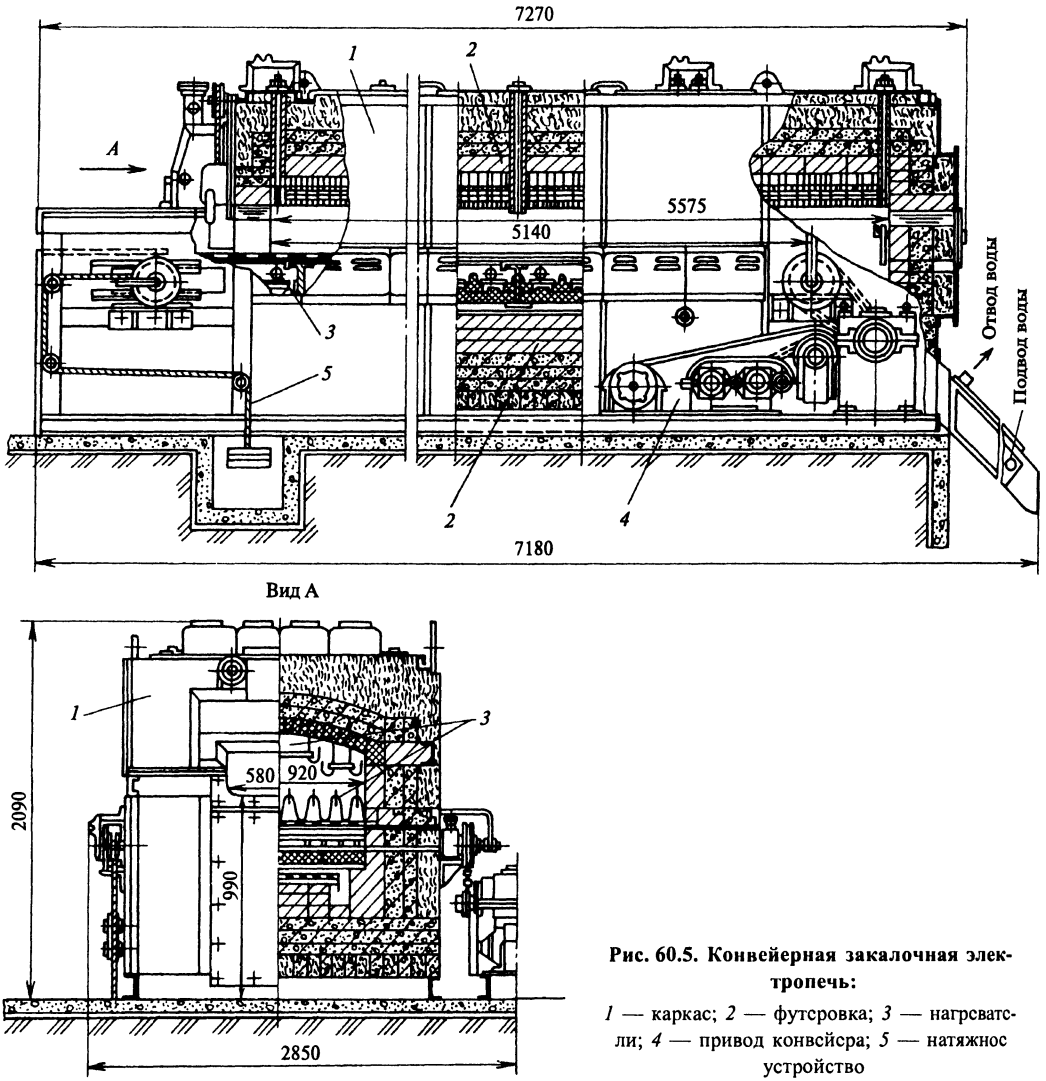


Рис. 60.5. Конвейерная закалочная электропечь:

1 — каркас; *2* — футеровка; *3* — нагреватели; *4* — привод конвейера; *5* — натяжное устройство

ло загрузочного или разгрузочного окна печи. В табл. 60.3 приведены технические данные некоторых конвейерных печей, выпускаемых отечественной электропромышленностью.

Толкательные печи (табл. 60.3). Изделия проталкиваются по направляющим или роликам пода печи с помощью находящегося перед загрузочной дверцей печи механизма — толкателя. Мелкие изделия или изделия, имеющие сложную конфигурацию, проталкиваются на специальных поддонах, башмаках или тележках. Направляющие и транспортирующие детали для печей с температурой выше 500 °С выполняются из жароупорных сталей.

Разновидностью толкательных печей являются *ручьевые печи*. Направляющими в этих печах служат жароупорные лотки — «ручьи», по которым с помощью толкателей перемещаются вдоль печи (в несколько параллельных «ручьев») однотипные детали, имеющие правильную цилиндрическую или иную удобную для проталкивания по узким лоткам, форму (кольца, втулки).

Барабанные печи (рис. 60.6, табл. 60.3). Они предназначены для нагрева мелких изделий сферической, цилиндрической (шарики, ролики) или другой округлой формы. Печь имеет загрузочный бункер, из которого изделия попадают в жароупорный барабан, имеющий внутри винтовую полость. При вращении барабана изделия перекатываются из одного витка барабана в другой и передвигаются вдоль печи к разгрузочному патрубку. Электромеханический привод барабана монтируется на торцевой стенке печи со стороны выгрузки.

Карусельные печи (табл. 60.3). Под печи обычно в виде футерованной кольцевой тележки враща-

Таблица 60.3. **Технические данные некоторых печей сопротивления непрерывного действия**

Наименование и назначение	Тип	Мощность, кВт	Напряжение на нагревателях, В	Максимальная рабочая температура, °С	Максимальная производительность, кг/ч	Мощность холостого хода, кВт	Число тепловых зон	Мощности тепловых зон, кВт	Габаритные размеры (длина × ширину × высоту), мм	Масса, т
Конвейерная для закалки стальных изделий в защитной атмосфере	СКЗ-4.20.1/9	70	90—120	900	160	32	2	I—45; II—25	6160×2450×4200	10,6
	СКЗ-6.30.1/9	150	105—120	900	360	47	3	I—80; II—40; III—30	7640×2650×4200	13,8
	СКЗ-10.40.1/9	270		900	800	80	3	I—140; II—85; III—45	8640×3050×4200	18,2
Конвейерная для отпуска стальных изделий в защитной атмосфере	СКЗ-4.20.1/7	50	151—165	700	160	17,5	2	I—35; II—15	6160×2450×4200	12
	СКЗ-6.30.1/7	100	143—218	700	360	26	3	I—55; II—30; III—15	7640×2650×4200	15,5
	СКЗ-10.40.1/7	195	155—200	700	800	41,5	3	I—105; II—60; III—30	8640×3605×4200	21,6
Конвейерная для низкотемпературного отпуска стальных изделий	СКО-8.35.4/3	50	—	350	240	14	2	I—35; II—15	7110×2350×2860	10,7
	СКО-12.55.4/3	75	—	350	480	30	3	I—45; II—15; III—15	9110×2750×2860	18
	СКО-14.75.4/3	130	—	350	800	44	4	I—70; II—20; III—20; IV—20	11 110×2950×2860	22,5
Конвейерная с камерой охлаждения	СКЗ-8.50.2,5/10-Х100	325	—	1000	600	124	4	I—160; II—100; III—55; IV—10	21 000×2660×3660	29,1
С пульсирующим подом для закалки стальных изделий в защитной атмосфере	СИЗ-4.20.1/9	80	90—120	900	160	34	2	I—50; II—30	5200×2080×1830	7
	СИЗ-6.40.1/9	150	105—120	900	360	38	3	I—80; II—40; III—30	7800×2330×2150	11,5
Рольганговая для различных термических процессов. То же с камерой охлаждения	СРО-10.80.4/10	350	90—100	1000	700	110	4	I—320; II и VI—260	21 600×2580×2540	53
	СРЗ-8.160.10/10	1500	173—225	1000	3100	—	6	III—240; IV и V—210	20 460×4660×4500	93
	СРЗ-12.240.4/11-Х150	1200	—	1100	2000	—	7	—	45 310×3215×2800	135
Толкательная для нормализации стальных изделий	СТО-10.60.5/10	360	33—50	950	1000	52	3	—	13 360×3300×3115	38
Толкательная для закалки стальных изделий	СТЗ-5.40.5/10	235	65—75	950	450	80	2	I—146; II—89	9800×4750×5600	40
Барабанная для закалки стальных изделий	СБЗ-4.24/9	95	61—106	900	150	45	2	I—65; II—30	4380×2500×2500	13
Барабанная для цементации и нитроцементации	СБЦ-6.24/10	120	33—80	950	150	50	3	—	6950×3700×4800	—
Карусельная для нагрева стальных изделий под закалку	СА3-53.21.7/11	540	196—380	1100	600	215	6	II и IV—89; II, III, VI—76; V—135	9100×7400×6600	80

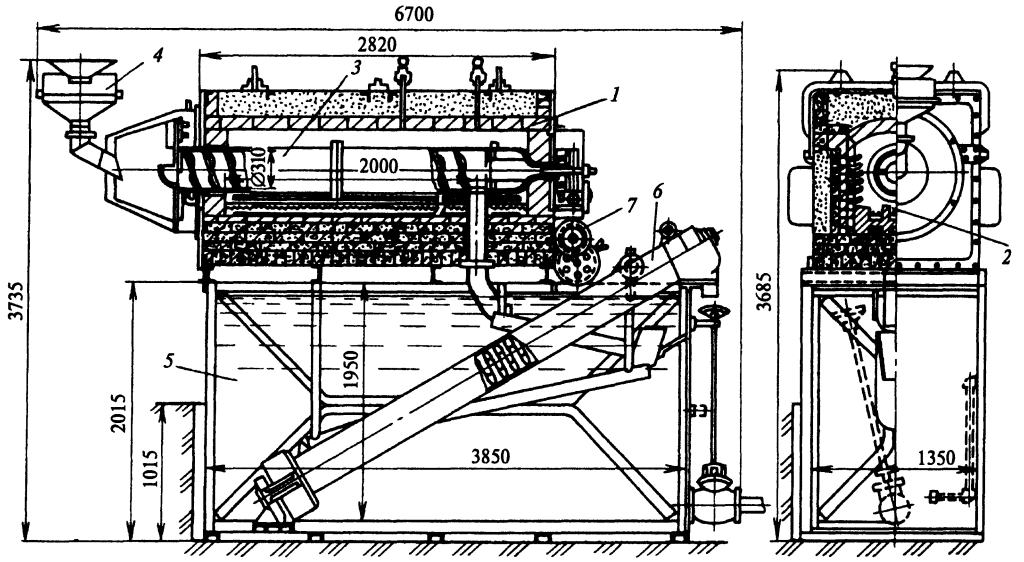


Рис. 60.6. Барабанная муфельная электропечь:

1 — футеровка; *2* — нагреватели; *3* — жароупорный муфель; *4* — загрузочный бункер; *5* — закалочный бак; *6* — разгрузочный шнек; *7* — привод муфеля

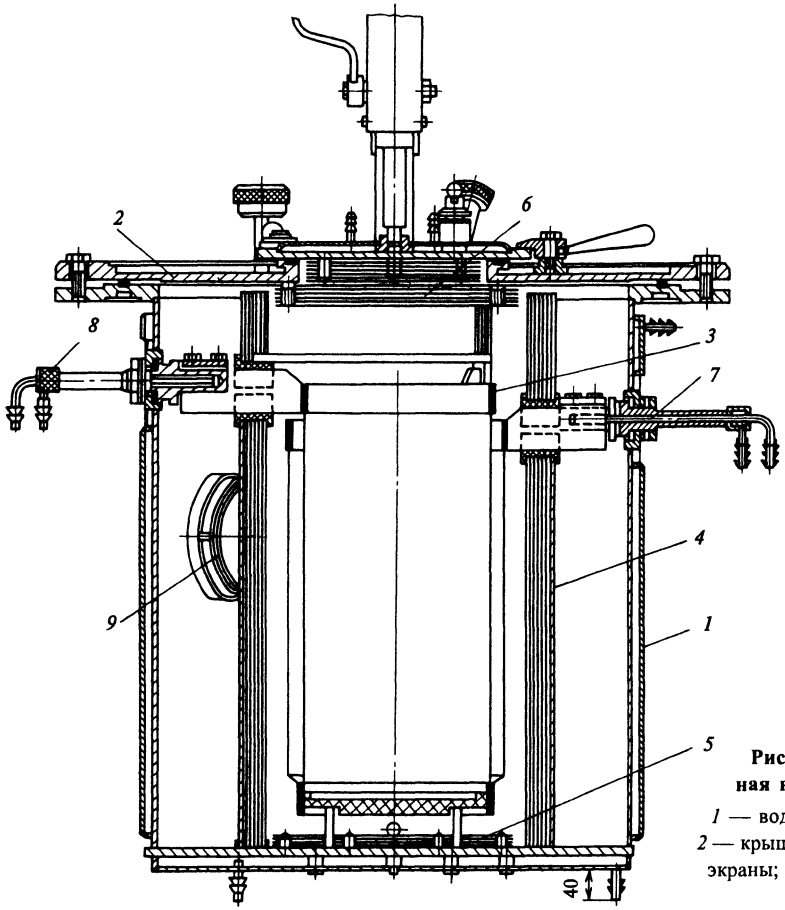


Рис. 60.7. Высокотемпературная вакуумная электропечь:

1 — водоохлаждаемый кожух печи; *2* — крышка; *3* — нагреватель; *4—6* — экраны; *7*, *8* — выводы нагревателя; *9* — гляделка

ется от электромеханического привода. Загрузочное и разгрузочное отверстия либо совмещены, либо находятся в непосредственной близости друг от друга. Благодаря отсутствию жароупорных конструкций внутри печи рабочая температура печи лимитируется только допустимой температурой материалов нагревательных элементов и огнеупорной кладки печи.

Рольганговые печи (табл. 60.3). Перемещение изделий в печи осуществляется рольгангом пода. Ролики выполняются из жароупорных материалов и приводятся во вращение цепной передачей. Рольганговые печи применяются для термической обработки крупногабаритных изделий (труб, профильного и листового проката, стекла, подшипниковых колец и др.).

Протяжные печи. Протяжные печи предназначаются для термической обработки и процессов эмалирования проволоки и ленты. Лента или проволока перемещается вдоль печи специальными намоточно-размоточными механизмами, находящимися вне печи. Для термической обработки чаще применяются горизонтальные печи, а для эмалирования — вертикальные.

Высокотемпературные вакуумные печи (рис. 60.7). Для термообработки или плавки очень чистых по химическому составу и тугоплавких материалов применяются высокотемпературные вакуумные печи сопротивления. Нагреватели в печах этого типа выполняются из молибдена, вольфрама, ниобия, тантала или графита.

Печь работает в комплексе с вакуумной установкой, откачивающей перед включением нагревателей воздух из рабочей камеры и поддерживающей необходимую степень разрежения в течение всего цикла работы печи.

Особенностью высокотемпературных вакуумных печей является или полное отсутствие футеровки, или выполнение ее очень тонкой и легкой. Часто вместо футеровки используется система тепловых экранов из жаростойких материалов, обладающих малым значением коэффициента теплового излучения. При отсутствии футеровки печь очень быстро разогревается до рабочей температуры, поэтому значительно ускоряется процесс откачки воздуха из рабочего пространства печи.

Конструкция нагревателей в высокотемпературных вакуумных печах определяется в основном свойствами и сортаментом применяемых для нагревательных элементов материалов. Металлические нагревательные элементы выполняются из проволоки и прутков (зигзагообразные, стержневые, шпилечные) или тонколистового материала (см. рис. 60.7). Графитовые и угольные нагреватели применяются в виде стержней, трубок или колец. Технические данные высокотемпературных вакуумных печей приведены в табл. 60.4 [60.2, 60.3].

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Электрические нагревательные элементы промышленных печей сопротивления выполняются для рабочих температур до 1200 °С из специальных жаростойких металлических сплавов высокого сопротивления, для печей с температурой до 1350 °С — из карборунда (карбида кремния). В печах с рабочей температурой выше 1350 °С применяются нагреватели из молибдена, вольфрама, графита и дисилицида молибдена.

Металлические нагревательные элементы выполняются из круглой проволоки и из ленты (в отдельных случаях могут применяться литые нагреватели). Неметаллические нагреватели чаще всего изготовляются в виде стержней круглого или прямоугольного сечения.

Расчет нагревательных элементов. Исходные данные: $P_ф$ — мощность на фазу или одну фазовую ветвь при параллельном соединении нескольких ветвей в фазе, Вт; $U_ф$ — фазное напряжение, В; $t_{изд}$ — конечная температура изделия, °С.

По максимальной температуре нагреваемого изделия выбирается материал нагревательных элементов.

Для выбранного материала с учетом его максимальной рабочей температуры и конструкции нагревателя определяется значение допустимой удельной поверхностной мощности нагревателя $w_д$.

Расчетный диаметр, м, нагревателя круглого сечения (проволочный зигзаг, спиральный, стержневой)

$$d = \sqrt[3]{\frac{4P_ф^2 \rho_{гор}}{\pi^2 U_ф^2 w_д}},$$

где $\rho_{гор}$ — удельное электрическое сопротивление материала нагревателя в горячем состоянии, Ом · м; $w_д$ — допустимая удельная поверхностная мощность нагревателя, Вт/м^2 (см. ниже).

Расчетная длина проволоки или стержня на фазу, м,

$$L_ф = \frac{R\pi d^2}{\rho_{гор} \cdot 4} = \frac{\pi U_ф^2 d^2}{4P_ф \rho_{гор}}.$$

Для ленточного нагревателя или стержня прямоугольного сечения размеры сечения, м, определяются по формуле

$$a = \sqrt[3]{\frac{P_ф^2 \rho_{гор}}{2m(m+1)U_ф^2 w_д}},$$

где $m = b/a$ (рис. 60.8).

Таблица 60.4. **Технические данные некоторых вакуумных печей сопротивления**

Наименование и назначение	Тип	Мощность, кВт	Напряжение на нагревателях, В	Максимальная температура, °С	Число тепловых зон	Мощность тепловых зон, кВт	Габаритные размеры (длина × ширину × высоту), мм	Масса, т	Остаточное давление, Па	Примечание
Шахтная высокотемпературная	СШВ-1,5.3/25	190	20—43	2500	1	—	3300×2545×1910	3,5	0,01	Нагреватели из карбида ниобия
	СШВ-2.20/20	540	11—18	2000	4	I—120; II—150; III—150; IV—120	4650×4170×11 250	15,2	0,001	Нагреватели из вольфрама
	СШВ-5.15/22	340	21—31	2200	2	I—310; II —30	7150×4100×4900	19,7	0,1	Нагреватели из графита
	СШВ-8.12/13	260	10—26	1300	3	I—45; II—165; III—50	9100×5520×5610	18,3	0,001	Нагреватели из молибдена
Камерная высокотемпературная	СНВ-1.10.3/25	400	11	2500	1	—	6350×4900×3500	16,3	0,01	Нагреватели из вольфрама
	СНВ-2.42/25	430	15	2500	1	—	6000×4710×3085	15,8	0,001	То же
Камерная с выдвижным подом	СНВ-5.15/11,5	140	77—87	1150	4	4×35	5900×5220×2740	10,5	0,1	Нагреватели из молибдена
	СНВ-15.30.5/11,5	340	66—142	1150	4	I—50; II—130; III—50; IV—110	15 200×4900×6000	45	7	То же
Элеваторная высокотемпературная	СЭВ-1,7/20	130	17	2000	1	—	3500×3500×5050	2,9	0,001	Нагреватели из вольфрама
	СЭВ-2.5.5/20	180	19	2000	1	—	4100×2730×4100	9	0,07	То же
	СЭВ-5.5/20	300	19	2000	1	—	6800×4900×5900	19,3	0,01	»
	СЭВ-8.8/16	480	28	1600	1	—	9150×4900×6300	39	0,001	Нагреватели из молибдена
Толкательная высокотемпературная	СТВ-3,8.15,2/20-Х30	450	35	2000	1	—	9250×7600×3530	23	0,1	Нагреватели из вольфрама
	СТВ-3,8.38/16-Х30	480	9—73	1600	1	—	11 470×5200×7800	42	7	Нагреватели из графита
Туннельная	СЛВ-16.128.16/14,5-Х64	2000	30—60	1450	3	—	44 000×11 500×7200	195	0,1	Две камеры нагрева и одна камера охлаждения

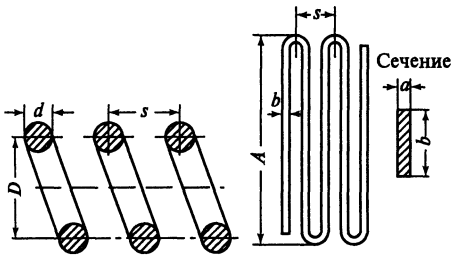


Рис. 60.8. Конструктивные размеры проволочного спирального (слева) и ленточного зигзагообразного (справа) нагревателей

Обычно для ленточных нагревателей $m = 5—15$ в соответствии с сортаментом выпускаемой ленты.

Длина ленты (или стержня) на фазоветвь, м,

$$L_ф = \frac{R_{ab}}{\rho_{гор}} = \frac{U_ф^2 m a^2}{P_ф \rho_{гор}}.$$

Для спирального проволочного нагревателя средний диаметр спирали (рис. 60.8) выбирается из условии механической прочности нагревателя: $D = (4—6)d$ для хромоалюминиевых сплавов Х23Ю5, Х27Ю5Т и фехраля Х15Ю5, $D = (7—10)d$ для нихромов и сплавов ХН70Ю, ХН60Ю3.

Шаг витков спирали $s \geq 2d$. Для ленточного зигзагообразного нагревателя высота петли принимается по условиям механической прочности нагревателя: $A \leq 100\,a$. Рекомендуется шаг волны $s \geq 2b$ (см. рис. 60.8). Для проволочного зигзагообразного нагревателя $s \geq 5d$.

Выбор удельной поверхностной мощности нагревателя высокотемпературной печи ($t_{печи} \geq$ ≥ 700 °С). В печах с температурой $t_{печи} \geq 700$ °С теплообмен между нагревателем и изделием осуществляется преимущественно излучением.

Если представить себе электрическую печь, в которой отсутствуют потери через кладку печи ($P_{пот} = 0$) и нагреватель выполнен в виде сплошного тонкого листа, охватывающего загрузку, то при допущении равенства поверхности нагревателя и изделия ($F_н = F_{изд}$) уравнение теплообмена излучением между таким идеальным нагревателем и поверхностью нагреваемого изделия имеет вид:

$$P_{печи} = C_s \varepsilon_{пр} \left[\left(\frac{T_н}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{изд}}{100} \right)^4 \right] F_н,$$

откуда удельная поверхностная мощность идеального нагревателя

$$w_{ид} = \frac{P_{печи}}{F_н} = C_s \varepsilon_{пр} \left[\left(\frac{T_н}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{изд}}{100} \right)^4 \right] = \varepsilon_{пр} w_s.$$

В этих уравнениях $P_{печи}$ — мощность печи, Вт; $F_н$ — поверхность нагревателя, м^2; $T_н$, $T_{изд}$ — температуры нагревателя и изделия. К; $C_s = 5{,}67$ Вт/(м$^2 \cdot$ К^4); $\varepsilon_{пр}$ — приведенный коэффициент теплового излучения,

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_н} + \frac{1}{\varepsilon_{изд}} - 1};$$

$\varepsilon_н$ и $\varepsilon_{изд}$ — коэффициенты теплового излучения материала нагревателя и материала изделия; w_s — удельная поверхностная мощность при теплообмене двух абсолютно черных тел.

Значения w_s в зависимости от температуры абсолютно черного нагревателя и абсолютно черного изделия даны семейством кривых на рис. 60.9.

В реальных условиях работы печи часть мощности нагревателя, равная тепловым потерям через стенку печи, поглощается футеровкой. Теплообмен излучением в камере печи с реальным нагревателем представляет собой сложную картину. Имеет место взаимное экранирование отдельных витков и секций (спирали, зигзаги) нагревателя. Если нагреватели укладываются в пазы на полочки, футеровка также частично экранирует нагреватели. Кроме того, внутренняя поверхность футеровки участвует в теплообмене с поверхностью нагреваемого изделия. Эти факторы могут быть учтены коэффициентом эффективности излучения нагревателя $\alpha_{эф}$.

Допустимая удельная поверхностная мощность нагревателя

$$w_д = \varepsilon_{пр} w_s \alpha_{эф}.$$

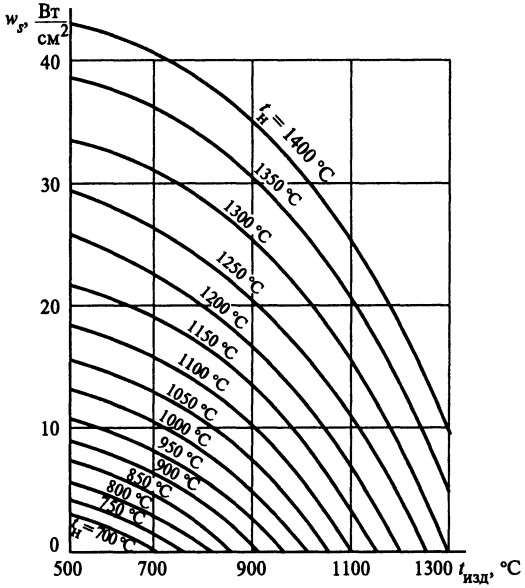


Рис. 60.9. Кривые удельной поверхностной мощности идеального абсолютно черного нагревателя

Таблица 60.5. **Значения коэффициентов эффективности излучения для различных конструктивных исполнений нагревателей**

Типы нагревателей	$\alpha_{эф}$
Проволочные, полузакрытые в пазах футеровки	0,16—0,24
Проволочные на полочках и на трубках	0,3—0,36
Проволочные зигзагообразные или стержневые	0,6—0,72
Ленточные зигзагообразные	0,38—0,44
Ленточные профилированные (ободовые) и литые	0,56—0,7

Рекомендуемые значения коэффициента эффективности для различных конструкций нагревателей даны в табл. 60.5.

Расчет нагревательных элементов можно вести, основываясь на имеющемся сортаменте проволоки, ленты или неметаллических стержней. Имея расчетное сопротивление фазоветви нагревателя $R_ф = U_ф^2 / P_н$ и выбирая из имеющегося в наличии материала размеры сечения проволоки, ленты или стержня, можно получить длину нагревателя на фазоветвь, м,

$$L_ф = \frac{R_ф f}{\rho_{гор}} = \frac{U_ф^2 f}{\rho_{гор} P_н}.$$

Рассчитанный таким образом нагреватель проверяется на допустимую удельную поверхностную мощность

$$w_н = P_н / F_н.$$

Для проволоки и стержней круглого сечения

$$w_н = P_н / \pi d L_ф,$$

а для ленты и стержней прямоугольного сечения

$$w_н = \frac{P_н}{2(a+b)L_ф}.$$

Если полученное значение удельной поверхностной мощности меньше допустимого $w_н \le w_д$, нагреватель выбран правильно. Если $w_н > w_д$, размер сечения нагревателя при данной схеме его соединений не подходит. В этом случае необходимо увеличить сечение и соответственно длину нагревателя, а при отсутствии возможности размещения такого нагревателя следует уменьшить заданную мощность нагревателя.

При расчете нагревательных элементов следует иметь в виду, что для промышленных печей сопротивления с рабочей температурой выше 700 °С проволоку диаметром меньше 3 мм и ленту тоньше 1,5 мм из-за малого срока их службы применять не рекомендуется.

Расчет нагревателей низкотемпературных печей см. [60.1].

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЕЧИ И УСТРОЙСТВА ПРЯМОГО НАГРЕВА

При протекании тока через нагреваемый предмет в нем выделяется теплота, Дж,

$$Q = I^2 R \tau,$$

где I — ток, А; R — сопротивление предмета, Ом; τ — время, с.

Печи прямого нагрева применяются для процесса графитизации угольных электродов, в стекловаренной промышленности, при производстве карборунда и др. Устройства прямого нагрева применяются в штамповочном и кузнечном производстве для нагрева прутков, труб и деталей цилиндрической формы. Разработан ряд конструкций установок для прямого нагрева под пластическую деформацию и термическую обработку стальных цилиндрических заготовок, прутков, труб, проволоки. Созданы также вакуумные установки прямого нагрева для термической обработки изделий из тугоплавких и химически активных металлов (табл. 60.6).

К установкам прямого нагрева относятся также электродные водогрейные и паровые котлы, нашедшие широкое применение для отопления и горячего водоснабжения.

Электродный водоподогреватель (рис. 60.10) представляет собой теплоизолированный сосуд (котел) с патрубками для подвода и отвода воды.

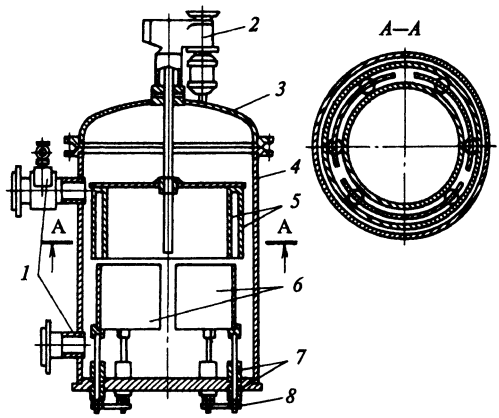


Рис. 60.10. Электродный водогрейный котел на напряжение 380 В:

1 — патрубки подвода и отвода воды; *2* — механизм перемещения антиэлектрода; *3* — крышки; *4* — корпус; *5* — антиэлектрод; *6* — электроды; *7* — изоляционные втулки; *8* — токопровод

Таблица 60.6. **Технические данные некоторых установок прямого нагрева**

Параметр	Тип установки АО «ВНИИЭТО»							
	ОКБ-1383	ОКБ-1171	ОКБ-1355	ОКБ-1238	СКБ-5015	СКБ-5003	СКБ-7013	ЦЭП-302Б
					Вакуумные установки			
	Назначение установки							
	Нагрев стальных заготовок		Нагрев проволоки		Термообработка труб		Спекание штабиков из тугоплавких металлов	
Размеры нагреваемых изделий, мм:								
диаметр (сечение)	60×120	10—40	1—4	3—8	19	70	30×30	20×20
длина	2000—4000	3000—4500	Непрерывного действия		2500	1250	600	600
Мощность, кВ · А	2000	500	160	180	132	132	270	212
Рабочая температура, °С	1250	1150	600	150—680	1200	1200	2900	2700
Максимальная производительность, кг/ч	9000	1300	1930	1000	—	—	—	—
Напряжение на контактах, В	20—40	30—100	35—50	28—84	—	—	—	—
Средний КПД, %	85	75	85	84	—	—	—	—
Габаритные размеры, мм:								
в плане	1944×4890	5600×8850	2150×1200	2500×5000	2820×2780	2820×2780	4000×2800	1700×2000
высота	5610	2300	2500	1950	5240	3900	3700	3700

Таблица 60.7. **Технические данные П-образных печей**

Мощность трансформатора, кВ · А	Длина печи, м	Ширина печи, м	Длительность графитизации, ч	cos φ в конце процесса	Загрузка печи, т	Диаметр электродов, мм	Расход электроэнергии, кВт · ч/т
2000	8	1,44	48	0,80	15,08	200	5400
2000	9	1,24	42	0,80	13,44	250	5100
2000	8	1,04	42	0,80	10,56	400	5500
3500	11	—	65	0,73	22,70	300	5900
3500	11	—	70	0,70	30,00	400	5500

Нагрев воды происходит за счет прохождения электрического тока на участке между фазным электродом и антиэлектродом (нулевой точкой). Последний может перемещаться и тем самым обеспечивать регулирование мощности в широких пределах.

На рис. 60.11 схематически показана П-образная графитировочная печь. Она представляет собой тесно расположенные и последовательно соединенные две обычные печи. Поэтому при той же ширине печного зала для П-образных печей достигается почти удвоенная длина керна по сравнению с обычным. Керн печи состоит из двух частей, соединенных между собой токопроводящей перемычкой, изготовленной из графитированных блоков, которые замурованы в заднюю стенку печи. При помощи этой перемычки осуществляется последовательное соединение двух частей загрузки, расположенных рядом.

Нагрев в печи осуществляется на постоянном токе. В табл. 60.7 приведены технические данные печей для графитизации П-образного типа, работающих на постоянном токе.

Прямой нагрев металлических заготовок принято называть электроконтактным нагревом. *Электроконтактный нагрев* — это технологический процесс сквозного нагрева определенной массы металла (детали, заготовки или другого объекта)

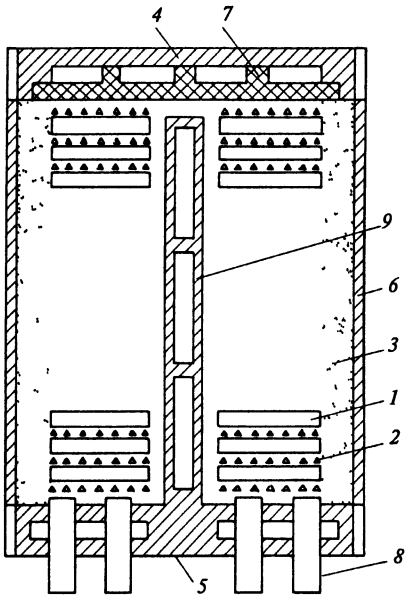


Рис. 60.11. П-образная графитировочная печь:
1 — электроды, *2* — перссыпка, *3* — теплоизоляционная шихта, *4*, *5*, *6*, *9* — задняя, передняя, боковая и разделительная стенки соответственно, *7* — графитовая перемычка, *8* — токоподводящие электроды

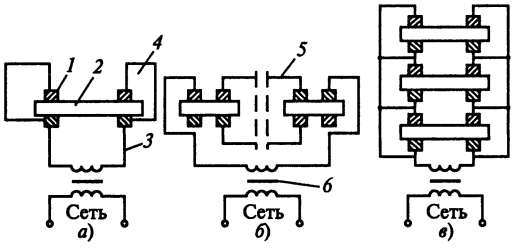


Рис. 60.12. Принципиальные электрические схемы однопозиционного устройства (*а*) и многопозиционных устройств с последовательным (*б*) и параллельным (*в*) включением нагревательных позиций (заготовок) в нагревательную цепь:
1 — зажимной токоподводящий контакт, *2* — нагреваемая заготовка, *3* — токоподводящий провод (шина), *4* — межконтактная перемычка, *5* — межпозиционная перемычка, *6* — силовой трансформатор

за счет тепловой энергии протекающего по металлу электрического тока

На рис 60 12 приведены принципиальные электрические схемы, иллюстрирующие принцип электроконтактного нагрева

60.2. УСТАНОВКИ БЫТОВОГО НАГРЕВА

По распространенности и областям применения бытовые электронагревательные приборы разделяются на шесть групп [60 5]

1 **Электроприборы для приготовления пищи**, к котором относятся а) *электроплиты* — бытовой нагревательный электроприбор напольной конструкции с электроконфорками и жарочным электрошкафом, б) *электроплитки* — бытовой нагревательный электроприбор переносного типа с одной или несколькими электроконфорками, в) *жарочные электрошкафы* со встроенным вентилятором и без него предназначены для приготовления пищевых продуктов внутри их рабочего объема, г) *электрогрили* предназначены для приготовления пищевых продуктов внутри их рабочего объема с применением инфракрасного излучения, д) *электротостеры* — бытовой нагревательный прибор для поджаривания ломтиков хлеба, е) *электроростеры* — бытовой нагревательный прибор для поджаривания бутербродов, ж) *зэлектромармиты* — прибор для поддержания постоянной температуры разогретой пищи, з) *электрофритюрница* — прибор для приготовления пищевых продуктов в горячем масле, и) *электрокастрюли* (скороварки предназначены для приготовления пищевых продуктов при повышенном давлении, пароварки — для приготовления на пару), к) *электросковороды*, л) *электровафельницы*, м) *электрошашлычницы*, н) *электрожаровни*, о) *электрояйцеварки*

2 **Электроприборы для отопления**, к ним относятся а) *электрорадиаторы* — отопительные электроприборы с теплоотдачей излучением и конвекцией от поверхности корпуса, б) *электроконвекторы* — отопительные электроприборы с преимущественной теплоотдачей естественной конвекцией непосредственно от нагревательного элемента, в) *электротепловентиляторы* — приборы с теплоотдачей вынужденной конвекцией от нагревательного элемента, г) *аккумуляционные* отопительные электроприборы — приборы, обеспечивающие аккумулирование теплоты в течение длительного времени с последующей теплоотдачей в окружающее пространство, д) *электрокамины* — приборы с преимущественной теплоотдачей направленным инфракрасным излучением

3 **Электроприборы для нагрева воды**, к которым относятся а) *электроводонагреватели* — приборы стационарного типа для нагрева воды до температуры 85 °С, б) *проточные электроводонагреватели* — приборы для быстрого нагрева струи водопроводной воды, в) *емкостные аккумуляционные электроводонагреватели* — приборы с теплоизолированным баком, предназначены для нагрева и сохранения горячей воды длительное время, г) *емкостные быстродействующие электроводонагреватели* — приборы с баком без теплоизоляции, предназначены для быстрого нагрева воды, д) *погружные электрокипятильники* — приборы, работающие погруженными в подогреваемую воду, е) *электроподогреватели для аквариумов* — прибо-

Таблица 60.8. **Расход электроэнергии на 1 чел. в год при различной степени электрификации быта**

Потребитель электроэнергии	Годовое потребление электроэнергии, кВт · ч
Только электрическое освещение	120—140
То же и мелкие нагревательные приборы и машины, приборы культурно-бытового назначения	300—350
То же и электроплита	600—700
То же и электрический водонагреватель для полного снабжения горячей водой	1400—1600
Полная внутриквартирная электрификация быта	3000—3500

ры для поддержания заданной температуры воды в аквариуме; ж) *электроподогреватели детского питания*; з) *электрочайники*; и) *электросамовары*; к) *электрокофеварки* (перкуляционные — для приготовления кофе в направленном потоке воды или пара; компрессионные, в которых приготовление кофе происходит при давлении выше атмосферного); л) *посудомоечные машины*.

4. **Электроприборы мягкой теплоты и косметические**: а) *электрооделяла*; б) *электробинты*; в) *электроподушки*; г) *электрогрелки*; д) *электроковрики*; е) *электрорефлекторы медицинские* — приборы с направленным тепловым потоком для лечебных целей; ж) *электросушители* для рук; з) *электрощипцы* и *электробигуди*; и) *фены* — приборы, создающие направленный поток теплого воздуха для сушки и укладки волос.

5. **Сушильные и гладильные машины, электроутюги**.

6. **Электронагревательные инструменты**, к которым относятся: а) *электропаяльники*; б) *электроприборы для выжигания по дереву*; в) *электроприборы для сваривания полиэтиленовой пленки*; г) *электровулканизаторы*; д) *электрофотоглянцеватели*; е)*электросварочные аппараты* бытового назначения; ж) *предпусковые подогреватели* двигателя автомобиля.

В табл. 60.8 приведены данные по расходу электроэнергии при различной степени электрификации быта.

ЭЛЕКТРОПРИБОРЫ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ПИЩИ

Электроплита напольного типа является универсальным прибором для приготовления пищи в домашних условиях. Приводим усредненные данные по расходу электроэнергии при приготовлении пищи с использованием электроплиты [60.6].

Число членов семьи	2	3	4	5	6
Расход электроэнергии в сутки, кВт · ч/чел	1,38	1,14	0,95	0,85	0,78

Электроплиты состоят из корпуса, электроконфорок и жарочного шкафа. Корпус электроплиты изготавливается из стали и покрывается силикатной эмалью, габаритные размеры электроплит: высота 850 ± 50 мм; ширина 400—600 мм; глубина 600 мм. Электроплиты изготавливаются с тремя или четырьмя конфорками и жарочным шкафом общей мощностью от 5 до 12 кВт. Конфорки изготавливаются с электронагревателями сопротивления либо индукционные. Преимущественное распространение в России имеют электроконфорки с нагревом сопротивлением (резистивным электронагревом). На рис. 60.13 приведена конструкция бытовой напольной четырехконфорочной электроплиты. Левая передняя конфорка предназначена для быстрого приготовления пищи и имеет повышенную мощность (до 2 кВт). Для предохранения от перегрева в этой конфорке предусмотрен термоограничитель биметаллического типа. Электроплита снабжается сигнализатором включения конфорок и шкафа. Температура нагрева конфорок изменяется с помощью многоступенчатого переключателя, позволяющего изменять мощность, потребляемую конфоркой, путем изменения схемы соединения электронагревателей конфорки. На рис. 60.14 приведена схема семиступенчатого переключателя нагревателей конфорки.

Жарочный шкаф электроплит изготавливается в виде металлического короба размерами по высоте 220—230 мм, по ширине 300—460 мм, по глубине 280—460 мм, обогреваемого сверху и снизу нагревателями мощностью 2 кВт. Включение нагревате-

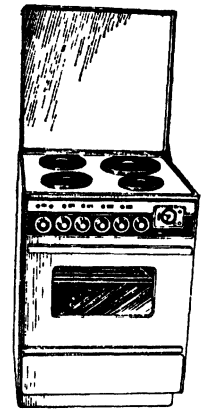


Рис. 60.13. Напольная бытовая электроплита

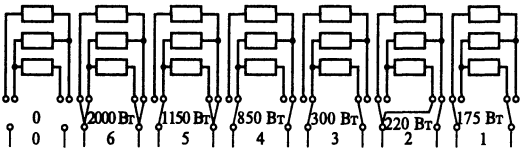


Рис. 60.14. Схема семиступенчатого переключателя нагревателей электроконфорки

лей осуществляется через трехступенчатый переключатель, позволяющий включать либо один из нагревателей, либо оба одновременно Температура внутри шкафа поддерживается автоматически с помощью дилатометрического терморегулятора в пределах 50—300 °С Для уменьшения тепловых потерь снаружи короб жарочного шкафа покрывается теплоизоляцией из стекловолокна, обернутого алюминиевой фольгой Передняя дверца жарочного шкафа застекляется ударопрочным стеклом, в шкафу располагается лампа внутренней подсветки Нагреватели жарочного шкафа выполняются либо из трубчатых электронагревателей (ТЭН), либо в виде плоских стальных коробок, в которых в изоляционной набивке (кварцевый песок, периклаз) запрессованы нихромовые спирали В ряде конструкций для интенсификации процесса нагрева в жарочный шкаф встраивается вентилятор, обеспечивающий принудительную теплопередачу от нагревателей шкафа к обрабатываемому изделию

Для предотвращения загрязнения воздуха кухни продуктами, образующимися при подгорании пищевых продуктов, современные конструкции жарочных шкафов оборудуются системой пиролитической или каталитической очистки, обеспечивающей разрушение загрязняющих воздух выделений

Схема включения электроплит предусматривает возможность подключения к электровводам 380/220, 380, 220 или 3×220 В В электроплитах используются три типа конфорок — чугунные со спиральными нагревателями из нихрома, запрессованными в изоляционную массу (периклаз, кварцевый песок), трубчатые из профилированных ТЭН и пирокерамические с инфракрасным нагревателем и стеклокерамическим покрытием В табл 60 9 приведены основные данные конфорок, используемых в конструкциях электроплит и электроплиток Основные размеры чугунных конфорок приведены на рис 60 15

Трубчатые конфорки изготавливаются из профилированных ТЭН треугольного или D-образного сечения (рис 60 16) Под ТЭН устанавливается металлический экран-отражатель, препятствующий распространению теплоты от ТЭН вниз Нагреваемая посуда ставится непосредственно на ТЭН и нагревается от него за счет теплопередачи теплопроводностью и излучением Пирокерамические конфорки имеют плоскую рабочую поверхность, покрытую стеклокерамикой толщиной 5,5 мм, на которой рисунком обозначена зона нагрева, под которой располагаются инфракрасные нагреватели мощностью 1,5—2 кВт Внизу под на-

Таблица 60 9 **Типы и основные параметры конфорок**

Тип конфорки	Диамстр конфорки, мм	Номинальная мощность, Вт	Время разогрева, мин, не более	КПД, %, не менее
Чугунная	145	1000	10	65
		1500*	5	70
	180	1200	15	65
		1500	10	65
		2000	5	70
	220	2000	15	65
Трубчатая из ТЭН	145	1000	4	70
		1200	4	70
	180	1800	4	70
		2000*	4	70
Пирокерамичсская	145	800	5	70
		1000	5	70
		1200	5	70
	180	1200	5	70
		1500	5	70
	220	2000	5	70

* Экспрсcс-конфорка или автоматическая конфорка (ускорснного нагрева за счет дополнительно установленной мощности с автоматичсским переходом из режима разогрева в заданный тепловой режим)

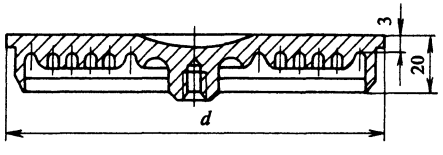


Рис. 60.15. Основные размеры чугунных конфорок

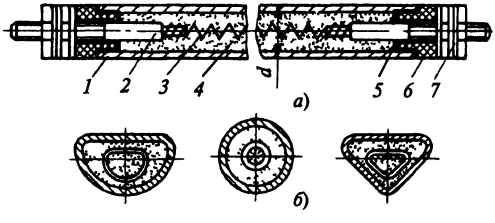


Рис. 60.16. Общий вид трубчатого электронагревателя (ТЭН):

а — продольный разрез, *б* — поперечные сечения, *1* — оболочка нагревателя, *2* — токоподвод, *3* — спираль из нихрома, *4* — наполнитель (периклаз), *5* — гермстик, *6* — изолятор, *7* — контактное устройство

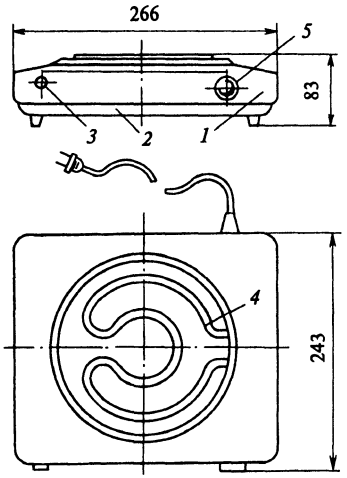


Рис. 60.17. Электроплитка с ТЭН:

1 — корпус; *2* — дно плитки; *3* — световой указатель; *4* — ТЭН; *5* — ручка регулятора

гревателями располагается слой стекловаты для теплоизоляции.

Бытовые электроплитки изготавливаются на напряжение 220 В и номинальные мощности 800; 1000; 1200 и 1500 Вт — одноконфорочные и 1600, 1800, 2000 и 2200 Вт — двухконфорочные. На рис. 60.17 приведен общий вид электроплитки типа ЭПТ1-1/22044 мощностью 1000 Вт с бесступенчатым регулированием температуры и трубчатым нагревателем D-образного сечения.

Электрогрили (жарочные шкафы с инфракрасным нагревом) выполняются закрытого и открытого исполнения мощностью 1—1,5 кВт; инфракрасным излучателем является либо ТЭН, либо трубчатая кварцевая лампа с вольфрамовой спиралью. Размеры рабочего пространства: ширина 300—425 мм, глубина и высота 200—250 мм для закрытого исполнения; ширина 500—375 мм, глубина и высота 260—225 мм для открытого исполнения гриля. В рабочем пространстве находятся приспособления для крепления приготовляемых продуктов (вертела, шампуры, сетки), частота вращения привода составляет 3—4 об/мин (рис. 60.18).

Электротостеры выполняются с ручным, полуавтоматическим и автоматическим управлением. При ручном управлении закладка и извлечение ломтиков поджариваемого хлеба выполняются вручную, время обжаривания устанавливается произвольно. При полуавтоматическом управлении время обжаривания контролируется либо термоограничителем, либо реле времени. В автоматическом тостере время обжаривания контролируется автоматически, извлечение обжаренных ломтиков хлеба осуществляется пружинными толкателями.

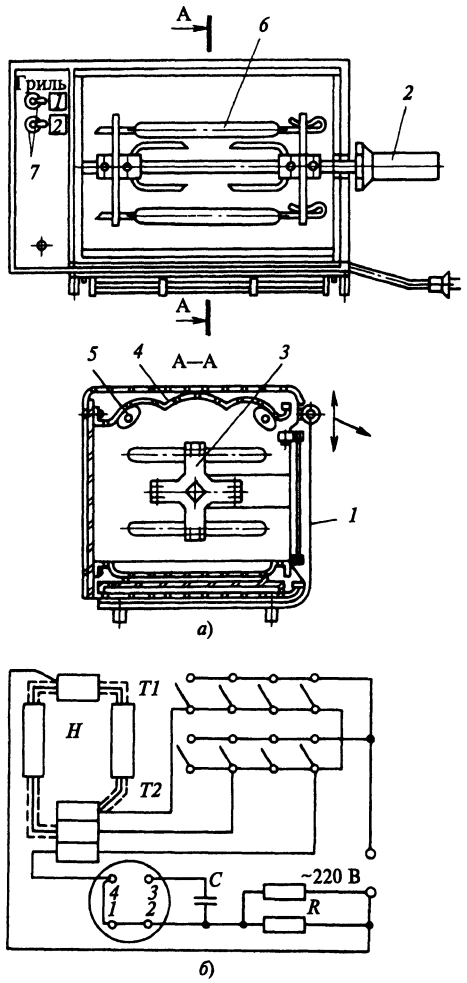


Рис. 60.18 Электрогриль:

а — устройство; *б* — схема; *1* — откидная стеклянная дверца; *2* — вертел; *3* — держатель; *4* — рефлектор; *5* — нагреватель; *6* — шпажки; *7* — тумблеры; *Т1* и *Т2* — тумблеры; *Н* — нагреватель

Мощность тостера 0,7—1,2 кВт, время обжаривания не превышает 3 мин.

Электрокастрюли должны соответствовать параметрам, приведенным в табл. 60.10. Электрокастрюли изготавливаются на напряжение 220 В, оборудуются терморегулятором, позволяющим регулировать температуру воды от 65 – 5 °С при минимальной уставке до 95 + 5 °С при максимальной уставке терморегулятора; КПД электрокастрюль 75 % и более. Время нагрева до 95 °С – 20 мин. Применение электрокастрюли-скороварки ускоряет на 70 % процесс приготовления пищи и на 40 % уменьшает расход электроэнергии.

Таблица 60.10. **Основные параметры и размеры электрокастрюль**

Внутренний диаметр, мм	Номинальная вместимость, л	Номинальная мощность, кВт
120	0,6	0,5
140	1,25	0,6
160	1,6	0,8
180	2,0	1,0
200	3,0	1,25
220	4,0	1,6

Электросковороды изготавливаются на напряжение 220 В и номинальные мощности 0,8; 1,0; 1,25; 1,4: 1,6 кВт; оборудуются терморегулятором, предназначенным для регулирования температуры рабочей поверхности от 100 °С при минимальной уставке до 230 ± 45 °С при максимальной уставке; неравномерность нагрева рабочей поверхности 40 °С и менее; время разогрева рабочей поверхности до температуры 185 °С 6 мин и менее. Средняя наработка электросковороды до отказа 1000 ч и более. На рис. 60.19 приведен внешний вид электросковороды типа ОКБ-1293/4ХЛЧ.

Электросковорода состоит из корпуса с крышкой и съемного терморегулятора. Корпус сковороды литой, в его дно залит ТЭН. Масса сковороды 2,9 кг, габаритные размеры 184×420×426 мм.

Электровафельницы, элекрожаровни и *электрошашлычницы* выпускаются на рабочее напряжение 220 В, оборудуются встроенным терморегулятором (кроме шашлычниц). Основные параметры

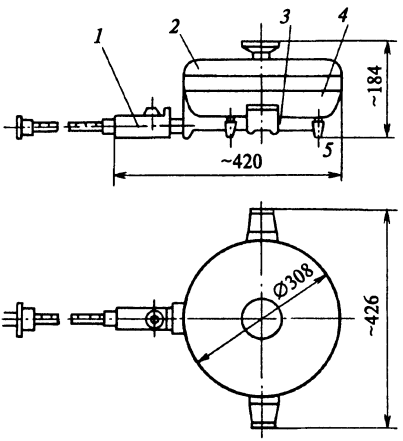


Рис. 60.19. Электросковорода:

1 — терморегулятор; *2* — крышка; *3* — ТЭН, залитый в дно сковороды; *4* — корпус; *5* — опорные ножки

этих приборов приведены в табл. 60.11. Средняя наработка приборов до первого отказа 1000 ч и более.

ЭЛЕКТРОПРИБОРЫ ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ

Преимуществами электрического отопления по сравнению с другими видами отопления являются: упрощение строительных работ при возведении зданий; возможность автоматического поддержания заданной температуры в помещении; простота обслуживания; отсутствие надобности в топливных складах; отсутствие загрязнения окружающей среды продуктами сгорания топлива. Недостатком

Таблица 60.11. **Основные параметры и размеры электровафельниц, электрожаровен и электрошашлычниц**

Прибор	Номинальная мощность, кВт	Площадь рабочей поверхности, см^2	Диапазон рабочей температуры, °С	Время разогрева до рабочей температуры, мин, не более
Электровафельница	0,8	315	170—200	10
	1,0	445		
	1,25	475		
Электрожаровня	0,8	315	180—250	12
	1,0	445		
		Масса одновременной загрузки, кг	Температура излучателя, °С	
Электрошашлычница с горизонтальным расположением шампуров	1,2	0,9	Не менее 700	5
	1,4	1,25		
	1,6	1,4		
Электрошашлычница с вертикальным расположением шампуров	1,2	0,9	Не менее 700	5
	1,4	1,25		

являются повышенные расходы на отопление. Ввиду этого широкое распространение получили переносные электроприборы местного отопления, служащие либо для местного, либо для дополнительного обогрева.

Электрорадиаторы отдают теплоту преимущественно конвекцией, выполняются в виде металлического герметичного корпуса, заполненного минеральным маслом, нагреватель располагается в нижней части корпуса и работает при удельной поверхностной мощности до 3 Вт/см^2. Температура рабочей поверхности в условиях нормальной эксплуатации 60—70 °С (максимум 105 °С). Радиаторы снабжаются регуляторами температуры рабочей поверхности, сигнализаторами включения нагревателя. Электрорадиаторы выпускаются мощностью 0,5—1,25 кВт при напряжении 127 и 220 В и мощностью 1,6 и 2,0 кВт при напряжении 220 В. В зависимости от типа радиаторы оборудуются автоматическим регулятором температуры воздуха в помещении, либо регулятором мощности, либо термоограничителем. Срок службы электрорадиатора 3000 ч и более.

Электроконвекторы предназначены для дополнительного отопления жилого помещения. При мощности 0,5 и 0,8 кВт электроконвекторы используются без регулирования мощности, при 0,8—2,0 кВт — со ступенчатым или бесступенчатым регулированием мощности. Номинальное напряжение 127 и 220 В (рис. 60.20).

Нагрев воздуха осуществляется за счет активной естественной конвекции, что обеспечивает максимальную теплоотдачу от нагревателей; температура воздуха, нагретого конвектором, превышает температуру окружающего воздуха не более чем на 85 °С; средняя наработка прибора до отказа 4000 ч и более.

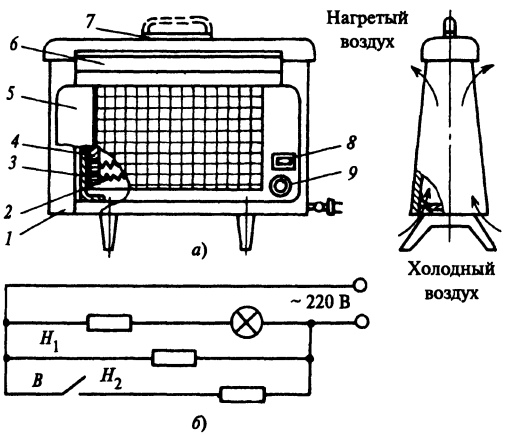


Рис. 60.20. Электроконвектор:

а — устройство; *б* — схема; *1* — корпус; *2* — нагреватели; *3* — кронштейн; *4* — экран; *5* — боковая панель; *6* — отражатель; *7* — ручка; *8* — переключатель мощности; *9* — сигнальная лампа ТН-0,3; H_1, H_2 — нагреватели; *В* — выключатель

Аккумуляционные отопительные электроприборы (печи) до 70 % всей энергии отдают тепловым излучением. Печь имеет сердечник большой теплоемкости, в который заделаны электрические нагреватели. Изолированный от окружающей среды теплоаккумулирующий сердечник разогревается до 300—600 °С, температура облицовки печи не превышает 70 °С. В зависимости от конструкции печи отопление осуществляется за счет теплоотдачи либо только от облицовки печи, либо дополнительно и от теплоаккумулирующего сердечника за счет естественной или вынужденной конвекции через его воздушные каналы. Печи выпускаются мощностью 3—6 кВт, работают при восьмичасовой ночной зарядке. Масса аккумуляционной отопительной печи равна 75—100 кг на 1 кВт мощности, занимаемая площадь 0,1—0,15 м^2.

Электрокамины предназначены для дополнительного обогрева помещения. Бытовые электрокамины изготавливаются на номинальное напряжение 220 В и мощности 0,5—2,0 кВт в напольном, настенном и универсальном исполнении. Применяются нагреватели типа спирали в кварцевых трубках с толщиной стенки 1—2 мм либо закрытого типа — ТЭН, помещаемые в фокусе параболического рефлектора из полированного алюминия или стали с покрытием, обеспечивающего направленный поток теплового излучения. Температура спирали в открытых электронагревателях или рабочей поверхности ТЭН находится в пределах 650—900 °С. Интенсивность теплового потока, создаваемого камином, выбирается из следующего условия: установившаяся температура поверхности, находящейся на расстоянии 0,5 м от электрокамина, на которую направлен поток теплового излучения, должна превышать температуру окружающей среды не более чем на 65 °С. Средний срок службы электрокамина 4000 ч и более. Эффективный радиационный КПД (величина, характеризующая количество теплоты, полученной объектом при направленном инфракрасном излучении) прибора 10—22 %.

В конструкции электрокамина мощностью 0,75 кВт и выше предусматривается ступенчатое регулирование мощности.

ЭЛЕКТРОПРИБОРЫ ДЛЯ НАГРЕВА ВОДЫ

Горячее водоснабжение является важнейшим элементом бытового комфорта.

Электрические водонагреватели существенно превосходят топливные в санитарно-гигиеническом отношении. Степень распространенности их в быту для горячего водоснабжения зависит от та-

рифа на электроэнергию. Объем и электрическая мощность водонагревателей определяются из нормы суточного потребления горячей воды в быту на 1 чел., равной 33 л при 65 °С. Применяются в домах без централизованного горячего водоснабжения для нагрева воды до 85 °С для хозяйственных, санитарно-гигиенических и других бытовых нужд. Электроводонагреватели применяются и при наличии централизованного горячего водоснабжения при температуре подаваемой воды до 50 °С и необходимости ее подогрева.

Проточные электроводонагреватели предусматривают отбор горячей воды одновременно с нагревом, имеют высокую установленную мощность 18—21 кВт, их КПД достигает 97 %.

Емкостные аккумуляционные электроводонагреватели имеют внутренний бак, вместимость которого обеспечивает потребное в течение дня количество горячей воды. Бак имеет высококачественную тепловую изоляцию (стекловата, полиуретан, натуральная пробка), предотвращающую снижение температуры горячей воды в течение дня более чем на 10 °С. Оптимально подогрев воды осуществляется в ночное время в течение 6—8 ч либо в ночное время с частичным подогревом днем. Оптимальной считается температура горячей воды 85 °С. Мощность нагревателя выбирается из расчета 110—120 Вт на 10 л вместимости водонагревателя. Вместимость аккумуляционного водонагревателя рекомендуется определять по выражениям: $V = 1{,}3Q_{уд}n$ — нагрев в ночное время; $V = 0{,}975Q_{уд}n$ — нагрев в ночное время с частичным подогревом днем; $V = 0{,}819Q_{уд}n$ — свободный режим нагрева, где $Q_{уд}$ — удельный расход горячей воды, л/(чел · день); n — количество людей, проживающих в квартире.

Для центральных районов России наиболее перспективным является нагрев воды в ночное время, для Восточной Сибири — в ночное время с подогревом днем.

Емкостные быстродействующие электроводоподогреватели вместимостью до 25 л предназначены для установки на кухне, обычно выполняются настенной конструкции, нагрев воды осуществляется за 30—60 мин, мощность нагревателя выбирается из условия до 1,5 кВт на каждые 5 л вместимости. Для получения воды с температурой 45—90 °С водонагреватели снабжаются терморегуляторами и смесителями. В качестве нагревателей используются ТЭН.

Погружные электрокипятильники предназначены для подогрева и кипячения воды в бытовых условиях, представляют собой ТЭН, свернутый в спираль диаметром 30—50 мм, три-четыре витка. Прямолинейные концы ТЭН заключены в пластмассовую герметичную ручку, соединяющую нагреватель со шнуром электропитания.

Таблица 60.12. **Основные параметры бытовых электрокипятильников**

Тип	Мощность, кВт	Время нагрева воды в сосуде от 20 до 95 °С	
		Вместимость сосуда, л	Время, мин
ЭПМ	0,3	0,25	6
	0,5	0,5	10
	0,7	1,5	20
ЭПО	1,0	3,0	20
	1,2	4,0	20
ЭПОТ	1,6	5,0	25
	2,0	7,0	30

Кипятильники выпускаются трех типов: ЭПМ — электрокипятильник малого габарита; ЭПО — основного габарита; ЭПОТ — основного габарита с термовыключателем. Погружные электрокипятильники изготавливаются на номинальное напряжение 220 В, основные параметры электрокипятильников приведены в табл. 60.12.

Электроподогреватели детского питания предназначены для разогрева до 35 °С бутылочек с питанием диаметром 53 мм и вместимостью 200 мл. Подогреватели выпускаются на номинальное напряжение 220 В мощностью 75 Вт, рассчитаны на работу с промежуточным теплоносителем — водой. Средняя наработка подогревателя 300 ч и более.

Широкое распространение для кипячения воды получили электрочайники, электросамовары и электрокофеварки, так как нагрев воды в них происходит значительно быстрее и экономичнее, нежели в обычной посуде на конфорках электроплит.

Электрочайники (рис. 60.21) выполняются типов: ЭЧ — электрочайник без термоограничитель-

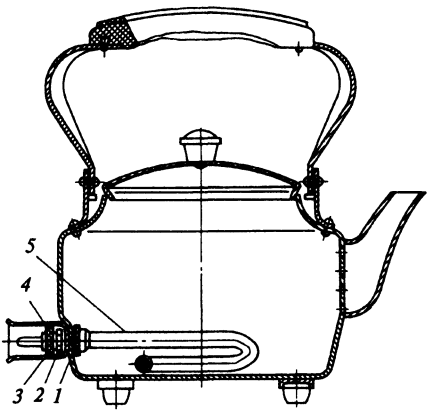


Рис. 60.21. Электрочайник:

1 — сальник; *2* — фибровая прокладка; *3* — гайка; *4* — фарфоровая колодка; *5* — ТЭН

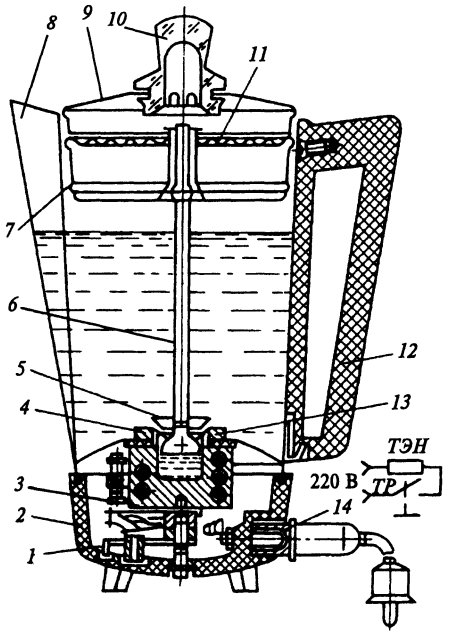


Рис. 60.22. Электрокофеварка перкуляционная:
1 — терморегулятор *ТР*; *2* — подставка; *3* — *ТЭН*; *4* — подвижная шайба; *5* — клапан; *6* — гейзер; *7* — сетчатый цилиндр; *8* — корпус; *9*, *11* — крышки; *10* — смотровое окно; *12* — ручка; *13* — гайка; *14* — контакты

ного устройства; ЭЧТ — с термоограничительным устройством; ЭЧЗ — с устройством отключения при закипании; ЭЧЗТ — с термоограничительным устройством и устройством отключения при закипании воды. Корпус чайника изготавливается из латуни или алюминия, самовара — из латуни, нагревателем служит ТЭН диаметром 10 мм, изогнутый в форме петли. Электрочайники и электросамовары изготавливаются на напряжение 220 или 127 В, мощность нагревателя 800—1250 Вт.

Мощность нагревателя электрочайника или электросамовара определяется выражением:

$$P = 7{,}3 \cdot 10^3 m / \tau_{доп},$$

где m — номинальная масса воды в приборе, кг; $\tau_{доп}$ — допустимое время нагрева воды до кипения, мин.

Средний ресурс работы электрочайников и электросамоваров 2500 ч и более.

Электрочайники выпускаются вместимостью 1; 1,6; 2; 2,5; 3 и 4 л, а электросамовары вместимостью 2; 2,5; 3; 4; 5 и 6 л. Время нагрева воды до кипения 7,5—20 мин в электрочайниках и 17—30 мин в электросамоварах.

Электрокофеварки (рис. 60.22) предназначены для приготовления кофе, чая, а также быстрого кипячения воды в домашних условиях. Корпус и крышка кофеварки изготавливаются из нержавеющей стали, в корпусе размещен стояк гейзера с дозатором под молотый кофе или чай. Нагрев воды осуществляется ТЭН, встраиваемым в основание корпуса. Большинство конструкций кофеварок снабжается термоограничителем, отключающим нагреватель при включении прибора в сеть без воды или при полном ее выкипании. Основные параметры электрокофеварок приведены в табл. 60.13. Средний ресурс электрокофеварок 1000 ч и более.

Таблица 60.13. **Основные параметры электрокофеварок**

Номинальная вместимость, л	Потребляемая мощность, Вт, не более	Время приготовления кофе, мин, не более
0,3	500	15
0,5	500	15
0,8	1250	25
1,2	1250	25
1,5	1250	25

РАЗЛИЧНЫЕ БЫТОВЫЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Основные параметры электроприборов для обогрева человеческого тела приведены в табл. 60.14.

Нагревателем в приборах для обогрева тела служат спирали из нихромовой проволоки, вплетенные в асбестовую ткань, которая закрепляется в малорастягивающейся ткани, либо трубки из нагревостойкой пластмассы с графитовым заполнением. Приборы выпускаются на рабочее напряжение сети 220 В, для регулирования температуры нагрева применяются трехступенчатые переключатели мощности. В одеялах, грелках дополнительно устанавливаются термоограничители, размыкающие цепь нагревателя при температуре 50—70 °С.

В *рефлекторах электрических медицинских* в качестве источника теплоты применяется электрическая лампа накаливания из стекла синего цвета мощностью 40—60 Вт, температура светового пятна рефлекторов до 40 °С.

Фены бытовые представляют собой электровентиляторы с нагревателем, размещенные в пластмассовом корпусе, предназначены для сушки волос в бытовых условиях струей подогретого воздуха. Основные параметры бытовых фенов приведены в табл. 60.15.

Фены изготавливаются на номинальное напряжение 220 В, средняя наработка фена до отказа

Таблица 60.14. **Электроприборы для обогрева тела человека**

Наименование	Тип	Потребляемая мощность, Вт	Рабочая температура, °С	Размер, мм	Масса, кг
Электроковрик	ЭКФ-20	20, 40, 80	45	430×360	0,54
Электроматрац	ЭМФ-20	30, 60, 120	45	2000×1000	3,5
Электроодеяло	ЭОФ-20	30, 60 120	45	2000×1400	1,5
Электрогрелка	—	15, 30, 60	45	370×300×20	0,6
Электробинт	БЭ-1	60, 120, 250	45	2100×160×20	0,5
Электрогрелка для ног (электробабуши)	ЭГН-1	15, 30, 60	70	335×270×160	2,0

Таблица 60.15. **Основные параметры бытовых фенов***

Тип	Номинальная подача, $м^3$/мин	Количество режимов нагрева	Масса, кг	Температура выходящего воздуха, °С
ФР, ФРН	0,16	1	Менее 0,5	60
ФП, ФПН	0,4—1,0	1; 2; 3	2,0	40—60
ФС, ФСН, ФСБ	1,0	2; 3 или бесступенчатое регулирование	—	20—60

* В обозначении типов фенов: Ф — фен; Р — ручной; П — переносный; С — стационарный; Б — бесступенчатое регулирование; Н — с насадками.

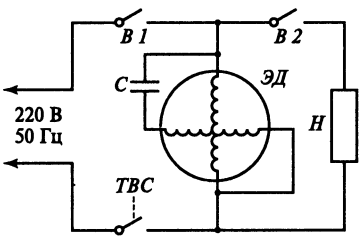


Рис. 60. 23. Электрическая схема фена:

В1 — выключатель фена; *В2* — выключатель нагревателя; *Н* — нагреватель; *ЭД* — электродвигатель вентилятора; *С* — конденсатор; *ТВС* — термовыключатель с самовозвратом

500 ч и более, потребляемая мощность 250—500 Вт, мощность двигателя вентилятора 50 Вт.

На рис. 60.23 приведена электросхема бытового фена типа ФП-0,9/1-220. В нагреватель фена встроен термовыключатель с самовозвратом *ТВС*, отключающий фен при отказе электродвигателя.

Электропаяльники бытовые выпускаются непрерывного нагрева (для работы в продолжительном режиме) форсированного нагрева (для работы в продолжительном режиме, снабжаются устройством для скоростного разогрева до рабочей температуры) и импульсного нагрева (прибор малой теплоемкости для работы в повторно-кратковременном режиме). Условное обозначение паяльника: ЭП — электропаяльник; С — сменный паяльный стержень; Ц — несменный паяльный стержень, Н — непрерывный нагрев; И — импульсный нагрев; Ф — форсированный нагрев; цифры в числителе — номинальная мощность, Вт; в знаменателе — номинальное напряжение, В.

Срок службы электропаяльников непрерывного и форсированного нагрева 1500 ч и более, импульсного нагрева — 3000 циклов включено-выключено и более. Основные параметры бытовых электропаяльников приведены в табл. 60.16.

Электрические утюги являются одним из наиболее распространенных и широко применяемых бытовых электроприборов. В современных конструкциях утюгов нагревателем служит ТЭН, залитый в алюминиевую подошву утюга. Утюги снабжаются терморегуляром, некоторые модели снабжаются разбрызгивателем воды и пароувлажнителем, выполняются на рабочее напряжение 220 и 127 В. Терморегулятор поддерживает температуру подошвы утюга в пределах, приведенных в табл. 60.17.

Время разогрева утюга с подошвой из алюминиевого сплава лежит в пределах 3—4 мин, в конструкциях утюгов с пароувлажнителем время разогрева до начала парообразования 4 мин и менее. Выпускаются следующие типы утюгов: УТ — с терморегулятором; УТП — с терморегулятором и пароувлажнителем; УТПР — с терморегулятором, пароувлажнителем и разбрызгивателем; УТМ — с терморегулятором, малогабаритный. Основными параметрами, определяющими способность утюга к глажению, являются его мощность (указана в обозначении типа), масса (указана в обозначении типа), пределы и точность регулирования температуры подошвы, время разогрева подошвы утюга. Качество и надежность утюга определяются его КПД

Таблица 60.16. **Основные параметры бытовых электропаяльников**

Режим работы паяльника	Условное обозначение	Номинальная мощность, Вт	Время разогрева до 300 °С, мин, не более	Температура рабочая, °С
Непрерывный нагрев	ЭПЦН, ЭПСН	10, 16	5	300—400
		25	7	
		40, 65, 100	8	
		160 (200)*, 250	—	
Форсированный нагрев	ЭПСН, ЭПЦФ	40/20, 100/50, 250/125**	2	Не более 500
Импульсный нагрев	ЭПЦИ	40, 65, 100, 160	0,2	Не более 6500
	ЭПСИ	40, 65	0,2	Не более 500

* Указанное в скобках значение мощности относится к ЭПСН.

** Цифра в знаменателе указывает мощность в установившемся режиме работы.

Таблица 60.17. **Температура подошвы утюга, рекомендуемая при глажении различного рода тканей**

Материал	Температура подошвы, °С
Вискозный шелк, капрон, нейлон	80—100
Натуральный шелк	140—160
Шерсть, шерсть в смеси с хлопком, вискозным волокном, лавсаном	160—180
Хлопок	180—200
Лен	210—230

Таблица 60.18. **Основные параметры бытовых электроутюгов**

Тип	Время разогрева подошвы, мин, не более	Тип	Время разогрева подошвы, мин, не более
УТ1000-1,2	3	УТП1000-2	4
УТ750-1,3	4	УТП750-2	5
УТ1000-1,6	3,5	УТПР1000-2	4
УТ750-1,6	4,5	УТПР750-2	5
УТ1000-2,5	8	УТМ400-0,8	6
УТ750-2,5	10	УТМ240-0,8	8

и долговечностью. Основные параметры бытовых электроутюгов приведены в табл. 60.18. Утюги мощностью 1000 Вт выпускаются только на 220 В, а остальные на 127 и 220 В.

Допустимые колебания температуры подошвы утюга не более 30 °С, допустимая неравномерность нагрева подошвы не превышает 15 °С. Средний ресурс электроутюгов 2000 ч и более, КПД = 80—85 %.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ТЭН ДЛЯ БЫТОВЫХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Мощность ТЭН выбирается соответственно определяемой тепловым расчетом потребной мощности прибора:

$$P_{\text{ТЭН}} = 1{,}2P_{\text{потр}}.$$

Оптимальная поверхность ТЭН определяется выражением

$$F_{\text{ТЭН опт}} \geq P_{\text{ТЭН}} / w_{\text{доп}},$$

где $w_{\text{доп}}$ — допустимая по условиям эксплуатации удельная поверхностная мощность ТЭН, Вт/см^2. Рекомендуемые значения $w_{\text{доп}}$ приведены в табл. 60.19.

60.3. ДУГОВЫЕ ПЕЧИ

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ

К дуговым печам относится класс электропечей, состоящий из дуговых сталеплавильных печей переменного тока, агрегатов комплексной обработки стали переменного и постоянного тока, дуговых печей постоянного тока, рудовосстановительных, рудоплавильных, вакуумных дуговых печей и др. [60.2].

Дуговые сталеплавильные печи переменного тока малой (0,5—12 т) и средней (25—50 т) вместимости предназначены в основном для выплавки конструкционных углеродистых, низколегированных, легированных и высоколегированных сталей в фасонно-литейных цехах машиностроительных заводов. Сверхмощные крупнотоннажные печи переменного тока, удельная мощность печного трансформатора которых имеет значение 600—1000 кВ · А/т, предназначены для выплавки жидкого полупродукта с последующей его доводкой до требуемых химического

Таблица 60.19. **Допустимая удельная поверхностная мощность для ТЭН**

Нагреваемая среда	Условия нагрева	Рекомендуемый материал оболочки ТЭН	Удельная нагрузка, Вт/см^2	
			рекомендуемая	максимально допустимая
Вода	Нагрев в проточном водоподогревателе	Алюминиевый сплав; луженые медь и латунь, нержавеющая сталь, стали 10 и 20 с противокоррозионным покрытием	8—12	15
	Нагрев, кипячение в баке водоподогревателя		6—10	11
Воздух	Нагрев в спокойной среде до 400 °С на оболочке ТЭН	Стали 10 и 20	1,2—1,8	2,3
	То же свыше 400 °С	Нержавеющая сталь 1Х18Н10Т	2,3—5	6,0
	Скорость движения воздуха до 6 м/с и температура на оболочке ТЭН свыше 400 °С	То же	3—4,5	6,0
	Нагрев в калорифере, скорость движения воздуха свыше 6 м/с и температура на оболочке ТЭН до 400 °С	Стали 10 и 20	5—5,5	7,0
Пищевые жиры, масла	Нагрев в емкости	То же	2,5—3	3,5
Молоко	То же	Нержавеющая сталь 1Х18Н10Т	1,5—2	2,5
Конфорки для бытовых электроплит	—	То же	4—6	8
Подошва утюга из алюминиевого сплава	Нагреватели залиты в подошву, нагрев с термоограничителем до 250 °С	Стали 10 и 20	11—12	13
Бытовые электроплиты	Нагреватели залиты в металл конфорки	То же	5—7	8,0
Жарочные и сушильные шкафы	—	—	0,5—1,5	—

состава и температуры в агрегатах внепечной обработки стали.

Кроме выплавки стали, в том числе из металлизированных окатышей, дуговые печи переменного тока применяют для выплавки высококачественных чугунов, цветных металлов, различных огнеупоров, флюсов и синтетических шлаков, рафинирования некоторых ферросплавов. Наряду с использованием дуговых печей в качестве плавильных агрегатов их также применяют в качестве миксеров (печей выдержки) для чугуна и других металлов, при этом печь может быть как прямого, так и косвенного нагрева, когда дуга горит между двумя горизонтально установленными электродами, размещенными над расплавом.

Агрегаты комплексной обработки стали предназначены для проведения в них ряда доводочных технологических операций в целях получения из жидкого полупродукта, выплавленного в дуговой печи или конвертере, заданной марки стали или сплава с требуемыми химическим составом и температурой.

Кроме того, агрегаты комплексной обработки стали являются своего рода «демпфером» между плавильным агрегатом и машинами непрерывного литья заготовок и обеспечивают непрерывный цикл получения литой заготовки.

Дуговые печи постоянного тока, аналогично печам переменного тока, предназначены для выплавки конструкционных углеродистых, легированных и высоколегированных сталей, высокопрочного чугуна, а также для выплавки алюминия и сплавов на его основе, различных медных сплавов и др. Принципиальная конструктивная схема таких печей аналогична схеме дуговых печей переменного тока, что позволяет производить замену последних без больших капитальных затрат.

Если в дуговой печи происходит процесс восстановления одного или нескольких оксидов до элемента, входящего в выплавляемый продукт,

то такая печь является по характеру процесса рудовосстановительной

Рудовосстановительные электропечи или электропечи с «погруженной» дугой представляют собой электротермические установки, в которых осуществляется переработка природных рудных материалов в присутствии восстановителей (углерода, алюминия, кремния) и флюсов (для формирования шлака) Рудовосстановительные электропечи относятся к установкам смешанного нагрева (дугового и резистивного), но в подавляющем большинстве случаев основная доля тепловой энергии образуется за счет «закрытой» (теплоизолированной) дуги

Вакуумные дуговые печи предназначены для производства слитков и фасонного литья из высокореакционных металлов (титана, циркония, ниобия, тантала, вольфрама и др), а также слитков специальных сталей и жаропрочных сплавов В соответствии с этим печи делятся на два вида для плавки в кристаллизаторе и для плавки в гарниссаже

ДУГОВЫЕ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫЕ ПЕЧИ

Дуговые печи — это печи, в которых теплотой плавления является теплота, выделяемая электрической дугой, горящей в рабочем пространстве печи

По конструкции дуговые сталеплавильные печи подразделяются на два типа — *с поворотным сводом* и *выкатной ванной*

В условном обозначении дуговых сталеплавильных печей — ДСП первая буква означает метод нагрева (Д — дуговой), вторая буква — выплавляемый металл (С — сталь или другие сплавы железа), третья — конструктивную особенность (П — поворотный свод), а число после букв — вместимость печи в тоннах, после числа следует номер исполнения печи Например, условное обозначение дуговой электропечи для выплавки стали, имеющей поворотный свод, при вместимости печи 100 т и седьмом ее исполнении — ДСП-100И7

При известной общности физико-химических процессов производства стали в кислородных конвертерах, а также мартеновских и электрических печах выплавка металла в открытых ДСП имеет ряд особенностей, которые обусловливают следующие технологические преимущества этих печей

возможность плавления и перегрева большинства металлов благодаря достижению в дуге высокой температуры и возможности введения в рабочее пространство печи большой удельной мощности,

регулируемость физико-химической активности шлака, что позволяет при соответствующем его составе и температуре проводить все необходимые металлургические операции дефосфорацию, десульфурацию, дегазацию и раскисление металла,

возможность регулирования состава атмосферы в рабочем пространстве печи с достижением окислительной, восстановительной или нейтральной среды,

небольшой угар железа и легирующих элементов по сравнению с кислородными конвертерами и мартеновскими печами,

возможность достаточно просто и плавно регулировать вводимую в печь мощность,

перемешивание металла в ванне печи, усреднение его температуры и химического состава благодаря электродинамическому взаимодействию расплавленного металла и дуг (в отличие от мартеновской печи)

Освоен выпуск ДСП переменного тока вместимостью 0,5, 1,5, 3, 6, 12, 25, 50,100 и 150 т Чаще всего в ДСП предусматривают механизированную загрузку сверху с помощью специальной корзины Технические данные ДСП приведены в табл 60 20

Печной трансформатор — неотъемлемый комплектующий элемент ДСП Мощность печного трансформатора определяют, исходя из требуемой (допустимой) продолжительности наиболее энергоемкого периода расплавления

Чтобы обеспечить работу ДСП в оптимальных режимах (при соответствующих соотношениях рабочих токов и напряжений), необходимо соблюдать определенное соответствие между электрическими параметрами печного трансформатора, с одной стороны, и вторичного токопровода ДСП — с другой

Разработаны ДСП различных конструкций Общий вид ДСП-100И7 приведен на рис 60 24, *а* и *б*

Сварной кожух, образующий ванну и стенки печи, выполняют цилиндрическим или цилиндроконическим Для удобства монтажа и сокращения времени на ремонты в кожухе предусмотрены разъемы на уровне порога рабочего окна Водоохлаждаемые элементы стен кожуха состоят из двух горизонтальных поясов жесткости трубчатого или коробчатого сечения, служащих напорным и сливным коллекторами для охлаждения стеновых панелей

Свод предназначен для герметизации печи и снижения ее тепловых потерь В ДСП широко применяют водоохлаждаемые своды При малой и средней вместимости печей применяют полностью охлаждаемые своды, при большой вместимости — комбинированные [периферийная часть охлаждаемая, центральная выполнена из керамики (рис 60 25)]

Электродные уплотнения устанавливают в зазоре между электродом и сводом Конструкции этих уплотнений самые разнообразные — от сальниковых огнеупорных до газодинамических В крупных печах надежно работают газодинамические уплотнения, в которых используют перегретый пар или азот

Таблица 60.20. **Технические данные ДСП переменного тока**

Параметр	ДСП-0,5	ДСП-1,5	ДСП-3	ДСП-6	ДСП-12	ДСП-25	ДСП-50	ДСП-100И7	ДСП-150И1
Номинальная вместимость элсктропсчи, т	0,5	1,5	3	6	12	25	50	100	150
Диаметр (внутренний) кожуха на уровнс откосов, мм	1600	2200	2600	3200	4260	4700	5500	6500	7800
Номинальная мощность, МВ · А	0,8	1,6	2,5	5	8	12,6	40	80	90
Номинальное первичное напряжениc трансформатора, кВ	6 или 10					10 или 35	35		110
Вторичнос напряжснис, В	212—80	220—90	231—95	260—104	318—120	370—130	570—200	829—189	826—301
В том числс при постоянной мощности	—		231—182	260—201	—		570—410	829—675	826—673
Максимальный ток электрода, кА	2,18	4,2	7,9	14,4	17,5	23,5	55	80	
Диаметр, мм:									
графитового элсктрода	150	200		300	250	400	500	610	
распада элсктрода	450	520		850	1000	1150	—	1400	
Удсльный расход элсктроэнергии на расплавлснис твсрдой завалки, кВт · ч/т	500	480	490	480	435	420	410	400	396
Продолжительность расплавлсния под током, мин	45		60		55	84	60	55	85
Расход охлаждающей воды, $м^3/ч$	3	10	12	20	30	50	500	700	850
Масса металлоконструкции собственно печи, т	5	11	22	50	88	168	280	510	

Рабочее окно печи служит для наблюдения за ходом плавки и проведения необходимых операций — заправки порогов и стен после выпуска металла, скачивания шлака, измерения температуры, взятия проб и продувки металла кислородом. Проем окна обрамляют рамой с водоохлаждаемой аркой и закрывают водоохлаждаемой заслонкой с механизмом подъема.

Сливной носок предназначен для слива готового металла. Он состоит из «постели», крепящейся к кожуху печи, желоба и сменной насадки. При сифонном сливе металла вместо носка применяют желоб укороченной конструкции (рис. 60.26). Выпускное отверстие системы эксцентрического донного (эркерного) выпуска (рис. 60.27) образовано полыми кирпичными блоками, внутрь которых установлены сменные трубки. В нижней части выпускного отверстия предусмотрено наружное кольцо. Отверстие закрывается затвором, приводимым в движение пневмоцилиндром.

Устройства сифонного и эркерного выпусков имеют ряд преимуществ перед традиционным сливным носком, основными из которых являются: возможность слива металла в ковш практически без печного шлака; сокращение в 3—5 раз длительности операции слива металла; уменьшение длины струи металла при сливе и вследствие этого уменьшение его газонасыщенности; умень-

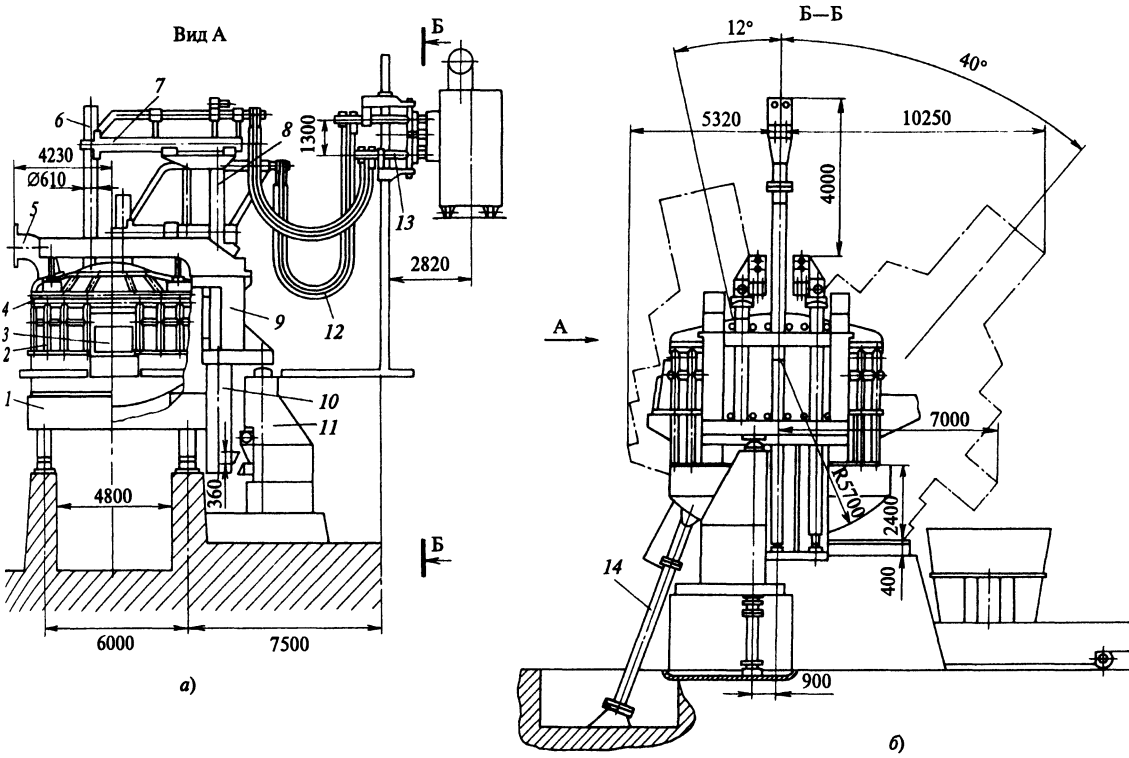


Рис. 60.24. Габаритные и установочные размеры электропечи ДСП-100И7:
1 — люлька *2* — кожух; *3* — рабочее окно; *4* — свод; *5* — газоотвод; *6* — электрод; *7* — электрододержатель; *8* — стойка электрододержателя; *9* — портал; *10* — шахта; *11* — механизм подъема и поворота свода; *12* — кабельная гирлянда; *13* — трубы моста расшихтовки; *14* — гидроцилиндры механизма наклона

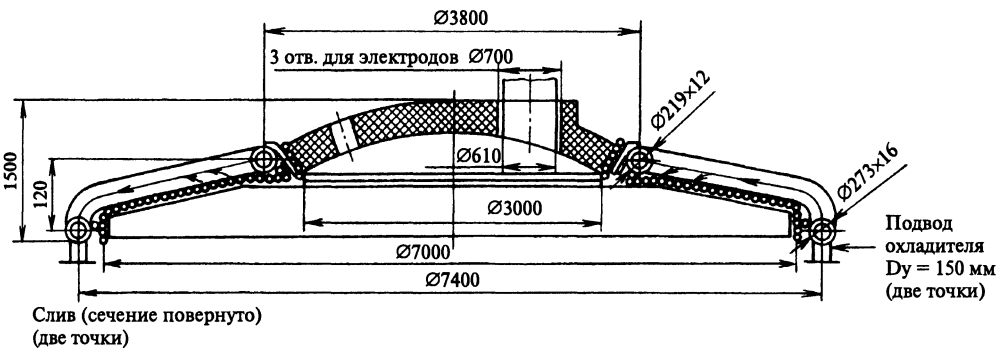


Рис. 60.25. Схема трубчатого водоохлаждаемого свода ДСП вместимостью 100 т

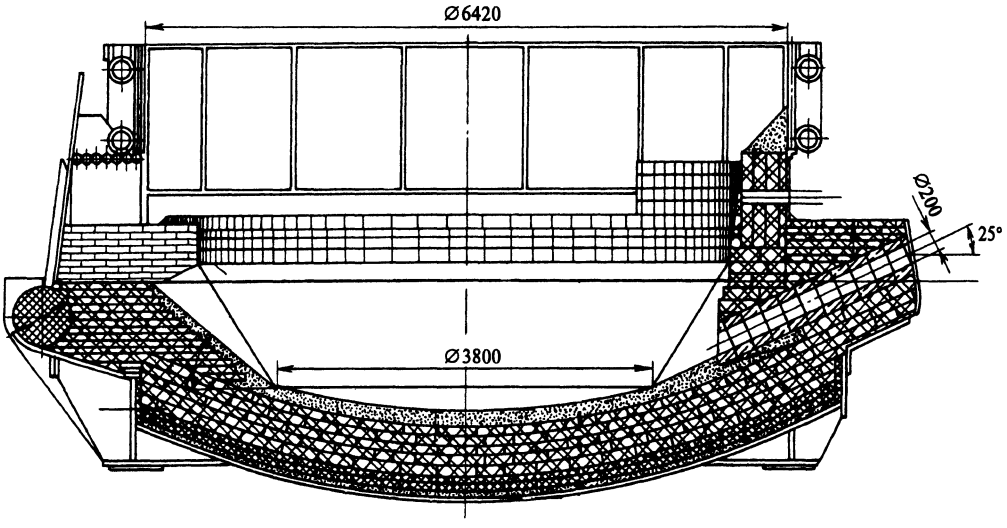


Рис. 60.26. Футеровка электропечи с сифонным сливом

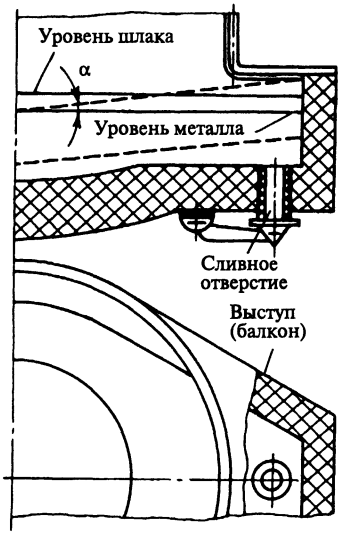


Рис. 60.27. Схема устройства эркерного слива металла

шение (до 12—15°) необходимого для слива металла угла наклона печи и упрощение благодаря этому ее конструкции.

Электрододержатель служит для удержания и перемещения электродов, а также для закрепления токоведущих труб токоподвода. Основная его часть — головка — чаще всего выполнена в виде медной плиты со сверленными каналами для прохода воды. Удержание электрода обеспечивается пружинно-пневматическим или пружинно-гидравлическим механизмом зажима. Головку электрододержателя крепят к несущему рукаву, перемещаемому приводом при регулировании мощности печи.

Механизм перемещения электродов обеспечивает подъем и опускание электродов как при ручном, так и при автоматическом регулировании мощности.

Привод перемещения может быть тросовым или реечным с противовесами (для электромеханического варианта), а также гидравлическим. Преимущества гидропривода — безынерционность, отсутствие запаздывания, возможность быстрого изменения скорости.

Механизм наклона используют для наклона ванны при сливе металла и шлака.

Механизм подъема и отведения свода (поворачивает свод для загрузки печи скрапом) наиболее часто монтируют на отдельном фундаменте.

Система водоохлаждения печи состоит из коллекторов, вентилей, труб, подводящих и отводящих воду от водоохлаждаемых элементов стен и свода, токопровода печи, заслонки и арки рабочего окна, патрубка газоотсоса и других элементов, а также из системы датчиков давления, температуры и расхода воды.

Футеровка ДСП — один из важнейших элементов конструкции. Футеровку можно выполнить или полностью керамической, или с применением водоохлаждаемых элементов стен и свода. Использование водоохлаждаемых элементов позволяет увеличить вводимую в печь мощность, значительно повысить стойкость футеровки, снизить затраты на проведение горячих и холодных ремонтов и как следствие повысить производительность печей.

Подина высокомощных крупных электропечей (см. рис. 60.26) состоит из нескольких рядов магне-

зитовых (печи с основной футеровкой) кирпичей, уложенных на плашку или ребро, и набивного слоя Ряды набирают в елочку или линию, начиная от центра печи к стенам Швы кладки не должны совпадать, для чего ряды кирпичей один по отношению к другому смещают на углы 45 и 60° Набивной слой — из магнезитового порошка

Подину печи с кислой футеровкой выкладывают динасовым кирпичом Набивка состоит из смеси кварцевого (70 %), молотого динаса (20 %) и огнеупорной глины (10 %) Связующим, как правило, является жидкое стекло

Стены печей Шлаковый пояс стен печей с основной футеровкой выкладывают изделиями из плавленого периклаза марки ППЛУ-95 или магнезитовых изделий, участки стен печи напротив электродуг — из периклазохромитовых изделий на основе плавленых материалов марки ПХПП или периклазоуглеродистых изделий марки ПУЭ, верхнюю часть футеровки стен (участок между шлаковым поясом и водоохлаждаемыми панелями) — из периклазоуглеродистых изделий марок ПХСП, ПХСУ или хромитопериклазовых изделий марки ХПТ Стены печей с кислой футеровкой выкладывают динасовым кирпичом

Кладку желоба выполняют из магнезитовых изделий, внутреннюю (рабочую) часть набивают массой из магнезитового порошка

Сталевыпускное отверстие сифонного типа выкладывают из периклазовых изделий марки ПЛК Уступы в основании отверстия заполняют густой массой, приготовленной из магнезитового порошка на жидком стекле плотностью 1,30—1,35 г/см^3

Своды печей с основной футеровкой, как правило, выполняют из магнезитохромитовых или периклазохромитовых изделий Центральную часть водоохлаждаемых сводов (см рис 60 25) выполняют из муллитокорундовых изделий марки МКС (МКТ) Кладку центральной части выполняют насухо или на растворе, состав которого должен соответствовать применяемым огнеупорам

Своды электропечей с кислой футеровкой выкладывают динасовым кирпичом Стойкость кирпичных сводов составляет 100—150 плавок

Набивные футеровки для стен широко применяют в печах с кислой футеровкой Такие футеровки имеют следующий состав, % (массовая доля) кварцевого песка 89, жидкого стекла 6, огнеупорной глины 3, едкого натра 2 Преимущество набивных футеровок — высокая стойкость, доходящая до 800 плавок, при некотором усложнении процесса футеровки

Водоохлаждаемые элементы стен и свода На отечественных электропечах применяют водоохлаждаемые панели, выполненные из труб, гнутых в спирали прямоугольной формы и уложенных одна в другую без переходников, что позволяет исключить сварные швы в зонах высокой теплонапряженности и упростить изготовление Внутренняя часть панелей (рабочая) снабжена штырями, приваренными к поверхности труб в шахматном порядке, для удержания теплозащитной обмазки и гарниссажа

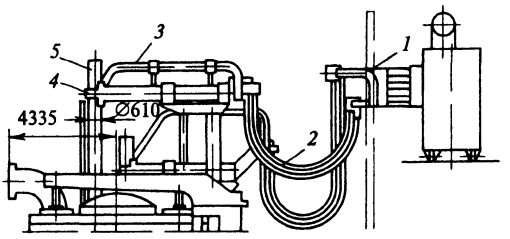


Рис. 60.28. Схема вторичного токопровода ДСП

Вторичный токопровод ДСП — совокупность проводников, соединяющих выводы низшего напряжения печного трансформатора с рабочей зоной электрической печи

Различают следующие элементы вторичного токопровода (рис 60 28) компенсаторы — гибкие ленты для соединения выводов низшего напряжения печного трансформатора с неподвижной частью короткой сети, шинный пакет *1* небольшой протяженности, как и компенсаторы, предназначен для передачи тока от компенсаторов к неподвижным башмакам, неподвижный башмак для соединения и передачи тока от проводников шинного пакета к гибким проводникам короткой сети, пакет гибких проводников *2* (кабелей без изоляции, гибких лент или водоохлаждаемых кабелей) для передачи тока от неподвижного башмака к подвижному, перемещающемуся совместно с электрододержателем, подвижный башмак для соединения и передачи тока от пакета гибких проводников к электрододержателю, проводники *3* и токопроводящие конструкции электрододержателя, головки *4* электрододержателей для передачи тока от электрододержателя к электроду, обеспечивающие возможность перепуска электрода (относительно конструкции электрододержателя), электроды *5*

Вместо токоведущих труб рукавов электрододержателей используют также токоведущие рукава, стальную несущую конструкцию которых «облицовывают» медными полосами, передающими ток от подвижных башмаков к головкам электрододержателей, или биметалл В этом случае упрощается конструкция токопровода, уменьшаются колебания рукавов из-за электродинамического взаимодействия проводников, снижается индуктивное сопротивление вторичного токопровода

Современные сверхмощные ДСП характеризуются использованием ряда дополнительных технических средств, способствующих повышению их

эффективности [60.7]. Например, одна из разрабатываемых ДСП вместимостью 125 т снабжена комплектом газокислородных горелок, расположенных в стенах, дверце рабочего окна и в зоне эркерного выпуска металла; комплектом сопел «острого» дутья для дожигания водорода и оксида углерода в рабочем объеме печи; манипулятором для вдувания в расплав кислорода и углеродистой пыли, фурмами для подачи в расплав углерода, оксида кальция и кислорода в целях перемешивания расплава и образования пенистого шлака; манипулятором для взятия проб металла и измерения температуры по ходу плавки.

Электропечь снабжена системой автоматизированного управления на базе микропроцессорной техники.

Предусмотрен пост внепечного подогрева шихты в бадье печными газами.

Система газоочистки электропечи состоит из реакторов для очистки отходящих газов от пыли и вредных и токсичных составляющих — диоксидов, фуранов, оксидов азота и т.д., что обеспечивает экологическую чистоту процесса электроплавки стали.

По требованию заказчика электропечь может быть оснащена системой донной продувки ванны кислородом и инертным газом.

Предусмотрены посты для подогрева разливочных ковшей до 1200 °С.

ДУГОВЫЕ ПЕЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В отличие от ДСП дуговые печи постоянного тока (ДППТ) обычно имеют один вертикально установленный графитовый электрод, который вводят в рабочее пространство через экономайзер, расположенный в центре свода.

Узел ввода электрода и дверца рабочего окна хорошо уплотняются, что позволяет почти полностью исключить подсос воздуха в рабочее пространство печи и выброс продуктов плавки в атмосферу цеха. Конструкция печи допускает работу с контролируемой нейтральной атмосферой.

Для подвода тока к шихте в подине печи устанавливают один или несколько водоохлаждаемых подовых электродов.

Подовый электрод является основным узлом ДППТ, который состоит из водоохлаждаемого медного корпуса и приваренной к нему стальной головки, контактирующей в процессе работы печи с расплавляемым металлом. Зона водяного охлаждения корпуса вынесена за пределы днища печи. При сварке головки и корпуса должен быть обеспечен плотный шов без трещин, пор, раковин и непроваренных зон. Для контроля за состоянием электрода предназначены термопары, установленные в медном корпусе.

Ресурс непрерывной работы таких электродов составляет 2,0—2,5 года и определяется сроком ремонта подины, осуществляемым при капитальных ремонтах печи.

Преимущества ДППТ по сравнению с ДСП следующие [60.8]:

снижен удельный расход электродов: в 4—5 раз при работе с обычной атмосферой и в 10—12 раз при нейтральной атмосфере;

повышен выход годного металла в результате снижения его угара на 3—4 %;

сокращены расходы ферросплавов (на 15—20 %) и шлакообразующих;

отсутствует местный перегрев футеровки и как следствие снижен расход огнеупорных материалов;

резко снижен угар легирующих элементов, внесенных в состав легированного металлолома;

снижены уровень шума на 15—20 дБ (по шкале А), пылегазовыбросы в 6—8 раз, а также затраты на системы воздухоочистки;

уменьшены помехи в питающей энергосистеме;

при необходимости источник электропитания может быть удален за пределы цеха.

На новых печах управление электрическим режимом осуществляется микропроцессорными устройствами. В ДППТ, используя низкоуглеродистый стальной лом и коксит в качестве карбюризатора, можно получать серый чугун для литья машиностроительных деталей. Разработаны процессы плавки в ДППТ алюминия и его сплавов. Дуговые печи постоянного тока позволяют плавить широкий сортамент черных и цветных металлов и сплавов и по сравнению с дуговыми печами переменного тока являются экологически более чистыми агрегатами (табл. 60.21).

АГРЕГАТЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Для доводки жидкого металла по температуре и химическому составу до требуемых параметров перед его разливкой в слитки или литые заготовки применяется внепечная обработка.

Основной целью обработки жидкой стали в агрегатах комплексной обработки стали (АКОС) является повышение качества металла. Однако, в связи с тем что возможен перенос многих технологических операций из сталеплавильной печи в АКОС, эти агрегаты применяют и в целях увеличения производительности плавильных печей. Наличие безокислительной атмосферы в АКОС создает предпосылки для уменьшения угара легирующих.

Цикл операций АКОС может реализовываться в той же последовательности, что и в ДСП, но с некоторыми дополнениями, которые дают конструктивные особенности агрегата.

Таблица 60.21. **Основные параметры серийно выпускаемых ДППТ**

Параметр	Вместимость печи, т				
	0,4	3	6	12	25
Выплавляемый металл	Алюминий		Сталь, чугун		
Мощность, МВт	0,725	2,8	4	8	16
Выпрямленное напряжение, В:					
U_1	460	640		800	
U_2	230	320		400	
Номинальный выпрямленный ток*, кА:					
$I_{ном1}$	1,6	6,25		10	20
$I_{ном2}$	3,2	12,5		20	40
Время расплавления, ч, не более	0,33			0,9	
Расход графитированных электродов, кг/т, не более	0,5		1,5		
Угар металла, %	0,5—3,0		1,0—3,0		1,0—2,5

* Выпрямленный ток на всех печах может быть увеличен на 25 % по отношению к его номинальному значению на время, не превышающее 1 ч за плавку.

Ниже приводится полный набор технологических операций, которые можно осуществить в АКОС.

1. Интенсивное перемешивание расплава, обеспечивающее хорошее усреднение химического состава и температуры. Известны, по крайней мере, три способа перемешивания:

электровихревое течение, создаваемое током, протекающим через расплав между электродами;

движение, создаваемое бегущим магнитным полем статора, расположенного снаружи ковша;

движение под действием струи аргона, вдуваемого в расплав сверху через фурму или через дно ковша.

Скорости движения, достигаемые перечисленными способами, составляют 0,2—0,6 м/с.

2. Десульфурация в АКОС проводится двумя способами. Первый — традиционный — сводится к удалению серы за счет ее перехода из металла в шлак через границу их раздела; он требует наводки специального основного шлака и длительного времени. Второй способ, применяющийся относительно недавно, — продувка металла мелкодисперсным порошком силикокальция или извести, вдуваемым в металл струей аргона через погружную фурму, благодаря чему реакция идет чрезвычайно быстро, а содержание серы может быть доведено до 0,005 %.

3. Удаление неметаллических включений достигается обработкой расплава шлаком. Частично это происходит за счет всплывания более легких примесей, частично за счет относительного перемешивания металла и шлака.

4. Дегазация расплава — один из наиболее эффективных способов улучшения свойств металла. При дегазации удаляют растворенные в металле газы: водород, азот и кислород. Наиболее простым способом дегазации является продувка аргоном снизу или сверху.

Значительно больший эффект дает вакуумирование металла — создание над расплавом разрежения, равного примерно 26—133 Па. После вакуумирования вполне достижимо содержание водорода 2—3 $см^3$ на 100 г стали, что гарантирует отсутствие флокенов — наиболее опасного и распространенного дефекта металла.

5. Легирование — операция, обязательная при производстве сложных марок стали, — заключается в добавке в сталь хрома, никеля, марганца, кремния, молибдена и многих других компонентов. Эту операцию выгодно проводить не в печи, а в АКОС, где отсутствует окислительная атмосфера и угар (окисление) некоторых дорогих легирующих элементов существенно больше. Активное перемешивание в АКОС ускоряет усвоение легирующих и улучшает равномерность их распределения.

6. Глубокое обезуглероживание проводят при выплавке марок стали с низким содержанием углерода. Операция эта заключается во вдувании в металл, находящийся под вакуумом, кислорода через специальную фурму.

7. Доводка по химическому составу предусматривает обеспечение точного содержания всех элементов, входящих в состав стали.

8. Раскисление металла преследует цель перевести кислород в более благоприятное состояние. Для этого в металл вводят такие элементы, как кремний, кальций, алюминий.

9. Нагрев металла в ковше — операция, без которой невозможно не только проведение всех перечисленных технологических приемов, но и их части. Высокая температура металла и шлака необходима для обеспечения его жидкотекучести, химической и физической активности, надежного запаса энтальпии. В то же время существенный перегрев может привести к снижению стойкости футеровки. Поэтому к АКОС предъявляется требование особо точного регулирования температуры. Если металл после обработки в АКОС разливают на машине непрерывной разливки, требования становятся еще более жесткими и точность поддержания температуры составляет 3—5 °С.

В зависимости от технологического назначения существуют различные конструктивные схемы АКОС (рис. 60.29).

Однопостовой агрегат (рис. 60.29, *а*) обеспечивает выполнение практически всех технологических операций, кроме вакуумирования. Преимуществом такой схемы является компактность и минимальная продолжительность пауз между операциями.

Однопостовой агрегат с размещением ковша внутри вакуумной камеры (рис. 60.29, *б*) обеспечивает возможность проведения вакуумирования с нагревом, однако для проведения прочих технологических операций необходимы шлюзы.

Двухпостовые агрегаты (рис. 60.29, *в*, *г*) отличаются от первого типа тем, что отдельные технологические операции (продувка металла порошкообразными реагентами через фурму, вакуумирование и т.п.) выносятся на самостоятельные, отдельно стоящие посты. Это (при определенных требованиях к получаемой стали) позволяет вести одновременную обработку двух тигель-ковшей, что повышает производительность и одновременно упрощает конструкцию как каждого поста, так и отдельных его элементов, а также облегчает эксплуатацию. Трехпостовой агрегат состоит из стендов нагрева, продувки и вакуумирования, что позволяет одновременно обрабатывать три ковша.

Разработаны однопостовые АКОС с массой обрабатываемой стали от 25 до 350 т. Компоновка агрегата АКОС-100 изображена на рис. 60.30.

Разработана серия двухпостовых агрегатов серии АКВОС (агрегат комплексной и вакуумной обработки стали), состоящих из стенда нагрева, полностью совпадающего по конструкции и функциям с АКОС, и стенда вакуумирования.

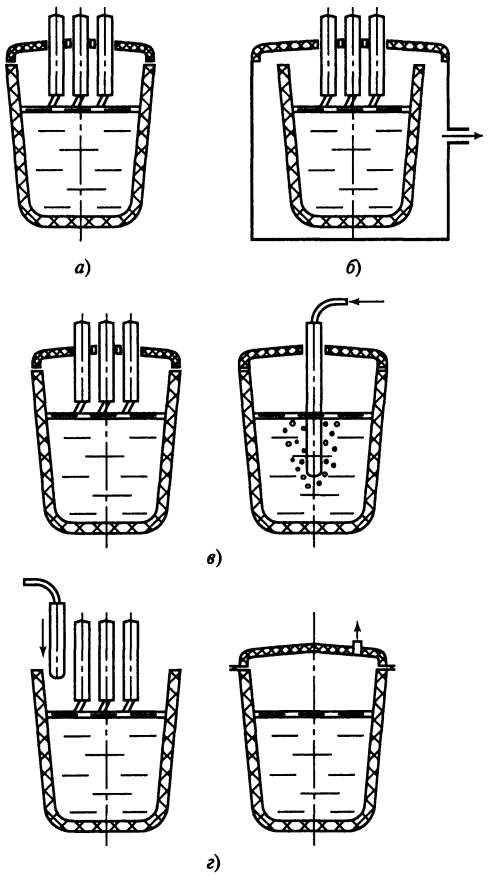


Рис. 60.29. Конструктивные схемы АКОС:
а — однопостовой агрегат; *б* — однопостовой вакуумный агрегат; *в* и *г* — двухпостовые агрегаты

Ведутся работы по созданию агрегатов на постоянном токе. Их преимущества аналогичны преимуществам ДППТ.

РУДОВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОПЕЧИ

По характеру протекающего в ванне рудовосстановительной печи (РВП) технологического процесса можно назвать три типа печей [60.9—60.11]:

1) РВП для бесшлаковых процессов (выплавка ферросилиция, карбида кальция, силикоалюминия, огнеупоров, кристаллического кремния и др.);

2) РВП для шлаковых процессов (выплавка силикомарганца, ферромарганца, феррохрома, рафинировочные процессы и др.);

3) РВП для многошлаковых процессов (производство штейнов, свинцовых шлаков, фосфора, ферроникеля и др.).

Технологический процесс плавки для этих типов печей отличается электрическим режимом, сте-

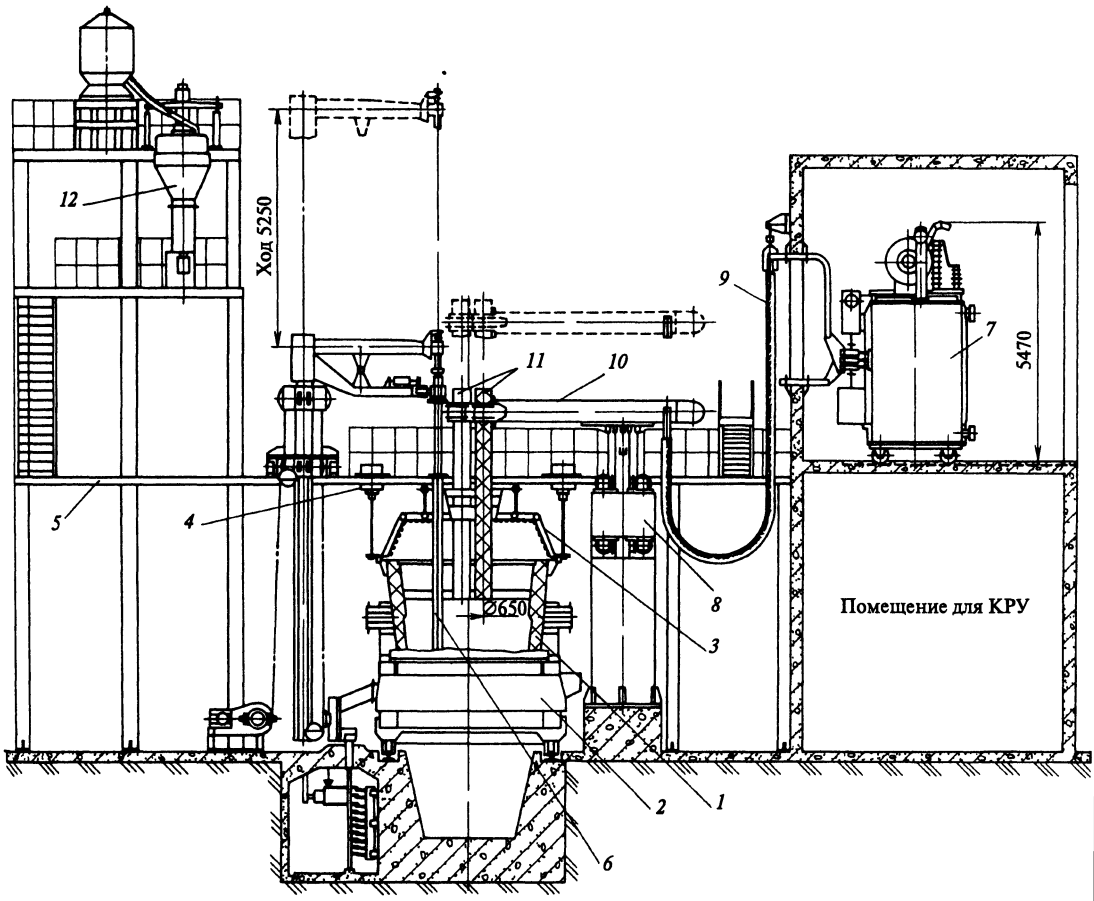


Рис. 60.30. Однопостовой агрегат комплексной обработки стали АКОС-100:

1 — тигель-ковш, *2* — сталевоз, *3* — крышка, *4* — механизм подъема крышки, *5* — рабочая площадка обслуживания, *6* — устройство для продувки металла порошкообразными раскислителями, *7* — трансформатор, *8* — механизм перемещения электрода, *9* — гибкие водоохлаждаемые кабели, *10* — рукава токоподвода, *11* — электроды, *12* — пневмонасосы

пенью стабильности, способами дозирования и корректировки шихты и приемами выпуска расплавов и шлаков

Большинство РВП работает с непрерывной подачей шихтовых материалов при периодическом выпуске расплава

Однако имеется группа процессов, осуществляемых с периодической загрузкой материалов, причем она делится на две подгруппы

1) с выпуском расплава через сливной желоб (производство рафинированного феррохрома, металлического марганца, титановых шлаков и др),

2) с выплавкой на «блок» (производство электрокорунда, плавленого магнезита и т д)

Современные мощные РВП предназначены для производства большой гаммы сплавов, и подавляющая часть процессов в них заключается в восстановлении оксидов карбонатов или сульфидов металлов или металлоидов восстановителем (углеродом, кремнием, алюминием и др) при высоких температурах (примерно 2000—3000 °С) Эти температуры достигаются за счет совместного действия теплопередачи излучением от закрытой дуги и теплопроводностью и конвекцией от выделяемой джоулевой теплоты в шихте, шлаке и печных газах

Руда, содержащая ведущий оксид, восстановитель и флюсообразующие материалы в различных соотношениях по массе, составляют шихту, которая непрерывно или периодически загружается в печную ванну

Показатели рудовосстановительных процессов иллюстрируются табл 60 22

Таблица 60.22. **Затраты энергии на 1 т сплава в РВП**

Наименование выплавляемого продукта	Рабочая температура процесса, °С	Удельный расход электроэнергии на продукт, кВт · ч/т
45 %-ный ферросилиций	2800	4600—5000
75 %-ный ферросилиций	3000	7800—8800
Силикомарганец	2500	4100—4700
Медно-никелевый штейн	1800	700—740
Ферроникель из окисленных никелевых руд	2000	2200—2400
Электрокорунд на блок	2500	2700—2900
Чугун	2500	1800—2200
Кремний кристаллический	3000	12 000—13 000
Ферромарганец углеродистый:		
при бесфлюсовом процессе	2000	2600—2800
при флюсовом процессе	2000	3700—3800
Металлический марганец	2200	2400—2500
Силикохром	2500	3300—3500
Силикокальций	3000	12 000—12 500
Безуглеродистый феррохром	2500	3300—3500
Ферровольфрам	3000	4000—4200
Феррованадий	2200	1500—1600
Карбид кальция	2500	2800—2900
Фосфор	2000	14 000—15 000
Карбид бора	2500	20 000—22 000
Карбид кремния	2000	8000—12 000

Наиболее распространенные технологические процессы в РВП протекают непрерывно при непрерывной загрузке шихты и периодических сливах готового сплава.

При этом электроды постоянно погружены в шихту (горит «закрытая» дуга) и перемещаются на незначительные расстояния вверх или вниз в зависимости от состояния печной ванны (значения приведенного активного сопротивления) под действием системы автоматического регулирования мощности или ручного управления электродвигателями перемещения электродов.

В процессе ведения технологического процесса расчетное соотношение по массе компонентов шихты корректируется в зависимости от влажности компонентов и состояния печной ванны (закварцевание, перекоксовка и т.д.).

Корректировка соотношения по массе компонентов производится путем изменения уставки дозаторов шихты.

При ведении технологического процесса особое внимание уделяется эксплуатации самообжигающихся электродов.

В закрытых печах помимо указанных параметров процесса и электрического режима технологический процесс контролируется по давлению под сводом печи, расходу и температуре печных газов. Кроме того, регулярно проверяется эффективность работы системы газоочистки и содержание пыли в атмосфере на выходе из печного цеха.

При ведении периодического процесса в РВП (рафинировочные процессы, плавка огнеупоров, титановых шлаков и др.) плавку ведут с полным проплавлением шихты. После очередного выпуска расплава наносятся защитные покрытия из сыпучих огнеупорных материалов со связующим на заметно выгоревшие участки боковых стен и подины, а затем производится загрузка следующей порции шихтовых материалов.

Электроды в процессах этого типа перемещаются более значительно за одну плавку в связи с тем, что периодический процесс характеризуется постоянно изменяющимся электрическим сопротивлением ванны по мере разогрева печи и шихтовых материалов (до их расплавления). Технологический процесс выплавки «блок-процессом» проводится аналогично вышеописанному рафинировочному. При этом расплав стекает на подину и затвердевает послойно под действием интенсивного охлаждения водой кожуха.

После наплавления полного объема («блока») ванна печи выкатывается в разделочное отделение, а ей на смену устанавливается новая подвижная ванна.

При производстве ферросплавов, ферроникеля, штейнов, корунда и др. образуются жидкие расплавы восстановленных элементов (железа, меди) и жидкие шлаки.

Имеется группа процессов восстановления металлов и элементов, которые из-за низких температур кипения удаляются из печи в газовой фазе вместе с оксидом углерода. К ним относятся фосфор, калий, натрий, цинк, кадмий, стронций, алюминий, кальций и др.

Для конструкции РВП характерно в большинстве случаев применение самообжигающихся электродов.

Применяются в зависимости от рабочей температуры процесса и химического состава парогазовой смеси открытые, укрытые, полузакрытые и закрытые электропечи.

В печах открытого типа загрузка шихтовых материалов осуществляется через отдельные труботечки, расположенные над колошником печи, или с помощью машины, непрерывно перемещающейся вокруг печи по рельсам и подающей шихту порциями в разные зоны колошника.

Конструкция электрододержателя и вторичного токоподвода открытой печи выполнена таким образом, чтобы их элементы не подвергались открытому излучению или воздействию горячих газов.

Печи открытого типа снабжены вытяжным зонтом, расположенным над колошником на расстоянии 3—5 м и имеющим развитую боковую поверхность, нижняя часть которой экранами защищает эксплуатационный персонал от теплового воздействия колошника и парогазовой смеси над ним, а также уменьшает объем смешивающегося с печными газами воздуха.

В печах открытого типа выплавляют марки ферросилиция с высоким содержанием кремния и кристаллический (металлический) кремний. Существенное развитие имеют и печи «укрытого типа», в которых зонт становится элементом конструкции, снабжен водоохлаждаемыми полостями и элементами, поверхность которых защищена жаропрочным бетоном или специальными составами огнеупорных обмазок.

Наиболее распространены печи полузакрытого типа в которых загрузка шихтовых материалов осуществляется через кольцевые отверстия в своде печи вокруг электродов, образуемые загрузочными воронками. Конструкция элементов печи полузакрытого типа, расположенных над сводом, учитывает тепловое воздействие части парогазовой смеси (до 30 %), выделяющейся помимо системы газоочистки, через кольцевые зазоры внутри загрузочных воронок. Печи этого типа также оборудованы вытяжными зонтами, но эти зонты рассчитаны на пропускание 30 % печных газов и менее.

В печах полузакрытого типа выплавляют марки ферросилиция с низким содержанием кремния, силикомарганец, ферромарганец, феррохром углеродистый и силикохром, карбид кальция, силикоалюминий, медный и медно-никелевый штейны и ферроникель. В печах цветной металлургии для производства штейнов шихтовые материалы загружаются под свод труботечками, а зазор вокруг электродов остается открытым.

Печи закрытого типа отличаются наличием уплотнений зазора электрод—свод. Загрузка шихтовых материалов в закрытых печах производится через загрузочные труботечки, проходящие под свод. Уплотнения позволяют поддерживать подсводовое давление на уровне (300—500 Па). В закрытых печах электрододержатель выполняется максимально компактным в зоне прохода через свод, а контактные плиты опущены под свод.

К особенностям закрытых печей следует отнести повышенные требования к качеству шихтовых материалов и ведению технологического процесса, так как многие нарушения процесса могут вызвать аварийные ситуации.

Принципиальные конструктивные схемы РВП иллюстрируются рис. 60.31 и 60.32. Большинство конструкций электропечей работает с непрерывной загрузкой шихты и выполняется по типу рис. 60.31, в отдельных случаях при необходимости периодической загрузки шихтовых материалов и полного выпуска расплава или наплавления «на блок» применяются печи по типу, данному на рис. 60.32.

Как видно из рис. 60.31, электрододержатель *3* обеспечивает частичное удержание и формирование электрода, а также передачу электрической энергии к электроду.

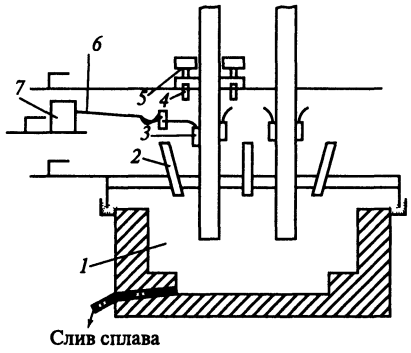


Рис. 60.31. Принципиальная конструктивная схема рудовосстановительной электропечи непрерывного действия:

1 — печная ванна; *2* — загрузочные труботечки; *3* — электрододержатель; *4* — механизм перемещения электродов; *5* — механизм перепуска электродов; *6* — короткая сеть; *7* — печной трансформатор

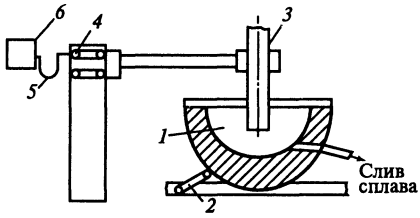


Рис. 60.32. Принципиальная конструктивная схема рудовосстановительной электропечи периодического действия:

1 — печная ванна; *2* — механизм наклона ванны; *3* — электрод; *4* — механизм перемещения электродов; *5* — короткая сеть; *6* — печной трансформатор

Прижим плит осуществляется дистанционно с помощью сильфонных компенсаторов, на которые воздействует рабочее вещество (химически очищенная вода или воздух) под давлением 60—100 Па При этом имеется возможность плавного регулирования усилия прижима и отжима контактных плит путем изменения давления

Механизмы перемещения *4* и перепуска *5* электродов обеспечивают полное их удержание, перемещение вверх и вниз, а также компенсацию износа («угара») рабочего конца Эти механизмы расположены вокруг вертикальной оси электродной «свечи» на наиболее высоко размещенных перекрытиях цеха Эта особенность конструкции определяет исполнение и конструктивные решения токоподвода *6* и выводов печного трансформатора *7*

Для РВП периодического действия (см рис 60 32) чаще применяются печи открытого или «укрытого» типа, и для них характерно приближение типа конструкции к конструктивным решениям ДСП

Ванна печи *1* этого типа также может вращаться, но обязательно выполняется наклоняющейся с помощью механизма наклона *2* для периодического выпуска (слива) готового расплава

Общая длина электрода *3* намного меньше, чем в печах непрерывного действия Привод перемещения электродов *4* выполнен на отдельной стойке Особенностью токоподвода *5* (короткая сеть) является значительно бóльшая длина гибкой части (из-за наклона ванны) Соединение гибкой части с трансформатором *6* осуществляется водоохлаждаемыми медными трубами

Рассмотрим более подробно конструкцию элементов РВП на примере современных электропечей для производства желтого фосфора, выплавки силикомарганца и ферросилиция, а также производства малоуглеродистого ферромарганца

Рудовосстановительные электропечи для производства желтого фосфора из-за токсичности и ядовитости парогазовых смесей, скапливающихся в подсводном пространстве, выполнены герметизированными (рис 60 33) Конструкция уплотнений позволяет поддерживать давление под сводом, равное 300—500 Па

Футеровка печи *1* — комбинированная верхняя часть выложена шамотным кирпичом, а нижняя — углеродистыми блоками Она предназначена для обеспечения процесса протекания углетермических восстановительных реакций образования и доведения до конечного физико-химического состава шлака и феррофосфора

Кожух печи *2* выполнен из низколегированной толстолистовой стали и снаружи постоянно орошается водой Кожух имеет цилиндрическую форму и снабжен вертикальными и горизонтальными ребрами жесткости Основное назначение кожуха печи — восприятие механических нагрузок, развивающихся при тепловом расширении футеровки и от действия веса свода и других конструктивных элементов

Для герметизации подсводового пространства печи применены свод *11* из жаропрочного бетона и крышка *3* над сводом, изготовленная из немагнитной стали Уплотнение зазора между кожухом головки электрододержателя *6* и сводом осуществлено с помощью сухих асбографитовых сальниковых уплотнений *5* Благодаря специальной «капсулированной» (герметизированной) головке электрододержателя и установке сухого сальника конструкция обеспечивает герметизацию ванны

Токоподвод выполнен из трубчатых сбифилированных пакетов *10* и гибких медных лент *9*, подсоединенных к электродам С противоположной стороны он по отдельным фазам смонтирован на выводах низкого напряжения однофазных печных трансформаторов, установленных выше рабочей площадки печи

Электрододержатель *6* перемещается в вертикальном направлении гидроподъемником *7* с реечным синхронизатором Механизм перепуска электродов *8* — дистанционный, пружинно-гидравлический

Печь снабжена двумя шлаковыми *13* и двумя феррофосфорными летками Загрузка шихты осуществляется через 10 трубочек, расположенных вокруг электродов и в центре печи

Для электрической изоляции крышки печи и электрододержателей применены специальные термоупорные материалы в многослойном исполнении (электронит, термоупорный миканит, асбест на жидком стекле)

Закрытые электропечи, например для выплавки силикомарганца, отличаются по конструкции от фосфорной печи отсутствием металлической крышки и другим исполнением свода Сальниковое же уплотнение принципиально выполнено аналогично, но имеет более простую конструкцию (отсутствует регулировка уплотнения)

В «укрытой» печи для выплавки кристаллического кремния применены угольные электроды, проходящие внутри закрытого (капсулированного) электрододержателя Над ванной расположен водоохлаждаемый зонт, а зазор между рабочей площадкой и зонтом перекрыт перемещающимися вверх и вниз водоохлаждаемыми шторками Токоподвод проходит от высоко расположенного печного трансформатора к верхней части электрододержателя Подобная конструкция позволяет улучшить условия труда и увеличить срок службы конструктивных элементов даже для высокотемпера-

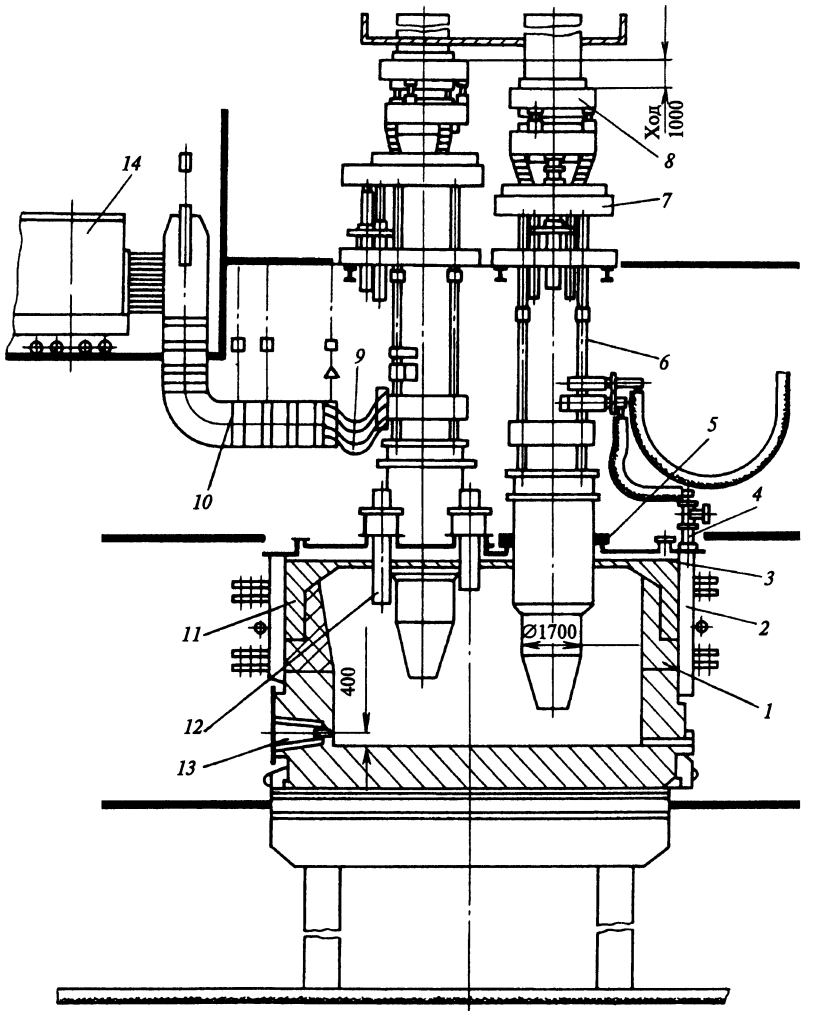


Рис. 60.33. Рудовосстановительная печь для производства желтого фосфора:

1 — футеровка; *2* — кожух; *3* — крышка; *4* — система водоохлаждения; *5* — сальниковые уплотнения; *6* — электрододержатель; *7* — гидроподъемник; *8* — механизм перемещения перепуска электродов; *9* — гибкий токоподвод; *10* — шинный пакет; *11* — свод; *12* — загрузочная труботечка; *13* — шлаковая летка; *14* — печной трансформатор

турных процессов с температурой газов над колошником в среднем 1000—1200 °С. Кроме того, применение зонта позволяет утилизировать вторичную энергию печных газов.

Печи полузакрытого типа оборудованы водоохлаждаемым металлическим или железобетонным сводом с песочным затвором, выполненным на кожухе ванны.

Кольцевой зазор между сводом и электродами образован загрузочными воронками, формирующими колошник и подсводное пространство. Шихтовые материалы поступают в загрузочные воронки через труботечки.

Токоподвод служит для передачи электрической энергии от сети в печную ванну. Токоподвод выполняют из бронзовых или медных трубошин, водоохлаждаемых медных труб, гибких кабелей типа МГЭ-650 или МГЭ-1000, обеспечивающих рабочий ход электрода, контактных башмаков (подвижного и неподвижного) и щек, а также медных компенсаторов. Для изготовления контактных щек рекомендуется электролитическая медь М1 или хромистая бронза БРХ-1. Для РВП малой мощности (до 16,5 МВ · А) возможно применение алюминиевых шин и труб.

Для снижения индуктивных потерь шинный пакет выполняют бифиллярным с чередованием шин разной полярности.

Для печей мощностью до 22,5 МВ · А применяют шины прямоугольного сечения размером до 400×12 мм. Для печей большой мощности применяют водоохлаждаемые трубы диаметром 60×10 мм. Допустимая плотность тока для шин 1,1—1,2 А/мм^2, для труб 3,5—4,5 А/мм^2. Расстояние между отдельными шинами (трубами) в свету должно быть не менее 12 мм. Жесткость шинного пакета обеспечивают стальными стяжками. В местах зажима между шинами ставят изоляционные прокладки.

Для гибкой части токоподвода применяют гибкие кабели. Для этих кабелей допустимую плотность тока в зависимости от температуры окружающей среды принимают 1,2—1,5 А/мм^2.

ВАКУУМНЫЕ ДУГОВЫЕ ПЕЧИ

Вакуумные дуговые печи (ВДП) предназначены для производства слитков и фасонных отливок из высокореакционных металлов (титана, циркония, молибдена, ниобия, тантала, вольфрама и др.), а также из специальных сталей и жаропрочных сплавов [60.12]. В связи с этим плавка в ВДП осуществляется либо в кристаллизаторе (рис. 60.34), либо в гарниссаже.

Вакуумная дуговая печь для выплавки слитков как металлургический агрегат позволяет при расплавлении и затвердевании осуществлять ряд физико-химических процессов, определяющих качество конечного продукта, а именно:

удалять летучие примеси путем испарения; газы, находящиеся в свободном и растворенном состоянии; химически связанные газы переводом их в газообразное состояние; неметаллические включения;

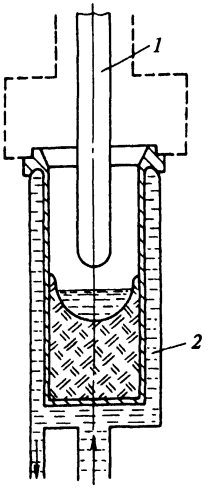


Рис. 60.34. Схема ВДП с кристаллизатором:
1 — электрод; *2* — водоохлаждаемый кристаллизатор

растворять лигатуры, которые обычно вводят в электрод или в ванну из дозатора;

формировать кристаллическую структуру слитка в условиях повышенного температурного градиента перед фронтом кристаллизации.

В вакуумной дуговой гарниссажной печи для получения фасонных отливок металл рафинируется в таких же условиях, как и при выплавке слитка. Лигатуры растворяются в еще более благоприятных условиях.

В ВДП для плавки в кристаллизаторе (табл. 60.23) процессы плавления и затвердевания осуществляются одновременно (рис. 60.34). По мере расплавления расходуемого электрода жидкий металл перетекает в водоохлаждаемый кристаллизатор, где и застывает в виде слитка. Возможно применение и нерасходуемого электрода, но тогда шихту засыпают в кристаллизатор постепенно.

В качестве расходуемого (переплавляемого) электрода используют штанги круглого и квадратного сечения. Стальные электроды изготавливают из сортового проката; титановые электроды первого переплава прессуют из губки; электроды из тугоплавких металлов собирают или сваривают из прессованных и спеченных штабиков. Слитки можно подвергать нескольким переплавам, и тогда слиток предыдущего переплава становится электродом последующего.

Печи с кристаллизатором можно классифицировать по способу загрузки электрода и выгрузки слитка.

Печь с отъемным поддоном и стационарно закрепленным кристаллизатором. Загрузку электрода и выгрузку слитка осуществляют, опуская поддон и выкатывая его затем из-под печи. Недостаток печей этого типа — большая высота и трудности при эксплуатации.

Печь с отъемным кристаллизатором. Загрузку электрода и выгрузку слитка осуществляют посредством опускания кристаллизатора и перемещения его из-под печи в зону обслуживания краном. При такой схеме можно использовать два кристаллизатора, работающих поочередно, и чистить их на специальном стенде, сокращая продолжительность цикла. Недостатки печей этого типа — трудности, связанные с подводом воды для охлаждения.

Печь со стационарным кристаллизатором и съемной вакуумной камерой. Перед загрузкой электрода вакуумная камера поднимается и отводится в сторону специальным механизмом или цеховым краном. Слиток удаляется вместе с гильзой и поддоном. Высота печи этого типа наименьшая, однако размеры в плане несколько увеличены.

В нашей стране наибольшее распространение получили печи с отъемным кристаллизатором (рис. 60.35). Печи нового поколения выполнены

Таблица 60.23. **Технические данные ВДП для плавки в кристаллизаторе различных металлов**

Параметр	ДМВ-5-Г3,6	ДСВ-3,2-Г1	ДСВ-4,5-Г2	ДСВ-6,3-Г6	ДСВ-8-Г10	ДСВ-8-Г16	ДСВ-11,2-Г37	ДТВ-8, 7-Г10	
								1-й переплав	2-й переплав
	Расплавляемый мсталл								
	Медь	Сталь						Титан	
Диаметр кристаллизатора, мм	320, 420, 520, 600	160, 200, 250, 320	160, 250, 320, 400, 450	320, 400, 500, 630	500, 600, 700, 800	560, 630, 710, 820	630, 800, 1000, 1120, 1350	450, 560, 650, 770	560, 650, 770, 870
Длина слитка, мм	1450	1750	1800	2700	4200		4300—5200	2640, 2780, 2810, 2890	3500, 4000
Максимальные* размеры электрода, мм:									
диаметр	490	220	360	510	700	650	1100	360, 450, 550, 600	440, 548, 636, 754
длина	2300	3550	2750	4550	3350	6000	7600	5100, 5450, 5500	5100, 5400, 5600
Масса слитка, т	3,5	1,1	2,0	6,3	10	16	60	1,92; 2,9; 4,2; 5,3	3,62; 5,06; 8,05 10,3
Максимальный ток, кА	25	12,5		25			37,5	25	37,5
Давление в холодной печи, Па	0,133	0,06						2,66	
Расход охлаждающей воды, $м^3/ч$	70	40	50	70	50	90	120	80	
Габаритные размеры, мм:									
общая высота	9320	12 950	12 000	13 900	11 650	19 100	23 900	20 940	
заглубление	950	4200	—	5250	1950	9000	10 500	7800	
в плане	7480×7340	4935×7310	9650×7000	6840×7960	8200×7000	9000×8200	5595×15 900	9415×5310	
Масса печи, т	—	23	50	29	80	55	135	140	

Окончание табл. 60 23

Параметр	ДТВ-10-Г10		ДДВ-1,4-В01	ДДВ-2,5-В06	ДКВ-3,2-КГ0,6	ДКВ-4,5-Г2,5	ДРВ-0,3-Г		
	1-й переплав	2-й переплав	1-й и 2-й переплавы						
	Расплавляемый металл								
	Титан		Молибден		Цирконий		Вольфрам	Молибден	Ниобий
Диаметр кристаллизатора, мм	450,560, 575, 650, 870	575, 670, 770, 1000	60, 80, 100, 125, 140	100, 140, 160, 200, 220, 250	250, 320	280, 360, 450	160, 200, 250		
Длина слитка, мм	1750, 2050, 2100, 2400, 2700, 2890	1800, 3000, 3400, 4000	420	685, 700, 730, 730, 730, 835	1200	1600, 2000, 2450	450, 800	900	
Максимальные* размеры электрода, мм:									
диаметр	360, 450, 550, 700	440, 548, 636, 856	90	100, 140, 160	196, 245	230, 250, 350	80, 130	115, 130, 460	110, 140, 180
длина	3460, 4000, 4100,4300, 4700, 4850, 5100	4100, 4650, 4700, 5300, 5600, 6000, 5100	1000	600, 1715, 1715	1900, 1960	2100, 4000	2450		
Масса слитка, т	1,2; 2,17; 2,54; 2,84; 3,93; 42; 53	3,35; 3,6; 5,15; 6,05; 8,05; 10	0,11	0,09; 0,175, 0,23; 0,41, 0,57	0,37; 0,60	0,63; 1,25; 2,5	0,166; 0,295	0,156; 0,256, 0,385	0,129; 0,199, 0,380
Максимальный ток, кА	25	37,5	12,5		25				
Давление в холодной печи, Па	1,33		0,0013	0,0065	0,133		0,665		
Расход охлаждающей воды, $м^3/ч$	80		60	40	70	80	190		
Габаритные размеры, мм:									
общая высота	21 294		3400	3750	13 865	14 100	10 000		
заглубление	7800		—	—	3700	3000	2000		
в плане	9415×5310	11 230×7200	3950×3000	8090×3860	7100×4820	6000×10 800	7000×5000		
Масса печи, т	213,4		7	20	65,1	135	32		

* Для слитка соответствующей длины и массы.

Примечание. Напряжение электропитания 75 В

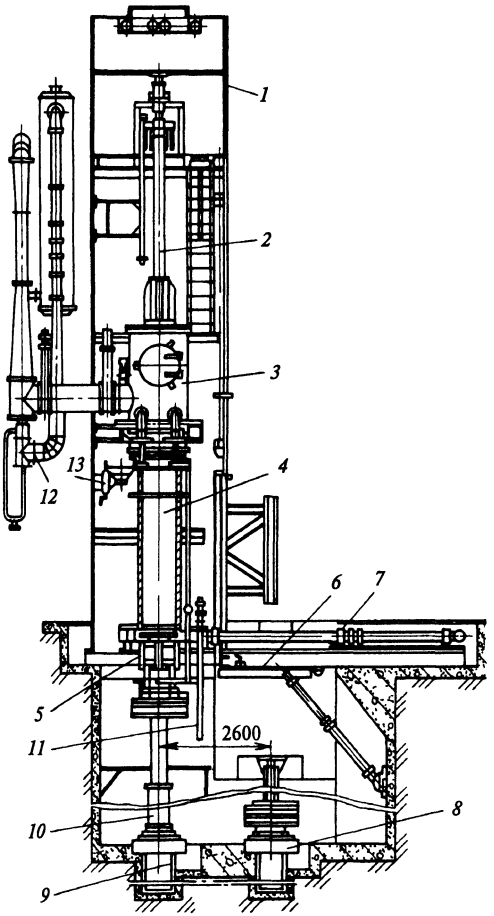


Рис. 60.35. Общий вид дуговой вакуумной печи типа ДТВ-8,7-Г10:

1 — защитный кожух; *2* — шток электрододержателя; *3* — вакуумная камера, *4* — кристаллизатор, *5* — поддон, *6* — дверца; *7* — механизм отката кристаллизатора (тележка), *8* — разгрузочный стол; *9* — гидравлический плунжер; *10* — механизм перемещения кристаллизатора, *11* — система охлаждения; *12* — пароэжекторный вакуумный насос; *13* — механизм для сбора возгонов

как по этой схеме, так и по схеме со стационарным кристаллизатором.

Вакуумные дуговые печи для плавки в гарниссаже (табл. 60.24) отличаются от ВДП для плавки в кристаллизаторе тем, что процессы плавления и затвердевания металла в гарниссажных печах происходят не одновременно. После расплавления металла в тигле расплав сливают из тигля в форму, благодаря чему можно получить изделие сложной конфигурации. Расплав в тигле в течение всей плавки изолирован от стенок тигля слоем гарниссажа, либо образованным в процессе плавления,

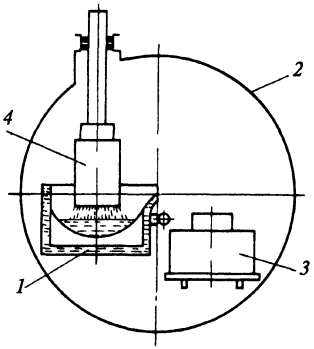


Рис. 60.36. Схема гарниссажной ВДП:

1 — тигель, *2* — корпус печи, *3* — форма, *4* — электрод

либо оставшимся в тигле после слива предыдущего расплава. Основные требования к гарниссажной печи — получение в необходимом количестве достаточно горячего металла и быстрая заливка его в форму при отсутствии заметного перехода его в гарниссаж. Это вынуждает проводить процесс плавления с большой скоростью при высокой удельной мощности дуги.

Жидкая ванна образуется при плавке как с расходуемым электродом, так и с нерасходуемым (рис. 60.36). В последнем случае переплавляемый металл подают в зону плавления в виде кусков или порошка.

Гарниссажные печи применяют также для получения слитков

В зависимости от способа разливки металла печи можно подразделить на две группы печи с разливкой при горящей дуге и печи с разливкой после разрыва дуги.

В печи с разливкой при горящей дуге расплав подогревают во время разливки. Эксплуатируют несколько разновидностей печей этой группы·

с механизмом перемещения электрода, закрепленным на тигле внутри вакуумной камеры и наклоняемым вместе с тиглем;

со сливом металла в стационарную или вращающуюся форму,

с тиглем и электродом, закрепленными внутри камеры, и механизмом перемещения, расположенным снаружи; форму устанавливают в отдельной камере, соединенной с плавильной цапфой, через которую проходит разливочный желоб; разливка осуществляется при наклоне плавильной камеры вместе с тиглем и электродом относительно цапфы;

с тиглем, поворачивающимся таким образом, что сливное отверстие, находящееся в процессе плавки выше уровня расплава, перемещается вниз, оказываясь под ванной Электрод при этом остается в прежнем положении (дуга продолжает

Таблица 60.24. **Технические данные ВДП для плавки в гарниссаже различных металлов**

Парамстр	ДТВГ-0,06ПЦ	ДТВГ-0,16ПФ	ДТВГ-0,25ПФ	ДТВГ-0,6ПЦ	ДТВГ-2,0ПЦ	ДРВГ-0,025ПЦ	ДХВГ-0,25ПЦ
	Расплавлясмый мсталл						
	Титан					Вольфрам	Тантал
Вмсстимость плавильной ванны, кг	25—100	160	250	600	1000×2	25	250
Ток (постоянный), кА	12,5	14	25	37,5	37,5	12,5	75
Напряжснис, В	28—32	28—33	38—40	75	75	75	75
Остаточное давлснис, Па	0,65	1,33	0,65	0,65	0,666	0,133	0,665
Максимальныс размсры элсктрода, м:							
длина	0,5	0,5	0,485	1,0	1,65	1,0	1,5
диамстр	0,2	0,3	0,465	0,62	0,56	0,28	0,18
Максимальныс размсры формы, м:							
длина (диамстр)	0,8	0,8	1,0	1,85	2,8	1,5	1,5
ширина	—	0,6	0,8	—	—	—	—
высота	0,5	0,5	1,2	1,6	6	1,0	0,9
Частота вращсния формы, об/мин	150—650	—	—	250	250—400	300—600	800
Вмсстимость бункера, $м^3$	—	0,6	0,55	—	—	0,1	0,1
Скорость плавки, кг/мин	5—8	6—8	10—15	10—20	40	3—5	4
Длитсльность цикла, ч	3—2	5,5	6,5	7	5,5	4	4
Расход охлаждающсй воды, $м^3$/ч	25	38	45	70	150	47	125
Масса псчи, т	17,6	36,6	42	61	400	15	60

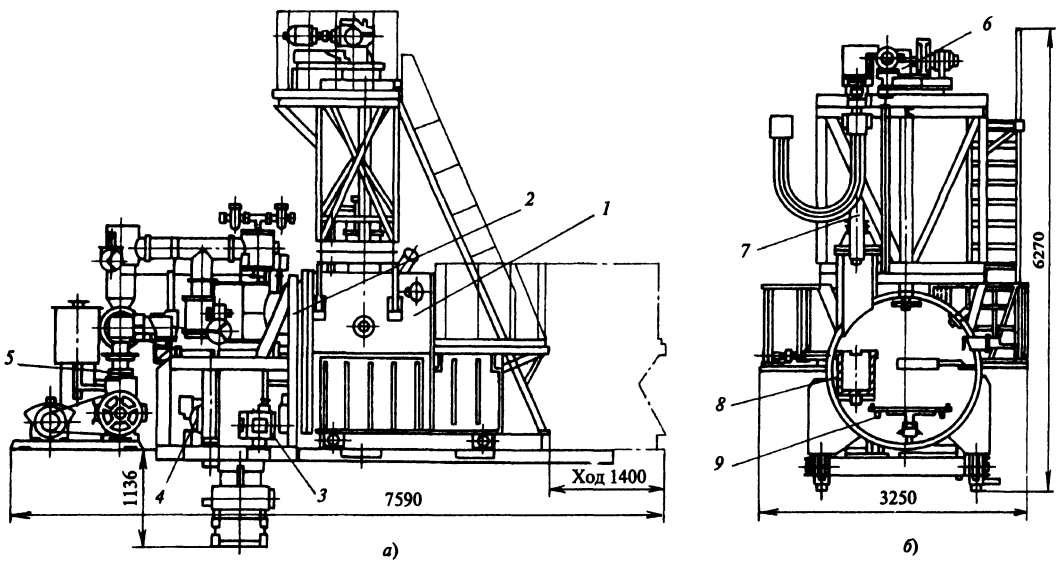


Рис. 60.37. Гарниссажная ВДП с откатывающейся камерой модели ОКБ-956:

1 — камсра; *2* — крышка; *3* — элсктродвигатсль цснтробсжного стола; *4* — привод наклона тигля; *5* — вакуумная систсма; *6* — привод пересмсщения штока; *7* — шток; *8* — тигсль; *9* — цснтробсжный стол

гореть). Металл поступает в форму, располагаемую под тиглем.

Печи с разливкой после разрыва дуги имеют механизм перемещения, расположенный за пределами вакуумной камеры (рис. 60.37). По окончании плавления дугу выключают, электрод быстро поднимают и осуществляют слив металла. Недостаток схемы — потеря времени на подъем электрода и наклон тигля с открытым зеркалом, что может вызвать охлаждение металла.

Вакуумные дуговые печи, несмотря на отсутствие футеровки, имеют достаточно большой КПД, что объясняется высокой концентрацией мощности в дуговом промежутке, передаваемой непосредственно электроду и жидкой ванне и таким образом используемой на плавление и перегрев металла.

Тепловой КПД составляет 20—50 % и зависит от распределения мощности дуги между катодом и анодом. При плавке тугоплавких металлов (молибдена, ниобия, вольфрама и др.) КПД более низкий, чем КПД при плавке легкоплавких металлов (стали, титана), а доля тепловых потерь выше.

Электрический КПД высок и составляет 85—90 %, так как печи работают на постоянном токе, а активные и индуктивные потери малы.

Расход электроэнергии при плавке различных металлов различен и зависит в основном от температуры плавления, для меди он составляет 1500, а для вольфрама — 10 000 кВт · ч/т.

Рассмотрим основные элементы конструкции ВДП.

Кристаллизатор является наиболее напряженным в отношении тепловых воздействий узлом печи и состоит из внутренней гильзы *1* и наружного кожуха *2*, между которыми имеется полость для протока охлаждающей воды (рис. 60.38). Гильзу изготавливают из меди или хромистой бронзы — материалов с высокой теплопроводностью.

При плавке металлов с температурой плавления до 2000 °С толщина стенки гильзы составляет 35—40 мм, при плавке более тугоплавких металлов 10—20 мм. Толщина поддонов *3*, которые также предпочтительно делать из хромистой бронзы, составляет соответственно 60—150 и 20—30 мм. Наружную рубашку кристаллизатора изготавливают обычно из немагнитной стали.

Шток-электрододержатель (рис. 60.39) предназначен для закрепления и перемещения электрода и подвода к нему тока. Шток состоит из коаксиально расположенных труб — наружной стальной *1* и внутренней токоведущей *2*, изготавливаемой из меди. Шток охлаждается водой. Внутри штока размещают ходовой винт *3*, при вращении которого происходит вертикальное перемещение штока. В сталеплавильных печах применяют цепную подвеску штока. На нижнем конце штока предусмотрен хвостовик, используемый для крепления электрода с помощью резьбы или специального цангового зажима.

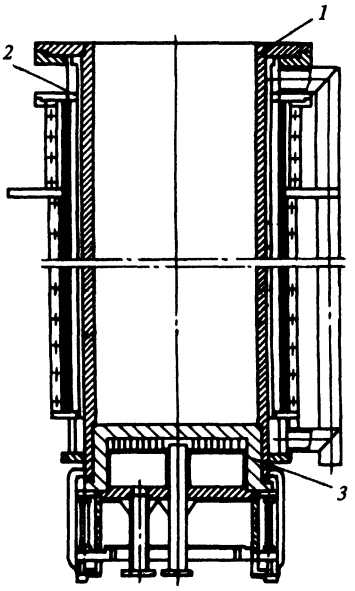


Рис. 60.38. Кристаллизатор

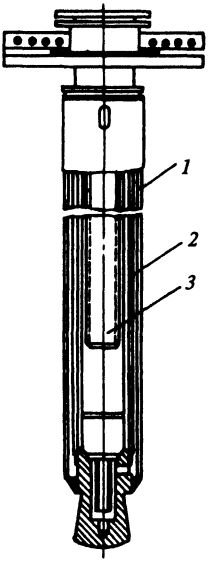


Рис. 60.39. Шток-электрододержатель

Привод перемещения штока обеспечивает как рабочие (несколько миллиметров в минуту), так и маршевые (около 1 м/мин) скорости для быстрой ликвидации коротких замыканий и выполнения сборочных операций.

Вакуумная камера представляет собой водоохлаждаемый герметичный сосуд, к нижнему фланцу

которого присоединяется фланец кристаллизатора, а к верхней крышке — уплотнение штока На верхней крышке расположены два-три смотровых окна оптических наблюдательных приборов Для чистки камеры предусмотрены люки, для присоединения вакуумной системы — патрубок

Соленоид предназначен для создания аксиального магнитного поля в целях стабилизации дуги и перемешивания расплава и представляет собой катушку, намотанную из изолированного медного провода в несколько слоев Ток соленоида выбирают таким, чтобы напряжение на соленоиде в целях безопасности было минимально возможным Питание соленоида осуществляют от полупроводниковых выпрямителей с возможностью переключения полярности

Вторичный токоподвод печи состоит из шин и участка гибких кабелей, позволяющих перемещать шток Их сечение рассчитывают по существующим нормам для постоянного тока Гибкий участок токоподвода, охлаждаемый водой, изготавливают из кабелей типов МГТ и КВС, допускающих плотность тока соответственно 2—3 и 5—7 А/мм^2 Токоподводы располагают как можно дальше от зоны плавления в целях снижения напряженности магнитного поля в зоне плавки Токоподвод к кристаллизатору осуществляют через вакуумную камеру

Вакуумная система должна обеспечивать откачку выделяющихся газов и поддерживать заданное остаточное давление, которое зависит от расплавляемого металла

	Остаточное давление, Па
Для стали	1—7
Для титана	0,5—13
Для циркония	0,01—0,07
Для молибдена, ниобия, тантала и вольфрама	0,13—0,65

Соответственно давлению выбирают типы вакуумных насосов, затворов и средств измерения вакуума Наиболее распространены системы с бустерными, паромасляными или механическими насосами Получают широкое распространение вакуумные системы, состоящие из безмасляных насосов — водокольцевого, двухроторного и воздушных эжекторов

Защитный кожух печи предназначен для локализации взрыва, который может произойти в случае соединения высокореакционного металла, например титана, с водой

Специфические особенности узлов гарниссажных печей Тигель воспринимает несколько меньшие тепловые нагрузки, чем кристаллизатор, так как происходит растекание теплоты в вертикальном направлении — и по гарниссажу, и по стенке Кроме того, тигель защищен гарниссажем от непосредственного воздействия дуги

В отечественной промышленности широкое распространение получили графитовые тигли, безопасные в эксплуатации Тигли устанавливают в водоохлаждаемом корпусе из обычной или немагнитной стали Толщина стенки тигля составляет 20—60 мм Металлические тигли изготавливают из меди или хромистой бронзы

Вторичный токоподвод размещают внутри вакуумной камеры частично, чтобы уменьшить магнитные поля, отклоняющие дугу

Источники питания ВДП, как правило, выполняют на базе тиристорной техники Основные их особенности — достаточно большие токи при малом напряжении на дуге, широкий диапазон и высокая точность стабилизации тока (± 1 %), высокие КПД (93 %) и коэффициент мощности (0,86—0,88 в номинальном режиме)

Агрегат состоит из силового трансформатора, выпрямительного блока и теплообменника

Системы управления ВДП строят обычно по принципу двухконтурного регулирования Один канал управления обеспечивает стабильность протяженности дугового промежутка посредством перемещения электрода по сигналу «напряжение на печи» Второй канал обеспечивает заданную скорость плавки или заданный ток дуги Кроме того, система может осуществлять управление по программе и сбор информации Последнее поколение регуляторов реализовано на микропроцессорах

УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА

Основная область применения печей электрошлакового переплава (ЭШП) — производство слитков из высококачественных сталей (шарикоподшипниковых, конструкционных, коррозионностойких, жаростойких, валковых и др) [60 13] Слиток, полученный в печах ЭШП, отличается от обычного слитка, отлитого в изложницу, отсутствием усадочной раковины, осевой пористости, осевой и внецентренной ликвации, отсутствием неметаллических включений и сниженной анизотропией механических свойств, лучшей деформируемостью Печи электрошлакового переплава также применяют для улучшения качества цветных металлов — меди, титана и сплавов на их основе

Принцип действия печей ЭШП (рис 60 40) Расходуемый электрод из переплавляемого металла погружается в слой электропроводящего флюса (шлака), размещенного в водоохлаждаемом металлическом кристаллизаторе, к которому примыкает водоохлаждаемый поддон Электрический ток, пропускаемый через электрод и шлак, поддержива-

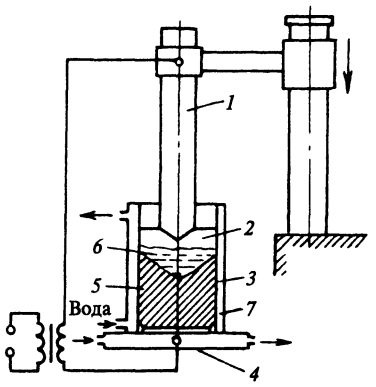


Рис. 60.40. Схема электрошлакового переплава:
1 — расходуемый элсктрод; *2* — шлаковая ванна; *3* — кристаллизатор; *4* — поддон; *5* — слиток; *6* — металлическая ванна; *7* — шлаковый гарниссаж

ет шлак в расплавленном состоянии при температуре 1600—2000 °С. Часть теплоты, выделяемой шлаковой ванне, передается контактирующему с ней электроду, торец которого оплавляется. Капли металла, стекающие с торца электрода, проходят через слой шлака и формируются в водоохлаждаемом кристаллизаторе в виде слитка. В процессе переплава в верхней части слитка на границе со шлаковой ванной образуется ванна жидкого металла, а на боковой поверхности слитка — тонкая корочка затвердевшего шлака (гарниссаж).

К основным факторам, обусловливающим улучшение качества металла при ЭШП относятся:

рафинирование жидкого металла шлаками на оплавляемой поверхности электрода в процессе прохождения капель через слой шлака и на поверхности раздела шлаковая ванна — слиток;

последовательная направленная кристаллизация слитка в водоохлаждаемом кристаллизаторе;

формирование слитка в шлаковом гарниссаже, что способствует получению ровной, гладкой поверхности слитка, не требующей дополнительной механической обработки.

Разновидности электрошлаковой технологии (ЭШТ). На базе ЭШП получили развитие другие разновидности ЭШТ, к которой относятся: электрошлаковая сварка (ЭШС) крупных заготовок, электрошлаковое литье (ЭШЛ), электрошлаковое кокильное литье (ЭКЛ), или электрошлаковая тигельная плавка, электрошлаковая порционная отливка (ПЭШО), электрошлаковая наплавка (ЭШН), электрошлаковое производство биметаллических заготовок (ЭШПБ), электрошлаковый переплав окатышей (ЭШПО) и стружки (ЭШПС), а также ЭШП под давлением (ЭШПД) и ряд других процессов.

Электрошлаковое литье отличается от ЭШП применением сложнопрофильного кристаллизатора, соответствующего по форме изделию. Этим способом производят следующие заготовки: корпуса жидкостной арматуры, валки прокатных станов, трубы, коленчатые валы, сосуды высокого давления, шестерни и др.

Электрошлаковая наплавка предусматривает нанесение на поверхность заготовки равномерного слоя электрошлакового металла, образуемого в результате переплава под шлаком расходуемых электродов. В процессе ЭШН зона плавления обычно перемещается вдоль обрабатываемой поверхности. Химический состав электродов выбирают в соответствии с назначением изделия.

Электрошлаковый переплав окатышей — способ, состоящий в переплаве металлизованных окатышей, которые дозатором непрерывно подаются вместе с раскислителями в шлаковую ванну, подогреваемую с помощью нерасходуемого электрода. При непрерывном процессе ЭШПО осуществляют вытягивание слитка с резкой его на мерные заготовки и удаление избыточного шлака.

Способ ЭШПД предназначен для получения сталей и сплавов с высоким неравновесным содержанием азота.

Основные параметры печей ЭШП. Масса выплавляемого слитка является основным параметром, на котором основывается размерный ряд печей ЭШП, включающий печи типов: ЭШП-1,25, ЭШП-2,5, ЭШП-5, ЭШП-10, ЭШП-20, ЭШП-40, ЭШП-60, ЭШП-80. Число в условном обозначении печи означает массу выплавляемого слитка в тоннах.

Другой важные параметр — форма сечения слитка. При получении слитков одинаковой массы печи для производства слитков круглого, квадратного и прямоугольного сечений, трубных заготовок и фасонных отливок имеют различные параметры и конструктивные решения.

По числу электродов, одновременно переплавляемых в одном кристаллизаторе, различают одно-, двух-, трех- и многоэлектродные печи. Число переплавляемых электродов и их сечения зависят от условий производства и электрической схемы переплава. При прочих равных условиях целесообразно стремиться к увеличению коэффициента заполнения кристаллизатора, являющегося отношением суммарного сечения переплавляемых электродов к сечению слитка, что позволяет уменьшить высоту печи. Коэффициент заполнения кристаллизатора для большинства промышленных печей составляет 0,20—0,64 и растет с увеличением массы слитка.

Исполнение печей. Одно- и двухэлектродные печи выполняют по однофазной схеме, а трех- и многоэлектродные — по однофазной и трехфазной. Основные разновидности электрических схем ЭШП приведены на рис. 60.41. Наибольшее распространение получили однофазные одноэлектрод-

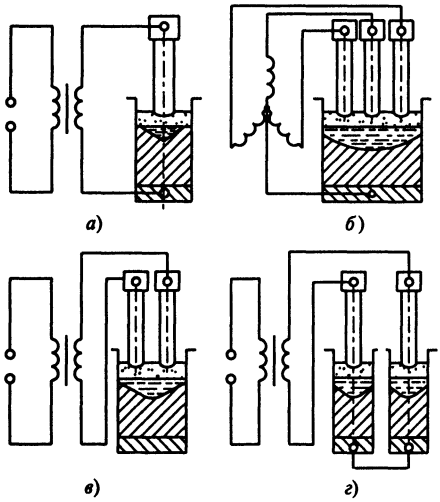


Рис. 60.41. Электрические схемы печей ЭШП:
а — одноэлектродная однофазная; *б* — трехэлектродная трехфазная; *в* — двухэлектродная однофазная с бифилярным токоподводом; *г* — то же для получения двух слитков

ные печи. Трехфазные печи отличаются лучшими энергетическими показателями по сравнению с однофазными одноэлектродными, но обладают меньшим коэффициентом заполнения кристаллизаторов, в результате чего увеличивается длина электродов, и следовательно, высота печи. Для получения слитков прямоугольного сечения предпочтительна двухэлектродная бифилярная печь. Ее преимущество перед обычными однофазными печами — более высокий (до 0,9) коэффициент мощности и меньший расход электроэнергии. Схема с последовательным подключением двух печей к одному трансформатору позволяет выплавлять одновременно два слитка круглого или квадратного сечения и обеспечивает бифилярность электродов и короткой сети.

Существуют две модификации печей ЭШП. В одной из них переплав осуществляют в неподвижном глухом кристаллизаторе, при другой схеме кристаллизатор перемещается относительно наплавляемого слитка или слиток относительно кристаллизатора. В отечественных конструкциях, как правило, применяют перемещающийся кристаллизатор. Применение схемы ЭШП с коротким перемещающимся кристаллизатором облегчает задачу внешнего воздействия на шлаковую и металлическую ванны и слиток. Приведенные схемы реализованы в серии промышленных печей ЭШП, предназначенных для производства слитков массой 2—60 т и включающей печи ОКБ-905, ОКБ-906, ОКБ-1065, ОКБ-1155, ОКВ-1111, которыми оснащены цеха и участки металлургических и машиностроительных заводов.

Технические данные печей ЭШП для производства слитков и фасонного литья приведены в табл. 60.25 и 60.26. Общий вид печи ЭШП-2,5ВГ дан на рис. 60.42.

Основные особенности наиболее распространенных печей ЭШП для производства слитков:

широкий сортамент типоразмеров слитков, включая слитки прямоугольного сечения;

возможность применения обычной и бифилярной схем переплава, а также стационарных (индекс Г) и подвижных (индекс В) кристаллизаторов;

соответствие конструкции печи требованиям современной технологии ЭШП (применение дозаторов для подачи легирующих добавок и раскислителей, использование сифонного устройства для «жидкого старта», подача защитного газа и др.);

применение: тиристорных приводов кареток, обеспечивающих перемещение электрододержателей и кристаллизаторов в широком диапазоне скоростей; специализированных трансформаторов с большим числом (90) ступеней рабочего напряжения; специализированных автоматических регуляторов на базе микропроцессорных средств, позволяющих управлять по заданной программе параметрами переплава.

Таблица 60.25. **Основные параметры печей ЭШП для производства слитков**

Параметр	ЭШП-0,125	ЭШП-0,25ВГ	ЭШП-2,5ВГ	ЭШП-10ВГ	ЭШП-10Г	ЭШП-20ВГ	ЭШП-40ВГ
Мощность источника питания, кВ · А	250	630	1600	2390 (частота, Гц: 0,49; 0,99; 1,9; 4,7; 9,4)	3200	2×5000	2×5000
Максимальный ток, А	5000	10 000	21 000	25 000	35 000	50 000	50 000
Максимальный размер поперечного сечения, мм:							
прямоугольного	—	—	400×550	650×650	300×1400	620×1970	760×2000
круглого (диаметр)	200	250	425	—	800	—	—

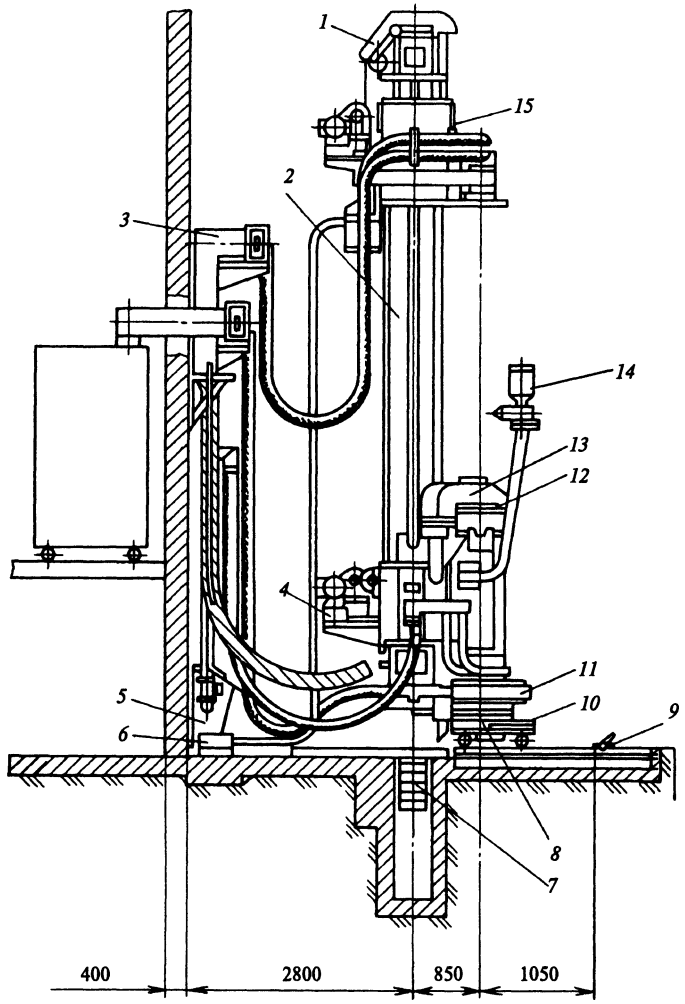


Рис. 60.42. Электропечь ЭШП-2,5ВГ:

1 — блок; *2* — колонна; *3* — вторичный токоподвод; *4* — каретка кристаллизатора; *5* — система водоснабжения; *6* — система воздуховода; *7* — противовес; *8* — каретка-суппорт; *9* — конечный выключатель; *10* — тележка кристаллизатора; *11* — поддон; *12* — кристаллизатор; *13* — система газоотсоса; *14* — дозатор; *15* — электродная каретка

Таблица 60.26. **Основные параметры серийных печей ЭШП для фасонного литья**

Параметр	ЭШП-0,125ВГЛ	ЭШП-0,5Л	ЭШП-1,25Л	ЭШП-2,5Л	ЭШП-5Л	ЭШП-80Л
Мощность источника питания, кВ · А	360	630	1000	2500	5000	2×5000
Максимальный ток, кА	6	10	14	28	50	100
Максимальная масса отливки, кг	125	500	1250	4500	7000	80 000
Максимальная высота отливки, мм	700	700	1000	1200	1375	4000

60.4. УСТАНОВКИ ИНДУКЦИОННОГО И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Принцип действия установок индукционного и диэлектрического нагрева основан на физических эффектах преобразования электромагнитной энергии в теплоту в проводящих и диэлектрических материалах, отличающихся значениями удельного электрического сопротивления ρ (соответственно $\rho < 1 \cdot 10^{-2}$ Ом · м и $\rho > 1 \cdot 10^{8}$ Ом · м). Математически процесс нагрева материалов в электромагнитном поле описывается уравнениями Максвелла, при этом для проводников учитывают только ток проводимости (током смещения пренебрегают), а для диэлектриков — только ток смещения.

Решение уравнений Максвелла позволяет получать математическое описание процессов индукционного и диэлектрического нагрева и рассчитывать электрические и энергетические характеристики установок [60.14].

Эти характеристики определяются как параметрами электромагнитного поля: значениями напряженностей магнитного H и электрического E полей и частоты f, так формой и параметрами нагреваемого изделия: геометрическими размерами и электрофизическими свойствами (удельным электрическим сопротивлением ρ и относительной магнитной проницаемостью μ; относительной диэлектрической проницаемостью ε и тангенсом угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$).

Следует отметить, что электрофизические свойства материалов (как проводников, так и диэлектриков) в общем случае зависят от параметров электромагнитного поля.

Индукционный нагрев связан с непостоянством параметров электромагнитного поля в нагреваемом проводящем теле, которое характеризуется глубиной проникновения электромагнитной волны, м:

$$\Delta = 503\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}. \qquad (60.1)$$

Глубина проникновения Δ — это расчетный параметр, который определяет распределение напряженности магнитного поля H, а также плотности тока J и выделяющейся в единице объема мощности по сечению проводящего тела. Наибольшие значения эти величины имеют на поверхности тела (поверхностный эффект).

Физический смысл параметр Δ имеет только для распространения плоской электромагнитной волны в плоском полубесконечном теле с постоянными электрофизическими свойствами ρ и μ. В этом случае в слое толщиной Δ амплитуды H и J снижаются в $e \approx 2{,}71$ раз по сравнению с их значениями на поверхности полубесконечного тела.

В связи с непостоянством параметров электромагнитного поля в проводящем теле выделяющуюся в нем энергию (или мощность, т.е. энергию в единицу времени) удобно характеризовать удельной поверхностной мощностью — мощностью, отнесенной к единице энерговоспринимающей поверхности, Вт/м^2, которая определяется по формуле

$$p_{0s} = 1 \cdot 10^{-3} H_0^2 \sqrt{\rho \mu f}. \qquad (60.2)$$

Здесь H_0 — значение напряженности магнитного поля на поверхности тела.

Диэлектрический нагрев также можно характеризовать глубиной проникновения и удельной мощностью, однако имеются существенные отличия их от аналогичных величин, описывающих процесс индукционного нагрева.

Глубина проникновения электромагнитной волны в полубесконечное тело из диэлектрического материала, м, рассчитывается по формуле:

$$\Delta = \frac{9{,}55 \cdot 10^{7}}{f\sqrt{\varepsilon}\operatorname{tg}\delta}. \qquad (60.3)$$

Для многих практических случаев диэлектрического нагрева значение Δ значительно превышает размеры нагреваемого диэлектрика, а следовательно, напряженность электрического поля E в диэлектрике можно с достаточной точностью считать постоянной. Поэтому удельная объемная мощность, Вт/см^3, выделяющаяся в диэлектрике, будет также одинаковой во всех точках и равной

$$p_{0v} = 5{,}55 \cdot 10^{-7} \varepsilon \operatorname{tg}\delta f E^2. \qquad (60.4)$$

При использовании сверхвысоких частот в диэлектриках также может проявляться поверхностный эффект.

Используемые частоты и некоторые области применения индукционного и диэлектрического нагрева приведены в табл. 60.27.

Значения применяемых удельных поверхностных и объемных мощностей p_{0s} и p_{0v} в нагреваемом изделии и соответствующих напряженностей магнитного и электрического полей H и E определяются конкретными технологическими процессами (значениями температуры нагрева, электрофизическими свойствами материалов и т.д.) и возможностями оборудования (мощностью источника питания, допустимым током индуктора, допустимым напряжением на рабочем конденсаторе и т.п.).

Некоторые, наиболее распространенные типы установок индукционного и диэлектрического нагрева для проведения указанных в табл. 60.28 технологических процессов, а также источники питания для них рассмотрены далее.

Таблица 60.27. **Частоты и области применения индукционного и диэлектрического нагрева**

Частота f		Основные области применения
Пониженная	0,5 Гц $< f <$ 50 Гц	Транспортирование и перемешивание расплавов, сквозной нагрев металлов
Сетевая (промышленная)	50 (или 60) Гц	Сквозной нагрев металлов, поверхностная закалка стали, плавка металлов
Средняя	50 Гц $< f <$ 66 кГц	Сквозной нагрев и плавка металлов, поверхностная закалка, сварка и спайка металлов
Высокая	66 кГц $< f <$ 300 МГц	Поверхностная закалка, сварка и пайка металлов, нагрев полупроводников и диэлектриков, плавка оксидов, нагрев плазмы
Сверхвысокая	0,3 ГГц $< f <$ 22,125 ГГц	Нагрев диэлектриков, нагрев плазмы

Таблица 60.28. **Параметры электромагнитных полей при индукционном нагреве**

Технологический процесс	Удельная поверхностная мощность p_{0s}, кВт/м^2	Напряженность магнитного поля H_0, А/м	Частоты
Плавка металлов	$1 \cdot 10^2$—$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$—$1 \cdot 10^5$	Среднис; 50 Гц
Сквозной нагрев металлов	$1 \cdot 10^2$—$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$—$5 \cdot 10^4$	Среднис; 50 Гц
Нагрев ферромагнитной стали	5—100	$1 \cdot 10^3$—$5 \cdot 10^4$	50 Гц
Поверхностная закалка	$2 \cdot 10^3$—$2 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^4$—$5 \cdot 10^5$	Среднис и высокис
Сварка и пайка	Не более $1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^3$—$1 \cdot 10^4$	Высокис
Плавка полупроводников	Не более $1 \cdot 10^3$	Не более $5 \cdot 10^3$	Высокис
Плавка оксидов	$(0{,}5—2)10^3$	Не более $5 \cdot 10^3$	Высокис
Нагрев плазмы	Не более $1 \cdot 10^3$	Не более $1 \cdot 10^4$	Высокис; сверхвысокис

ИНДУКЦИОННЫЕ КАНАЛЬНЫЕ ПЕЧИ

Индукционные канальные печи (ИКП) предназначены для плавки и перегрева чугуна, меди и сплавов на ее основе, алюминия и его сплавов, а также цинка и применяются главным образом в литейном производстве.

Конструктивно ИКП состоит из металлического кожуха, футерованной ванны с расплавленным металлом и одной или нескольких (обычно до шести) индукционных единиц. Индукционная единица содержит индуктор, замкнутый магнитопровод, кожух и футеровку канала, так называемый подовый камень (рис. 60.43, *а* и *б*). За счет индуцированного тока в канале происходит нагрев расплава, при этом в канале и частично в ванне постоянно находится расплавленный металл. Так как срок службы индукционной единицы ограничен, то она выполняется разъемной с возможностью замены. Охлаждение индуктора, а также магнитопровода и полости подового камня выполняется воздушным принудительным или водяным.

В зависимости от вместимости ИКП выполняются либо шахтного типа (до 10 т), либо барабанного типа (свыше 10 т) и снабжаются гидравлическим или электромеханическим приводом для поворота печи в целях перемешивания расплава и слива (рис. 60.44, *а* и *б*).

Индукционные канальные печи работают в режиме плавильной печи с твердой загрузкой или в режиме копильника (миксера) с жидкой загрузкой от другой плавильной печи, обычно дуговой при плавке чугуна или индукционной тигельной при плавке цветных металлов.

Индукционные канальные печи выпускаются вместимостью от 0,5 до 250 т и мощностью до 6000 кВт, при этом мощности индукционных единиц достигают 1500 кВт, работают на промышленной частоте 50 Гц и имеют хорошие энергетические параметры: электрический КПД до 0,9 и коэффициент мощности до 0,7 (без компенсации).

В табл. 60.29 приведены технические данные некоторых типов ИКП для плавки цветных металлов (типы ИАК, ИЛК, ИЦК) и миксеров для перегрева чугуна (тип ИЧКМ).

Питание ИКП осуществляется от специальных печных трансформаторов с регулированием вторичного напряжения под нагрузкой, при этом

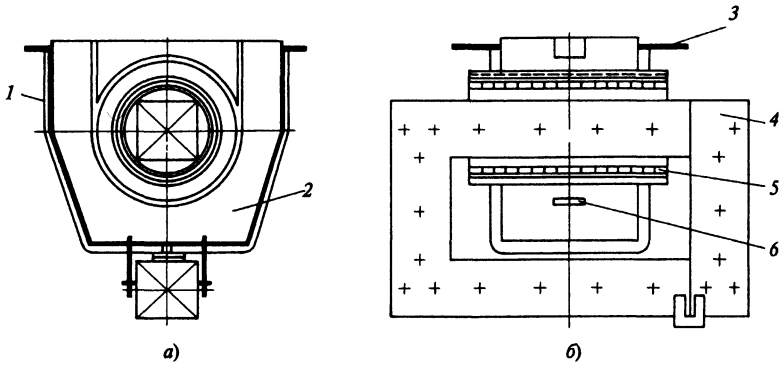


Рис. 60.43. Индукционная единица канальной печи:

а — поперечное сечение; *б* — продольное сечение; *1* — кожух; *2* — подовый камень; *3* — фланец; *4* — магнитопровод; *5* — индуктор; *6* — канал

Таблица 60.29. **Технические данные индукционных канальных печей промышленной частоты**

Назначение, тип печи	Вместимость печи, т		Максимальная рабочая температура, °С	Число и мощность, кВт, индукционных единиц	Удельный расход электроэнергии, кВт · ч/т	Напряжение на индукторе, В	cos φ (без компенсации)
	полезная	полная					
Плавка меди и сплавов на медной основе, ИЛК	1,0	1,3	1200	1×250	200	350	0,7
	2,5	5	1200	1×750	200	500	0,66
	6	9	1200	2×750	265	500	0,32
	16	25	1200	4×575	280	475	0,46
Плавка алюминия и его сплавов, ИАК	1,0	1,7	750	4×400	450	320	0,21
	2,5	4,5	750	2×400	450	440	0,21
	25	40	750	6×385	400	525	0,16
	40	60	750	9×385	350	525	0,17
Плавка катодного цинка, ИЦК	25	25	500	2×300	100	500	0,65
	40	40	500	4×250	100	500	0,63
	100	100	500	6×500	100	500	0,63
Выдержка и перегрев чугуна, ИЧКМ	6	9	1400	1×500	33,4*	500	0,7
	10	15	1400	1×500	33,2*	500	0,7
	25	35	1500	2×1000	33,0*	500	0,7
	40	53	1400	2×1000	33,5*	500	0,7
	60	80	1400	4×1000	31,9*	500	0,7

* Удельный расход электроэнергии указан при перегреве 1 т чугуна на 100 °С.

обычно каждая индукционная единица подключается к своему трансформатору. (Технические данные некоторых печных трансформаторов см. в табл. 60.31.)

Основные достоинства ИКП по сравнению с другими плавильными печами: высокий КПД и соответственно малый удельный расход электроэнергии; минимальный «угар» металла (менее 1 %); высокое качество металла за счет интенсивного перемешивания расплава, происходящего вследствие электродинамических сил и конвекции в расплаве. Недостатками ИКП являются трудность перехода от плавки одной марки металла к другой и относительно низкая производительность.

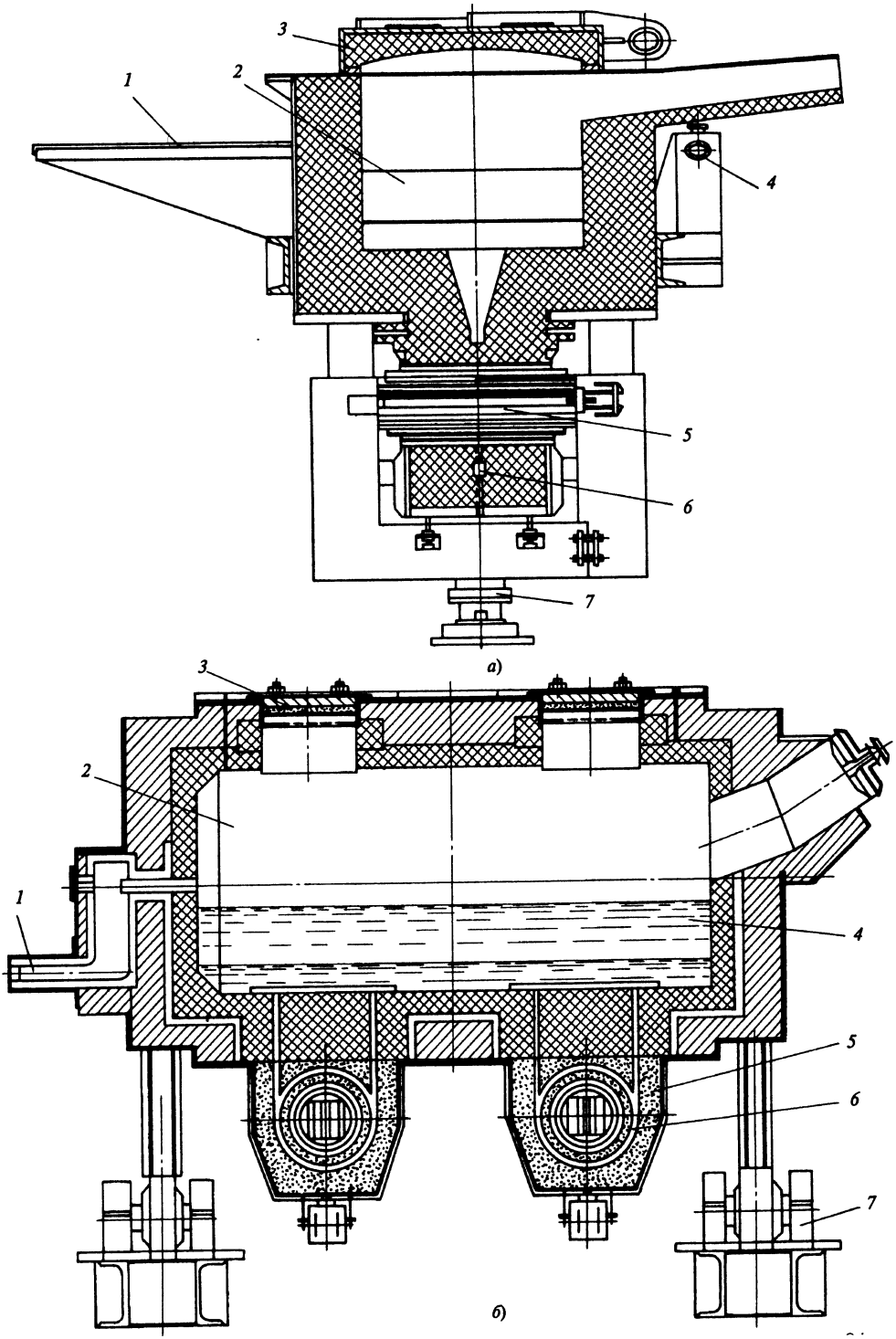


Рис. 60.44. Индукционные канальные печи:

а — индукционная канальная печь шахтного типа; (*1* — рабочая площадка; *2* — ванна с расплавленным металлом; *3* — крышка; *4* — ось наклона; *5* — индукционная единица; *6* — канал; *7* — гидроплунжер); *б* — индукционная канальная печь барабанного типа (*1* — сливной носок; *2* — ванна; *3* — крышка; *4* — расплавленный металл; *5* — индукционная единица; *6* — канал; *7* — опора (электромеханический привод не показан))

ИНДУКЦИОННЫЕ ТИГЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ

Индукционные тигельные печи (ИТП) предназначены для плавки стали, чугуна, никеля, меди и сплавов на ее основе, алюминия и его сплавов, магния, а также драгоценных металлов. По конструкции различают открытые и вакуумные (также компрессионные) печи.

Основными конструктивными элементами открытых ИТП являются индуктор и тигель, в котором плавят металл (рис. 60.45). Индуктор изготавливается из медной трубки (равностенной или неравностенной), охлаждаемой водой. Тигель выполняется керамическим на основе оксида кремния, магнезита или диоксида циркония (соответственно кислая, основная или нейтральная футеровка) с учетом выплавляемой марки стали или другого металла, а также из электропроводящих материалов, например из графита при плавке цветных металлов с низким удельным электрическим сопротивлением или из стали при плавке магния.

Вакуумные и компрессионные ИТП имеют герметичный корпус, рассчитанный на соответствующее внешнее пли внутреннее давление. Наиболее широко применяются вакуумные ИТП, которые выполняются для работы в периодическом (рис. 60.46) или полунепрерывном режиме. Разливка и кристаллизация металла осуществляется в вакууме. В вакуумных ИТП полунепрерывного действия имеются шлюзовые камеры, отделенные вакуумными затворами от плавильной камеры и имеющие свою систему вакуумной откачки. Это позволяет повысить производительность вакуумной ИТП по сравнению с печью периодического действия. Применение вакуума позволяет снизить содержание растворенных газов в металле и существенно улучшить его характеристики, а также плавить химически активные металлы и сплавы.

Открытые ИТП выполняются вместимостью до 100 т при мощности до 20 МВт, а вакуумные ИТП — до 10 т (в мировой практике до 40 т) при 3 МВт. В зависимости от вместимости и электрофизических параметров расплавляемого металла ИТП работают на промышленной, средней или высокой частотах (до 440 кГц). При выборе частоты учитывают действие электромагнитных сил на расплавленный металл (мениск и скорость движения), а также экономические факторы, в частности наличие дешевого ночного тарифа на электроэнергию. С увеличением частоты при том же токе в индукторе возрастает мощность ИТП, что следует из формулы (60.2), и появляется возможность провести большее число плавок в ночное время.

Технические данные некоторых типов открытых индукционных тигельных печей для плавки и выдержки черных (типы ИСТ, ИЧТ и ИЧТМ) и цветных (типы ИАТ, ИЛТ) металлов, а также вакуумных печей периодического и полунепрерывного действия (тип ИСВ) приведены в табл. 60.30.

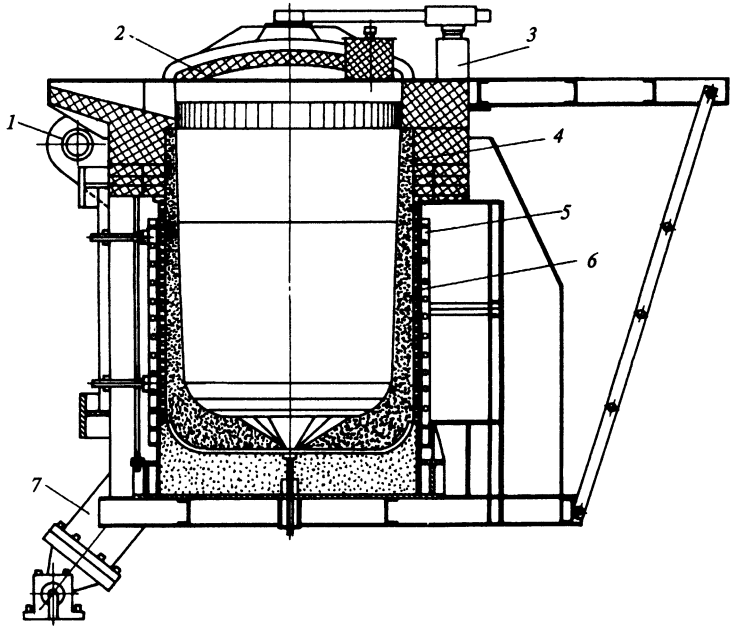


Рис. 60.45. Индукционная тигельная печь:

1 — ось наклона печи; *2* — крышка; *3* — механизм подъема крышки; *4* — тигель керамический; *5* — магнитопровод; *6* — индуктор; *7* — плунжер гидравлического механизма поворота печи

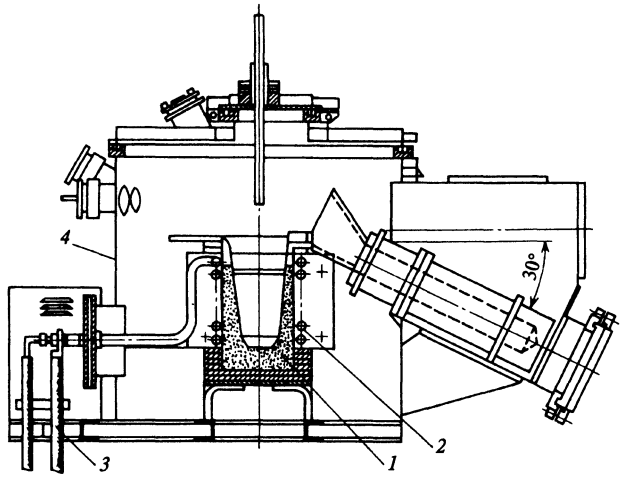


Рис. 60.46. Вакуумная индукционная тигельная электропечь:
1 — тигель; *2* — индуктор; *3* — токоподвод; *4* — герметический кожух

Таблица 60.30. **Технические данные индукционных тигельных печей**

Назначение, тип печи	Вместимость, т	Мощность источника питания, кВт	Частота, Гц	Напряжение на индукторе, В	Максимальная температура, °С	Производительность, т/ч	Удельный расход электроэнергии, кВт · ч/т
Плавка стали, ИСТ	0,06	100	2400	1000	1600	0,1	730
	0,16	250	2400	1000	1600	0,15	695
	1,0	800	1000	1000	1600	1,0	625
	2,5	2400	500	2000	1600	2,5	747
	6,0	2400	500	2000	1600	1,5	630
Плавка чугуна, ИЧТ	2,5	910	50	980	1400	1,7	550
	6,0	1600	50	1000	1400	2,2	546
	10,0	3630	50	2400	1500	6,6	550
	21,5	5465	50	2400	1500	10,5	520
	3,0	6870	50	2400	1500	13,3	515
	60	17 475	50	2400	1500	34,4	508
Выдержка и перегрев чугуна, ИЧТМ	6,0	370	50	500	1400	6,0	52
	10,0	840	50	1255	1400	6,0	48
Плавка алюминия и его сплавов, ИАТ	0,4	180	50	340	750	280	667
	0,4	595	500	1000	750	900	660
	2,5	740	50	1000	750	1300	580
	2,5	1460	500	1800	750	2500	625
Плавка меди и ее сплавов, ИЛТ	1,0	325	50	485	1200	1000	380
	2,5	720	50	980	1200	2006	355
	10,0	1290	50	1050	1200	3600	350
Вакуумная плавка стали. Печи периодического действия ИСВ	0,06	155	2400	800	1800	67	2500
	0,16	157	2400	800	1700	107	2170
	0,16	435	2400	800	1650	200	2100
	1,0	1000	1000	1000	1650	445	2000
	2,5	1500	1000	1000	1800	750	2000

По сравнению с индукционными канальными печами коэффициент мощности у ИТП более низок (обычно 0,03—0,15 в зависимости от частоты) и изменяется в ходе плавки, поэтому для компенсации реактивной мощности используются конденсаторные батареи с регулируемой емкостью.

Для питания ИТП промышленной частоты (обычно это печи большой вместимости) используются специальные печные одно- и трехфазные трансформаторы, технические данные некоторых типов приведены в табл. 60.31. Так как в ИТП применяют однофазные индукторы, то при питании от трехфазных трансформаторов обычно используют симметрирующие устройства.

Источниками тока средней частоты для питания тигельных печей являются вращающиеся (машинные) и статические (тиристорные) преобразователи частоты, параметры некоторых типов которых приведены в табл. 60.32 и 60.33. Индукционные тигельные печи малой вместимости могут пи-

Таблица 60.31. **Трансформаторы одно- и трехфазные для питания индукционных электропечей**

Тип	Мощность, кВ · А	Вторичное напряжение, В	Число ступеней напряжения	Масса, т
ЭОМПИ-1000/10-УХЛ4	400	510—85	11	3,5
ЭОМПИ-1600/10-УХЛ4	630	511—81	11	4,8
ЭОМПИ-2000/10-УХЛ4	1000	510—92; 1020—182	11	5,8
ЭОМНИ-2700/10-У-3	1600; 2500	527—105; 1054—210	17	10,3
ЭОМНИ-4200/10-У-3	2500	1050—210; 2100—422	17	12,9
ЭТМП-250/10-УЗ	1000	1020—182	11	7,0
ЭТМНИ-2000/10-УХЛ4	1600	1057—211	17	13,8
ЭТЦНКИ-5000/10-УХЛ4	2500	2100—420; 1050—210	17	15,2
ЭТЦНКИ-8000/10-УХЛ4	4000	2403—402	23	32,0
ЭТЦНКИ-10000/10-УХЛ4	5600	2400—388	23	36,7
ЭТЦНКИ-12500/10-УХЛ4	7100	2400—384	23	40,0

Примечание. Трансформаторы масляные для внутренней установки. Первичное напряжение 6/10 кВ.

Таблица 60.32. **Вращающиеся преобразователи частоты серий ВПЧ и ОПЧ**

Тип	Генератор			Двигатель		КПД
	Частота, Гц	Мощность, кВт	Напряжение, В	Мощность, кВт	Напряжение, В	
ВПЧ-50-2400	2400	50	800/400/200	77	380/220	0,7
ВПЧ-50-8000	8000					
ВПЧ-100-2400	2400	100	800/400/200	77	380/220	0,75
	8000					
ОПЧ-250-2,4	2400	250	800	291	660/380 или 6000/3000	0,86
ОПЧ-250-4,0	4000			294		0,85
ОПЧ-250-10,0	10 000			305		0,82
ОПЧ-320-1,0	1000	320	800	364	660/380 или 6000/3000	0,88
ОПЧ-500-1,0	1000	500	800/1600	556	6000/3000	0,9
ОПЧ-500-2,4	2400			568		0,88
ОПЧ-500-4,0	4000			575		0,87

Таблица 60.33. **Тиристорные преобразователи частоты серии ТПЧ**

Номинальная мощность, кВт	3	10	50	63	100	160	200	250	320	630
Частота, кГц	22 10*	10 4*	10 4*	2,4 4*	10 4*	2,4 4*	10 4*	2,4 4*	1; 2,4 4*	1; 2,4 4*
Напряжение выходное, В	220		400; 800							800
Мощность потребляемая, кВт	3,3	11	55	69	100	176	220	275	352	693
Напряжение сети, В (трехфазное, 50 Гц)	380					380; 660				660
Охлаждение	Воздушное	Водяное								

* Возможное значение частоты.

таться и от транзисторных и ламповых генераторов высокой частоты [60.15, 60.16].

Вследствие изменения параметров загрузки в процессе работы печи снабжаются микропроцессорными системами управления, поддерживающими на требуемом уровне основные электрические параметры: потребляемую мощность, коэффициент мощности и др., а также температуру расплава.

Крупные печи имеют компьютерные системы управления, контролирующие электрические и теплотехнические параметры, массовый и химический состав загрузки, а также состояние футеровки и снабженные системой визуализации процесса, существенно облегчающей работу персонала.

По сравнению с дуговыми электропечами ИТП при плавке сталей и чугуна имеют такие преимущества: большая стойкость огнеупоров и меньший «угар» металла за счет более точного регулирования температуры, отсутствие графитовых электродов (нет науглероживания расплава), выравнивание температуры и химического состава металла благодаря перемешиванию под действием электромагнитных сил. Недостатками ИТП являются холодные шлаки, необходимость использования источников питания средней и высокой частоты для печей малой и средней вместимости.

При плавке цветных металлов ИТП и ИКП успешно конкурируют с плавильными электропечами сопротивления.

ИНДУКЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ СКВОЗНОГО НАГРЕВА

Индукционные установки для сквозного нагрева (ИУСН) предназначены для нагрева заготовок из стали, титана, алюминия, меди и их сплавов перед обработкой давлением и для термообработки деталей.

По режиму работы различают ИУСН периодического и непрерывного действия. В установках периодического действия нагрев от начальной до конечной температуры ведется без перемещения заготовок относительно индуктора. Такие установки применяются для нагрева заготовок различных, в том числе больших (диаметром до 600 мм) размеров. В ИУСН непрерывного действия заготовки (обычно диаметром не более 200 мм) нагреваются, перемещаясь с помощью толкателя по оси индуктора, расположенного горизонтально (рис. 60.47).

В промышленности работают индукционные установки сквозного нагрева непрерывного действия серии ИНМ промышленной частоты и серии КИН средней частоты (табл. 60.34).

Большое число установок производится индивидуально для конкретных изделий и технологических операций при массовом поточном производстве.

Естественный коэффициент мощности в установках сквозного нагрева очень низок (0,1—0,4), поэтому предусматривается использование конденсаторных батарей для компенсации реактивной мощности.

Индукторы для ИУСН могут быть однофазными или трехфазными, в последнем случае применяются различные способы для уменьшения электромагнитной связи между индукторами, подключенными к разным фазам. В зависимости от материала и диаметра нагреваемых заготовок выбирается частота питающего тока. Для сквозного нагрева под обработку давлением заготовок различных диаметров из конструкционной стали рекомендуются следующие частоты:

Частота, Гц....	50	500	1000	2400	8000	66 000
Диаметр, мм..	Более 200	90— 220	60— 150	40— 100	20— 70	Менее 30

Питание ИУСН осуществляется от источников питания соответствующих частот (см. табл. 60.32, 60.33). Управление режимом работы, в том числе качеством нагрева, т.е. температурным полем в на-

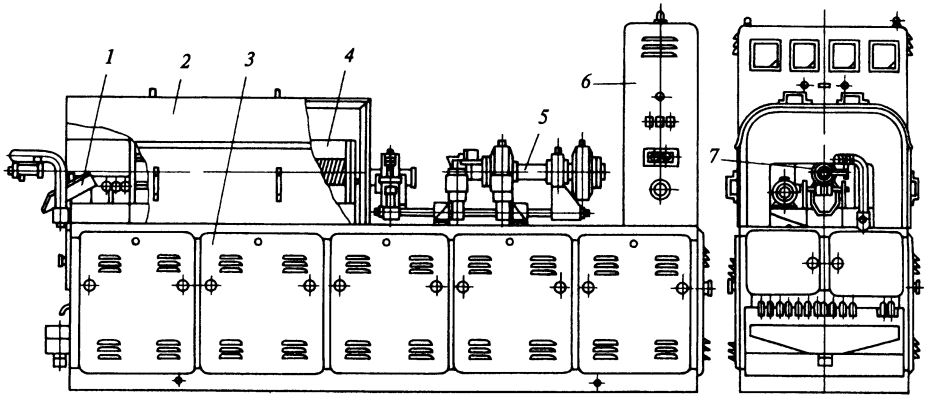


Рис. 60.47. Индукционная нагревательная установка непрерывного действия:
1 — разгрузочный лоток, *2* — кожух индуктора, *3* — конденсаторная батарея, *4* — индуктор, *5* — механизм загрузки, *6* — шкаф управления, *7* — визирная головка пирометра

Таблица 60 34 **Технические данные индукционных нагревательных установок**

Название и назначение, тип индукционной установки	Мощность установки, кВт	Напряжение на индукторе, В	Частота, Гц	Размеры нагреваемых изделий, мм		Производительность, т/ч
				диаметр	длина	
Установка непрерывного действия для нагрева кузнечных стальных заготовок до 1250 °С, КИН	150	800	10 000	10—50	100—500	0,5—0,3
	250	800	2400	40—80	100—500	0,85—0,6
	500	800	1000	70—150	100—600	1,7—1,3
	750	800	2400	30—80	100—600	4,6—1,8
	1500	800	1000	70—190	100—500	3,6—3,0
Установка непрерывного действия для нагрева заготовок из стали до 1250 °С, ИНМ	1000	600	50	130—290	До 700	3,2
	1300	380	50	200—360	До 420	3,0
Установка непрерывного действия для нагрева заготовок из алюминия и его сплавов до 500 °С, ИНМ	500	600	50	112—145	150—600	1,8
	750	600	50	145—195	200—600	2,5
	750	600	50	275—410	565—1000	3,3
	1000	600	50	225—350	400—850	3,5
Установка непрерывного действия для нагрева заготовок из меди и ее сплавов до 950 °С, ИНМ	500	380	50	80—115	До 120	1,6
	5000	490	50	165—400	До 800	До 18

греваемом изделии, производится микропроцессорными регуляторами

Широкое распространение получил низкотемпературный индукционный нагрев стальных ферромагнитных изделий на промышленной частоте для различных технологических целей в машиностроении, строительной, химической и в других отраслях промышленности отпуск и отжиг деталей, нагрев под прессовую посадку, сушка электроизоляции и лакокрасочных покрытий и др Мощности таких установок доходят до 2500 кВт [60 17]

ИНДУКЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ

Индукционные установки для поверхностной закалки (ИУПЗ) предназначены для упрочнения поверхностного слоя стальных и чугунных деталей

В состав ИУПЗ входят индуктор, закалочный трансформатор, устройство для охлаждения закаливаемой поверхности, конденсаторная батарея и шкаф управления Форма и размеры индуктора определяются размерами и конфигурацией закали-

Таблица 60.35. **Технические данные индукционных закалочных установок типа ИЗ**

Мощность установки, кВт	Напряжение на индукторе, В	Частота, Гц	Мощность конденсаторной батареи, квар	Размеры нагреваемых изделий	
				Минимальный диаметр, мм	Максимальная поверхность, $см^2$
30	74	8000	1000—1200	17	25
100	74	2400	1000—1200	35	200
100	240	8000	1000—1200	19	200
200	240	2400	1400—1650	35	400
200	240	8000	1400—1650	19	400

Таблица 60.36. **Высокочастотные установки с ламповыми генераторами для термообработки, плавки и сварки металлов**

Тип	Частота, МГц	Мощность колебательная, кВт	Мощность, потребляемая из сети, кВт	Анодное напряжение, кВ	Расход охлаждающей воды, $м^3/ч$
ВЧГ1-60/0,066	0,066	60	105	10,5	1,4
ВЧИ2-100/0,066	0,066	100	140	11,0	7,5
ВЧИЗ-160/0,066	0,066	160	240	11,0	7,0
ВЧИ-10/0,44	0,44	10	16	7,0	0,72
ВЧИ-25/0,44	0,44	25	40	8,0	2,0
ВЧИ-63/0,44	0,44	60	105	10,5	3,6
ВЧС1-400/0,44	0,44	400	630	11,0	10,2
ВЧС1-630/0,44	0,44	630	960	11,0	17,0
ВЧС1-1000/0,44	0,44	1000	1550	11,0	19,2

ваемой детали. Обычно закалочный индуктор имеет один-два витка и подключается к источнику питания через понижающий (закалочный) трансформатор, рассчитанный на данную частоту. Закалочные трансформаторы на средние частоты имеют магнитопровод и позволяют ступенчато регулировать вторичное напряжение в широких пределах. На высоких частотах применяются воздушные трансформаторы с плавным регулированием вторичного напряжения. В установках непрерывного действия имеются также механизмы транспортировки деталей через индуктор и через охлаждающее устройство. Пример общего вида ИУПЗ средней частоты (без источника питания) приведен на рис. 60.48.

Отечественная электротехническая промышленность производит индукционные закалочные установки периодического и непрерывного действия специализированные и универсальные. Технические данные индукционных закалочных установок типа ИЗ приведены в табл. 60.35.

Питание ИУПЗ осуществляется в зависимости от требуемой частоты вращающихся преобразователей частоты, тиристорных и транзисторных инверторов или ламповых генераторов см. табл. 60.32,

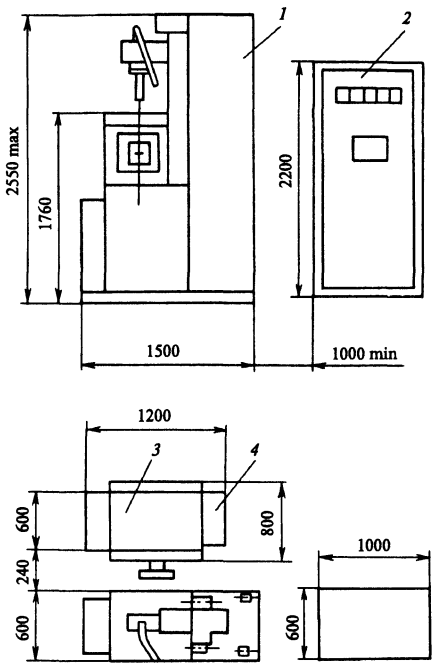


Рис. 60.48. Установка для поверхностной закалки типа ИЗ мощностью 160 кВт и частотой 4 кГц:
1 — механизм перемещения; *2* — шкаф управления;

бины закаленного слоя нагреваются под поверхностную закалку на промышленной частоте.

УСТАНОВКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

Высокочастотные и сверхвысокочастотные установки для диэлектрического нагрева (УДН) применяют для различных видов тепловой обработки неэлектропроводящих материалов (сушка древесины, керамики, фруктов и др., сварка термопластических материалов, нагрев термореактивных материалов, склеивание фанеры, пластмасс и др., нагрев пищевых продуктов и т.д.) [60.18].

В высокочастотных УДН (частоты 1—150 МГц, мощности до 200 кВт) нагрев диэлектриков осуществляется в переменном электрическом поле рабочего конденсатора, форма которого выбирается в зависимости от конфигурации нагреваемого изделия (в простейшем случае применяется плоский конденсатор). Обычно применяемые в УДН значения напряженности электрического поля $E_м$ и удельной объемной мощности p_{0v} в нагреваемом материале приведены ниже:

	Сушка	Сварка термопластов	Нагрев реактопластов	Склеивание
$E_м$, кВ/см ...	0,1—1,0	10—50	Менее 15	1,5—2,5
p_{0v}, Вт/см^3..	0,3—1,0	Менее 1500	Менее 20	Менее 12

По режиму работы различают УДН периодического и непрерывного действия, в последнем случае чаще всего используется конвейер. Технические данные некоторых типов высокочастотных УДН, применяемых в промышленности, приведены в табл. 60.37.

Сверхвысокочастотные УДН работают на частотах 300—22 125 МГц и имеют мощности до 60 кВт. В табл. 60.38 приводятся данные генераторов сверхвысоких частот — магнетронов, которые используются в ряде установок для нагрева диэлектриков. Нагрев диэлектриков осуществляется с использованием бегущей электромагнитной волны в волноводе

Таблица 60.37. **Технические данные высокочастотных установок с ламповыми генераторами для нагрева диэлектриков**

Назначение, тип	Мощность, потребляемая от сети, кВт	Мощность колебательная, кВт	Частота, МГц	Анодное напряжение, кВ	Технологические показатели		Масса установки, кг
					Характеристика нагрузки	Время нагрева, с	
Нагрев пресс-материалов до 120 °С перед прессованием, ВЧД-х/х	2,2	1,0	40,68	4,0	0,3*	15—55	120
	5,1	2,5	40,68	5,0	0,64*	30—50	190
	11,7	6,0	40,68	5,0	1,64*	30—60	350
	20,0	10,0	40,68	5,0	3,0*	40—60	410
Сварка термопластичных пленок, ВЧД-х/х-СП	1,8	0,6	40,68	2,5	16**	1—5	360
	4,2	1,6	40,68	4,0	40**	2—5	500
	6,5	2,5	40,68	6,0	60**	2—5	930
	9,0	4,0	40,68	6,0	100**	2—5	950
Склейка древесины, ВЧД-х/х-СД	6,5	2,5	13,56	5,0	420**	15	400
	20,0	10,0	5,28	8,0	3300**	80	900
	40,0	25,0	27,12	7,5	8000**	80	1350
Сушка литейных стержней ВЧД-х/х	100,0	63,0	27,12	10,5	0,05—1***		4250

* Масса нагрузки, кг.

** Площадь шва, см^2.

*** Скорость конвейера м/мин.

Примечание. В числители дроби х/х указывается колебательная мощность, кВт, в знаменателе — частота, МГц.

Таблица 60.38. **Технические данные СВЧ-генераторов**

Тип установки, тип магнетрона	Частота, МГц	Выходная мощность, кВт	Анодное напряжение, кВ	Ток анода, А	Масса, кг
«Электроника», М-112	2450	0,5	3,2	0,3	26
«Хазар-2Р», М-571	2450	2,5	3,6	1,4	230
«Хазар-20», М-93	915	25,0	10,0	3,2	2160
КИЭ-2, М-111	915	50,0	12,0	6,0	3730
КИЭ-5, М-571 (2 шт.)	2450	5,0	3,6	1,4	450
ВЧД 60/915, М-116	915	60,0	12,0	6,5	2750

или с помощью излучателя (рупорной антенны), а также с использованием стоячих волн в полом резонаторе или в волноводе. Широкое применение для нагрева пищевых продуктов нашли так называемые микроволновые печи. Так как электрический КПД УДН относительно невысок, целесообразно применять в комбинации с диэлектрическим нагревом и другие виды нагрева, например инфракрасный нагрев или нагрев потоком воздуха из калорифера, что позволяет также достигать определенных технологических эффектов, в частности при сушке диэлектрических материалов.

60.5. УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО И ПЛАЗМЕННОГО НАГРЕВА И ЛАЗЕРНЫЕ

УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО НАГРЕВА

Электронно-лучевые плавка, нанесение покрытий, сварка и размерная обработка достаточно широко распространены в промышленности [60.19].

Метод электронно-лучевой плавки имеет преимущества по сравнению с другими видами нагрева: низкое давление в рабочей зоне; широкий диапазон регулирования мощности и ее поверхностной плотности (для различных технологических процессов плотность мощности электронного пучка может изменяться от 10^2 до 10^5 Вт/см^2); возможность практически неограниченного времени выдержки жидкого металла; возможность значительного перегрева. Эти преимущества электронно-лучевого нагрева позволяют весьма эффективно применять его для рафинировочного переплава широкого сортамента тугоплавких и активных металлов, а также сталей и спецсплавов [60.20]. Кроме того, этот вид нагрева может использоваться для ряда технологических процессов, связанных с полным или частичным расплавлением исходного материала.

Открытая ванна и высокий перегрев металла в электронно-лучевых плавильных печах (ЭЛП) создают весьма благоприятные условия для вакуумного рафинирования. Наиболее эффективно она проходит, если основной металл имеет низкую, а примесь — высокую упругость пара [60.21].

Слитки в ЭЛП формируются в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе с постепенным их вытягиванием. Поверхность слитка во многом определяется специально подобранными режимами вытягивания. На процесс кристаллизации и структуру слитка можно воздействовать путем изменения режимов плавки (скорости плавки, уровня подводимой мощности и распределения ее по поверхности ванны расплава, условий охлаждения слитка).

Использование в ЭЛП промежуточной емкости существенно улучшает технологические возможности и расширяет область их использования. В этом случае исходный материал, расплавляясь, вначале накапливается в водоохлаждаемой промежуточной емкости, а затем переливается в кристаллизатор. Промежуточная емкость переменного профиля (глубина жидкой ванны изменяется по ее длине) в сочетании со специально подобранным настилом мощности электронного луча обеспечивает эффективное удаление неметаллических включений из жидкого металла. При необходимости для повышения степени рафинировки на поверхности жидкого металла в промежуточной емкости можно наводить шлак различного состава.

Электронно-лучевая плавильная печь с успехом используется и для литейных целей. Литейный тигель, как правило, медный, водоохлаждаемый. Футерованные тигли используются, когда материал футеровки не реагирует с расплавом или когда он не наносит вреда качеству продукта. Исходный материал подается в тигель в виде сыпучей шихты; в этом случае тигель играет роль плавильного. Если же материал заливают в тигель жидким или он попадает в него каплями со сплавляемой заготовки, то тигель служит только для рафинирования. Литье может быть непрерывным (получение заготовок различных сечений, производство фольги) и порционным (фасонная арматура, турбинные лопатки и т.п.). При порционном литье для увеличения объема жидкой ванны, усреднения температуры и гомогенизации состава используют электромагнитное перемешивание жидкого металла.

Таблица 60.39. **Удельный расход электроэнергии при электронно-лучевом переплаве некоторых материалов**

Материал	Cu	Fe	Ni	Ti	Zr	Mo	Nb	Ta	W
ΔE, кВт · ч/кг	1—2	1—2	1—2	2—5	2—5	5—15	8—10	10—18	20—40

Следует иметь в виду, что электронно-лучевой переплав является очень энергоемким процессом (табл. 60.39), предъявляющим высокие требования к производственным помещениям и обслуживающему персоналу.

Использовать ЭЛП в промышленных целях целесообразно лишь в тех случаях, когда другие способы переплава (электрошлаковый, вакуумно-индукционный, вакуумно-дуговой, плазменный) не обеспечивают требуемых свойств получаемого продукта, а также когда электронно-лучевой нагрев позволяет существенно упростить или даже исключить некоторые стадии технологического процесса (предварительную подготовку исходного материала, замену многократных переплавов однократным и т.п.).

Существует большое число вариантов электронно-лучевой плавильной печи [60.22]. Типичные варианты представлены на рис. 60.49. Использование ЭЛП для нанесения покрытий в вакууме методом испарения получило промышленное распространение в силу следующих преимуществ: энергия подводится непосредственно к поверхности, на которой формируется поток пара; большие плотности энергии (10^4—10^6 Вт/см^2) обеспечивают высокие температуры, достаточные для эффективного испарения даже самых тугоплавких материалов; благодаря простоте регулирования мощности и распределения энергии по поверхности нагрева относительно легко управлять толщиной и равномерностью покрытия; ведение процесса испарения из водоохлаждаемого тигля обеспечивает высокую чистоту наносимого слоя [60.23].

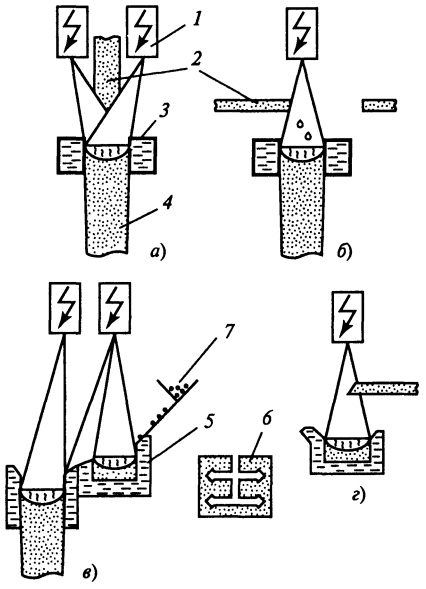


Рис. 60.49. Схемы типичных способов электронно-лучевой плавки и литья:

а — переплав вертикально подаваемой заготовки; *б* — капельный переплав горизонтально подаваемой заготовки; *в* — переплав компактных заготовок, кусковых и сыпучих материалов с использованием промежуточной емкости; *г* — порционное литье фасонных изделий; *1* — электронно-лучевая пушка; *2* — сплавляемая заготовка; *3* — кристаллизатор; *4* — слиток; *5* — промежуточная емкость; *6* — литейная форма; *7* — устройство для подачи сыпучего материала

По технологическому назначению и характеру получаемых покрытий электронно-лучевые установки можно разделить на установки для получения тонкопленочных покрытий и установки для получения толстых вакуумных конденсатов.

Установки первой группы предназначены в основном для нанесения просветляющих и отражающих покрытий в оптике и при производстве тонкопленочных структур интегральных схем в электронике. Установки второй группы используются для нанесения защитных жаропрочных и износостойких покрытий на детали машин и аппаратов.

Еще одной областью использования электронно-лучевого испарения является нанесение (при производстве силовых полупроводниковых приборов и фотопреобразователей солнечных батарей) покрытий, которые используются в качестве контактов.

Весьма эффективно электронно-лучевое испарение используется для нанесения защитных антикоррозионных покрытий на стальную ленту для получения ленточных композиционных материалов и при производстве фольги.

Принципы устройства электронно-лучевых испарителей и схемы установок для нанесения покрытий приведены на рис. 60.50

В ЭЛП подведение мощности к нагреваемому объекту осуществляется сильноточным пучком электронов, ускоренных до энергии 10—40 кэВ в зависимости от типа печи и ее мощности.

В месте встречи пучка с объектом кинетическая энергия электронов при взаимодействиях с веществом превращается в тепловую энергию или энергию возбуждения атомов и молекул. Часть электронов пучка отражается поверхностью объекта, а в результате вторичных процессов возникают рентгеновское излучение и вторичные электроны. Выде-

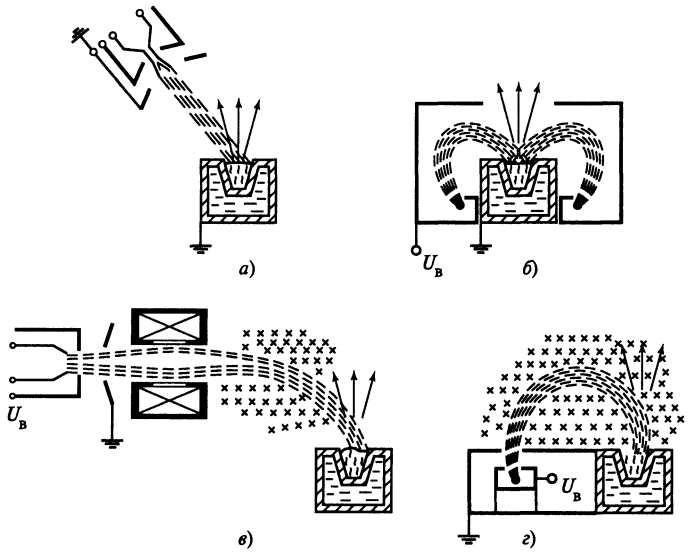


Рис. 60.50. Принципиальные схемы устройства электронно-лучевых испарителей:

а — испаритель с аксиальной пушкой; *б* — испаритель с кольцевым катодом; *в* — испаритель с аксиальной пушкой и магнитным поворотом пучка; *г* — испаритель с плосколучевой пушкой и магнитным поворотом пучка

лившаяся теплота повышает температуру объекта в зоне действия пучка и распространяется за счет теплопроводности внутри объекта и за счет теплоотдачи с его поверхности в окружающую среду.

По мере нарастания температуры увеличивается также число тепловых электронов, покидающих поверхность объекта, и становится значимым процесс термоэлектронной эмиссии. Явления, происходящие при бомбардировке объекта электронным пучком, схематично изображены на рис. 60.51.

За глубину проникновения S электронов пучка принимают расстояние по нормали от поверхности в глубь объекта, на котором электроны теряют практически всю свою энергию. Она зависит только от энергии электронов и плотности материала и для $10 \le U_в \le 100$ кэВ с достаточной степенью точности равна, см:

$$S \approx 2{,}1 \cdot 10^{-12} \frac{U_{разг}}{\rho},$$

где $U_{разг}$ — разгоняющее электроны напряжение, В; ρ — плотность материала, г/см^3.

Ориентировочно мощность ЭЛП для плавки слитка может быть определена по данным табл. 60.40, в которой приведены значения удельной мощности на поверхности ванны жидкого металла, обеспечивающие превышение температуры $t_{пов}/t_{пл}$. Мощность печи для данного отношения $t_{пов}/t_{пл}$ определится как произведение табличной

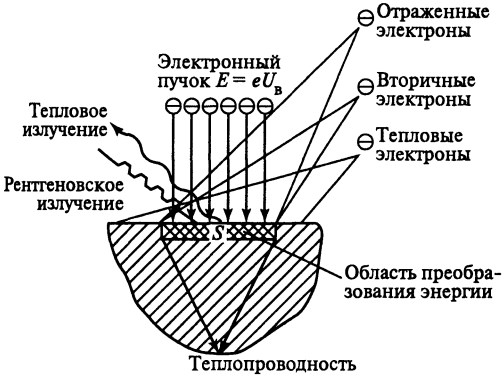


Рис. 60.51. Явления при бомбардировке объекта электронным пучком

Таблица 60.40. **Удельная мощность, МВт/м^2, подводимая к поверхности ванны жидкого металла для получения заданного превышения температуры металла над температурой плавления**

Металл	$t_{пов}/t_{пл}$							
	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,4
Железо, сталь	1,9	2,5	3,2	5,0	—	—	—	—
Цирконий	2,2	3,0	3,8	4,5	5,1	6,0	7,1	8,8
Ниобий	4,0	5,3	6,7	8,4	10,5	—	—	—
Молибден	5,6	7,4	9,2	12,6	—	—	—	—

удельной мощности на площадь поверхности жидкой ванны [60.24].

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ПУШКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Технологическая электронно-лучевая пушка — устройство, обеспечивающее формирование электронного пучка, доведение его до поверхности обработки и распределение мощности по поверхности обработки по заданному закону.

Диапазон мощностей пушек, используемых в промышленной технологии, изменяется от нескольких десятков до тысяч киловатт в единице. При этом практически при всех процессах пушки должны работать в непрерывном режиме, исчисляемом часами или десятками часов.

В общем виде электронно-лучевая пушка состоит из электронно-оптической системы (ЭОС) и системы проведения пучка. Электронно-оптическая система формирует пучок электронов необходимой энергии, тока и геометрических размеров. Наиболее типичная ЭОС пушки состоит из катода, фокусирующего электрода и анода. Исключение составляют лишь пушки автоэлектронного нагрева, в которых анодом является сам обрабатываемый материал. В зависимости от формы эмитирующей поверхности катода, геометрии фокусирующего электрода и анода ЭОС может формировать пучки различного сечения.

За пушками, ЭОС которых формирует аксиальный пучок электронов, укоренилось название аксиальных. Пушки, ЭОС которых формирует ленточный пучок, называются *щелевыми* или *плосколучевыми*. Сочетание нескольких щелевых пушек, симметрично ориентированных относительно поверхности обработки, получило название *радиальной* электронной пушки.

Ток пучка, формируемого ЭОС, подчиняется закону

$$I = pU^{3/2},$$

где U — ускоряющее напряжение, приложенное между анодом и катодом, В; p — первеанс системы, $А/В^{3/2}$.

Выражение справедливо для ЭОС с любой формой электродов при условии, что ток эмиссии катода заведомо больше тока, определяемого этим выражением. Первеанс определяется геометрией электродов и не изменяется при пропорциональном изменении размеров системы.

Мощность пучка определяется выражением

$$P = pU^{5/2}.$$

Для уменьшения вероятности электрических пробоев в ЭОС пушки давление в зоне уско ения должно быть не более $5 \cdot 10^{-2}$—$5 \cdot 10^{-3}$ Па. Большее давление относится к щелевым ЭОС, меньшее — к высокопервеансным аксиальным. В связи с этим конструкции пушек для проведения технологических процессов при давлениях выше указанных должны обеспечивать поддержание давления в камере ЭОС $5 \cdot 10^{-2}$ Па и менее путем индивидуальной откачки камеры ЭОС и проведения пучка в технологическую камеру через лучевод.

Пушки с индивидуальной откачкой камеры ЭОС устойчиво работают до давлений в рабочей камере примерно 10^{-1} Па. Для увеличения диапазона устойчивой работы пушки при более высоких давлениях вводятся дополнительные промежуточные системы вакуумной откачки из лучевода пушки.

В *электронных пушках с кольцевым катодом* (пушки автоэлектронного нагрева) анодом является подвергаемый нагреву материал, система проведения электронного пучка отсутствует. Ускоряющее (анодное) напряжение в пределах 10—15 кВ. Такие пушки благодаря простоте их конструкции использовались в первых электронно-лучевых установках различного технологического назначения. Однако в связи с малым сроком службы катода и большой чувствительностью к газовыделениям из нагреваемого материала они не получили промышленного развития и в настоящее время практически не используются, за исключением установок для зонной очистки и некоторых специальных случаев.

У *радиальных пушек* ЭОС формирует клинообразный расходящийся пучок электронов. Угол расходимости пучка на выходе из анодной щели составляет около 10°. Катод выполнен прямоугольной формы из вольфрамовой проволоки, нагреваемой проходящим по ней током. Несколько ЭОС (от трех до десяти), расположенных обычно по кругу и заключенных в вакуумную полость с индивидуальной откачкой, составляют радиальную пушку. Ускоряющее напряжение пушек 10—20 кВ. Цепи накала катодов всех ЭОС соединены последовательно и питаются от общего источника питания.

Для технологических процессов, связанных с большим парциальным давлением паров металла в технологической камере и интенсивным газовыделением из расплава, рационально использовать *плосколучевые пушки с разворотом луча*. Широкое применение подобные пушки нашли в установках для вакуумного нанесения покрытий благодаря возможности освободить пространство над поверхностью расплава от элементов конструкции пушки.

В зависимости от типа ЭОС и системы магнитного разворота пучка, их взаимной компоновки возможны различные схемы электронных пушек.

Электронно-лучевые пушки *аксиального типа* лучше других соответствуют самым разнообразным требованиям различных технологических про-

цессов. Устойчивая работа в широком диапазоне давлений в технологической камере (до 1 Па); возможность развертки электронного пучка практически по любому закону, позволяющая получить желаемое распределение температур по поверхности нагрева; глубокая регулировка мощности; разнообразие схем взаимной компоновки источника и объекта нагрева обеспечили пушкам этого типа, несмотря на относительную сложность их конструкции, наиболее широкое промышленное применение. Как правило, аксиальные пушки строятся по многокамерному принципу, при котором ЭОС и элементы системы проведения пучка размещаются в отдельных последовательно расположенных камерах с индивидуальным вакуумированием, и отличаются разнообразием конструктивных исполнений. Наиболее характерным представителем этого класса пушек является созданная в ВЭИ серия, включающая два типоразмера — ЭПА-60 и ЭПА-300 (рис. 60.52).

Электронные пушки серии ЭПА — это объединенные в одном агрегате источник электронов с термокатодом; система вакуумного перепада с затвором, отсекающим в необходимых случаях катодную камеру пушки от технологического объема установки; системы фокусировки и отклонения электронного пучка и защитный кожух с кабельным вводом. Охлаждение находящихся под высоким потенциалом деталей — воздушное. Пушка ЭПА-60 имеет одну ступень дифференциальной откачки и одну магнитную линзу, а ЭПА-300 — по две. Мощность пучка регулируется путем изменения тока эмиссии катода или ускоряющего напряжения. Точность установки и поддержания заданного уровня мощности ±1%. Широкий диапазон рабочих мощностей — 5—250 кВт у ЭПА-60 и 15—600 кВт у ЭПА-300 — позволяет выполнять одной пушкой как интенсивный нагрев, так и тонкие технологические операции, повышает функциональную взаимозаменяемость пушек разных номиналов и обеспечивает возможность обойтись этими двумя типоразмерами пушек при создании практически любых технологических электронно-лучевых установок.

Для питания пушек серии ЭПА применяются созданные для этих целей источники типа В-ТПЕ-2-30к и В-ТПЕ-8-30к номинальной мощностью 60 и 250 кВт соответственно. Источники питания допускают параллельное соединение и имеют входы для подключения микропроцессорной системы управления технологическим процессом. Выпрямители В-ТПЕ содержат три источника напряжений: ускоряющего, прямого и электронного накалов. В первичной цепи каждого источника установлен тиристорный регулятор, обеспечивающий регулирование выходного напряжения, поддержание его на заданном уровне с точностью ±1 %, отключение при пробоях в пушке и автоматическое повторное включение. Источник В-ТПЕ-2-30к имеет сухой трансформатор высокого напряжения. Трансформатор-выпрямитель источника В-ТПЕ-8-30к размещен в масляном баке. В комплект источников входит выносной пульт, размещаемый на рабочем месте оператора.

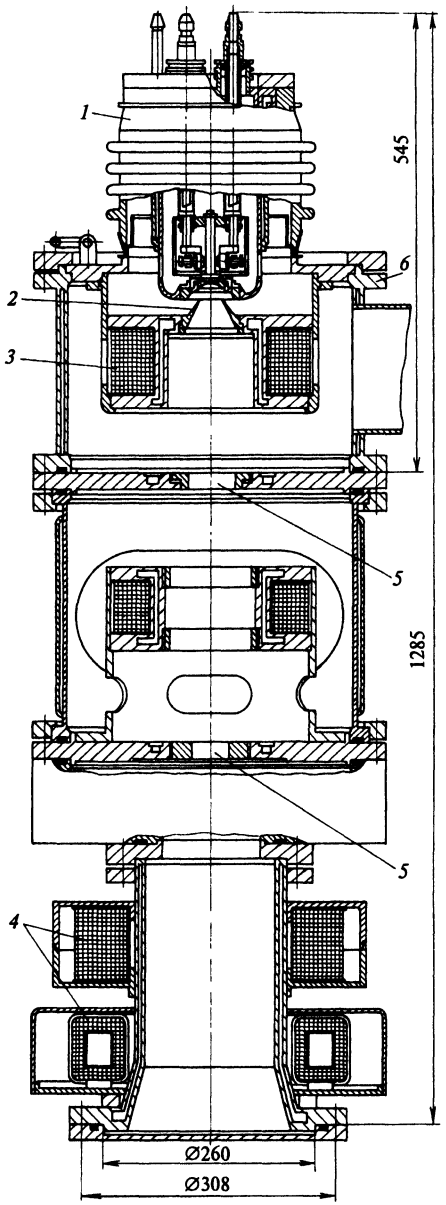


Рис. 60.52. Аксиальная электронная пушка ЭПА-300:

1 — катодный узел; *2* — анод; *3* — система фокусировки; *4* — система отклонения; *5* — система вакуумного перепада с затвором; *6* — защитный кожух с кабельным вводом

Для распределения мощности по объектам нагрева и питания магнитных линз пушки ЭПА комплектуются блоком управления электронным лучом типа БУЭЛ, одинаковым для обоих типов пушек. Блок содержит два стабилизированных источника питания магнитных линз, источник питания системы статического отклонения пучка, генераторы разверток, коммутатор и индикатор. Генератор развертки обеспечивает перемещение пучка по кругу, эллипсу или линии с произвольной ориентацией осей, а коммутатор — распределение мощности пучка по двум объектам нагрева при любом сочетании указанных фигур и соотношении времени нахождения на каждом из объектов от 1 : 100 до 100 : 1. Максимальный угол отклонения пучка от оси пушки составляет 45° по всем направлениям. Габаритные размеры БУЭЛ 492×286×450 мм позволяют располагать его непосредственно на пульте оператора.

Электронно-лучевое оборудование для технологических целей, как правило, узко специализировано по назначению и производится в виде единичных образцов или мелких серий. Стремление наилучшим образом учесть особенности того или иного технологического процесса приводит к большому разнообразию конструктивных исполнений. Типажных или размерных рядов на это оборудование не существует. Однако все большее распространение получает модульный (блочный) принцип, когда одни и те же электронные пушки с системами питания и управления, плавильные модули, испарительные блоки, вакуумные системы и др. используются при создании различных печей и установок.

УСТАНОВКИ ПЛАЗМЕННОГО НАГРЕВА

Принцип действия и области применения плазменного нагрева. Низкотемпературная плазма — газообразное вещество, содержащее положительно и отрицательно заряженные частицы — ионы и электроны [60.25]. Плазма квазинейтральна, т.е. в достаточно большом объеме электрические заряды обоих знаков компенсируются.

Плазма называется термической, или изотермической, если она находится в состоянии термодинамического равновесия. В этом случае плазма имеет определенную температуру, одну и ту же для всех ее компонентов. Получить в лабораторных или промышленных условиях изотермическую плазму довольно сложно, и на практике приходится иметь дело с плазмой, находящейся в состоянии локального или частичного локального термодинамического равновесия [60.26—60.28]. В плазме, находящейся в этом состоянии, нарушается баланс процессов фотоионизации и фоторекомбинации частиц — число актов испускания фотонов превышает число актов поглощения. Остальные элементарные процессы приблизительно сбалансированы. Параметры такой плазмы определяются ее составом и локальной температурой, хотя электронная температура всегда будет несколько превосходить температуру тяжелых частиц. В состоянии локального термодинамического равновесия находится плазма сильноточных дуг при нормальном давлении. Разницу электронной и ионной температур можно оценить по формуле

$$\frac{T_e - T_g}{T_e} = \frac{M}{m_e}\left(\frac{\lambda_e e_0 E}{3kT_e}\right)^2,$$

где T_e, T_g — температуры электронов и тяжелых частиц; m_e, e_0, λ_e — масса, заряд и длина свободного пробега электронов; M — масса иона; k — постоянная Больцмана; E — напряженность электрического поля.

Для сильноточных дуг $(T_e - T_g)/T_e$ составляет несколько процентов.

При частичном локальном равновесии состояние плазмы характеризуется двумя температурами — электронной T_e и ионной T_t (последняя примерно равна температуре нейтральных атомов T_g).

В плазменных нагревательных устройствах достигается температура $(10—20)10^3$ К для плазмы, находящейся в состоянии локального термодинамического равновесия; для неравновесной, находящейся в частичном равновесии плазмы электронная температура может достигать $(30—50)10^3$ К. Образование заряженных частиц происходит в основном за счет термической ионизации, нагрев газа — за счет энергии, выделяющейся при прохождении через газ электрического тока.

Устройства, позволяющие стационарно получать плазму с указанными выше температурами, называются *плазмотронами*.

По назначению плазмотроны могут быть разделены на два типа.

Первый тип — это плазмотроны, в которых полезным является только теплота, переданная потоку плазмы. К ним относятся высокочастотные и сверхвысокочастотные плазмотроны, а также электродуговые плазмотроны постоянного и переменного тока с дугой, горящей между электродами плазмотрона. В дальнейшем мы их будем называть *струйными плазмотронами*. В них дуга горит внутри плазмотрона, рабочие электроды являются элементом конструкции и внутри плазмотрона замыкается электрическая цепь. Эти плазмотроны используются для нагрева газов.

Второй тип — это плазмотроны, в которых полезной теплотой является теплота, выделяемая в анодном пятне (при переменном токе — в одном из опорных пятен) дуги, а также в большей или меньшей степени энергия излучения. В этих плаз-

мотронах одно из опорных пятен дуги вынесено на нагреваемое изделие, которое таким образом включается в электрическую цепь. Такие плазмотроны мы в дальнейшем будем называть *плавильными*.

Электротермические печи и устройства, использующие в качестве источника энергии плазмотроны различного типа, называются *плазменными печами* и *устройствами*.

Развитие плазменного электротермического оборудования связано с рядом преимуществ этого способа нагрева:

1) возможностью обеспечения большей по сравнению с иными методами экологической чистоты производства;

2) возможностью высокой концентрации вводимой мощности в малом объеме и получения высоких температур;

3) возможностью использования низкокачественного сырья;

4) малой инерционностью процесса, гибкостью управления, легкостью автоматизации.

В то же время ряд факторов серьезно сдерживает расширение области применения плазменного нагрева. Главными из этих фактором являются:

1) высокая стоимость комплектующего оборудования;

2) относительно невысокий ресурс работы катодов и анодов плазмотронов;

3) невысокая единичная электрическая мощность созданных к настоящему времени плазмотронов.

Из многообразия областей применения плазменных установок можно выделить следующие:

1) установки для осуществления процессов химической технологии;

2) установки для получения порошков, в том числе ультрадисперсных;

3) плазменные установки для плавки металлов и плавки керамики;

4) установки поверхностного нагрева для термообработки;

5) плазменные рудно-термические установки.

Особенности горения дуги в потоке газа. Электрическая дуга в плазмотроне в отличие от свободногорящей всегда находится в условиях вынужденной конвекции. В плазмотронах дугу сжимают, помещая ее в узких каналах и диафрагмах и обдувают интенсивными потоками газов и жидкостей. Пространственное положение столба дуги в разрядной камере большинства типов плазмотронов определяется и стабилизируется внешним силовым воздействием (газового потока, магнитного поля) и геометрией разрядной камеры. Взаимодействие электрической дуги с газовым потоком и стенками разрядной камеры плазмотрона происходит следующим образом. Газ поступает в канал, взаимодействует с дугой, горящей между катодом и анодом, и вытекает через сопло, которым в простейшем случае может быть один из электродов (обычно анод).

Условно столб дуги может быть разделен на три участка: начальный, цилиндрический и выходной.

Характерными отличиями начального участка служат уменьшающаяся напряженность электрического поля в столбе и возрастающие поперечные размеры столба. На начальном участке дуга постепенно расширяется до тех пор, пока ее «граница» встретится с холодным пограничным слоем, образующимся на стенке канала. Под «границей» в теории взаимодействия дуги с пристеночным пограничным слоем подразумевается поверхность, находящаяся на некотором расстоянии от дуги, где происходит резкое понижение температуры и вязкости плазмы. При неизменном диаметре канала и расходе газа увеличение тока проводит к расширению «границы» дуги и, следовательно, к уменьшению длины начального участка; если же неизменны диаметр канала и ток дуги, то увеличение расхода газа ведет к сжатию дуги и увеличению длины начального участка. Длина этого участка может быть рассчитана по полуэмпирическим формулам, которые используются при выборе длины выходного электрода плазмотрона и в других задачах.

После встречи холодного пристеночного слоя с «границей» дуги последняя начинает подвергаться турбулентным возмущениям и разрушению, начинается интенсивное перемешивание потока, ведущее к выравниванию поля температур. Длина второго участка может составлять десятки диаметров канала. Амплитуда колебаний, их частота на этом участке нарастают вниз по потоку. На этом участке растет напряженность электрического поля столба дуги, что связано с интенсификацией теплообмена. Увеличивается тепловой поток в электрод.

В плазмотронах с самоустанавливающейся длиной дуги в начале второго участка происходит явление повторяющегося пробоя между столбом дуги и стенкой канала, который является одним из электродов. Это явление часто называют «крупномасштабным шунтированием».

Третий участок — зона полностью развитого турбулентного течения. В плазмотронах с гладкой поверхностью канала обнаружить этот участок трудно вследствие весьма протяженного второго участка, однако в плазмотронах с распределенной подачей газа в канал он легко обнаруживается благодаря сильному сокращению предыдущих участков. Напряженность электрического поля здесь постоянна и в несколько раз выше, чем на первом участке.

Следует отметить, что такая картина справедлива лишь для струйных плазмотронов, в которых дуга горит в канале плазмотрона.

В плавильных плазмотронах дуга горит в свободном пространстве и стабилизирована продольным потоком газа, большая часть которого подается не через плазмотрон, а засасывается на начальном участке дуги из окружающей ее атмосферы.

Плазма струйных и плавильных плазмотронов нормального давления находится в состоянии локального термодинамического равновесия. В дуге вакуумных плавильных плазмотронов, работающих в диапазоне давлений 1,0—10^2 Па, плазма находится в состоянии частичного локального термодинамического равновесия.

Струйные плазмотроны, которые применяются для нагрева газов, могут быть разделены на две группы, отличающиеся способом стабилизации дуги: плазмотроны с продольно обдуваемой дугой — линейные; плазмотроны с поперечно обдуваемой дугой — коаксиальные. Фактически в любом струйном плазмотроне есть оба участка и речь идет об участке дуги, играющем основную роль.

Плазмотроны линейной схемы, в свою очередь, делятся на два типа: плазмотроны с самоустанавливающейся длиной дуги и плазмотроны с фиксированной длиной дуги, причем фиксация длины дуги может осуществляться или использованием электрода с уступом, или с помощью изолированной межэлектродной вставки между катодом и анодом.

Выбор конструктивной схемы плазмотрона для каждого конкретного случая определяется целым рядом факторов: мощностью, родом плазмообразующего газа, энтальпией (температурой) газа, требованием к потоку газа, предельно допустимым загрязнением материалами электрода, степенью неоднородностей параметров струи, минимально допустимым ресурсом непрерывной работы, условиями эксплуатации и т.д.

Так как ресурс работы определяется ресурсом электродов, а последний зависит от тока, то для увеличения мощности плазмотрона целесообразно идти по пути увеличения напряжения. Однако в ряде случаев, например в условиях рудовосстановительного производства, поднимать напряжение на электродах выше 5—6 кВ нежелательно и приходится идти по пути повышения тока.

Методики расчета плазмотронов, пригодной для практических целей, пока не существует. В ряде организаций разрабатываются методы числовых расчетов плазмотронов, но каких-либо законченных материалов нет. Поэтому при разработке плазмотронов широко используются методы теории подобия, позволяющие результаты, полученные экспериментально на одной установке, распространить на целый ряд аналогичных устройств. Схемы промышленных струйных плазмотронов представлены на рис. 60.53.

Наиболее полно исследован плазмотрон с самоустанавливающейся длиной дуги. Такие плазмотроны выполняются как для постоянного, так и для переменного тока (в последнем случае оба электрода медные). Дуга горит в гладком канале, куда тангенциально подается плазмообразующий газ. Образующийся газовый вихрь сносит опорное пятно дуги (в плазмотронах постоянного тока — анодное) вниз по потоку. При определенной длине дуги, когда она превышает длину начального участка, происходит пробой пристеночного холодного слоя газа — крупномасштабное шунтирование и длина дуги как бы сокращается.

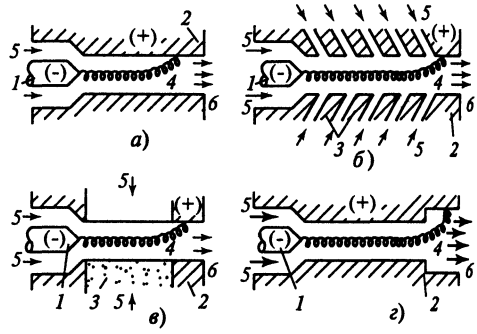


Рис. 60.53. Схемы промышленных струйных плазмотронов:

а — плазмотрон с самоустанавливающейся длиной дуги, *б* — плазмотрон с межэлектродной металлической водоохлаждаемой вставкой; *в* — плазмотрон с межэлектродной пористой вставкой; *г* — плазмотрон с уступом; *1* — катод; *2* — анод; *3* — межэлектродная изолированная вставка; *4* — столб дуги; *5* — ввод плазмообразующего газа; *6* — поток плазмы (нагретого теплоносителя)

Чем выше ток, тем раньше происходит пробой и эффективная длина дуги становится меньше. Поэтому плазмотрон имеет крутопадающую вольтамперную характеристику (ВАХ). Такие ВАХ плазмотрона ужесточают требования к источнику питания и затрудняют управление (регулирование мощности) плазмотроном, не позволяя поднять напряжение при заданном токе и расходе газа.

Эти недостатки устраняются в плазмотронах с фиксированной длиной дуги.

В плазмотроне со ступенчатым анодом анодное пятно располагается за уступом анода. За таким уступом вследствие развитых турбулентных пульсаций создаются благоприятные условия для пробоя и шунтирования дуги.

Более совершенными, но и более сложными конструктивно являются плазмотроны с изолированной межэлектродной вставкой.

Из довольно многочисленных схем плазмотронов с поперечно обдуваемой дугой наиболее характерными являются два типа: коаксиальный плазмотрон (рис. 60.54) и плазмотрон с кольцевыми (трубчатыми) электродами (рис. 60.55). Коаксиальный

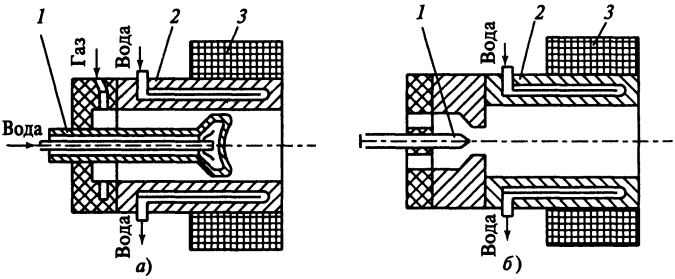


Рис. 60.54. Коаксиальный плазмотрон:

а — с центральным водоохлаждаемым электродом; *б* — с термокатодом; *1* — центральный электрод; *2* — выходной (внешний) электрод; *3* — соленоид

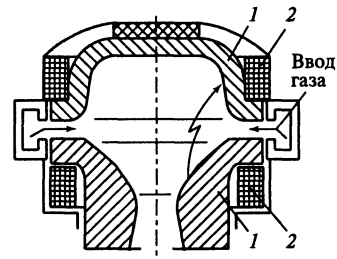


Рис. 60.55. Плазмотрон с кольцевыми (трубчатыми) электродами:

1 — электрод; *2* — соленоид

плазмотрон (рис. 60.54, *а*) имеет два водоохлаждаемых электрода и может использоваться для любых газов, в том числе и окислительных. Работает как на постоянном, так и на переменном токе. Его недостатком является сравнительно короткая дуга. Поэтому наращивание мощности здесь возможно главным образом за счет увеличения тока, т.е. снижения ресурса электродов. Если центральный водоохлаждаемый электрод заменить на тугоплавкий, то получим схему вырожденного коаксиального плазмотрона, или так называемого торцевого плазмотрона (рис. 60.54, *б*). Этот плазмотрон пригоден для неокислительных газов и не может работать на переменном токе; однако он позволяет получить существенно большие напряжения и значительно лучший КПД по сравнению с коаксиальным.

В тех случаях, когда не опасно загрязнение плазмы графитом, могут применяться плазмотроны с графитовыми электродами, которые по мере эрозии специальным механизмом наращиваются и перемещаются, поэтому сохраняется постоянной длина дугового промежутка.

В *плавильных* плазмотронах электрическая дуга горит между электродом плазмотрона и расплавляемым металлом. Плавильные плазмотроны постоянного тока, предназначенные для работы в диапазоне давлений 10^5—$3 \cdot 10^3$ Па, имеют стержневой катод, выполняемый из легированного вольфрама, и сопло. Сопло формирует поток плазмообразующего газа, а также служит анодом при включении плазмотрона (зажигании «дежурной» дуги). Ниже приводятся основные параметры плавильных плазмотронов нормального давления:

Ток, кА	1	3	6	10
Диаметр катода, мм	10	16	23	36
Расход аргона, 10^{-3} кг/с	1	2	4	8

Схема катодного узла плазмотрона дана на рис. 60.56.

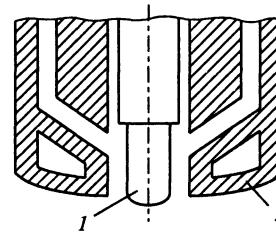


Рис. 60.56. Катодный узел плавильного плазмотрона:

1 — катод; *2* — сопло

Основная причина выхода из строя плавильных плазмотронов — шунтирующие дуги, горящие параллельно основной дуге по цепи катод—сопло—расплавляемый металл. При токе этих дуг в несколько сотен ампер плазмотрон может быстро выйти из строя.

Для работы на переменном токе могут использоваться плазмотроны постоянного тока, но при значительно меньших (в 5—8 раз) токовых нагрузках. При этом стойкость вольфрамового электрода существенно снижается. Для увеличения мощности и ресурса плазмотрона используется схема с «дежурной» дугой. Плазмотрон имеет основной кольцевой и вспомогательный стержневой электроды из вольфрама, между которыми горит маломощная дуга постоянного тока. Эта дуга создает область ионизации вблизи рабочей поверхности основного электрода, что обеспечивает устойчивое беспаузное горение основной дуги переменного тока. Бóльшая часть аргона направляется в зазор между кольцевым электродом и соплом, дополнительный расход (15—20 % основного) — в зазор между кольцевым и стержневым электродами.

Конструктивные элементы плазмотронов. Катоды плазмотронов осуществляют токоперенос от источника питания к плазме разряда. Токоперенос поддерживается электронами эмиссии и сопровождается эрозией катода в основном за счет испа-

рения. Большая часть испарившихся атомов ионизируется в прикатодной плазме и в виде ионов возвращается на поверхность катода, ослабляя эрозию (явление рециклинга).

Катоды различаются по типу используемых материалов, составу окружающей их газовой атмосферы, конструктивному исполнению (табл. 60.41) [60.26, 60.27].

Легированные катоды из вольфрама содержат небольшие (1,5—3 %) добавки оксидов лантана, тория или иттрия, повышающие их эмиссионную способность. В результате той же плотности тока эмиссии можно достигнуть при меньшей температуре и, следовательно, при меньшем износе вольфрамовой основы катода.

Графитовые расходуемые катоды — это катоды для которых необходимы непрерывная подача и периодическое наращивание стержневых электродов. Катодный узел плазмотрона содержит устройство перемещения, наращивания, центровки, уплотнения электродов, подвижный токоподвод и систему контроля положения рабочего торца графитового стержня.

Регенерируемые графитовые катоды работают в режиме постоянного возобновления эродирующего эмиссионного слоя. Для компенсации эрозии используют поток ионов углерода из прикатодной плазмы.

Термохимические катоды на основе циркония или гафния получили широкое распространение в воздушных плазмотронах. В кислородсодержащей среде при высоких температурах поверхность этих металлов покрывается оксидной пленкой, которая защищает катод от дальнейшего окисления.

Легкоплавкие катоды из меди или стали работают в режиме автоэлектронной эмиссии, характеризующейся локальным перегревом поверхности вплоть до температуры кипения и значительной эрозией.

Межэлектродная вставка (МЭВ) — участок разрядной камеры плазмотрона между катодом и анодом, изолированный от них. Назначение МЭВ состоит в повышении напряжения на дуге и увеличении таким образом мощности плазмотрона. Используется несколько видов МЭВ.

Простейшая несекционированная МЭВ представляет собой водоохлаждаемую втулку с внутренним цилиндрическим каналом. Поток плазмообразующего газа разделяется на две части. Одна часть подается в МЭВ, вторая — в зазор между МЭВ и анодом. Для удержания дуги на оси канала газ подается тангенциально и образует в канале вихрь. Другими видами являются: секционированная МЭВ с распределенной подачей газа между неизолированными секциями; пористая металлическая МЭВ, представляющая собой канал с проницаемыми стенками, через которые подают плазмообразующий газ; пористая изоляционная МЭВ, конструктивно повторяющая предыдущую схему, в качестве материала проницаемой стенки используют пористую высокотемпературную керамику; секционированная МЭВ с проницаемыми стенками, представляющая собой комбинацию из двух рассмотренных выше схем.

Плазменные плавильные электропечи — это печи с керамическим тиглем, которые подобно обычным ДСП имеют футерованную камеру, закрытую сводом. Плазмотроны (один или несколько) вводятся в печное пространство через свод или наклонно через стены. В печах постоянного тока анодом служит ванна жидкого металла, ток к которой подводится через подовый электрод. Печи трехфазного тока не имеют подового электрода, число плазмотронов кратно трем, а ванна металла является нулевой точкой схемы (рис. 60.57).

Плазменные печи, в отличие от ДСП, работают при относительно длинных дугах (в период расплавления длина 1,0—1,5 м; после расплавления длина дуги уменьшается в 2—3 раза). Поэтому футеровка стен и свода должна иметь высокую огнеупорность и нагревостойкость.

Узел ввода плазмотрона в печь выполняется герметичным, печь уплотнена, в ней поддерживается небольшое избыточное давление. Подовый электрод выполняется обычно из меди с интенсивным водяным охлаждением и надежной сигнализацией, срабатывающей при износе электрода. Срок служ-

Таблица 60.41. **Технические данные термоэмиссионных катодов**

Катод	Материал	Среда	Рабочий ток, кА
Легированный:	Вольфрам	Инертные газы, водород, азот	
стержневой			До 10
составной			0,5—0,8
револьверный			0,5—0,8
Расходуемый углеродный	Графит	Инертные газы, азот	До 2
Регенерируемый (самовосстанавливающийся)	Графит	Углекислота, углеводороды окислитель CO_2, O_2, H_2O, воздух	До 1,5
Термохимический:			
составной	Цирконий	Кислород, азот	0,2—0,3
с расщепленной дугой	Гафний	Воздух, пар	До 1

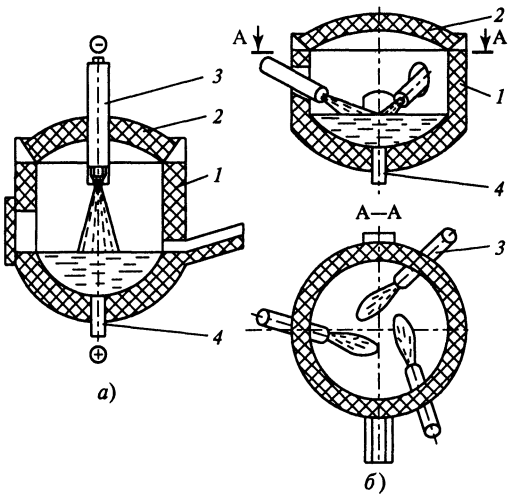


Рис. 60.57. Печь постоянного тока с керамическим тиглем:

а — с одним вертикально расположенным плазмотроном; *б* — с тремя наклонно расположенными плазмотронами; *1* — футеровка; *2* — свод; *3* — плазмотрон; *4* — подовый электрод

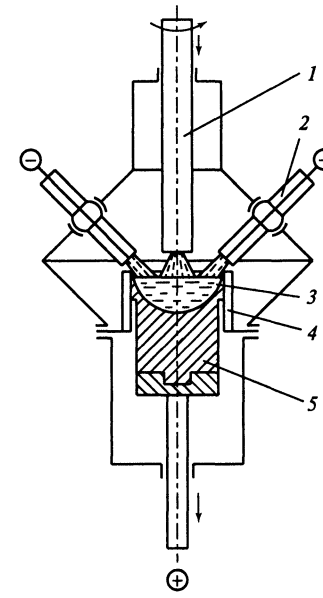


Рис. 60.58. Плазменная печь для плавки в кристаллизатор:

1 — переплавляемый электрод; *2* — плазмотрон; *3* — ванна расплавленного металла; *4* — кристаллизатор; *5* — слиток

бы электрода должен быть не меньше срока службы подины.

Плазменная печь имеет специальную систему подачи рабочего газа в плазмотрон. Обычно таким рабочим газом является аргон.

В сравнении с трехфазной электродуговой печью переменного тока стабильная работа плазмотронов постоянного тока позволяет существенно понизить уровень шума.

Основным преимуществом плазменных плавильных печей по сравнению с электродуговыми является более высокий выход годного металла и усвоение легирующих элементов: марганца, никеля и молибдена — на 1 %, хрома — на 2 %, железа — на 2—3 %.

Печи плазменного переплава выполняются как постоянного, так и переменного тока, в этом случае количество плазмотронов должно быть кратно трем (рис. 60.58).

Следует отметить, что в последние годы плазменные печи в черной металлургии вытеснены дуговыми печами постоянного тока.

Значительно большее распространение получили переплавные плазменные печи в цветной металлургии, в первую очередь для повторного использования титановых отходов (скрапа, стружки) и переплава губки, а также для переплава вольфрама и молибдена.

Некоторое развитие получили печи комбинированного нагрева, в которых плазменный нагрев сочетается с пламенным и индукционным.

В рудовосстановительных печах применение плазмы возможно в трех направлениях:

1) установка дополнительных струйных плазмотронов мощностью 3—10 МВт для интенсификации процессов термоподготовки и восстановления руд;

2) применение струйных плазмотронов мощностью 0,3—1,0 МВт для нагрева расплавов при выпуске или в ковше и открытия сливных отверстий;

3) замена графитированных электродов на плазмотроны в рафинировочных печах.

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ИНДУКЦИОННЫЕ ПЛАЗМОТРОНЫ

Высокочастотный индукционный (ВЧИ) плазмотрон — это устройство, позволяющее получать при атмосферном давлении плазму с температурой 7000—11 000 К. Мощность современных ВЧИ-плазмотронов — от единиц до тысяч киловатт. Нагревание плазмы в ВЧИ плазмотроне представляет собой хорошо известное явление электромагнитной индукции, т.е. индукционного нагрева проводящей среды в переменном (высокочастотном) электромагнитном поле индуктора. Проводящей средой в данном случае является ионизованный газ — плазма. Высокочастотное переменное магнитное поле индуктора индуцирует в плазме кольцевой ток. Безэлектродная кольцевая форма тока, отсутст-

вие электродов и определяют чистоту плазмы в таком плазмотроне. Для образования внутри плазмотрона проводящей среды при атмосферном давлении необходимо создать предварительную ионизацию газа от постороннего источника. Такая предварительная ионизация называется «зажиганием» ВЧИ-плазмотрона.

После зажигания в разрядной камере ВЧИ-плазмотрона возникает самоподдерживающийся стационарный безэлектродный индукционный разряд при атмосферном давлении. При продувке газа через разрядную камеру, обычно имеющую форму цилиндра, на выходе плазмотрона можно получить высокотемпературную струю. Высокочастотный индукционный плазмотрон обладает практически неограниченным ресурсом работы в любой газовой среде. Различают ВЧИ-плазмотроны по типу разрядных камер и по способу стабилизации в камере плазменного сгустка.

Хорошо изучены и конструктивно разработаны два основных способа газовой стабилизации ВЧИ-плазмы: аксиальным потоком и вихревым потоком (рис. 60.59).

Для целого ряда плазмотехнологических процессов вихревой способ газовой стабилизации нежелателен, требуется аксиальная стабилизация. Поэтому современные плазмотроны комплектуются, как правило, сменными газоформирователями, позволяющими обеспечивать вихревую и аксиальную газовую стабильность.

Промышленный выпуск генераторов и ВЧИ-плазмотронов охватывает следующий диапазон частот и мощностей: 60—160 кВт на частоте 5,28; 1,76 МГц; 160—1000 кВт на частоте 0,44 МГц и 5 МВт на частоте 66 кГц.

Высокочастотные индукционные плазмотроны применяются в ряде технологических процессов: для получения особо чистого кварца и изделия из него; получение пигментных порошков, например диоксида титана; получения новых материалов (карбидов, нитридов и композитных материалов); плавки и очистки периклаза; получения ультрадисперсных порошков; оплавления и сфероидизация частиц тугоплавких оксидов; для спектрального анализа; разложения химически вредных веществ (плазменная экология); обработки поверхности изделий из огнеупоров и строительных материалов; физических и тепловых испытаний космических аппаратов. Высокочастотные индукционные плазматроны при пониженном давлении нашли широкое применение также и для обработки (микрошлифовки) поверхностей, нанесения тугоплавких и высокопрочных покрытий на изделия и инструмент, плазмохимического синтеза и разложения.

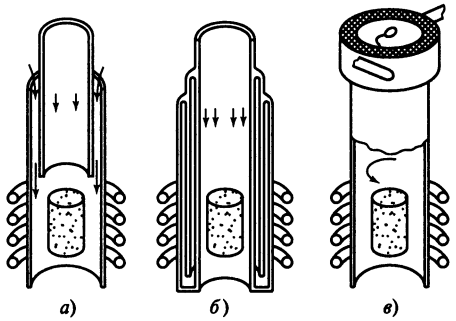


Рис. 60.59. Основные типы индукционных плазмотронов:

а и *б* — со стабилизацией аксиальным газовым потоком; *в* — со стабилизацией вихревым потоком

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ

Плазмохимические процессы осуществляются в потоке высокотемпературного газа [60.29]. Гидродинамика потока тесно связана с химическими превращениями в рассматриваемой системе. Совместное описание этих превращений во времени позволяет рассчитывать не только временное, но и пространственное распределение реагирующих компонентов в реакторе, необходимое для выбора его геометрических параметров.

Плазмохимический агрегат состоит, как правило, из плазменного генератора, реактора и закалочного устройства.

Плазмохимические реакторы — устройства, в которых перерабатываемое сырье взаимодействует с плазменным потоком, причем последний может быть не только теплоносителем, но и одним из реагентов. В зависимости от фазового состояния сырья реакторы делятся на две группы — для гомогенных и гетерогенных реакций. По способу взаимодействия исходного сырья с плазменным потоком наиболее распространены реакторы со струйной подачей сырья в плазменную струю и реакторы со струйной подачей плазмы в поток сырья.

Реактор для гомогенных реакций обычно состоит из смесителя и собственно реактора. В смесителе образуется гомогенная смесь реагентов при определенной температуре, задаваемой кинетическими и термодинамическими характеристиками процесса. Эта смесь и поток плазмы подаются в реактор. Здесь необходимо их перемешать так, чтобы молекулы были в непосредственном контакте, т.е. осуществить смешивание на молекулярном уровне. Характерное время химических реакций и процессов переноса массы и энергии при «плазменных» температурах сближается. Поэтому уже на этой стадии (при смешении) происходит значительная часть химических превращений [60.30]. В плазмо-

химической технологии, как правило, используют реакторы цилиндрической формы.

Известны три типа *гетерогенных плазмохимических процессов* с участием веществ в конденсированной фазе:

реагенты поступают в реактор в газовой фазе, продукты же находятся в конденсированной фазе;

продукты и реагенты находятся в конденсированной фазе;

в реактор вводятся реагенты в конденсированной фазе, а продукты образуются в газовой фазе.

Наличие в процессе веществ в конденсированной фазе значительно усложняет конструкцию реактора и технологическую реализацию процесса. В процессах первого типа смеситель устроен и работает так же, как и в гомогенных процессах. В процессах второго и третьего типов смеситель должен обеспечить равномерное распределение порошка сырья в плазменном потоке. Характерное время, необходимое для нагревания сырья до температуры плавления, испарения и фазовых переходов, пропорционально квадрату размера частиц и резко уменьшается с ростом температуры плазменной струи.

Гомогенные равновесные плазмохимические процессы чаще всего проводят в реакторах струйного типа. По способу перемешивания плазменного потока со струями сырья они делятся на прямоточные и со встречными струями. Сырье в реактор вводят поперечными струями, спутно-вихревыми и встречно-вихревыми потоками через отверстия, расположенные у верхнего среза реактора. Эта часть реактора служит смесителем. В реакторах со спутно-вихревой и встречно-вихревой подачей сырье подается тангенциально по отношению к плазменной струе. Коническая форма внутренней части реактора улучшает процесс смешения.

При необходимости зафиксировать целевой продукт и предотвратить обратные реакции применяется *закалка — принудительное охлаждение* продуктов реакции с такой скоростью, чтобы не успела пройти конверсия целевого продукта. Как правило, требуемая скорость закалки очень высокая — 10^6—10^8 К/с.

Выделение целевого продукта из потока, вытекающего из плазмохимического агрегата, производят известными методами. Если процесс гомогенный, то используют химические, диффузионные методы и т.п. В последнее время начали применять мембранные методы разделения. Для разделения дисперсной фазы и газа в гетерогенных процессах применяют тканевые, металлотканевые и металлокерамические пористые фильтры Для уменьшения нагрузки на фильтрующие элементы применяют вихревые аппараты: циклоны и вихревые пылеуловители. В этих устройствах дисперсные частицы перемещаются к стенкам аппарата и стекают

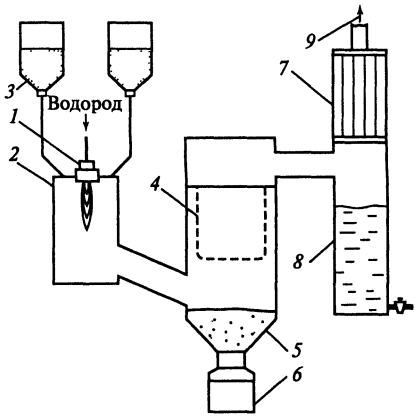


Рис. 60.60. Схема плазмохимической установки для синтеза высокодисперсных порошков:

1 — плазмотрон; *2* — реактор; *3* — дозатор; *4* — фильтр; *5* — осадительная камера; *6* — герметичный контейнер; *7* — холодильник; *8* — сборник конденсата; *9* — отходящие газы

по ним в сборник, а газ уходит на дальнейшую очистку на фильтрующих элементах [60.31].

В качестве примера типичной плазмохимической установки на рис. 60.60 показана схема установки, в которой реализуется гетерогенный процесс второго типа — восстановление порошка триоксида вольфрама в водородной плазменной струе. Сырье из дозаторов подается на срез дугового плазмотрона в струю водородной плазмы. В реакторе происходят перемешивание, нагрев, испарение сырья, реакция восстановления и конденсация паров вольфрама. Поток движется в зону охлаждения и фильтрации, где происходит выделение металлического вольфрама и его сбор в осадительной камере. Периодически осуществляется разгрузка порошка в промежуточную емкость, где он охлаждается и пассивируется. Из промежуточной емкости порошок также периодически выгружается в герметичную тару. Смесь водяного пара с водородом, оставшаяся после выделения целевого продукта, поступает в систему регенерации водорода [60.32].

ЛАЗЕРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Одним из новых способов термического воздействия на материалы является использование излучения, генерируемого устройствами, называемыми лазерами. Термин «лазер» является аббревиатурой английского выражения Light amplification by stimulated emission of radiation (усиление света в результате вынужденного излучения). Широкое применение лазеров в науке, технике и производстве обусловлено уникальными свойствами лазерного излучения: монохроматичностью, коге-

рентностью, высокими интенсивностью и направленностью [60.33].

Разработаны и внедрены в промышленность технологические процессы лазерной поверхностной обработки (термоупрочнение, наплавка, легирование), перфорации отверстий, резки, сварки, маркировки и др.

Все методы лазерной обработки характеризуются следующими особенностями:

возможностью варьирования в широких пределах плотности мощности излучения;

высокой локальностью воздействия и малой зоной термического влияния;

малыми деформациями деталей или практически их отсутствием;

высокой скоростью процессов и возможностью ее регулирования;

простотой управления лучом, его безынерционностью, возможностью разделения на несколько позиций для выполнения одинаковых или различных технологических операций;

возможностью обработки широкого круга материалов (тугоплавких, твердых, хрупких, химически активных, металлов и диэлектриков, гомогенных и композиционных);

возможностью обработки труднодоступных мест в деталях, сложноконтурных плоских и пространственных объектов;

отсутствием механических усилий в зоне воздействия луча, что позволяет обрабатывать нежесткие детали,

возможностью полной автоматизации процесса и встраивания лазеров в состав поточных и автоматических линий механической обработки, сварки, сборки,

экологической чистотой.

В работе лазера отражается тесная взаимосвязь корпускулярной и волновой природы света, причем генерационные процессы (возбуждение среды, поглощение и излучение света) связаны с квантово-механическими явлениями, а вывод и формирование излучения — с волновыми [60.34, 60.35].

Одно из свойств квантовой системы, состоящей из связанных микрочастиц (атом, ядро, электроны), заключается в том, что ее внутренняя энергия может принимать только определенные (разрешенные) дискретные значения $E_0, E_1, \ldots, E_n$ $(E_0 < E_1 < E_2 \ldots)$ и изменение энергии системы определяется ее переходами из одного устойчивого состояния в другое — с одного энергетического уровня на другой.

Взаимодействие излучения с веществом основано на дискретном переходе квантовой системы (атома, молекулы) с одного уровня на другой, причем при переходе с более высокого уровня энергии E_i на более низкий E_k система отдает энергию, равную $E_i - E_k$, а при обратном переходе поглощает ее.

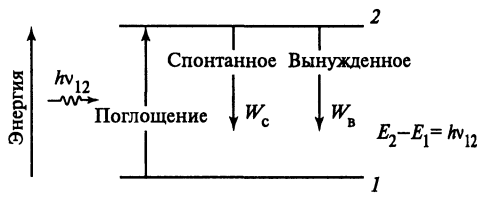


Рис. 60.61. Диаграмма энергетических уровней упрощенной атомной системы:

1, 2 — основное и возбужденное состояние соответственно

Разность энергий $\Delta E_{ik} = h\nu$, где h — постоянная Планка; ν — частота кванта.

Взаимодействие излучения с веществом в лазерной системе в основном сводится к поглощению, спонтанному и вынужденному излучению.

Спонтанные (самопроизвольные) процессы возбуждения происходят в нагретых телах и светящихся газах: нагревание или электрический разряд переводят часть атомов в возбужденное состояние, переходя в основное состояние, на нижние уровни энергии, они излучают свет (рис. 60.61) При спонтанных переходах атомы излучают свет независимо один от другого, поэтому спонтанное излучение некогерентно.

При вынужденном (индуцированном) излучении атомы излучают под действием внешнего электромагнитного поля, например световых колебаний, частота которых совпадает с одной из собственных частот энергетического спектра атома. Вынужденное излучение дает возможность управлять излучением атомов с помощью электромагнитных волн и таким образом усиливать и генерировать когерентный свет. Кроме указанного резонанса частот падающего и электрического спектра атома, необходимо обеспечить так называемую инверсию населенностей уровней, между которыми происходит разрешенный переход, т.е. превышение числа атомов на верхнем уровне над числом атомов на нижнем уровне. Этому процессу препятствует резонансное поглощение атомов, населяющих нижний уровень, а также спонтанное излучение, уменьшающее населенность верхнего уровня. Среднее время жизни атома в возбужденном состоянии составляет 10^{-8} с, что не позволяет накопить на верхних уровнях достаточное количество атомов.

Таким образом, в двухуровневой системе при возбуждении светом невозможно получить инверсию населенностей, а следовательно, генерацию и усиление излучения. Желаемого результата можно достигнуть при наличии промежуточного, метастабильного уровня с бóльшим временем жизни ($\tau \approx 10^{-3}$ с), который является накопителем возбужденных атомов.

Для создания лазерного устройства необходимо иметь специальную среду, в которой можно получить инверсию населенностей энергетических уровней, источник возбуждения для этой среды и колебательную систему (резонатор) для усиления и поддержания в ней колебаний определенного вида и вывода генерируемого излучения.

Классификация лазеров. Лазеры классифицируют по ряду признаков: по типу активного вещества (твердотельные, полупроводниковые, жидкостные и газовые), режиму работы (непрерывного действия, импульсного и импульсно-периодического действия), способу возбуждения (оптическая накачка, возбуждение электронным пучком, электрическим разрядом, смешанное и др.), модовому составу (одно- и многомодовые), назначению (технологические, медицинские, для связи и др.). Одна из возможных классификаций лазеров приведена на рис. 60.62.

Твердотельные лазеры. Этот вид лазеров широко распространен в технологии обработки материалов. Лазерные вещества твердотельных лазеров могут иметь кристаллическое или аморфное строение. Кристалл лазера состоит из основы — матрицы, в которую введен активатор, распределенный определенным образом в матрице. В качестве активаторов используют атомы актиноидов, редкоземельных элементов и переходных металлов. Излучательные переходы в этих атомах происходят между энергетическими уровнями электронов, расположенных на незаполненных внутренних электронных оболочках.

Лазерная генерация получена более чем на 50 кристаллах, однако для мощных технологических лазеров применяются рубин и гранаты. Наибольшее распространение в качестве лазерного кристалла получил иттрий-алюминиевый гранат (ИАГ) с неодимом. Благодаря удачному сочетанию спектроскопических и физико-механических свойств лазеры на иттриево-алюминиевом гранате являются наиболее приемлемыми для технологий, требующих высокой импульсной (с высокой частотой) и непрерывной мощности излучения. Рекордные

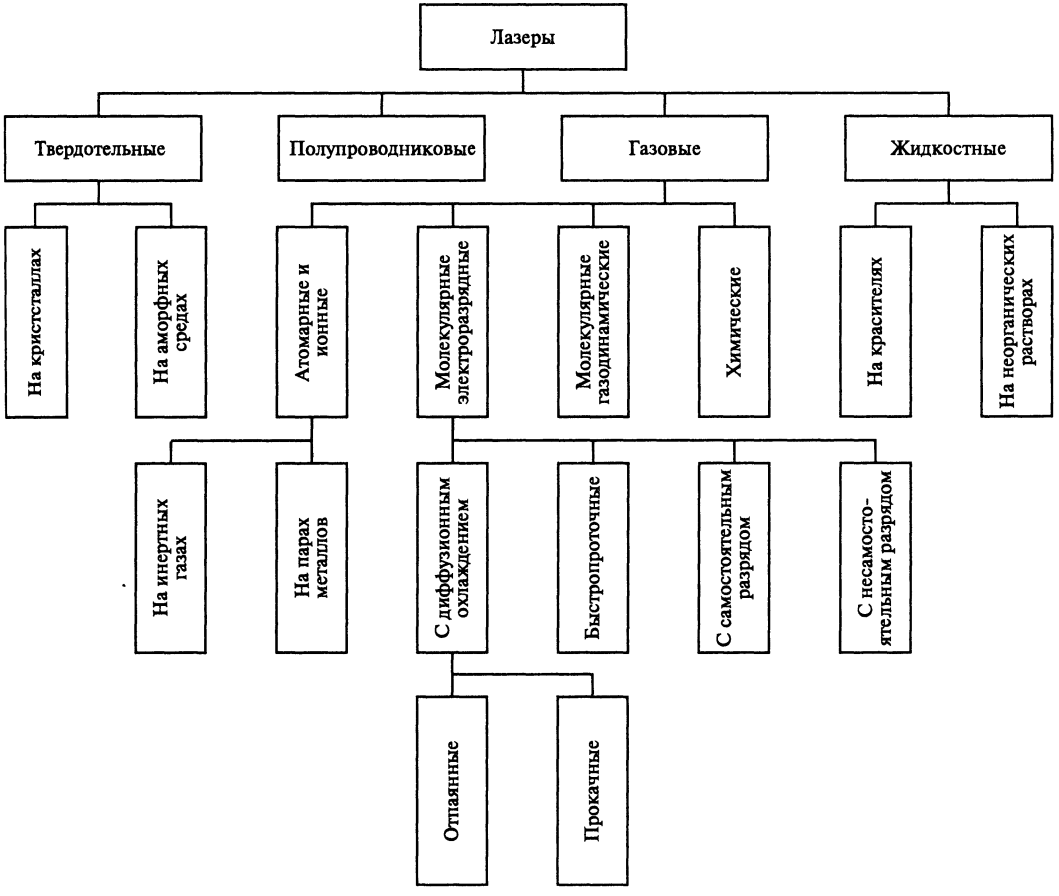


Рис. 60.62. Классификация лазеров

значения мощностей, полученные на этом типе лазеров, — 5 кВт.

В технологии также применяются лазеры на основе аморфных сред, в частности на стекле, активированном неодимом. У стекол как рабочего тела лазера имеется ряд преимуществ перед кристаллами: значительные концентрации в основе; невысокая стоимость материалов основы; возможность получения активных элементов любых размеров и формы; высокая оптическая однородность и малые потери излучения.

Недостатки стекла с неодимом как лазерного вещества — невысокие нагревостойкость и теплопроводность, что приводит при работе лазера в частотном режиме излучения к возникновению напряжений, которые могут разрушить стекло. Тем не менее от лазеров этого типа получены максимальные пиковые значения энергии.

Принципиальная схема твердотельного лазера показана на рис. 60.63. Отражатель с активным элементом и лампами накачки называют осветителем, а осветитель, заключенный в охлаждаемый корпус с устройствами крепления, — квантроном.

Конструкция осветителя существенно влияет на эффективность светопередачи и распределение поглощенной энергии в активном теле, от которых зависят угловые и энергетические характеристики генерируемого излучения.

Полупроводниковые лазеры. Полупроводниковые лазеры (ПЛ) являются наиболее компактными и эффективными типами лазеров. Их КПД теоретически может достигать значений, близких к 100 %, практически он составляет 40—50 %. Полупроводниковые лазеры могут работать как в импульсном, так и в непрерывном режимах. Способы возбуждения ПЛ: электронный пучок, оптическая накачка, прямое электрическое возбуждение (в сильном электрическом поле). В настоящее время получены выходные мощности излучения 1 кВт и выше, что позволяет рассматривать ПЛ как технологический инструмент.

Жидкостные лазеры. Жидкостные лазеры объединяют преимущества твердых и газообразных лазерных материалов.

Жидкие лазерные вещества делят на три группы. Первая — растворы органических комплексных соединений (хелаты европия). Они обладают большим коэффициентом поглощения света, поэтому их можно использовать в тонких слоях и капиллярах, а также малой фотохимической стойкостью. Свойства излучения этих лазеров близки к свойствам твердотельных лазеров.

Вторая группа жидкостей — растворы неорганических соединений редкоземельных элементов. Активным веществом в этих жидкостях является неодим, растворенный в жидкости в количестве нескольких процентов.

Лазеры на растворах органических красителей позволяют получить большую частоту следования импульсов (до 50 Гц) при высокой энергии излучения (2—3 Дж).

Газовые лазеры. Главное отличие активного вещества газового лазера от твердотельного заключается в малой плотности вещества, вследствие чего энергетический спектр активных частиц (нейтральных атомов, ионов, молекул) не искажается воздействием полей других атомов, и это определяет малую ширину энергетических уровней и линий генерации [60.36]. В газовых лазерах исключена возможность разрушения вещества лазерным излучением. В них сравнительно легко можно отвести теплоту путем удаления горячего газа из зоны возбуждения. Высокая оптическая однородность среды обеспечивает высокую монохроматичность и направленность излучения газового лазера. В то же время из-за малой плотности среды невозможно получить высокую удельную мощность излучения. Так, мощность излучения с единицы объема активной среды составляет в твердотельных лазерах 40—50, а в газовых 0,3—0,5 Вт/см^3.

Наиболее распространены следующие виды возбуждения рабочей среды газового лазера: электрический разряд, оптическая и тепловая накачка, химические реакции.

В целях повышения КПД газовых лазеров целесообразно использовать низкорасположенные энергетические колебательные уровни молекул, что реализовано в наиболее мощных лазерах на смеси диоксида углерода, азота и гелия, являющихся базой для целого ряда промышленных лазерных установок для резки, сварки, термообработки, легирования и установок, применяемых в микрометаллургии.

Успешное получение лазерной генерации в смеси азота и диоксида углерода обусловлено селективным возбуждением молекул диоксида углерода за счет столкновений второго рода с молекулами азота, находящимися на возбужденном колебательном уровне. Упрощенная схема уровней диоксида углерода и азота показана на рис. 60.64.

Заселение колебательных уровней E_3, E_4, E_5 в газовом разряде, благодаря которому в системе достигается инверсия населенностей, происходит под влиянием нескольких процессов. Первый из них — возбуждение молекул CO_2 при их соударениях с быстрыми электронами. Однако эффективность этого процесса низка по сравнению с возбуждением верхних уровней за счет столкновительных процессов II рода (передача энергии от молекулы N_2 к CO_2). При возбуждении под действием электронов до 30 % молекул азота переходят на уровень E_2. Совпадение энергетических уровней

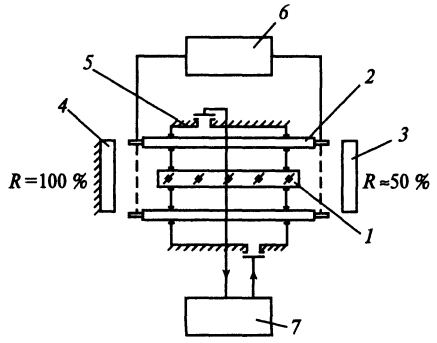


Рис. 60.63. Схема твердотельного лазера:

1 — активный элемент; *2* — лампа накачки; *3, 4* — зеркала резонатора; *5* — отражатель; *6* — блок питания и управления лампами накачки; *7* — блок охлаждения

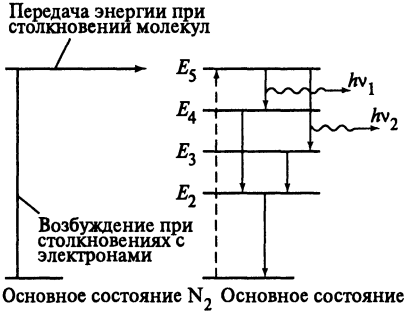


Рис. 60.64. Схема колебательных уровней молекул азота и диоксида углерода

азота и диоксида углерода практически идеальное (см. рис. 60.64).

Добавление в смесь гелия существенно увеличивает мощность генерации, так как он имеет высокую теплопроводность и ускоряет отвод теплоты из смеси, снижая ее температуру. Кроме того, гелий оказывает существенное влияние на скорость релаксации лазерных уровней, как верхнего, так и нижнего. Указанный механизм объясняет высокий КПД лазеров на диоксиде углерода, достигающий 30 % при теоретическом пределе 40 % [60.37, 60.38].

Электроразрядные лазеры на диоксиде углерода по способу поддержания электрического разряда разделяются на лазеры с самостоятельным разрядом и с несамостоятельным разрядом.

Лазеры с диффузионным охлаждением — лазеры с самостоятельным разрядом, в котором теплота из разряда выводится механизмом теплопроводности. В этих лазерах используется классическая схема тлеющего разряда в трубке. Газ медленно прокачивают через разряд в целях его непрерывного обновления, так как в разряде происходит разложение молекул и образование побочных неблагоприятных продуктов. Тепловой поток из разряда идет к стенкам трубки, которые охлаждают проточной водой или трансформаторным маслом. Одно из зеркал — непрозрачное, часто металлическое, другое — полупрозрачное, из специальных материалов (ZnSe, KCl, GaAs и др.).

Лазеры с диффузионным охлаждением с параллельным расположением трубок называют многолучевыми. На базе многолучевых излучателей созданы промышленные лазеры мощностью от 2 до 10 кВт, причем не существует принципиальных трудностей для повышения мощности этих лазеров до 30—50 кВт.

Быстропроточные газоразрядные лазеры (БПЛ) — непрерывные и импульсно-периодические лазеры с применением конвективного (быстропроточного) охлаждения рабочей смеси. Использование быстрой продольной прокачки сокращает время вывода энергии (в десятки и сотни раз), позволяет обеспечить удельный энергосъем 1—10 Вт/см^2, что на два-три порядка выше, чем у лазеров диффузионного охлаждения.

Широкое развитие подучили БПЛ с самостоятельным разрядом. Этот тип разряда имеет несколько модификаций электродной системы и газодинамического контура, применяемых для определенных уровней давлений, скоростей и состава рабочей смеси, токов и напряжений. Наиболее распространены две схемы газоразрядных камер: камеры поперечного разряда с секционированной и несекционированной электродной системой и камеры продольного разряда как с секционированием, так и без секционирования электродов.

С учетом ограничения на температурный перепад удельный энерговклад q, равный отношению полной электрической мощности P_e к массовому расходу газа Q, определяется так:

$$q = \frac{P_e}{Q} = \frac{C_p \Delta T}{1-\eta} = \frac{C_p \Delta T_{\max}}{1-\eta} = q_{\max},$$

где C_p — удельная теплоемкость, $\eta = P/P_e$ (P — мощность лазерного излучения).

Допустимый энерговклад $q_{\max}$ составляет примерно 700—800 Дж/г [(Вт/(г/с)], что требует расхода газа примерно 50—100 г/с при мощности лазера около 10 кВт.

Необходимость прокачки больших объемов газа в мощных технологических лазерах вынуждает применять в них замкнутый цикл.

В газовых лазерах с несамостоятельным разрядом существуют различные способы ионизации рабочей среды: пучками быстрых электронов, ультрафиолетовым излучением, вызывающим фотоэффект, введением в лазерную смесь легкоионизируемых молекул или атомов с низкий потенциалом ионизации и др.

Наилучший эффект был получен путем применения пучка электронов, ускоренных до энергии в 100 эВ и более. Метод электронного пучка особенно эффективен для получения импульсов с энергией несколько тысяч джоулей (при инициировании, например, управляемой термоядерной реакции). Однако по ряду причин электроионизационные лазеры не получили широкого распространения в промышленности. Прежде всего это связано с необходимостью защиты от рентгеновского излучения и низкой надежностью некоторых узлов, например разделительной мембраны.

Для промышленных лазеров непрерывного излучения более простым и эффективным оказалось использование для ионизации вспомогательного высокочастотного разряда емкостного типа. По такой схеме выполнены лазеры серии «Лантан» («Лантан-2», «Лантан-3», УЛГ2-01) с максимальной мощностью излучения до 5 кВт.

Газодинамические лазеры принципиально отличаются от электроразрядных лазеров с их проблемами поддержания устойчивого разряда в больших объемах. В газодинамических лазерах инверсию населенностей можно получать в камерах больших объемов термическим путем в процессе сверхзвукового расширения, который не зависит от поперечных размеров сверхзвукового потока. Это самые мощные лазеры из всех известных. Еще в 1973 г. от них была получена средняя мощность 400 кВт.

Химические лазеры — лазеры, работающие на инверсии населенностей, созданной прямо или косвенно в ходе экзотермических реакций. Химическую реакцию инициируют электрическим разрядом или вспышкой мощной лампы, т.е. реализуют явление фотолиза. Инверсия населенностей получается за счет колебательных переходов. Наиболее типична реакция типа

$$A + BC = AB + C + \Delta E,$$

где E — энергия реакции.

Распространен лазер, в котором протекает реакция

$$H_2 + F = HF + H.$$

Конструктивная схема такого лазера близка к схеме газодинамического лазера.

Перспективным для технологических применений является кислородно-ионный лазер, возбуждаемый фотолизом. От лазеров этого вида получены мощности 1 кВт и более в импульсном и непрерывном режимах. Основная проблема, препятствующая их широкому распространению, — реализация экономичных способов получения синглетного кислорода, необходимого для протекания соответствующей химической реакции.

Наибольшее распространение для технологических операций, связанных с нагревом материала без его испарения, получили лазеры на твердом теле и газовые лазеры с самостоятельным и несамостоятельным разрядом, причем первые чаще применяются для обработки деталей приборов и инструмента небольших размеров, а вторые — для обработки деталей машиностроения, в том числе крупногабаритных [60.39].

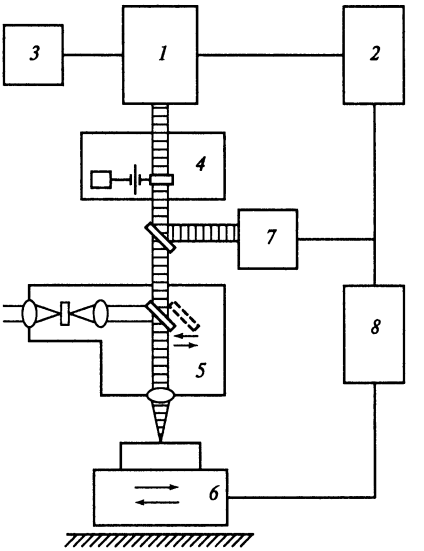


Рис. 60.65. Структурная схема лазерной технологической установки:

1 — излучатель; *2* — источник питания; *3* — система охлаждения; *4* — прерыватель; *5* — оптическая система для фокусирования и наблюдения; *6* — рабочий стол (манипулятор); *7* — система автоматической стабилизации выходной энергии; *8* — программирующее устройство

Структурная схема лазерной технологической установки (ЛТУ) для термообработки представлена на рис. 60.65.

Ниже приведены технические данные отечественных ЛТУ на базе твердотельных лазеров импульсного действия типа «Квант» и непрерывного действия, точнее квазинепрерывного (частота 150 Гц и более), типа ЛТН. Оба типа лазеров выполнены на иттриево-алюминиевом гранате, активированном неодимом.

Технические данные ЛТУ типа «Квант»

Тип лазера	Энергия импульса, Дж	Частота повторения импульса, Гц	Средняя мощность излучения, Вт
«Квант-9М»	5	0,1—3	16
«Квант-12»	3	10	30
«Квант-15»	10	10	80
«Кванта16»	15, 30	0,1—1	15
«Квант-17»	4	10	80
«Квант-18»	10	10—15	40

Технические данные ЛТУ типа ЛТН

Тип лазера	Длина волны, мкм	Мощность излучения, Вт (многомодовый режим)	Угол расходимостилуча, мрад
ЛТН-101	1,064	63	10
ЛТН-102А	1,064	125	10
ЛТН-102Б	1,324	32	10
ЛТН-103	1,064	250	12

Существенно чаща для термообработки применяют лазеры на диоксиде углерода, что объясняется их высокой мощностью, более низкими эксплуатационными расходами и большими долговечностью и надежностью по сравнению с твердотельными лазерами.

Большинство лазеров используется для резки и прошивки отверстий, однако с увеличением мощности технологических лазеров доля ЛТУ, используемых для поверхностной термообработки, возрастает. Это объясняется тем, что в тяжелом машиностроении существует много изделий с поверхностями высокой точности, где использование лазерной закалки является особенно эффективным. Применение лазеров высокой мощности позволяет значительно увеличить производительность при упрочнении больших поверхностей за счет увеличения диаметра луча и скорости сканирования. Увеличение скорости сканирования, кроме того, может привести к получению уникальной микроструктуры, а также к формированию лучших механических свойств (в частности, по остаточным напряжениям и деформациям).

Структура потребностей в лазерной технике по технологическим процессам в России и СНГ, выявленная в результате анкетирования промышленных предприятий, %, приведена ниже:

Упрочнение и наплавка	38
Резка и перфорация	30
Сварка	11
Маркировка и др.	21

Однако следует отметить, что до сих пор во всем мире в научно-исследовательских центрах, заводских исследовательских лабораториях или в опытно-промышленных условиях работает значительно больше лазерных установок, чем в промышленных условиях на потоке, в крупносерийном и массовом производстве. Отметим некоторые причины такого положения.

1. Высокая стоимость лазерного оборудования, которая в течение последних 10 лет практически не изменилась. Это связано с непрерывной модернизацией технологических лазеров, сопровождающейся значительным повышением их качества и одновременно усложнением узлов и систем, что не позволяет значительно снижать их стоимость.

2. Лазеры не являются традиционным промышленным оборудованием, при их эксплуатации обнаруживается целый ряд особенностей, возникает много дополнительных требований и ограничений, что мешает эффективному использованию, а также широкому внедрению лазерной техники в производство.

3. Конкуренция со стороны других, более дешевых и отработанных технологических процессов.

4. Выпуск в ряде случаев лазерных установок, не укомплектованных вспомогательной технологической оснасткой.

5. Недостаточные надежность и качество первых лазерных установок.

В результате доверие к лазерной технике со стороны промышленности оказалось в значительной мере подорванным. И главная задача разработчиков и создателей лазерной техники — обеспечить высокое качество и надежность оборудования при его работе в обычных производственных условиях. Это то направление, которое позволит на порядок повысить потребляемость технологических лазеров даже при их высокой стоимости.

60.6. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Прогресс, достигнутый в развитии полупроводниковой техники, привел к революционным изменениям элементной базы систем автоматики. Значительно расширилась номенклатура микропроцессорных средств, повысились их надежность и быстродействие, а также существенно снизилась стоимость, которая иногда становится ниже стоимости аналоговых регуляторов. Причем сохраняется тенденция снижения их стоимости. В настоящее время прекратился выпуск как зарубежных, так и отечественных аналоговых регуляторов различного назначения и сложности. Они повсеместно заменяются регуляторами, выполненными на программируемых контроллерах и ЭВМ. В настоящее время микропроцессорными регуляторами оснащается все новое электротехническое оборудование, одновременно происходит замена аналоговых регуляторов на микропроцессорные.

В общем случае автоматическое управление электротермическими установками не ограничивается регулированием одной или нескольких электрических и технологических величин. Управление любой электротермической установкой предполагает, кроме регулирования аналоговых величин,

выполнение целого ряда логических операций типа «включено-выключено». К таким операциям относятся: подача питания на установку, отключение ее в нормальных и аварийных режимах, включение и отключение вспомогательного оборудования (насосов, конвейеров т.д.), блокировки от неправильных действий персонала и сбоев аппаратов, а также аварийная защита и сигнализация. При использовании для автоматизации только аналоговых контроллеров управления выполнение логических операций осуществляется традиционными релейно-контакторными средствами. По этому принципу еще в 80-х годах XX в. создавались системы автоматизации практически всего выпускаемого оборудования как у нас в стране, так и за рубежом. Наряду с этим предпринимались попытки замены контактной аппаратуры на бесконтактную, выполняемую на основе «жесткой (непрограммируемой) логики». Однако этот этап был коротким и малоэффективным, поскольку системы управления, выполненные на бесконтактных логических элементах, оказывались функционально более сложными в сравнении с системами, построенными на электромагнитных реле. Кроме того, системы управления на основе бесконтактных логических элементов содержат значительное число контактных устройств (выходных реле, кнопочных станций, конечных выключателей, контакторов и т.д.), что снижает их надежность.

В 90-е годы XX в. создается доступный для массового использования комплекс технических средств, позволяющий реализовывать перепрограммируемые системы релейно-контакторной автоматики. Этот комплекс включает в себя, кроме самих программируемых логических контроллеров, специализированные средства по их программированию, бесконтактные датчики и выходные транзисторные и тиристорные согласующие силовые элементы. Особое место среди средств автоматизации электротехнологических установок занимают очень быстро развивающиеся средства индикации. Они используются для так называемых систем визуализации, которые в наглядной для обслуживающего персонала форме демонстрируют ход технологического процесса и состояние агрегатов. Сохранились в этом комплексе логических элементов и традиционные электромагнитные реле, герконы, магнитные пускатели и контакторы.

Универсальность используемых средств автоматизации позволяет строить систему управления любой электротермической установкой по единой гибкой схеме, допускающей расширение на любом уровне практически без замены действующего оборудования.

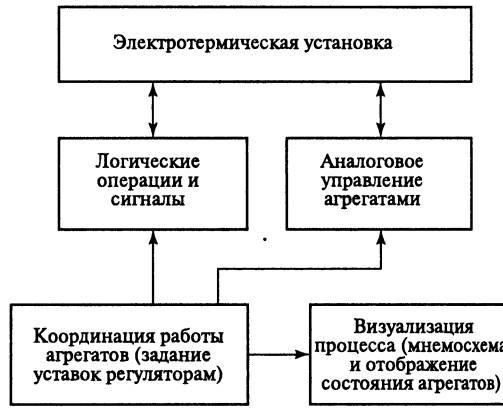


Рис. 60.66. Функции системы управления электротермическими установками

Автоматизация любой электротермической установки сводится в общем случае к обеспечению следующих функций (рис. 60.66):

1) выполнению логических операций по включению и отключению основного и вспомогательного электрооборудования, контролю электрических и технологических режимов работы установки, положения механизмов и перемещающихся элементов установки, осуществлению блокировок и защиты оборудования от аварийных режимов;

2) регулированию аналоговых электрических и технологических величин, определяющих режимы работы отдельных агрегатов и установки в целом;

3) координации работы всех агрегатов установки (выбору режима работы установки) для обеспечения оптимального или требуемого хода технологического процесса;

4) визуализации основных стадий технологического процесса, состояния и положения отдельных агрегатов, параметров, характеризующих режимы работы установки.

Реализация указанных выше функций предполагает автоматизацию электротермической установки на основе распределенной двухуровневой микропроцессорной системы управления, построенной по иерархическому принципу (рис. 60.67). Схема рис. 60.67 является универсальной и гибкой, т.е. допускает расширение на любом уровне и этапе внедрения. При этом в системе, содержащей персональную ЭВМ верхнего уровня иерархии, могут быть реализованы сколь угодно сложные алгоритмы управления (оптимальные, адаптивные, с наблюдателем и т.д.). Функции, выполняемые такой системой, ограничиваются только числом датчиков обратной связи, быстродействием и вычислительными возможностями персональной ЭВМ. Возможности современных вычислительных средств

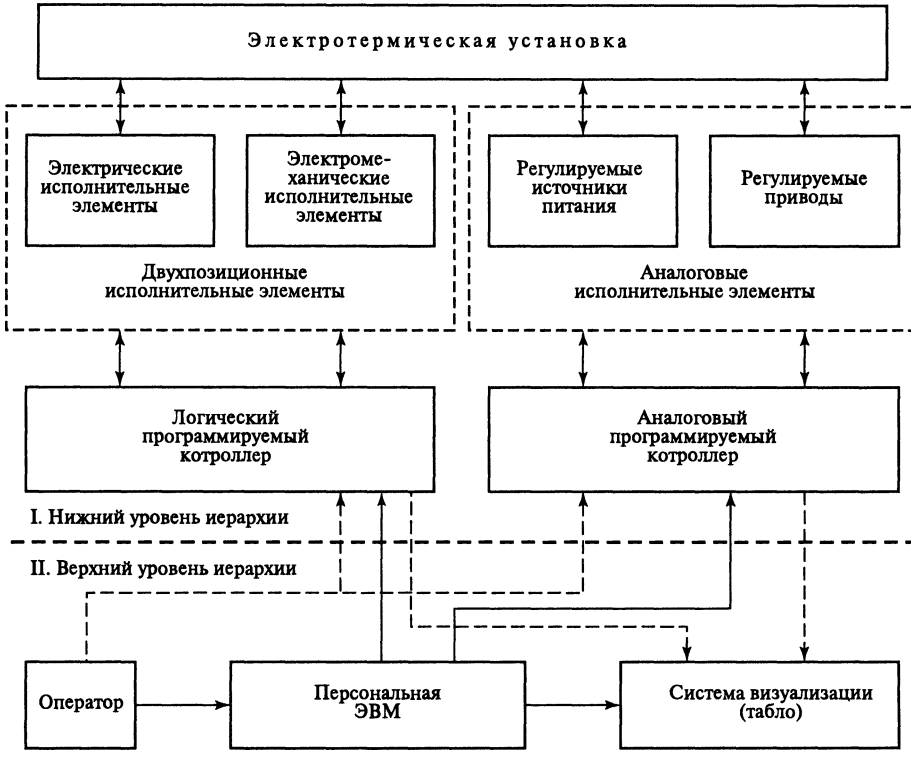


Рис. 60.67. Функциональная схема системы управления электротермической установкой

зволяют реализовать все функции, требуемые я управления электротермическими установками зличного назначения. Основное ограничение зможностей систем управления, построенных по еме рис. 60.67, обусловлено ограниченной но-енклатурой датчиков обратной связи и в ряде слу-ев высокой их стоимостью. Это ограничение от-осится в первую очередь к датчикам технологиче-их параметров, необходимых для определения мпературы и химического состава материалов в абочей зоне.

Системы управления конкретными установка-и выполняются в виде отдельных регуляторов или к совокупности. К регуляторам для электротерми-еских установок относят: 1) регуляторы темпера-уры; 2) регуляторы электрических величин: на-ряжения, тока, мощности, коэффициента мощно-ти; 3) регуляторы дуговых установок; 4) регулято-ы электронно-лучевых и плазменно-лучевых уста-овок; 5) регуляторы для установок переплава.

РЕГУЛЯТОРЫ ТЕМПЕРАТУРЫ

Наиболее освоенными как отечественными, так и зарубежными фирмами являются специализированные предметно-ориентированные контроллеры для регулирования температуры в электрических печах сопротивления (ЭПС). По существу они относятся к классу аналоговых контроллеров и выполняют функции традиционных аналоговых регуляторов температуры. К их достоинствам можно отнести простую структуру, несложное программирование, стабильность характеристик во времени и относительно низкую стоимость. Эти регуляторы, как правило, реализуются на базе однокристальных ЭВМ.

Базовым представителем устройств этого класса можно считать регулятор температуры типа ПРОТЕРМ, предназначенный для регулирования температуры, в том числе и программного, в установках различного назначения [60.12]. Регулятор выпускается в двух модификациях: ПРОТЕРМ 100 — для датчика температуры на основе термопары и ПРОТЕРМ 100С — для датчика температуры на основе термометра сопротивления. Регулятор выполняет следующие функции:

ПИД-, ПИ-, П-регулирование до трех независимых контуров;

формирование программного задания в виде произвольной кусочно-линейной функции времени (восемь отрезков с произвольным наклоном), логическое управление программным задатчиком;

введение сигналов задания, корректирующих воздействий и формирование сигнала рассогласования по каждому из трех каналов регулирования;

гальваническую изоляцию входных цепей;

линеаризацию сигналов термопар и компенсацию термоЭДС холодных спаев (для ПРОТЕРМ 100), линеаризацию сигналов термометров сопротивления (для ПРОТЕРМ 100С);

линеаризацию зависимости выходной мощности от выходного сигнала регулятора при фазоимпульсной модуляции;

в комплекте с тиристорными усилителями мощности усиление выходного сигнала каждого из трех основных выходов по мощности и гальваническую изоляцию цепей нагрузки;

сигнализацию предельных отклонений, конца программы и других состояний (по выбору);

формирование выходного аналогового сигнала с возможностью его масштабирования, смещения и двустороннего ограничения;

конфигурирование функциональной структуры;

по каждому из трех независимых каналов регулирования безударное переключение режимов управления с автоматического на ручное и обратно; ручное управление.

В регуляторе предусмотрены:

входы: для ПРОТЕРМ 100 — три термопары ПР(В), ПП(S), ВР(А) — 1Э ХА(К), ХК(L) либо сигнал 0—10 мВ постоянного тока; для ПРОТЕРМ 100С — три термометра сопротивления 50М, 500М, 100М, 100П; два входа постоянного тока 0—5, 0—20, 4—20 мА; 0—10 МВ; 0—10 В; 13 дискретных входов;

выходы: импульсные или дискетные ключи; коммутирующая способность ключей до 45 В, 0,15 А постоянного тока; активная составляющая сопротивления нагрузки 160 Ом и более; три фазово-модулированных или частотно-модулированных импульсных сигнала в виде изменения состояния ключа; один аналоговый выход постоянного тока по выбору 0—10 В, 0—5 мА; пульсирующий двухполупериодный постоянный ток напряжением 24 + 2,4 В (для питания выходных цепей).

Прибор обладает следующими техническими данными:

погрешность установки задания ± 0,1 °С;

статическая точность регулирования ± 0,3 °С;

погрешность аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 0,05 %; разрешающая способность:

0,5 мкВ для ПР(В), ПП(S) и сигнала 0—10 мВ;

2 мкВ для остальных термопар и для термометров сопротивления;

погрешность компенсации холодных спаев термопар 0,5 °С и менее.

Наиболее широкими функциональными возможностями обладают приборы типа ПРОТАР (рис. 60.68). Прибор содержит аппаратное устройство ввода информации, аппаратное устройство вывода информации, встроенный пульт оператора, источники основного и резервного питания и программируемое цифровое вычислительное устройство.

Аппаратное устройство ввода информации содержит средства обработки 6 аналоговых входных сигналов и 11 дискретных (логических) входных сигналов с преобразованием их в цифровую двоичную форму. Четыре аналоговых входных сигнала x_a, x_b, x_c, x_d гальванически изолируются друг от друга и от всех остальных цепей. Аналоговые входные сигналы x_e, x_h вводятся без гальванического разделения. Все шесть аналоговых входных сигналов преобразуются в цифровую форму аналого-цифровым преобразователем. Цифровые эквиваленты аналоговых входных сигналов a, b, c, d, e, h вводятся в программируемое цифровое вычислительное устройство. Осуществляется также аналого-цифровое преобразование выходного аналогового сигнала y, что обеспечивает возможность его контроля и индикации на цифровом дисплее.

Дискретные входные сигналы q_i, соответствующие разомкнутому или замкнутому состоянию контактных или бесконтактных ключей, преобразуются в электрический двоичный сигнал (соответственно логический 0 или логическую 1). Для одной пары дискретных входных сигналов (q_+; q_-) обеспечивается гальваническая изоляция от всех остальных цепей. В приборе формируется также внутренний дискретный сигнал q_p, зависящий от установленного режима управления (в режиме автоматического управления $q_p = 0$, а в режиме ручного управления $q_p = 1$).

Аппаратное устройство вывода информации содержит цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), преобразующий цифровой сигнал Y в аналоговый выходной сигнал y, поступающий на аппаратные выходы Y_1, Y_2, источник опорного напряжения $U_{оп}$, семь выходных бесконтактных ключей (Z_s, Z_m, Z_{s1}, Z_{m1}, Z_b, Z_h, Z_{ork}), встроенный источник напряжения постоянного пульсирующего тока (24 В), аппаратные средства переключения режима управления с автоматического на ручное и обратно, дистанционный переключатель режима управления и контактный дискретный выход Z, состояние которого определяется установленным режимом управления. Приборы всех модификаций содержат аналоговый выход Y_1 по напряжению (0—-10 В). Приборы ПРОТАР 102, ПРОТАР 112 дополнительно содержат аналоговый выход Y_2 по току (на выбор 0—5 мА либо 0—20 мА).

Встроенный пульт оператора содержит цифровой восьмиразрядный дисплей, четыре кнопоч-

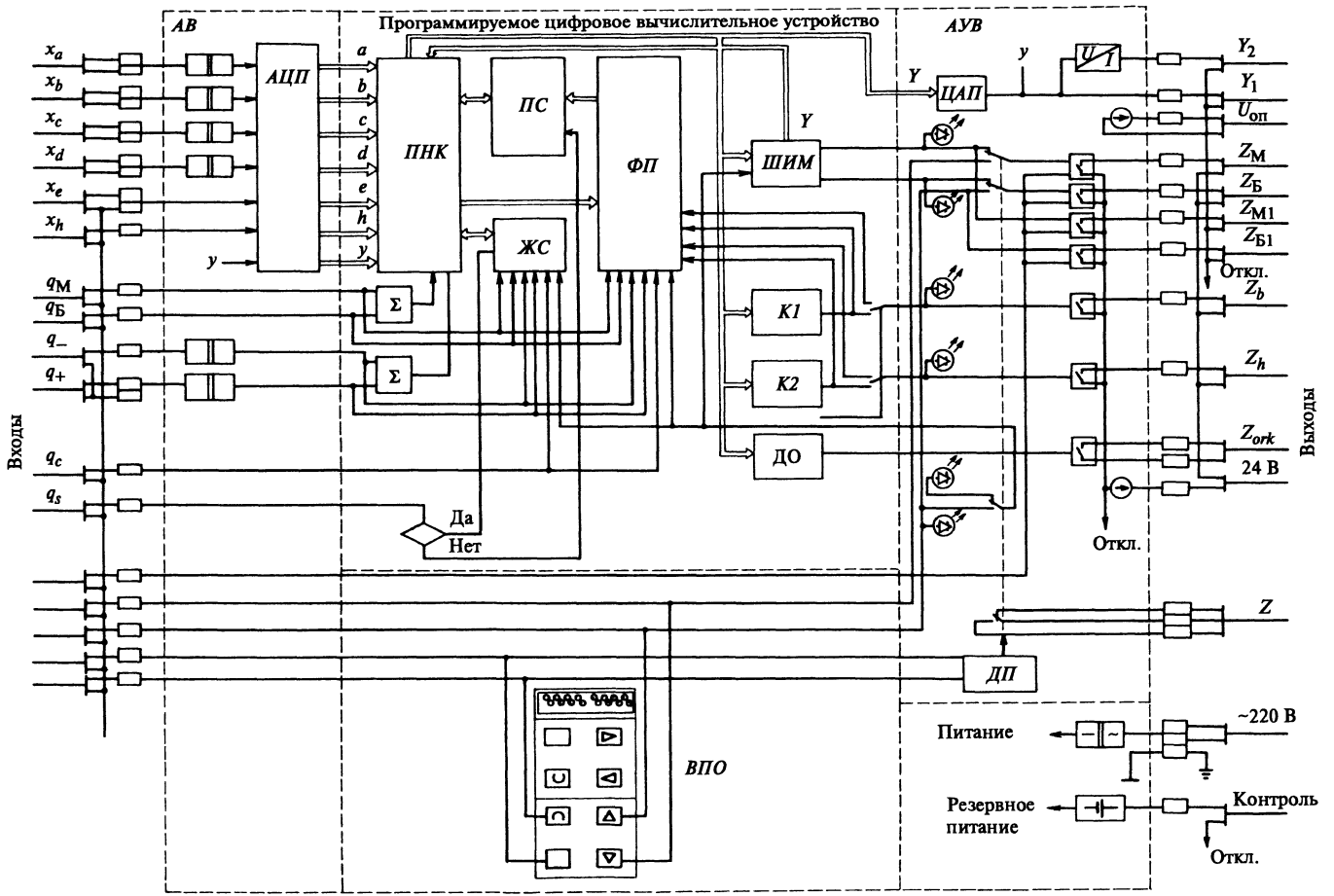


Рис. 60.68. Функциональная схема микропроцессорного регулятора типа ПРОТАР:

АВ — аппаратное устройство ввода информации; *ПНК* — переменные параметры настройки константы; *ПС* — программируемая структура; *ФП* — функции, используемые при программировании; *ЖС* — жесткая структура; *АУВ* — аппаратное устройство вывода информации, *ШИМ* — широтно-импульсный модулятор; *К1*, *К2* — компараторы, *ДО* — диагностика отказов; *ДП* — дистанционный переключатель; *ВПО* — встроенный пункт оператора

ных замыкателя для управления режимами работы дисплея, программирования прибора и настройки параметров. Кроме того, пульт оператора содержит четыре кнопочных замыкателя, служащих для переключения режима управления с автоматического на ручное и для управления выходами и Z_s и Z_m. Указанные органы воздействуют непосредственно на устройство вывода информации, и их работа не зависит от работы вычислительного устройства. Все они задублированы соответствующими дискретными входными сигналами, что позволяет вести управление как от встроенного пульта оператора, так и с верхнего уровня иерархии управления.

Источник резервного питания содержит две независимые батареи сухих элементов для питания цепей оперативного запоминающего устройства при отключении основного питания, что обеспечивает сохранение запрограммированной потребителем информации. Предусмотрена возможность подключения внешнего источника резервного питания.

Программируемое цифровое вычислительное устройство обеспечивает работу прибора в режиме жесткой или свободно программируемой структуры. При дискретном входном сигнале $q_s = 0$ (вход разомкнут) реализуется свободно программируемая структура. При $q_s = 1$ (вход замкнут) включается жесткая структура, не требующая программирования. В режиме свободно программируемой структуры реализуется широкий набор функций, среди которых имеются как сложные однократно используемые алгоритмические блоки (такие, как ПИД-регулирование, кусочно-линейное преобразование и т.д.), так и многократно используемые алгоритмические блоки, осуществляющие алгебраические, нелинейные, динамические преобразования, логические функции.

Пользуясь указанными функциями, переменными, параметрами настройки и константами, обозначения которых вызываются в процессе программирования на дисплей при данном шаге программы, потребитель в пределах отведенных на программирование 100 шагов набирает структуру, необходимую для реализации заданного алгоритма управления.

В приборе предусмотрен широтно-импульсный модулятор, который в режиме автоматического управления преобразует цифровой сигнал в последовательность импульсов, управляющих выходными ключами Z_M, $Z_Б$, Z_{M1}, $Z_{Б1}$. В режиме ручного управления указанные выходные ключи не коммутируются.

В настоящее время как зарубежными, так и отечественными фирмами выпускается широкая гамма терморегуляторов с различным набором выполняемых функций. Наиболее широкую номенклатуру микропроцессорных терморегуляторов выпускает фирма OMRON. Простейшие программируемые терморегуляторы имеют ручное задание температуры. В них отсутствуют также интерфейсы связи с ЭВМ верхнего уровня, что ограничивает область их применения. Из отечественных приборов следует отметить микропроцессорный регулятор температуры КПС-1, изготовитель ТОО ЛПР (Москва), «Термолюкс», изготовитель НПО «ЦНИИТмаш» (Москва), ТРМ10 и ТРМ10-PiC, изготовитель ПО «Овен» (Москва).

Характерной особенностью двух последних терморегуляторов является предусмотренная в них возможность автоподстройки коэффициента усиления под параметры объекта управления.

В указанные программируемые контроллеры включены функции изменения задания температуры во времени, т.е. такие терморегуляторы выполняют еще и функции программатора.

Для выполнения логических операций *при* управлении ЭПС, как и любыми другими электротехнологическими установками, необходимо в систему управления кроме аналоговых контроллеров, вводить также и специализированные логические контроллеры. Логические контроллеры различной архитектуры также выпускаются как отечественными, так и зарубежными фирмами. Логические контроллеры имеют более сложную архитектуру в сравнении с аналоговыми и, как правило, снабжаются цифровыми интерфейсами связи. Логические контроллеры нуждаются в более сложном программировании, чем аналоговые. Однако эта задача упрощается благодаря использованию специальных программирующих устройств или отладочных программ для персональных компьютеров. Таким образом, для управления типовой и массовой по применению ЭПС необходимо использовать два типа программируемых контроллеров: аналоговый терморегулятор и логический контроллер. Для обеспечения их совместной работы контроллеры должны быть снабжены интерфейсами связи. Система управления, включающая в себя два и более контроллера, может рассматриваться как типовая для автоматизации ЭПС любой степени сложности.

Для управления ЭПС, нуждающимися в регулировании температуры, в программировании изменения задания температуры во времени и в выполнении простейших операций по включению и отключению вспомогательного оборудования (двигателей насосов, перемещения дверей и т.д.), достаточно использовать программируемый контроллер типа ПРОТАР.

В качестве силовых исполнительных элементов в микропроцессорных регуляторах температуры используют оптронные тиристоры и симисторы или тиристоры и симисторы обычного исполнения, включаемые по схемам, приведенным на рис 60.69, *а* и *б*. Наряду с фазоимпульсным управлением ти-

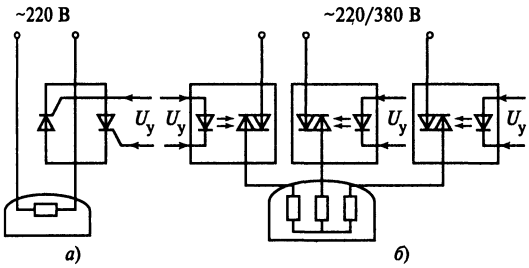


Рис. 60.69. Силовые схемы тиристорных регуляторов для однофазной (*а*) и трехфазной (*б*) нагрузок

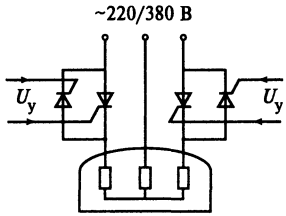


Рис. 60.70. Силовая схема широтно-импульсного тиристорного регулятора для трехфазной нагрузки

ристорами в регуляторах температуры широко используют релейное и широтно-импульсное управление. Благодаря большой тепловой инерции ЭПС точность регулирования температуры при широтно-импульсном управлении тиристорами практически не снижается в сравнении с фазоимпульсным управлением. В то же время широтно-импульсное управление позволяет упростить силовую схему для трехфазной нагрузки. Как показано на рис. 60.70, при широтно-импульсном управлении для трехфазного регулятора температуры достаточно использовать только два симистора или две пары встречновключенных тиристоров.

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДУГОВЫМИ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫМИ ПЕЧАМИ

Автоматические регуляторы ДСП реализуют ввод активной мощности на заданном уровне путем переключения ступеней напряжения печного трансформатора и перемещения электродов с помощью тиристорного или электрогидравлического привода. В качестве параметра регулирования используется разность сигналов, пропорциональных напряжению фазы и току дуги $Y = aU - bI$. Такой сигнал обратной связи позволяет устранить эксплуатационные короткие замыкания и обрывы дуг, свести к минимуму ненужные перемещения электродов при несимметричных режимах и кратковременных возмущениях, а также обеспечить автоматическое зажигание дуг печи [60.12].

Как показал опыт эксплуатации [60.30, 60.41] ДСП в цехах завода «Электросталь», одним из наиболее надежных оказался регулятор типа СТУ (рис. 60.71). Он предназначен для автоматического поддержания заданной электрической мощности одной фазы ДСП. Регулятор имеет пропорциональную характеристику управления с регулируемой зоной нечувствительности от 1 до 10 %, характер отработки единичного возмущения — апериодический, зажигание дуги — автоматическое, род работы — ручной или автоматический. Регулятор обеспечивает разгон электродвигателя до номинальной скорости при номинальном токе за 0,6—0,7 с и торможение за 0,3 с. Вероятность безотказной работы за 2000 ч 0,8 и выше.

В состав регулятора (рис. 60.71) входят блок измерительный *БИ*, блок управления *БУ*, блок фазосдвигающего устройства *ФСУ* и блок тиристоров *БТ*, панель автоматов, панель контроля и панель индикации, смонтированные в шкафу 600×600×1100 мм, в нижней части которого размещаются элементы тахометрического моста (дроссель и резистор), шунт амперметра, коробки выводов для внешних соединений в разъем для подключения аппаратуры проверки работоспособности и настройки регулятора во время его эксплуатации. Связь регулятора с печью по каналу тока осуществляется через специальный трансформатор с подмагничивающей обмоткой.

Во всех блоках регулятора на лицевых панелях предусмотрены контрольные гнезда. В блоках используются печатные платы для обеспечения высокой стойкости блоков к механическим воздействиям. Силовые трансформаторы и переключатели управления размещены вне шкафа управления.

Работа регулятора происходит следующим образом: в устройство задания поступают сигналы, пропорциональные полному сопротивлению участка электрод — ванна — печь. Устройство задания включает трансформатор связи регулятора по каналу тока, обмотка подмагничивания которого подключена к регулируемому источнику постоянного напряжения задания, и разделительный трансформатор, на который подается напряжение фазы печного трансформатора. Сигналы с устройства задания поступают на вход блока *БИ*, включающий схему сравнения и схему согласования цепей сравнения, с входов блока управления. Блок *БИ* обеспечивает изменение в нужных пределах характеристик регулятора. Блок *БУ* предназначен для получения необходимого коэффициента усиления системы регулирования, формирования и суммирования сигналов управления, сигналов обратной связи и для управления фазосдвигающим устройством. Блок *ФСУ* предназначен для управления трехфазным реверсивным тиристорным преобразователем. Блок

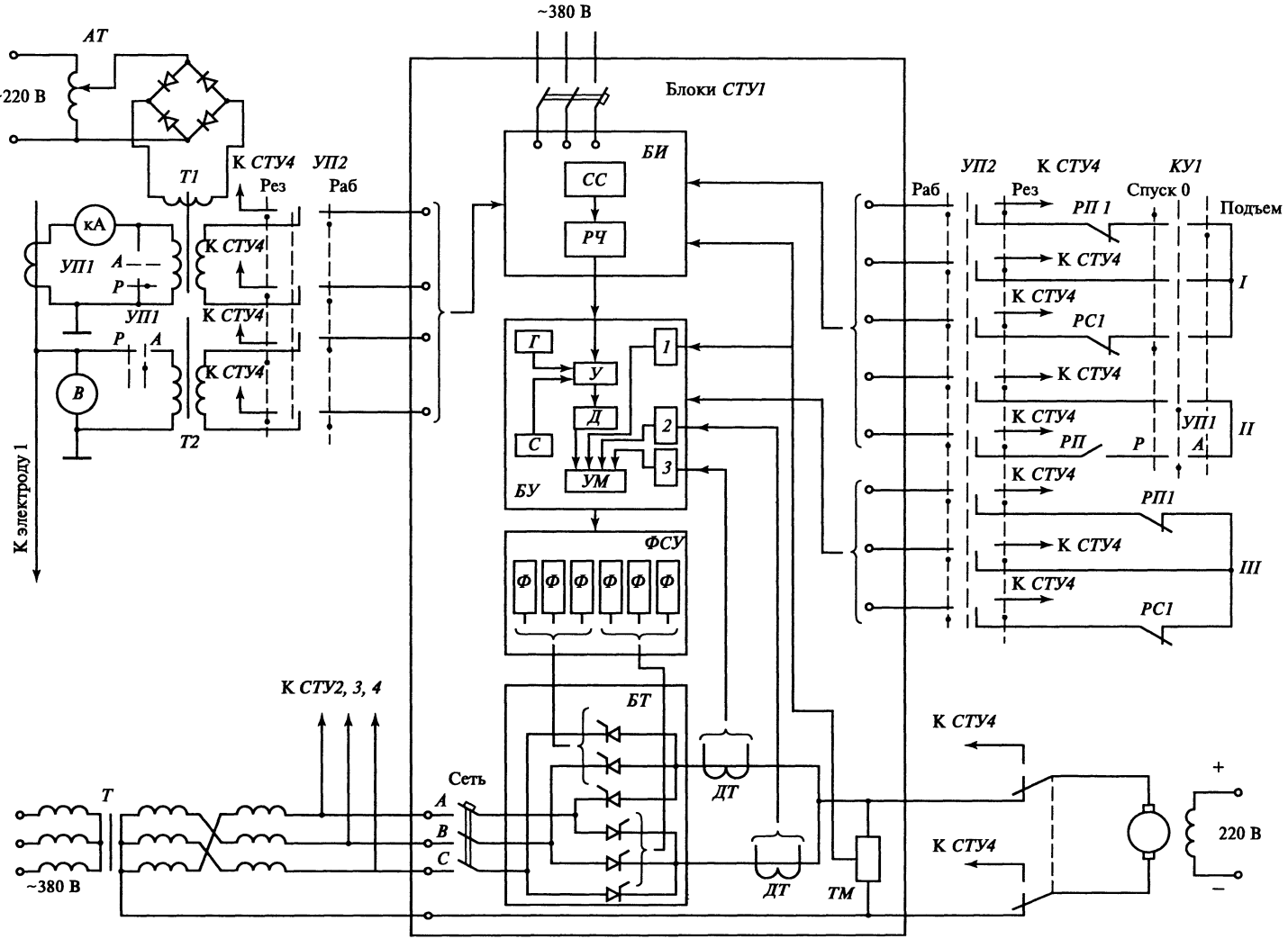


Рис. 60.71. Схема автоматического регулятора типа СТУ для ДСП

тиристоров *БТ* преобразует переменное напряжение сети в регулируемое постоянное, получает питание от силового трансформатора, обмотки которого включены по схеме звезда—зигзаг для предотвращения возникновения токов насыщения в магнитопроводе трансформатора.

Измерительный блок включает схему сравнения *СС*, схему регулирования чувствительности *РЧ*, разделительный трансформатор, фильтр и источник питания, цепи регулировки каналов обратной связи и токового ограничения и реле, осуществляющее перевод с ручного режима управления на автоматический.

Электрические сигналы, пропорциональные току и напряжению дуги, через разделительные трансформаторы подаются на схему сравнения. Эта схема состоит из двух выпрямительных мостов и подключенных к ним потенциометров сравнения. На потенциометре сигналы, пропорциональные полному сопротивлению электродуги, сравниваются, затем фильтруются фильтром, размещенным между выходом схемы сравнения и входом схемы регулировки чувствительности. Регулятор чувствительности производит суммирование управляющего сигнала и сигнала обратной связи, усиление их по мощности для согласования со входом блока управления.

Блок управления *БУ* усиливает, преобразовывает и разделяет на два канала сигналы управления, снимаемые с блока *БИ*. Блок *БУ* состоит из усилителя *У*, охваченного обратной связью через демодулятор *Д*, усилителя мощности *УМ*, формирователей токовой логики и сигналов токового ограничения, генератора несущей частоты *Г*, платы ключей, стабилизатора *С* и источника питания, включающего силовой трансформатор и выпрямитель. Конструктивно блок выполнен аналогично измерительному. Усилитель состоит из модулятора и усилителя переменного тока, работающего в классе А. Поступающий на вход блока *БУ* медленно изменяющийся сигнал модулируется по амплитуде генератора несущей частоты и усиливается в 400 раз.

После усиления модулированный сигнал поступает на демодулятор, в котором происходит его разделение на два канала. Демодулятор является фазочувствительным двухполупериодным выпрямителем, применяемым для уменьшения постоянной времени. Выходное напряжение каждого канала суммируется (с опорным напряжением 12 В из него) или вычитается и подается на усилитель мощности. В статических режимах при этом происходит раздельное управление группами тиристорного преобразователя без уравнительных токов. Демодулированный сигнал на входе усилителя мощности суммируется с сигналами токовой логики и усиливается по мощности (коэффициент усиления по напряжению приблизительно равен единице, а по току — произведению коэффициентов усиления триодов).

Генератор несущей частоты генерирует симметричные прямоугольные импульсы. Он собран по схеме двухтактного блокинг-генератора, запускающегося в момент подачи напряжения на блок *БУ*. Для исключения коротких замыканий между тиристорами двух групп тиристорного преобразователя *БТ* в динамических режимах работы, что обусловлено наличием малоинерционных каналов управления, предназначены схемы токовой логики, выполняющие следующие функции: запрещение отпирания тиристоров из групп при протекании тока в другой группе преобразователя; запрещение снятия управляющих импульсов с тиристоров группы, в которой протекает ток. Последнее обеспечивается подачей «дежурных импульсов» на тиристоры работающей группы при снятии управляющих импульсов, что позволяет коммутировать ток нагрузки с тиристора предыдущей фазы на тиристор следующей фазы в отрицательный полупериод анодного напряжения тиристоров. Для этого напряжение с датчика тока *ДТ* работающей группы тиристоров подается на вход схемы токовой логики, входной триод схемы насыщается и подается нулевой потенциал на вход неработающего канала усилителя мощности, запирая его. Одновременно запирается второй триод, при этом с делителя снимается напряжение, определяющее угол «дежурных импульсов».

Для ограничения тока якорной цепи электродвигателя перемещения электродов до заданного значения применяется ограничение угла отпирания тиристоров в зависимости от значения ЭДС двигателя. Эта задача решается подключением выхода тахометрического моста *ТМ* к входу усилителя мощности схемы ограничения тока, которая представляет собой балансный усилитель. При ЭДС двигателя, равной нулю, входные напряжения на плечах усилителя равны и усилитель сбалансирован. При ЭДС двигателя, не равной нулю, выходные напряжения на плечах усилителя не равны друг другу и на вход платы усилителя мощности поступает напряжение токоограничения.

Стабилизирующее звено предназначено для создания отрицательной обратной связи с выхода демодулятора на вход усилителя, чем обеспечивается необходимая амплитудно-фазовая характеристика электропривода и исключаются возможности появления сигнала по цепи обратной связи. Блок фазосдвигающего устройства *ФСУ* предназначен для управления трехфазным нулевым реверсивным тиристорным преобразователем и состоит из шести одинаковых плат, соединенных по три на анодную

и катодную группы, блока питания (силовой трансформатор и плата выпрямителей), конденсатора, и фильтра. Плата *Ф* служит для преобразования напряжения, пилообразно изменяющегося в пределах от 0 до 10 В, в кратковременный импульс, сдвигающийся по фазе относительно анодного напряжения тиристора, и состоит из генератора пилообразного напряжения и формирователя импульсов.

На основании опыта эксплуатации можно рекомендовать устанавливать силовые разделительные трансформаторы, мощность которых равна мощности электродвигателя перемещения электродов, под каждым шкафом регулятора. При наличии большого количества печей это требует использования в 4 раза большего числа трансформаторов, так как на каждую ДСП устанавливают по четыре регулятора (три рабочих и один резервный). На каждом комплекте регуляторов установлено по одному трансформатору мощностью 65 кВ · А при суммарной установленной мощности электродвигателей 13,5 кВт. Нулевой выход каждого регулятора заземляется через конденсатор емкостью 10 мкФ.

В настоящее время можно ориентироваться на два типа регуляторов: АРДМТ и АРДГ соответственно для ДСП с электромеханическим и гидравлическим приводом электродов. Схема тиристорного регулятора мощности типа АРДМТ приведена на рис. 60.72. Регулятор состоит из датчика тока *ВА* и напряжения *ВУ*, устройства коррекции *УК*, сумматоров подъема *СПЭ* и спуска электрода *ССЭ*, суммирующего усилителя *СУ*, цифроаналоговых преобразователей *ЦАП*, интегратора *И* и цифровых задатчиков тока *ЦЗТ* и напряжения *ЦЗН* дуги. Регулирование скорости перемещения электрода *Э* осуществляется электродвигателем *М* постоянного тока с помощью усилителя мощности *УМ* на тиристорах и устройства управления *УУ*, которое подключено к суммирующему усилителю. К входу *УМ* подключен тахогенератор *ТГ*, который связан с электродвигателем. Регулятор АРДМТ работает следующим образом.

При пуске печи на выходе датчика напряжения появляется сигнал, пропорциональный напряжению на электроде, который, проходя через устройство коррекции *УК*, изменяется по значению в зависимости от номера ступени печного трансформатора и поступает на вход сумматоров подъема *СПЭ* и спуска *ССЭ* электрода *Э*. С выхода *ССЭ* сигнал через суммирующий усилитель *СУ* и устройство управления поступает на вход усилителя мощности *УМ* тиристорного преобразователя, который управляет электродвигателем *М*. Электродвигатель через редуктор *Р* опускает электрод. Скорость спуска электрода устанавливается пороговым элементом *DT5*. Когда электрод *Э* достигает шихты, исчезает сигнал на выходе датчика напряжения. Электрод останавливается, если на выходе датчика тока *ВА* не появился сигнал о наличии тока дуги. При появ-

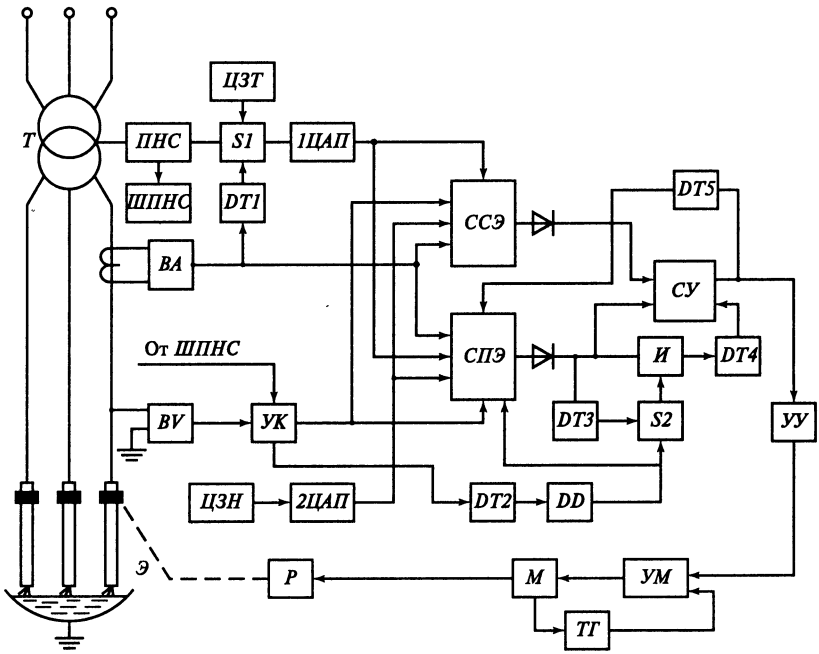


Рис. 60.72. Схема автоматического регулятора АРДМТ

лении тока дуги сигнал с *ВА* поступает на входы *ССЭ* и *СПЭ*, а также на пороговый элемент *DT1*. При превышении током значения, равного примерно 1 % номинального тока дуги, срабатывает пороговый элемент *DT1*, отпирающий ключ *S1*. С цифрового задатчика тока дуги *ЦЗТ* на вход цифроаналогового преобразователя *1ЦАП* поступает сигнал в двоично-десятичном коде, задающий ток дуги. С выхода *1ЦАП* сигнал поступает на выходы *ССЭ* и *СПЭ*. На входы *ССЭ* и *СПЭ* поступает также сигнал с *2ЦАП*, который преобразует в аналоговую форму сигнал, поступающий с выхода цифрового задатчика зоны нечувствительности в двоично-десятичном коде. В *ССЭ* и *СПЭ* происходит суммирование сигналов в зависимости от полярности результирующего сигнала, а также от того, превышает ли он зону нечувствительности. На вход суммирующего усилителя *СУ* поступает сигнал с *ССЭ* либо с *СПЭ*. Соответственно электродвигатель стоит или перемещает электрод вверх или вниз в зависимости от знака отклонения режима от заданного.

Пороговый элемент *DT2* контролирует режим короткого замыкания фазы печи и совместно с логическим элементом *DD* обеспечивает автономность регулирующих воздействий при коротких замыканиях: при коротком замыкании в одной из фаз ДСП выдается запрет на подъем электрода в отстающей по направлению вращения векторов напряжения фазе. При коротких замыканиях одновременно во всех фазах ДСП запрет на подъем любого из электродов исключен. Пороговые элементы *DT3*, *DT4* и интегратор *И* определяют значение интеграла отклонения и переводят автоматический регулятор мощности в релейный режим работы. Шифратор переключателя номера ступени *ПНС* напряжения *ШПНС* преобразует информацию о номере ступени печного трансформатора *Т* в двоичный код и направляет эту информацию в устройство коррекции регулятора. Зона нечувствительности автоматического регулятора АРДМТ от 1 до 10 %, разгон двигателя 0,6 с, торможение 0,3 с, статическая характеристика — пропорционально-релейная, скорость двигателя — до 5 м/мин. Устойчивый характер автоматического управления обеспечивается при переходе с пропорциональной характеристики при спуске электрода на релейный режим при отклонении номинального значения тока от 5 до 50 % при подъеме электрода.

Новосибирское НПО «Электротерм» выпускает ДСП с гидравлическими механизмами перемещения электродов. Такие печи оснащаются автоматическим регулятором типа АРДГ, схема которого приведена на рис. 60.73. Регулятор состоит из блоков фильтрации и сравнения *1*, усилителей постоянного тока *2*, системы импульсно-фазового управления *3*, блоков тиристоров *4*, двух однофазных двигателей с полым ротором *5*, золотника *6*, гидроусилителя *7*. Рабочая жидкость подается под плунжеры *8* из пневмогидроаккумулятора *9* через гидроусилитель, управляемый золотником. Насос *10*

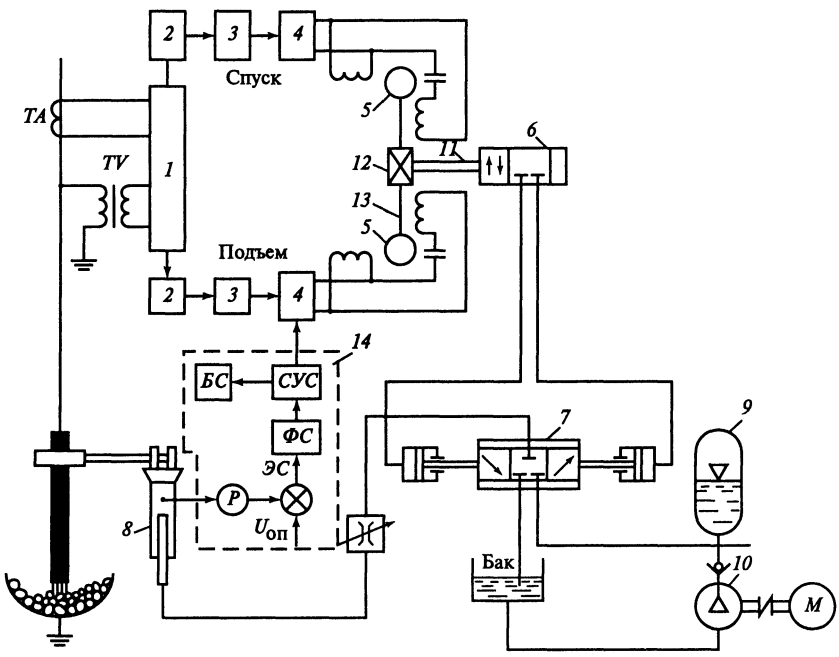


Рис. 60.73. Схема автоматического регулятора АРДГ

питает рабочей жидкостью аккумуляторы, поддерживая в них необходимое давление Два двигателя *5*, сидящие на общем валу *13*, подключены по конденсаторной схеме к выходам блоков тиристоров, управляемых системами спуска и подъема *3*, на входы которых поступают сформированные усилителями постоянного тока сигналы *aU—bI* разностного характера Последние формируются в блоке фильтрации и сравнения, куда приходят от трансформаторов тока и напряжения ДСП

Сигналы, пропорциональные току и напряжению фазы, в виде напряжений с частотой 50 Гц преобразуются резисторно-емкостными схемами расщепления в трехфазные напряжения, которые затем выпрямляются на диодных мостах Полученные сигналы постоянного тока вычитаются в схеме сравнения Сигнал рассогласования подается далее через усилитель постоянного тока в систему импульсно-фазового управления, которая управляет блоком тиристоров Через включенный тиристор протекает ток нагрузки двигателя При заданном режиме развиваемые двигателями *5* моменты равны и, так как они направлены в разные стороны, система неподвижна В случае разбаланса момент одного из двигателей становится больше — система поворачивается Сидящая на валу двигателей *5* шестерня *12*, сцепленная с рейкой *11*, обеспечивает установку управляющего золотника гидроусилителя, в результате чего происходит соответствующее перемещение плунжера и электрода ДСП

Быстродействие автоматического регулятора АРДГ 0,13 — 0,2 с, регулируемая ступенчато зона нечувствительности от 2 до 10 % Новые регуляторы АРДГ выпускаются с тиристорными усилителями Это обеспечивает значительное увеличение точности регулирования мощности ДСП, так как при этом снижается до паспортных значений нагрузка на трансформатор тока, появляется возможность более точно задавать зону нечувствительности, применять программаторы, вводить стабилизирующие обратные связи и снижать дисперсию тока ДСП [60 40, 60 41]

Учет изменения статических и динамических характеристик ДСП, напряжения на высокой стороне трансформатора, зоны нечувствительности и выравнивание фазных мощностей позволяют реализовать микроЭВМ Большие работы по созданию систем автоматического управления ДСП с применением управляющего вычислительного комплекса (УВК) на базе микроЭВМ были проведены в АО «ВНИИЭТО» и продолжаются в фирме «МЭЛТА» упомянутого АО [60 42, 60 43]

Система автоматического управления *14* выполняет следующие функции

управление директивным электрическим режимом на каждом технологическом интервале плавки с учетом требований равномерного износа футеровки, защиты подины от разрушения, равномерного проплавления колодцев,

прогнозирование температуры жидкого металла в ДСП по адаптивной модели и коррекцию задания на вводимую в ДСП мощность в зависимости от фактической температуры металла,

выбор и поддержание рациональных режимов в условиях введения ограничения на уровень потребляемой активной мощности [60 44],

периодический вывод на экран дисплея и печать усредненных измеренных и вычисленных информационных параметров процесса электроплавки,

управление уставками регуляторов мощности и переключением ступеней напряжения печного трансформатора,

обмен информацией и командами с управляющей вычислительной машиной более высокого уровня электросталеплавильного цеха, завода, комбината

На рис 60 74 представлена структурная схема системы автоматического управления (САУ) процессом плавки в ДСП с применением управляющего вычислительного комплекса УВК-2 Система состоит из устройства измерения параметров печи *УИП*, регулятора перемещения электродов *РПЭ*, переключателя ступеней напряжения *QF*, печного трансформатора *T*, измерительных преобразователей *U* мощности активной *P*, реактивной *Q* и напряжения *V*, электронного потенциометра *RP* с аналоговым выходом для контроля температуры металла, формирователя инициативного сигнала *ФИС* и комплекса УВК-2

В состав комплекса УВК-2 входят устройства связи с объектом *УСО*, т е модуль аналого-цифрового преобразователя *МАЦИ*, модуль ввода инициативных сигналов *МВИС*, модуль кодового управления контактный *МКУК* и микроЭВМ Последняя имеет модульный принцип построения, т е все функциональные блоки ЭВМ выполнены в виде конструктивно законченных устройств (модулей), связь между которыми осуществляется через единый канал обмена информацией Канал ЭВМ обеспечивает три типа обмена данными — программный, в режиме прямого доступа к памяти и в режиме прерывания программы Центральный процессор *ЦП* микроЭВМ с помощью оперативного задающего устройства *ОЗУ* управляет распределением времени использования канала внешними устройствами и выполняет все необходимые арифметико-логические операции для обработки информации

В состав микроЭВМ входят также устройства управления *УУ*, принтер *ЭПМ*, фотоэлектронное устройство ввода *ФСУ*, задающее устройство *ЗУ*, устройства параллельного обмена *УПО*, устройства пользователя *УП* и программируемое постоянное задающее устройство *ППЗУ*

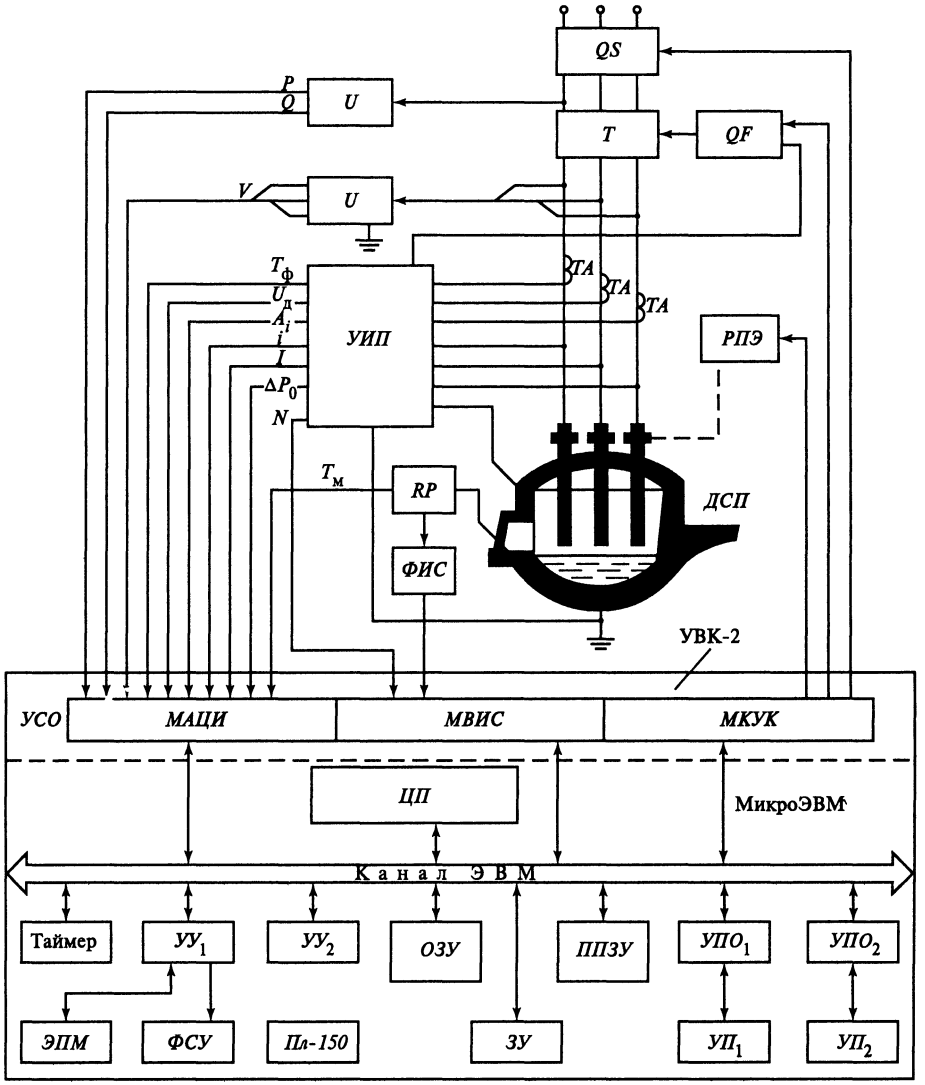


Рис. 60.74. Схема САУ ДСП с комплексом УВК-2

устройства измерения параметров ДСП плекс УВК-2 вводится информация: напря- ия дуг и фаз, температуры металла и футеров- игналы отношения амплитуд второй, третьей той гармоник токов дуг к амплитудам первых оник токов A_i, аналоговый сигнал, пропор- иальный номеру ступени напряжения печного сформатора N, сигнал директивного ограниче- на потребление активной мощности в часы контроля максимума нагрузки и сигнал о состоя- нии выключателя высокого напряжения QS: вклю- чено-отключено.

На стадии расплавления твердой шихты состоя- ние расплава в ДСП оценивается по косвенным па- раметрам процесса — колебательности и гармони- ческому составу токов дуг [60.41], положению электродов, расходу электроэнергии, температуре поверхности футеровки и скорости ее изменения. Вся электроплавка разбивается на ряд интервалов, и ее состояние оценивается по статистическим по- казателям дисперсий колебаний токов дуг, позво- ляющим определять моменты смены интервалов. Электрический режим задается одинаковым для всех трех фаз и различным для разных интервалов.

Кроме основных функций контроля и управле- ния САУ с микроЭВМ выполняет функции форми- рования и вывода управляющих воздействий, а также наблюдаемой информации на дисплей и печать, связь с оператором-плавильщиком в ре- жиме диалога.

Функциональные возможности САУ с микроЭВМ реализуются независимыми алгоритмическими программными и аппаратными модулями. Независимость достигается наличием общего информационного банка системы, буферных зон в локальных модулях и автономного управления при запрещении прямого обмена информацией между функциональными блоками и модулями. Общий алгоритм САУ с микроЭВМ реализован путем распределения приоритетов между частными алгоритмами при обязательном сохранении их независимости. Логически частные алгоритмы связаны между собой через развитую систему прерываний в соответствии с выбранными приоритетами. Одно из важнейших преимуществ САУ на базе вычислительной техники состоит в возможности организации диалога с оператором — электросталеплавильщиком. С его помощью обеспечиваются технологическая и энергосберегающая ориентировка процесса в ДСП, инициативное вмешательство как в параметры регулирования, так и в сами методы оптимизации, обмен сообщениями и недопущение критических ситуаций. Решение этой задачи достигнуто путем разработки программных макроинструкций и аппаратной реализации их вызова с использованием диалоговых программ.

Автоматизированная система управления с УВК на базе микроЭВМ для установок комплексной обработки стали (АКОС). За последние годы большое распространение получили агрегаты АКОС, поставленные на ряд электрометаллургических заводов страны, например на Дальневосточный металлургический завод. Такие установки оснащены САУ, принципиальная схема которой представлена на рис. 60.75.

Система содержит САУ продувкой аргона *1* с регулятором *2* подачи аргона и датчиком *3* контроля расхода и давления аргона; САУ дозированием сыпучих материалов и ферросплавов *4*, состоящую из бункеров с вибропитателями *5*, дозатора *6* с массоизмерительными устройствами *7* и транспортных устройств для подачи материалов в установку; систему аналитического контроля *8*; устройство подачи порошкообразных материалов, включающее высоконапорный аэрационный питатель порошка *9*, с датчиком уровня порошка *10*, фильтр *11*, рабочий бункер-дозатор *12* и УВК. В состав УВК входят ЭВМ, устройство связи с объектом, дисплей, табло световой сигнализации и печатающее устройство. Работа происходит так.

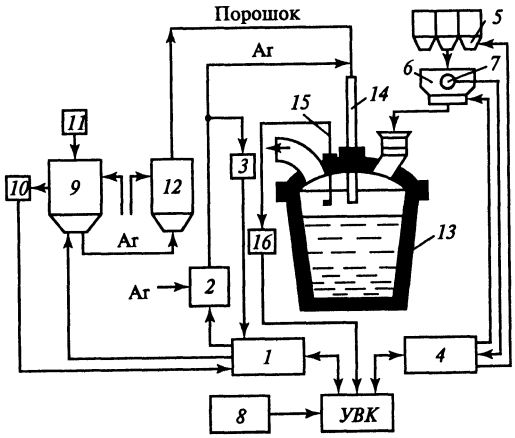


Рис. 60.75. Автоматизированная система управления с УВК для АКОС

Ковш со сталью, частично раскисленной и легированной при выпуске, подают на установку доводки *13*, которая включает в себя футерованную фурму *14* для подачи аргона и порошкообразных материалов, измерительный зонд *15* для определения температуры стали, содержания в ней кислорода и для отбора проб металла. ЭВМ УВК выдает задание (время и расход аргона) САУ продувкой аргона. Автоматический регулятор подачи аргона поддерживает заданные его расход и давление. При израсходовании заданного количества аргона САУ продувкой выдает команду регулятору *2* на отключение подачи аргона. После продувки аргоном, т.е. после усреднения температуры и химического состава металла, производят измерения температуры металла и отбор проб с помощью зонда. Проба металла поступает в экспресс-лабораторию для анализа.

Полученные от системы *8* данные о составе металла и от вторичного прибора *16* данные о его температуре вводятся в ЭВМ УВК. На основании этих данных и заданного состава стали ЭВМ УВК рассчитывает необходимые количества добавок и выдает задание системе *4* на подачу легирующих материалов и подсистеме *1* на продувку аргона и подачу в струе аргона порошкообразных материалов. Масса порошкообразных материалов, подаваемых в струе аргона, зависит от содержания серы в стали перед продувкой и от ее заданного содержания и определяется, таким образом, из разностного уравнения, приведенного к массе стали.

В соответствии с заданием подсистема *1* включает в заданной последовательности вибропитатели *5*, загружающие в дозатор *6* материалы. После набора материалов по команде системы *4* производится выгрузка материалов в АКОС. После окончания продувки повторно производят измерения температуры и отбор пробы с помощью зонда. Таким образом, АСУ АКОС с УВК на базе микроЭВМ (см. рис. 60.75) выполняет: сбор, первичную обработку и хранение технической информации; контроль состояния технологического оборудования; расчет оптимального состава легирующих и шлако-

образующих материалов по данным химического анализа и температуре стали в ковше; управление расходом аргона; расчет продолжительности обработки металла аргоном; формирование и печать отчетных документов. Применение АСУ АКОС с УВК на базе микроЭВМ позволяет уменьшить расход легирующих добавок и повысить качество обрабатываемой стали.

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РУДОВОССТАНОВИТЕЛЬНЫМИ ПЕЧАМИ

Принципы построения САУ с ЭВМ и автоматических регуляторов РВП слабо отличаются от систем автоматического управления ДСП, и неслучайно сами регуляторы бывают двойного назначения, например регулятор мощности для ДСП и ферросплавных печей (ФСП) [60.45]. Схема такого регулятора приведена на рис. 60.76. В рабочем режиме сигналы, пропорциональные току фаз, поступают на вход блока обработки сигналов *БОС*, откуда после преобразования переменного тока в постоянный и фильтрации нижних частот подаются в блок контроля токов *БКТ*. Сюда же подаются напряжения с электродов фаз, которые прошли через разделительные трансформаторы с регулируемым выходным напряжением, расположенные в блоке трансформаторов напряжения *БТН*.

Блок *БТК* выполняет функции логического устройства, анализирующего значения электрических параметров (токов и напряжений фаз) путем сравнения с заданными значениями: минимальным, максимальным и номинальным значениями тока и фазных напряжений на электродах. Заданные значения формируются в блоке задания и индикации *БЗИ* оператором — ферросплавщиком в цифровом виде с последующей индикацией и преобразованием в аналоговый сигнал для передачи в блок *БКТ*. Здесь определяется состояние каждой из трех фаз *ФСП* и формируются команды — по две на работу и направление движения каждого из регуляторов мощности фазы *РМФ*.

Сигналы, полученные на входе *БКТ*, поступают на вход платы управления рассогласованием *ПУР* для суммирования с сигналами задания, формирования команды «Запрет» на работу регуляторов *РМФ* и, в случае необходимости, сигнала на подъем электрода. Характер процесса регулирования определяется функциональным преобразователем *ПФП*, имеющим пропорционально-релейную характеристику с насыщением и регулируемой зоной нечувствительности при подъеме электрода *ФСП* и пропорциональную характеристику с насыщением и регулируемой зоной нечувствительности при движении электрода вниз. При работе устройства на подъем электрода имеется возможность регулировки пропорциональной части характеристики путем изменения рассогласования, при котором регулятор переходит на работу в релейном режиме.

Заданный характер переходного процесса при регулировании обеспечивается системой управления электроприводом перемещения электрода, состоящей из регуляторов тока *РТ* и скорости *РС*. Выходной сигнал регулятора тока поступает в блок управления тиристорами *БУТ*, который управляет работой трехфазного реверсивного тиристорного преобразователя *БТ* с раздельным управлением,

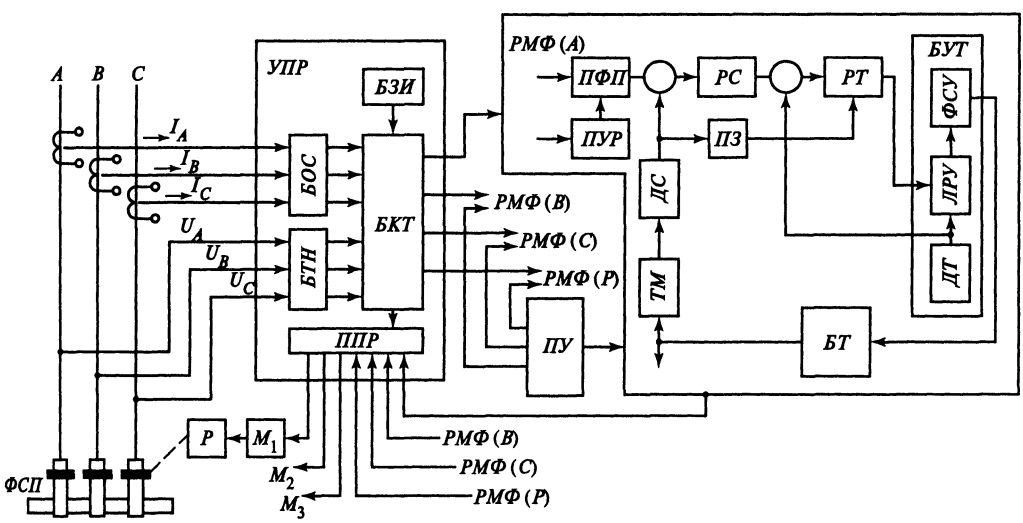


Рис. 60.76. Схема автоматического регулятора мощности для ферросплавной печи

включающего в себя логическое устройство *ЛРУ* и фазосдвигающее устройство *ФСУ*.

Обратная связь по току *ДТ* и частоте вращения двигателя *ДС* выполнена гальванически развязанной, что позволяет защитить прямой канал управления приводом от проникновения помех по цепям обратных связей. Этой цели служат активные фильтры второго порядка с многопетлевой обратной связью, обеспечивающие фильтрацию аналоговых сигналов тока и частоты вращения двигателя.

При перегрузках, когда двигатель перемещения электрода не вращается, подача импульсов на тиристоры блокируется платой защиты *ПЗ*. Блокировка осуществляется с выдержкой, чтобы исключить возможность снятия управляющих импульсов при кратковременных остановах двигателя. Сигнал на торможение электродвигателя для его останова формируется пропорционально частоте вращения его якоря.

Особенности построения системы управления электроприводом позволяют получить от него максимальное быстродействие при эффективном ограничении динамических токов в якорной цепи, что уменьшает нагрев двигателей *М* перемещения электродов *ФСП* и увеличивает продолжительность их работы до ремонта более чем в 3 раза.

Принципы построения САУ РВП с ЭВМ в основном совпадают с подробно изложенной структурной схемой САУ ДСП с применением УВК. Например, в САУ шестиэлектродной ферроникелевой печью мощностью 40 М · ВА, где использовались комплексы на базе МС УВТ В-7 с применением серийного УВК типа КТС ЛИУС были реализованы следующие функции:

параметры регулирования: стабилизация мощности путем перемещения электродов в зависимости от активной мощности под электродом, а также загрузка огарка в зависимости от средней мощности под электродом и положения электрода;

параметры контроля: номер ступени печного трансформатора, напряжения под электродами, токи фаз и предельные значения токов фаз, мощности под электродами, коэффициент мощности, расчетное время открытия затворов труботечек.

Сразу следует отметить особенность: измеряемое напряжение равно сумме полезного напряжения и падений напряжения в свободной части электрода, контактных щеках и короткой сети. Полезное напряжение — это напряжение участка, включающего часть электрода, находящуюся в шихте, и проводящую подину РПЗ-40 Ц. Сопротивление свободной части электрода определяется длиной перепуска, состоянием электродной массы, положением зоны спекания массы относительно контактных щек. Сопротивление последних зависит от качества поверхностей и степени прижима. Несмотря на эти «измерительные» трудности, применение САУ с микропроцессорными средствами позволило использовать экспоненциальный метод прогнозирования режимов ферроникелевого процесса [60.46] и реализовать авторегрессионный принцип управления процессом никелевой плавки [60.47].

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕЧАМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА, ПЛАЗМЕННЫМИ УСТАНОВКАМИ И ВАКУУМНЫМИ ДУГОВЫМИ ПЕЧАМИ

Системы автоматического управления дуговыми сталеплавильными печами и плазменными установками постоянного тока отличаются простотой и практически ограничиваются стабилизацией тока дуги и поддержанием необходимого промежутка между концом электрода и металлом, как это реализовано в вакуумно-дуговых печах (ВДП). Трудности возникают лишь в плазменных установках, где для особо точных режимов применяется переменный ток. Для таких случаев полезно использовать специальные программируемые методы, ориентированные на передовые достижения микроэлектроники и компьютерную технику [60.48].

С учетом сказанного остановимся на автоматическом управлении ВДП. Печь как объект управления представляется совокупностью четырех динамических звеньев: межэлектродного промежутка, электрода, электрической дуги и слитка металла (рис. 60.77). Звенья имеют между собой связи по скорости плавки, размеру межэлектродного промежутка, активной мощности, расходуемой на плавление электрода, и мощности, поступающей на поверхность жидкой металлической ванны слитка.

Входными величинами печи являются напряжение источника питания и скорость подачи электрода, выходными — параметры температурного поля слитка, влияющие на его качество. Системы управления ВДП обычно строятся двухконтурными — с контурами регулирования тока печи (регулятор тока) и длины межэлектродного промежутка (регулятор скорости подачи электрода). В качестве примера приведем разработанную АО «ВНИИЭТО» САУ ти-

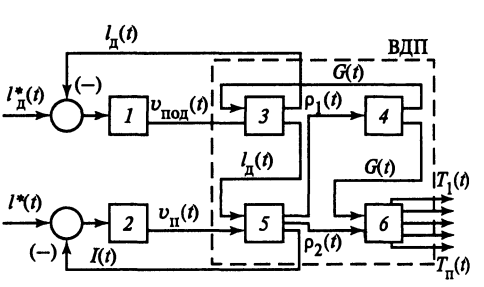


Рис. 60.77. Функциональная схема САУ ВДП

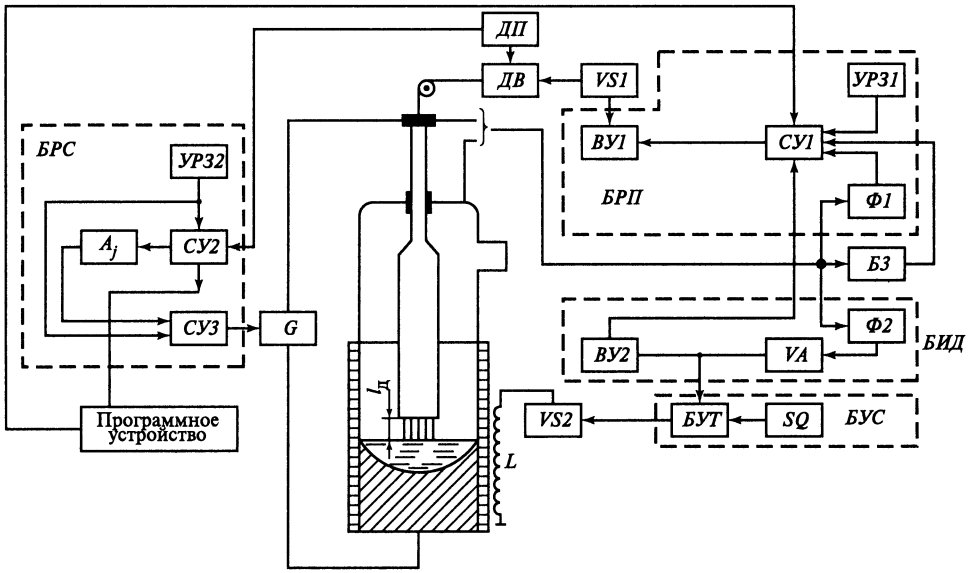


Рис. 60.78. Функциональная схема системы управления ВДП типа БУДП

па БУДП-10, реализующую интегральный закон управления (рис. 60.78).

Система состоит из двух каналов стабилизации: длины межэлектродного промежутка (блоки 1, 3, 4) и скорости плавления расходуемого электрода (блоки 2, 5, 6). Первый канал представляет собой замкнутый контур регулирования и состоит из следующих блоков: регулирования длины *БРП*, индикации ионизации и боковых дуг *БИД*, управления соленоидом *БУС*. Исполнительным органом канала служит привод перемещения электрода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения *ДВ*, управляемым реверсивным тиристорным преобразователем *VS1*.

Выходной сигнал с *БРП* поступает на *VS1*, вызывая перемещение электрода и соответственно изменение длины межэлектродного промежутка. Входной фильтр *Ф1* осуществляет фильтрацию напряжения печи с постоянной времени 0,5—0,8 с, благодаря чему исключается подача на вход канала высокочастотной составляющей сигнала. Сигнал рассогласования формируется в суммирующем усилителе *СУ1*, на один вход которого поступает напряжение с фильтра *Ф1* (сигнал обратной связи), а на другой — напряжение уставки, снимаемое с узла ручного задания *УРЗ1*. Выходной усилитель *ВУ1* согласует входные параметры регулятора с входными параметрами *VS1*.

Для коррекции напряжения уставки на вход *УРЗ1* может подаваться сигнал, пропорциональный току печи. Блок имеет пропорциональную характеристику вход-выход с ограничением, причем зона нечувствительности регулирования зависит от переплавляемого металла: для стали 0,1—0,5 В, для титана 0,5—2,5 В.

В регуляторе предусмотрен блок защиты от короткого замыкания и снижения напряжения печи *БЗ*, на вход которого поступает сигнал, пропорциональный напряжению печи. При снижении последнего ниже допустимого уровня сигнал с выхода *БЗ* подается на *СУ1*, при этом обеспечивается быстрый подъем электрода. Блок *БИД* предназначен для обнаружения ионизации и боковых дуг, для уменьшения высокочастотной составляющей напряжения печи, а также для выработки сигналов: на *БРП* — для уменьшения длины, на *БУС* — для увеличения тока соленоида, управляемого тиристорным преобразователем *VS2*. Основными функциональными элементами *БИД* являются узкополосный фильтр *Ф2* и преобразователь частота — напряжение *VA*, который преобразует высокочастотную составляющую напряжения печи в аналоговый сигнал и при ее снижении подает соответствующий сигнал на выходной усилитель *ВУ2*.

Блок *БУС* предназначен для создания знакопеременного постоянного или пульсирующего тока соленоида *L*. В его состав входит задатчик формы и тока соленоида, представляющий собой генератор импульсов *SQ* с регулируемой частотой и скважностью. Выходной сигнал *SQ* поступает на вход согласующего усилителя *БУТ*.

Канал стабилизации скорости плавления представляет собой блок регулирования скорости плавления *БРС*. Сигнал управления формируется как разность между желаемым и текущим значениями скорости плавления (скорости подачи), затем преобразуется согласно установленному закону регулирования и подается на вход источника питания *G* ВДП. На вход согласующего усилителя *СУ2* поступает сигнал от датчика скорости перемещения

электрода или датчика скорости плавления *ДП* и с узла ручного задания *УР32*. Сигнал рассогласования между текущим и желаемым значениями скорости плавления интегрируется в интеграторе *А* и поступает на вход суммирующего усилителя *СУ3*, где суммируется с сигналом уставки скорости плавления.

Выходной сигнал *СУ3* является сигналом управления источником питания печи. Значение постоянной времени интегрирования интегратора выбирается в соответствии с приведенными выше данными. Автоматическая система управления ВДП разработана на базе интегральных микросхем и обладает большой надежностью и помехозащищенностью.

Регулятор ВДП типа ШЦД с использованием микроЭВМ содержит три канала регулирования: тока дуги путем изменения напряжения источника питания печи, длины дуги путем управления перемещением электрода и, наконец, тока соленоида. Перед началом плавки осуществляется ввод исходной информации для предстоящей плавки с помощью набора переключателей задатчика программы плавки в оперативную память микроЭВМ. Контроль правильности ввода исходной информации осуществляется визуально с помощью панели индикации. Система предусматривает контроль давления в камере ВДП. Управление осуществляется следующим образом.

После начала плавления САУ снижает ток, уменьшая напряжение источника питания ВДП. После разогрева печь переходит в установившийся режим вакуумно-дугового переплава. В этом режиме САУ ШЦД с микроЭВМ поддерживает программные значения скорости и длины дуги, используя информацию о вольт-амперной характеристике дуги, полученную во время разогрева электрода. Переплав продолжается до получения слитка заданного размера, а затем наступает период выведения усадочной раковины. В этом режиме поддерживаются программные значения длины дуги и вводимой в ВДП мощности. После вывода усадочной раковины слиток охлаждают. Третий канал управления — по току соленоида — работает только в случаях появления процесса ионизации или развития боковых дуг.

Регулятор ШЦД непрерывно выдает на табло значения массовой скорости плавления и напряжения источника питания. На панель индикации выводятся: продолжительность плавки, активная мощность ВДП, ток электрода, перемещение электрода, программное значение скорости плавления и напряжение.

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕЧАМИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА

Для получения постоянной скорости наплавления слитка в печи электрошлакового переплава необходимо стабилизировать выделяемую в ванне мощность, поддерживая постоянными рабочий ток и напряжение шлаковой ванны в период кристаллизации слитка. Функциональная схема САУ ЭШП (рис. 60.79) содержит автоматический регулятор тока *1*, исполнительный механизм *2* для перемещения электрода *3* ЭШП, автоматический регулятор напряжения *4*, токосъемник *5*, переключатель ступеней напряжения под нагрузкой *6* и задатчик тока и напряжения *7*.

Рабочее напряжение печи E измеряется между поддоном кристаллизатора и участком электрода, находящимся на уровне верхнего торца кристаллизатора. Для повышения надежности и быстродействия в системе применен автоматический регулятор тока на тиристорах, имеющий пропорциональную статическую характеристику. Регулируемая зона нечувствительности 1—5 %, время разгона и торможения двигателя 0,6—0,3 с, максимальная скорость перемещения электрода 1,5 м/мин.

Автоматический регулятор тока воздействует через исполнительный механизм на перемещение электрода в сторону устранения возникшего отклонения по току. Автоматический регулятор напряжения сравнивает заданное значение напряжения $E_з$ с напряжением шлаковой ванны E, измеренным между поддоном и электродом, и воздействует на переключатель ступеней напряжения под нагрузкой в сторону устранения возникшего рассогласования по напряжению. Необходимость регулирования напряжения в процессе плавки потребовала реконструировать силовой трансформатор печи *Т*, чтобы уменьшить дискретность ступеней напряжения до 0,3—0,5 В.

Технические данные регулятора напряжения: характеристика — релейная, обработка возмущения — дискретная с задержкой, дискретность

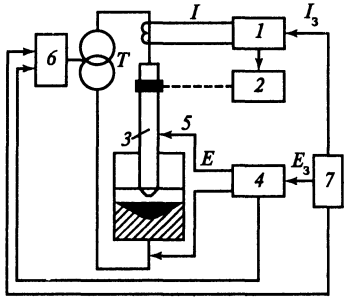


Рис. 60.79. Функциональная схема САУ ЭШП мощности в шлаковой ванне

0,2—0,5 В, задержка отработки возмущений 10 с, зона нечувствительности 2 %

Система автоматического программного управления процессом ЭШП по току и напряжению в шлаковой ванне с коррекцией скорости плавления электрода показана на рис 60 80 Система содержит блок программного управления *1*, автоматический регулятор напряжения *2* на шлаковой ванне с блоком задания *3*, автоматический регулятор тока *4* с блоком задания *5*, усилитель *6*, механизм *7* перемещения расходуемого электрода *8*, автоматический регулятор *9* скорости наплавления слитка, один вход которого соединен с датчиком *10* скорости подачи расходуемого электрода, два других соединены с блоком программного управления

Выход автоматического регулятора *9* подключен ко входам блоков задания тока и напряжения системы автоматического регулирования тока и напряжения шлаковой ванны Печь *11* подключена к регулируемому источнику питания *12*, представляющему собой многоступенчатый печной трансформатор, снабженный переключателем ступеней напряжения под нагрузкой и дросселем подмагничивания, включенным во вторичную или первичную цепь трансформатора

Автоматический регулятор *9* выполнен импульсным и содержит импульсный датчик времени *13*, устройство коррекции задания *14* и счетный элемент сравнения *15*, сопоставляющий число импульсов в единицу времени, пропорциональное заданной скорости подачи электрода, с фактическим числом импульсов, пропорциональным пути, пройденному электродом за то же время Один вход счетного элемента *15* связан с импульсным датчиком времени *13*, другой — с импульсным датчиком *10* скорости перемещения электрода, третий — с блоком программного управления *1*, а выход его подключен к устройству коррекции задания *14*, к регуляторам тока и напряжения шлаковой ванны, работа которых пояснена в предыдущем примере При управлении процессом блок *1* изменяет заданные напряжения и ток таким образом, чтобы их отношение обеспечило поддержание заданных оптимального сопротивления шлака и межполюсного зазора Таким образом определяется и стабилизируется выделяемая в шлаке мощность

Автоматический регулятор *9* скорости наплавления слитка получает от блока программного управления *1* задание на требуемую скорость подачи электрода или, что то же, путь электрода, который он должен пройти за базовое время, равное, например, нескольким минутам, и сопоставляет его с фактическим путем *L*, пройденным электродом за базовое время, измеряемым датчиком *10* Одновременно регулятор корректирует заданный ток и заданное напряжение на такое значение, чтобы заданное сопротивление шлаковой ванны сохранялось неизменным и оптимальным для рассматриваемого этапа плавки и неравенство заданных и вычисленных значений *L* снижалось

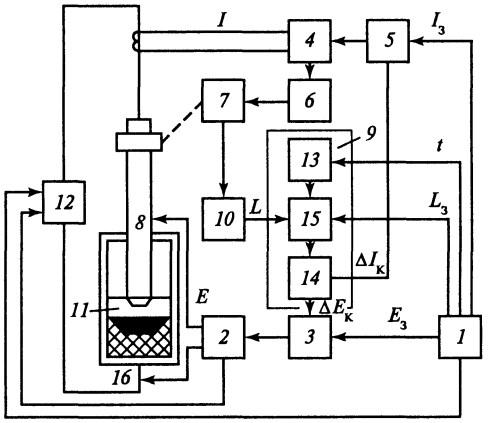


Рис. 60.80. Система автоматического управления процессом ЭШП

Система работает следующим образом Для каждого размера кристаллизатора и электрода, а также марки шлака экспериментально-статистически определяется оптимальная программа изменения скорости наплавления слитка и сопротивления шлака в зависимости от высоты сплавляемой части электрода или, что тоже самое, от времени и соответствующая им программа изменения среднестатистических тока и напряжения в шлаковой ванне Оптимальная программа изменения этих величин закладывается в блок *1* программного управления При включении установки ЭШП *11* блок *1* выдает команды на включение источника питания *12* и импульсного датчика *13* и одновременно устанавливает через блоки задания тока и напряжения задания регуляторам тока *4* и напряжения *2*

После разведения шлака и начала плавления электрода *8* блок *1* устанавливает задание по длине пути *L* регулятору скорости *9*, который периодически, через равные интервалы времени, сопоставляет заданное и фактическое значения подачи электрода *L* и в зависимости от знака рассогласования начинает медленно изменять задания регуляторам тока *4* и напряжения *2*, чтобы получаемое при этом изменение мощности обеспечило устранение рассогласования по пути *L*, т е отклонение скорости наплавления слитка от заданной, тогда как сопротивление шлаковой ванны сохраняется неизменным

При промышленной эксплуатации системы управления ЭШП была установлена ее высокая надежность и эффективность поддержания заданной мощности в шлаковой ванне и скорости плавления расходуемого электрода Применение рассматриваемой системы позволило увеличить производи-

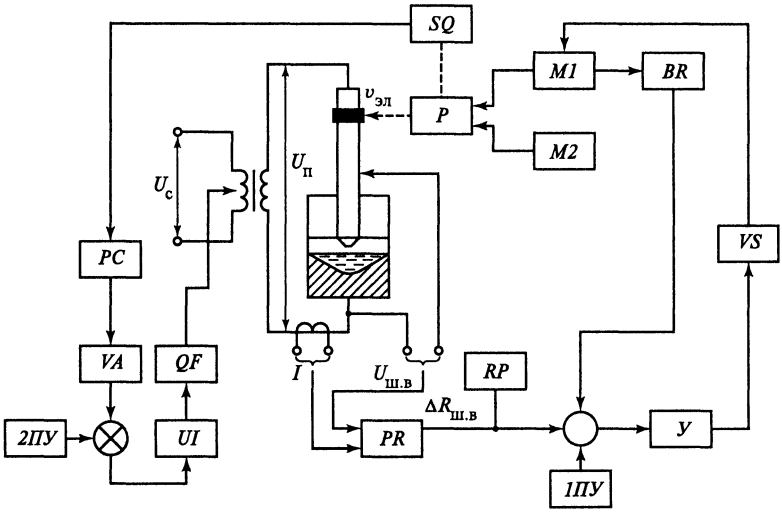


Рис. 60.81. Система автоматического программного управления ЭШП типа АРШМТ с тиристорным регулятором

тельность ЭШП на 3—4 % вследствие повышения средней скорости плавления электрода и снизить головную обрезь слитка до 3,5 % благодаря улучшению микроструктуры, в особенности верхней части слитка.

Наибольшее распространение получили системы автоматического программного управления с тиристорными регуляторами типа АРШМТ (рис. 60.81). Система имеет два канала программного регулирования сопротивления шлаковой ванны и скорости плавления электрода. Канал регулирования сопротивления шлаковой ванны содержит блок датчика активного сопротивления *PR*, программно-задающее устройство *1ПУ*, тиристорный преобразователь *VS*, усилитель мощности *У*, двигатель рабочей скорости перемещения электрода *M1* с редуктором *P* и тахогенератором *BR*.

Канал регулирования сопротивления шлаковой ванны, воздействующий на скорость двигателя перемещения электрода, может работать от датчика активного сопротивления *PR* или от датчика тока. На блок *PR* подаются сигналы: по току с трансформатора тока, по напряжению — напряжение шлаковой ванны. Сигнал, снимаемый с *PR*, сравнивается с сигналом задающего устройства *1ПУ*, и их разность через усилитель мощности *У* подается на тиристорный преобразователь *VS*, питающий двигатель *M1*. Если электрический режим печи ЭШП (сопротивление шлаковой ванны или ток электрода) отличается от заданного, то двигатель *M1* перемещает электрод в направлении устранения сигнала рассогласования.

Канал регулирования скорости плавления электрода содержит программно-задающее устройство *2ПУ*, датчик импульсов *SQ*, счетчик импульсов *PC*, блок преобразования код—напряжение *VA*, блок чувствительных элементов *UI* и переключатель ступеней напряжения *QF*.

Канал работает от датчика импульсов *SQ*, в качестве которого может быть использован путевой командоаппарат. Импульсы, поступающие от *SQ* за время, которое регулируется в пределах 1—30 с, суммируются счетчиком *PC*. С помощью блока *VA* число импульсов преобразуется в аналоговую величину, пропорциональную скорости электрода, которая затем сравнивается с заданной скоростью, определяемой на пульте *2ПУ*. Отклонение фактической скорости плавления электрода от заданной выявляется блоком *UI*, который дает команду *QF* уменьшить или увеличить напряжение ЭШП на одну или две ступени в зависимости от сигнала рассогласования.

Для регистрации сопротивления шлаковой ванны используется измерительно-регистрирующее устройство *RP* типа КСП. Система АРШМТ обеспечивает поддержание сопротивления шлаковой ванны с точностью 5—7 % и скорости электрода с точностью 6—8 %. Перемещение расходуемого электрода обеспечивается двигателями *M1* и *M2* через дифференциальный редуктор с маршевой скоростью 1,12 м/мин и рабочей скоростью 0,006—0,04 м/мин.

Сразу отметим, что имеется много модификаций САУ ЭШП, в том числе на базе микроЭВМ, выполненных АО «ВНИИЭТО» и фирмой «МЭЛТА» этого АО.

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИНДУКЦИОННЫМИ УСТАНОВКАМИ

Системы управлениями индукционными печами кроме типовых элементов для блокировки, сигнализации и управления основного и вспомогательного оборудования содержат ряд специфических систем защиты и управления. В качестве примера рассмотрим схему управления тигельной печью типа ИАТ-2,5. Схема силовых цепей установки приведена на рис. 60.82. Она включает в себя выключатель высокого напряжения *QF1*, печной трансформатор *T* и конденсаторную батарею *C1—C44*. С помощью разъединителей *QS1* и *QS2* производится подключение к трансформатору одной из двух тигельных печей. Обе печи одновременно не работают, что позволяет использовать один питающий трансформатор для двух установок, т.е. снизить установленную мощность электрооборудования. Системы управления для простоты рассмотрения разделены на отдельные фрагменты и приведены на рис. 60.83, *а—г*.

Питание индукционной тигельной печи осуществляется от сети напряжением 6 кВ. В схеме предусмотрено аварийное отключение выключателя высокого напряжения при снижении давления воды, при перегрузках и коротких замыканиях на стороне высокого или низкого напряжения, при увеличении давления газа в кожухе печного трансформатора *T*, сопровождающем межвитковые замыкания его обмотки. Световая сигнализация информирует оператора о нормальной работе насосов охлаждающей воды, срабатывании газовой защиты трансформатора, токовой защиты, защиты от перегрузок. Для информирования о том, что температура охлаждающей воды превысила допустимое значение, об открывании двери помещения конденсаторной батареи или о прогорании тигля используется также звуковая сигнализация.

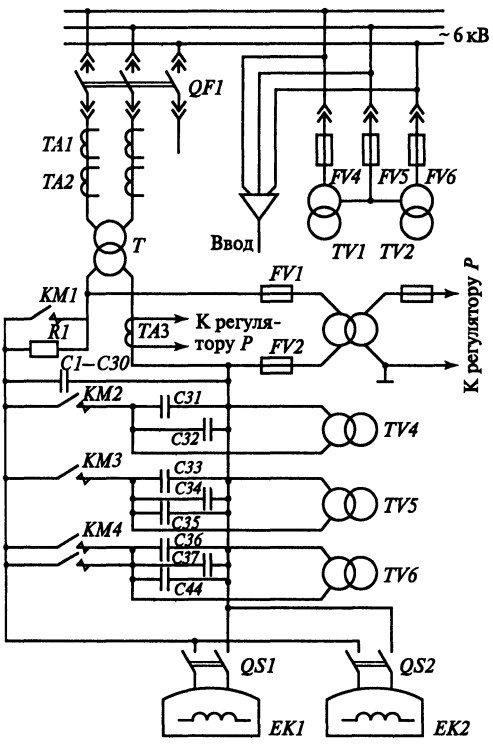


Рис. 60.82. Схема питания печи ИАТ-2,5

60.7. ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕЦИАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Специальные материалы, применяемые в конструкциях электропечей, принято разделять на четыре группы:

1) материалы для нагревательных элементов (чистые металлы, металлические сплавы, неметаллические материалы), табл. 60.42—60.44;

2) жаростойкие и жароупорные конструкционные стали и сплавы, табл. 60.45;

3) огнеупорные материалы, табл. 60.46;

4) теплоизоляционные материалы, табл. 60.47.

60.8. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

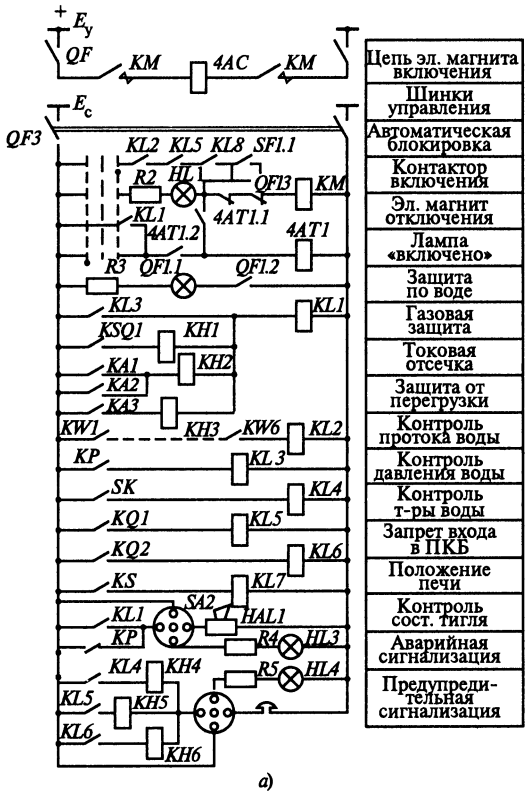
ЭЛЕКТРОФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Электрофизическим, электрохимическим и комбинированным методам размерной обработки соответствуют два вида технологии: снятие припусков («стружки») аналогично традиционным методам механической обработки резанием; деформирование заготовки подобно известным процессам обработки давлением — штамповке, прессовке.

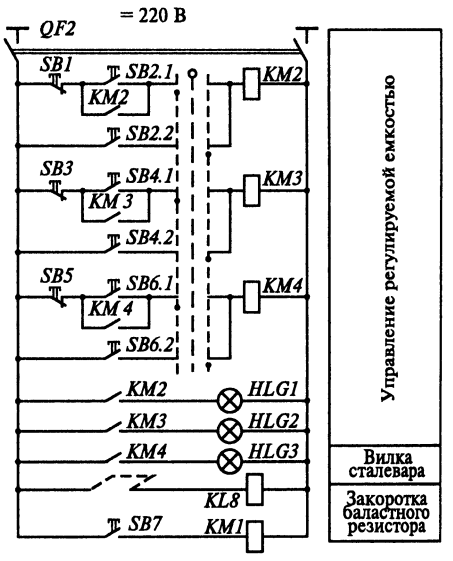
Область применения и перспективы развития электрофизико-химической (ЭФХ) технологии определяются тремя главными особенностями:

1) возможностью обработки материалов практически независимо от их прочностных характеристик, так как съем материала осуществляется не за счет создания концентрированных механических усилий, а вследствие ослабления связей в заготовке при нагреве (локальное плавление или испарение) либо перевода в результате электролиза металла в легко удаляемые химические соединения (например, гидрооксиды металлов);

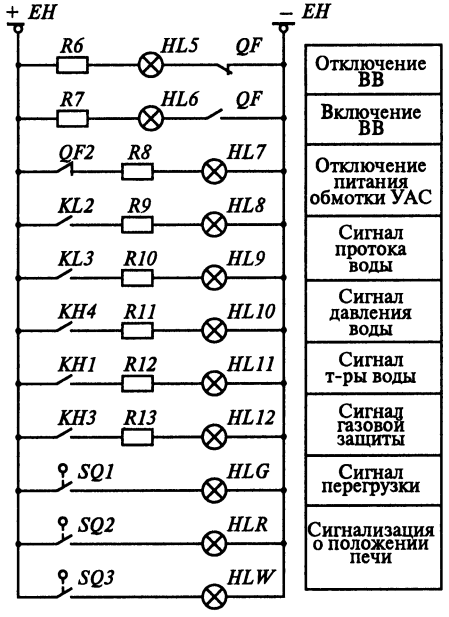
2) возможностью производительной обработки изделий со сложной формой (типа штампов, пресс-форм и т.п.). Это касается электроэрозионной и электрохимической обработки. позволяющей отображать (копировать) форму фасонного электрода-инструмента в теле заготовки благодаря тому, что интенсивность съема материала в данной точке зависит от местного межэлектродного расстояния.



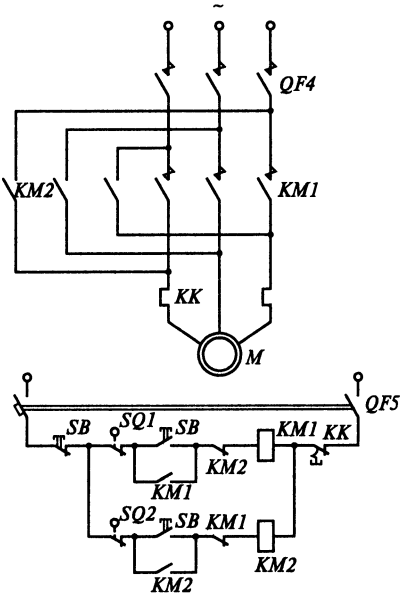
а)



б)



в)



г)

Рис. 60.83 Схемы печи ИАТ-2,5:

а — схема управления печью; *б* — схема управления регулируемой емкостью; *в* — схема сигнализации г *г* — управление приводом наклона печи

Таблица 60.42. **Основные свойства материалов для нагревательных элементов**

Материал	Плотность, кг/м^3	Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, Ом · м	Температурный коэффициент электросопротивления, 10^{-3} °С$^{-1}$	Температура плавления, °С	Максимальная рабочая температура, °С	Рабочая среда
Чистые металлы						
Молибден	10 200	$0{,}052 \cdot 10^{-6}$	5,1	2620	2000	Вакуум, инертная
Тантал	16 600	$0{,}15 \cdot 10^{-6}$	4,0	3100	2500	То же
Вольфрам	19 340	$0{,}055 \cdot 10^{-6}$	4,3	3380	2600	»
Ниобий	8660	$0{,}15 \cdot 10^{-6}$	4,0	2470	1700	»
Неметаллические материалы						
Карбид кремния	3200	1,0—2,0	Переменный	2820	1450—1600	Окислительная
Графит	1600	8—13	»	—	2800	Вакуум, инертная
Дисилицид молибдена	6300	$0{,}22 \cdot 10^{-6}$	4,8	2030 ± 50	1700	Окислительная, азотовосстановительная, инертная
Хромит лантана	—	$24{,}8 \cdot 10^{-3}$	Отрицательный		1750	Окислительная
Диоксид циркония	6270	0,647 (при 800 °С)	»	2585—2950	2100—2150	»

Таблица 60.43. **Основные свойства металлических сплавов для нагревательных элементов**

Марка сплава	Плотность, кг/м^3	Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, 10^{-6} Ом · м	Температура плавления, °С	Максимальная рабочая температура, °С	Рабочая среда
Х15Ю5	7280	1,24—1,34	1500	1000	Окислительная
Х23Ю5	7250	1,30—1,40	1500	1200	Окислительная, вакуумная
Х23Ю5Т	7210	1,34—1,45	1500	1400	Окислительная, углеродсодержащая, водород
Х27Ю5Т	7190	1,37—1,47	1510	1350	
ХН20ЮС	7700	0,98—1,06	1380	1100	
Х15Н60-Н	8200	1,07—1,17	1390	1125	
Х20Н80-Н	8400	1,04—1,15	1400	1200	Окислительная, инертная
ХН70Ю	7900	1,25—1,35	1390	1200	Окислительная, сероводородсодержащая, углеродсодержащая
ХН60Ю3	8100	1,24—1,34	1380	1200	
Х15Н60Ю3А	7900	1,20—1,30	1390	1200	

Вследствие этого можно увеличивать количество вводимой энергии по мере роста размеров обрабатываемой поверхности. Отсюда вытекает принципиально важная зависимость: общая продолжительность обработки полости зависит не столько от объема, сколько от ее глубины h, поскольку имеется возможность в соответствии с площадью обработки F изменять количество вводимой энергии. В традиционных же процессах обработки резанием количество допустимой энергии определяется не площадью F, а несоизмеримо меньшими и мало изменяющимися размерами инструмента и поэтому время обработки зависит от общего объема удаляемой «стружки». Таким образом, чем больше будет отношение F/h, тем выгодней в общем случае ЭФХ объемное формообразование;

3) возможностью обработки инструментами, не выдерживающих силового воздействия отверстий и щелей, а также отверстий, щелей, полостей, расположенных в недоступных для вращающегося инструмента местах, имеющих, например, криволинейные оси, сложные формы, в частности при

Таблица 60.44. **Области применения углеродистых сталей в атмосфере воздуха при рабочей температуре до 450 °С**

Марка	Применение
Ст. 3ПС, Ст. 3СП	Несущие и ненесущие элементы сварных и несварных конструкций и деталей
Ст. 3КП	Второстепенные, малонагруженные и ненесущие элементы сварных и несварных конструкций и деталей
10, 15	Патрубки, шайбы, прокладки, элементы сварных конструкций, змеевики, трубопроводы и другие детали, к которым предъявляются требования высокой пластичности (после нормализации или без термической обработки)
20	Сварные конструкции с большим объемом сварки
35, 40, 45	Несварные конструкции: оси, цилиндры, коленчатые валы, крепежные детали, звездочки, корпуса вентилей и другие детали
20Х	Сварные конструкции: втулки, шестерни, обоймы, кулачковые муфты, рычаги, диски, плунжеры и другие детали, к которым предъявляются требования высокой поверхностной твердости и невысокой прочности сердцевины
40Х	Несварные конструкции: оси, валы, шестерни, плунжеры и другие детали повышенной прочности
65Г	Несварные конструкции: пружины, упорные шайбы, фрикционные диски, корпуса подшипников, шестерни и другие детали, к которым предъявляются требования износостойкости

безотходном разделении твердых тел по любым траекториям.

Эти особенности проявляются в наибольшей мере при обработке деталей современных машин и аппаратов, работающих в особых условиях: в агрессивных средах, при воздействии интенсивных излучений, высоких температур, на больших скоростях и т.п., поскольку в этих случаях применяются, как правило, труднообрабатываемые традиционными методами материалы и сложные формы изделий. Таким образом, ЭФХ-методы наиболее применимы и эффективны в области технологии передовых отраслей техники. В области технологии инструментального производства они существенно облегчают изготовление фасонной штамповой оснастки, пресс-форм для пластмасс, металла, стекла, резины и подобных им изделий, причем создаются условия для развития малоотходной технологии формообразования без снятия стружки.

Электроэрозионная обработка. Электроэрозионная обработка (ЭЭО) основана на воздействии на деталь электрического разряда, возникающего между двумя электродами: деталью и инструментом (электродом в виде перемещающейся проволоки или электродом с конфигураций, соответствующей конфигурации требуемого отверстия или углубления в детали). Разряд инициируется в жидкой среде при сокращении расстояния между деталью и инструментом до пробивного. Параметры разряда, материал инструмента и среда подбираются такими, чтобы электрическая эрозия детали была максимальной, а электрода-инструмента — минимальной. Продукты эрозии попадают в жидкость и уносятся ею из зоны обработки.

Обработка происходит при перемещении электрода-инструмента и возникновении многих разрядов по всей обрабатываемой поверхности. Эрозионный промежуток является элементом электрической цепи генератора импульсных токов — его нагрузкой.

Таблица 60.45. **Области применения жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов в углеродсодержащей атмосфере**

Рабочая температура, °С	Марка материала		Применение
	деформируемого	литого	
До 950	15Х25Т, 20Х23Н18	40Х24Н12СЛ	Реторты, муфели, корзины, решетки, ролики, подовые плиты, поддоны и др.
	ХН67МВТЮ	ЖС6К	Крыльчатки вентиляторов и другие высоконагруженные детали
950—1050	15Х25Т, 20Х25Н20С2	20Х25Н19С2Л	Реторты, муфели, корзины, решетки, ролики, подовые плиты, поддоны и др.
	ХН67МВТЮ	ЖС6К	Крыльчатки вентиляторов и другие высоконагруженные детали
1050—1150	ХН70Ю, ХН45Ю	Х28Н48В5Л	Конвейсры, муфели и другие детали печей

Таблица 60.46. **Основные свойства огнеупорных материалов**

Материал и марка	Плотность, кг/м^3	Вид изделия	Огнеупорность, °С	Максимальная рабочая температура, °С	Термическая стойкость	Удельная теплоемкость, Дж/(кг · °С)	Теплопроводность, Вт/(м · °С)	Примечание
Динас	1900	Прямые и фасонные кирпичи	1700	1650	Недостаточная	$830 + 0{,}25t_{ср}$	$0{,}93 + 0{,}7 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	Своды, арки, стены дуговых электропечей
Элетродинас	2000		1720	1700	»	$830 + 0{,}25t_{ср}$	$0{,}93 + 0{,}7 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	
Динас легковес	1200	Набивки, прямые и фасонные кирпичи	—	1500	Удовлетворительная	$830 + 0{,}25t_{ср}$	$0{,}465 + 0{,}465 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	Стены и подина дуговых электропечей
Магнезит	2600—2800		2000	1650—1700	Недостаточная	$1050 + 0{,}29t_{ср}$	$6{,}15 - 2{,}67 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	
Плавленый магнезит	2700—2800		2860	1850	Удовлетворительная	—	—	
Хромомагнезит	2800—2900		2000	1600	Недостаточная	—	$2{,}14 - 0{,}377 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	
Хромомагнезитовый легковес	1500		1900	1500	Удовлетворительная	—	—	
Нагревостойкий хромомагнезит	2800—3000	То же	2300	1650	То же	—	$2{,}75 - 0{,}767 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	Своды дуговых электропечей
Шамот класса А	1800—1900	Прямые кирпичи, фасонные изделия	1730	1450	То же	$880 + 0{,}23t_{ср}$	$0{,}7 + 0{,}64 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	Футеровка электрических печей сопротивления
Шамот класса Б	1800—1900		1670	1350		$880 + 0{,}23t_{ср}$	$0{,}7 + 0{,}64 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	
Шамот легковес класса А	1300		1730	1300		$880 + 0{,}23t_{ср}$	$0{,}5 + 0{,}163 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	
Шамот легковес класса Б:								
БЛ-1,3	1300		1670	1300		$880 + 0{,}23t_{ср}$	$0{,}5 + 0{,}163 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	
БЛ-1,0	1000		1670	1250		$880 + 0{,}23t_{ср}$	$0{,}31 + 0{,}35 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	

Окончание табл. 60.46

Материал и марка	Плотность, кг/м^3	Вид изделия	Огнеупорность, °С	Максимальная рабочая температура, °С	Термическая стойкость	Удельная теплоемкость, Дж/(кг · °С)	Теплопроводность, Вт/(м · °С)	Примечание
Пеношамот	800	Прямые кирпичи, фасонные изделия	1730	1300	Удовлетворительная	$880 + 0{,}23t_{ср}$	$0{,}29 + 0{,}23 \cdot 10^{-3}t_{ср}$	Футеровка электрических печей сопротивления
Шамот ультралегковес	350—400		1730	1100		$880 + 0{,}23t_{ср}$	$0{,}093 + 0{,}162 \cdot 10^{-3}t_{ср}$	
Высокоглиноземистый огнеупор:								
ВГО-62	2300		1830	1600		—	2,5 + 1,3 при t = = 600—1000 °С	
ВГО-72	2500		1800	1700		—	2,5 + 1,3 при t = = 600—1000 °С	
Высокоглиноземистый легковес ВГЛДС-0,8	800		1700	1300	То же	—	$0{,}425 - 0{,}125 \cdot 10^{-3}t_{ср}$	Высокая стойкость к углеродсодержащим атмосферам
Муллит	2200—2400		1800	1650	То же	$836 + 0{,}25t_{ср}$	$1{,}68 - 0{,}23 \cdot 10^{-3}t_{ср}$	Детали высокотемпературных печей
Корунд (алунд)	2600—2900		1900	1700	Очень хорошая	$795 + 0{,}42t_{ср}$	$2{,}1 + 1{,}86 \cdot 10^{-3}t_{ср}$	
Диоксид циркония	4100	Фасонные изделия	2700	2000	Удовлетворительная	—	Примерно 2,0 при 1000 °С	Тигли, муфели, детали высокотемпературных печей
Оксид бериллия	3000		2600	2000	Хорошая	$1250 + 0{,}523t_{ср}$	1,85—3,7	
Графит	1600—1700		3000	2800	То же	1400—1600 при t = 800—2900 °С	55—25 при t = 1700—2900 °С	
Графит (уголь)	—	Крупка (зерно 1—1,25 мм)	3000	2800	»	1400—1600 при t = 800—2900 °С	1—4 при t = 1000-–2000 °С	Тепловая изоляция
Карборунд кл. I	2500	Фасонные изделия	2000	1500	Удовлетворительная	$963 + 0{,}147t_{ср}$	Примерно 20	Тигли, муфели, детали кладки
То же кл. II	2300		1900	1400		—	Примерно 17	

Таблица 60.47. **Параметры теплоизоляционных материалов**

Материал и марка	Вид изделия	Плотность, кг/м^3	Теплопроводность, Вт/(м · °С)	Максимальная температура применения, °С
Диатомит марки 700	Кирпич	700	$0{,}168 + 0{,}313 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	900
Диатомит марки 500	»	500	$0{,}105 + 0{,}232 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	900
Пенодиатомит ПД-350	»	350	$0{,}081 + 0{,}186 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	900
Диатомитовый порошок	Засыпка	500	$0{,}105 + 0{,}232 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	900
Вата минеральная (шлаковая) ВМ-150	»	150	$0{,}06 + 0{,}186 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	750
Стеклянная вата	»	200	$0{,}033 + 0{,}26 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	600
Зонолит (вермикулит вспученный В-150)	»	150	$0{,}07 + 0{,}232 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	1100
Асбовермикулит АВ-300	Плиты	300	$0{,}088 + 0{,}232 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	700
Асбест листовой (бумага асбестовая)	Листы	1200	$0{,}128 + 0{,}255 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	450
Перлитоцементные теплоизоляционные плиты ПЦ-350	Плиты	350	$0{,}081 + 0{,}232 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	500
Пеностекло	Кирпичи, блоки	240	$0{,}075 + 0{,}186 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	600
Вермикулитовые плиты	Плиты	250	$0{,}082 + 0{,}23 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	600
Перлит на фосфатной связке ПФ-350	Блоки	350	$0{,}045 + 0{,}163 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	1150
Керамоперлит КП-350	»	350	$0{,}087 + 0{,}186 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	900
Вата каолиновая ВК	Засыпка	100	$0{,}03 + 0{,}22 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	1100
Войлок углеграфитовый	»	180	0,2 в вакуумс при 1000 °С 0,3 в аргонс при 1000 °С	2000
Известково-кремнистые изделия ИКИ	Плиты, блоки	220	$0{,}0615 + 0{,}1 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	600

В соответствии с характером протекающих во время обработки физических процессов генератор может работать в режимах холостого хода, рабочем и короткого замыкания, в последнем случае источник питания генератора подключен к элеметам R, L, C, основные соотношения для такой цепи представлены далее. В рабочем режиме нагрузкой является электроэрозионный промежуток *ЭП*, представляющий собой нелинейное сопротивление как элемент электрической цепи, вольт-секундная характеристика которого состоит из трех основных участков (рис. 60.84): *1* — с крутым падением, длительность которого, определяемая временем формирования канала разряда, равна 10^{-11}—10^{-8} с; *2* — с монотонным уменьшением напряжения, длительность этого участка на четыре-семь порядков

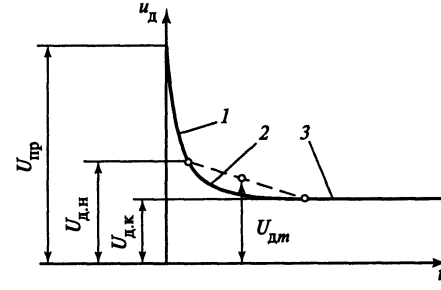


Рис. 60.84. Вольт-секундная характеристика эрозионного промежутка

больше и равна 100—500 мкс; *3* — горизонтальный участок, на котором (при данных среде, полярности и паре электродов) напряжение изменяется мало при увеличении длительности импульса. Закон изменения во времени напряжения в *ЭП* в послепробойной стадии мало зависит от формы подводимого импульсного напряжения, колебаний межэлектродного зазора и других факторов. Поэтому *ЭП* может быть в первом приближении представлен некоторой изменяющейся во времени фиктивной противоЭДС, включенной встречно разрядному току.

При длительных дуговых разрядах основное падение напряжения на *ЭП* сосредоточивается в прикатодной области. Оно зависит от материала катода и межэлектродной среды, мало зависит от тока через *ЭП* и составляет 15—35 В. Падение напряжения в канале и в прианодной области относительно невелико: от 1—2 В до долей вольта. После начала разряда ток не может быть ограничен *ЭП* и определяется последовательно включенными сопротивлением и напряжением источника питания.

Приближенно изменение во времени напряжения дуги $u_д$, действующего на *ЭП*, можно описать экспоненциальной функцией, определяемой рядом постоянных величин, зависящих от материала электродов, полярности напряжения, вида рабочей жидкости, и справедливой для используемого при ЭЭО диапазона электрических режимов:

$$u_д = U_{д.н}\gamma\left(e^{-t/\tau} + \frac{1+\gamma}{\gamma}\right),$$

где $U_{д.н}$ — напряжение на промежутке в начале послепробойной стадии (см. рис. 60.84); $\gamma = \frac{U_{д.н} - U_{д.к}}{U_{д.н}}$; $U_{д.к}$ — напряжение на промежутке в конце участка *3* кривой; τ — постоянная времени, характеризующая длительность участка *2* и зависящая от материалов электродов, полярности напряжения и среды [медь(+) — сталь (–) τ = 30 мкс; графит (+) — сталь (–) τ = 50 мкс; вольфрамокобальтовый сплав (широко применяемый для изготовления резцов) ВК6 (+) — медь (-) τ =25 мкс].

В условиях реального процесса отклонения значений $U_{д.н}$, $U_{д.к}$ и τ связаны с изменением зазора. При режиме, близком к короткому замыканию, они минимальны и снижаются примерно на 1/3.

Для практических расчетов иногда принимают, что напряжение на *ЭП* неизменно и равно среднему падению напряжения за импульс, в качестве которого может быть взято напряжение в середине участка *2* (см. рис. 60.84):

$$u_д \approx U_{ср} = \text{const} = U_{дт}.$$

Для этого случая простые формулы расчета импульсных характеристик даны в табл. 60.48.

Различные выражения для энергии, приведенные в табл. 60.48 полезны при анализе влияния конкретных электрических параметров на технологические характеристики. Средний ток $I_{ср}$ фиксируется на пульте генератора и является удобной для контроля и управления величиной.

Режимы ЭЭО можно разделить на две группы:

1) требующие широкого регулирования частот следования разрядов при относительно малой скважности импульсов (1,05—5,0). К этой группе относится большинство операций объемной обработки, осуществляемых на копировально-прошивочных станках;

2) требующие повышенных и высоких частот при относительно большой скважности импульсов (пять и более). К этой группе относятся операции вырезки электродом-проволокой и обработки узких и глубоких пазов и отверстий, осуществляемые на вырезных станках.

Электрохимическая обработка. В основе электрохимической (ЭХ) обработки лежит превращение электрической энергии в химическую на поверхности раздела двух фаз — твердой и жидкой, причем в результате обмена между фазами заряженными частицами (ионами и электронами) образуется двойной электрический слой и возникает скачок потенциала.

Изменение массы электродов, участвующих в ЭХ-процессе, подчиняется законам Фарадея, устанавливающим связь между количеством выделившегося на электроде или отделившегося от него вещества и количеством прошедшего электричества.

Процесс осуществляется по единой принципиальной схеме: электрический источник питания — электроды (твердая фаза) — электролит (жидкая фаза).

Изменяя материал электродов, состав электролита, размеры реакционного пространства, ограниченного электродами и заполненного электролитом и продуктами их взаимодействия, а также условия протекания процесса (температуру, плотность, скорость удаления продуктов реакции, потока электролита и другие параметры процесса), получают все разнообразие ЭХ-технологий.

Размерная ЭХ-обработка заключается в копировании формы инструмента-катода в заготовке-аноде, материал которой растворяется избирательно, в соответствии с местной плотностью тока. Этот эффект является результатом уменьшения на много порядков — в сотни и тысячи раз — размеров реакционной зоны (точнее, расстояния между электродами, составляющего доли миллиметра) и большой скоростью прокачки электролита (десятки мет-

Таблица 60.48. **Формулы для определения взаимосвязи между параметрами электрических импульсов ($U_{дт} \approx$ const)**

Параметр	За импульс	За период	За период прямоугольного импульса
Ток:			
амплитуда	$I_{mи} = \dfrac{I_{ср.и} K_ф K_а}{q}$	$I_{mT} = I_{ср} K_ф K_а$	$I_{ср} q = I_{ср.и}$
среднее значение	$I_{ср.и} = \dfrac{1}{t_и}\int_0^{t_и} i\,dt = I_{ср} q = \dfrac{I_m q}{K_ф K_а}$	$I_{ср T} = \dfrac{I_{ср.и}}{q} = \dfrac{I_m}{K_ф K_а}$	$\dfrac{I_{ср.и}}{q} = \dfrac{I_m}{q}$
действующее значение	$I_{д.и} = \sqrt{\dfrac{1}{t_и}\int_0^{t_и} i^2\,dt}$	$I_{д T} = I_{ср} K_ф = \dfrac{I_{ср.и} K_ф}{q} = \dfrac{I_m}{K_а}$	—
Напряжение:			
на нагрузке в момент $i = Im$	$U_{mи} = U_{ср.и} \approx \dfrac{1}{t_и}\int_0^{t_и} u\,dt$	$U_{mT} = \dfrac{U_{ср}}{q} = U_{ср.и}$	$U_m = \dfrac{U_{ср}}{q} = U_{ср.и}$
среднее значение	$U_{ср.и} = U_m$	$U_{ср T} = \dfrac{U_m}{q}$	$\dfrac{U_m}{q}$
Мощность:			
максимальная	$P_{mи} = U_m I_m$	$P_{mT} = U_m I_m$	$U_m I_m$
средняя	$P_{ср.и} = U_m I_{ср.и}$	$P_{ср T} = \dfrac{P_{ср.и}}{q} = \dfrac{U_m I_m}{K_ф K_0}$	$P_{ср} = \dfrac{U_m I_m}{q}$
Энергия	$W_s = \int_0^{t_и} ui\,dt = U_m I_{ср.и} t_и = \dfrac{U_m I_{ср.и}}{fq} = U_m I_{ср} T = \dfrac{U_m I_{ср}}{f} = U_m I_{ср} t_и q = \dfrac{U_m I_m T}{K_ф K_а} = \dfrac{U_m I_m t_и q}{K_ф K_а}$		$\dfrac{U_m I_{ср}}{f} = U_m I_{ср} t_и$
Коэффициенты:			
формы	$K_{ф.и} = I_{д.и}/I_{ср.и}$	$K_{ф T} = I_{д T}/I_{ср T} = K_{ф.и}\sqrt{q}$	$\sqrt{q}$
амплитуды	$K_{а.и} = I_{mи}/I_{д.и}$	$K_{а T} = K_{а.и}\sqrt{q}$	$\sqrt{q}$

ров в секунду). При этом обеспечивается вынос продуктов реакции, возобновление исходных составов и состава электролита и охлаждение системы. В итоге благодаря резкому количественному изменению геометрического и гидромеханического факторов оказалось возможным на несколько порядков увеличить допустимую плотность тока (десятки и сотни ампер на квадратный сантиметр вместо сотых и десятых доле в традиционных ЭХ-технологиях), соответственно увеличить скорость анодного растворения (до сотни и тысячи кубических миллиметров в минуту с 1 $см^2$ поверхности вместо долей или единиц, например при электрополировании) и, главное, резко повысить точность копирования формы катода в теле анода.

Возможность получения заданной конфигурации в твердом иногда недоступном для механической обработки аноде основана на том, что атомы металла М, переходя в раствор положительных ионов M^{n+} (где n — валентность) и взаимодействуя с имеющимися в электролите молекулами воды и анионами OH^-, образуют в итоге «мягкие» гидроксиды М(ОН), удаляемые затем потоком электролита. При отсутствии напряжения на электродах реакция $M \leftrightarrows M^{n+1} + ne$ (где e — заряд электрона) обратима и потенциал $\varphi_р$ между электродами и рас-

твором, соответствующий этому состоянию, называется равновесным. Он локализуется на границах $M—M^{n+}$ в узкой зоне (10^{-1} мкм и менее) упомянутого выше двойного электрического слоя, представляющего собой электрический конденсатор с относительно большой емкостью. Равновесный потенциал зависит от природы материала электродов и электролита и концентрации последнего. При приложении некоторого потенциала $\varphi_э > \varphi_р$ равновесие нарушается. Если $\varphi_э - \varphi_р > 0$, превалирует процесс окисления на аноде: ионы металла переходят в раствор, электроны из раствора — в металл анода; при этом происходит процесс образования нерастворимых гидрооксидов. Это процесс динамичный, он зависит от скорости подвода и отвода веществ и их концентрации.

Так как на электродах происходят дополнительные реакции, не связанные с анодным растворением, и на них также расходуется энергия, закон Фарадея принимает вид

$$m_a \approx AK_aJ_a,$$

где m_a — скорость удельного съема металла в единицах массы с единицы поверхности в единицу времени; K_a — электрохимический эквивалент металла анода; J_a — плотность тока на аноде; A — коэффициент эффективности ($0 < A < 1$); с ростом концентрации электролита (обычно 10—20 %-ный раствор NaCl или $NaNO_3$) A увеличивается.

Напряжение источника U должно быть достаточным для преодоления анодного φ_a и катодного $\varphi_к$ потенциалов и падения напряжения на сопротивлении электролита:

$$U \approx \varphi_a - \varphi_к + J_a\frac{s}{\sigma_р} = \Delta\varphi + \frac{sI}{F\sigma_р} = \Delta\varphi + R_{эк}I,$$

где $\sigma_р$ — удельная проводимость электролита; I — полный ток через электролит; $R_{эк}$ — эквивалентное сопротивление; s — межэлектродный зазор; F — площадь электрода.

Потенциал $\varphi_к$ изменяется в узких пределах (от –2,0 до –1,5 В) и определяется экспериментально по анодной поляризационной характеристике.

Удельная проводимость электролита растет с увеличением температуры (температурный коэффициент для солей 0,02—0,025 °С $^{-1}$, для кислот 0,01—0,015 $°C^{-1}$) и концентрации; в последнем случае после достижения некоторого значения дальнейшее увеличение концентрации снижает диапазон изменения $\sigma_р$ для применяемых электролитов от 5 до 20 См/м.

Установившаяся средняя скорость съема металла в объемных единицах

$$M = \frac{AK_a}{\rho}\frac{(U - \Delta\varphi)F\sigma_р}{s},$$

где ρ — плотность материала анода.

С уменьшением зазора s экономичность процесса растет, так как при этом падает расход энергии на нагрев электролита, одновременно при этом увеличивается точность отображения в детали формы анода. Однако уменьшение зазора возможно до тех пор, пока не будут существенно ухудшены условия удаления продуктов реакции. Очевидно, что для экономии энергии следует также снижать напряжение источника питания и увеличивать проводимость электролита. Верхний предел напряжения определяется вероятностью возникновения короткого замыкания. Обычно напряжение лежит в диапазоне от 4 до 24 В в зависимости от обрабатываемого материала (например, титан требует повышенного напряжения), рабочие токи — от сотен ампер до десятков килоампер, мощность — от десятков до сотен киловатт.

Следует отметить технические и экономические ограничения, свойственные ЭХ-механизму съема металла при непрерывном подводе энергии:

из-за высокой энергоемкости — почти на два порядка выше, чем при традиционных процессах, и на один-полтора порядка выше, чем при ЭЭ-обработке. Это недостаток принципиальный, так как в его основе лежат большие затраты энергии на нарушение связей в твердом теле на атомарном уровне. Большая энергоемкость приводит к увеличению габаритных размеров установок (не только вследствие роста мощности источника питания, но и из-за необходимости введения устройств для отвода теплоты, очистки и циркуляции электролита и т.п.) и их капиталоемкости;

из-за трудности получения малой шероховатости при низких плотностях тока: несущественные при высоких плотностях тока отличия в скорости растворения отдельных структурных и материальных компонентов сплавов проявляются при малых плотностях тока в виде зон растравливания, так называемой струйности и т.п. Если плотность тока менее 20 А/см^2, поверхность становится некачественной. Таким образом, наименьшая допустимая мощность установки часто определяется не требуемой производительностью, а возможностью качественной обработки заданной поверхности при минимальной плотности тока. Так, обработка поверхности, имеющей площадь, занимаемую страницей этой книги, потребует мощности (вместе с вспомогательными устройствами) не менее 150 кВт. По указанным причинам промышленные ЭХ-установки на непрерывном токе имеют мощность сотни киловатт, занимают площади в десят-

ки и сотни квадратных метров и используются преимущественно в специальном машиностроении, например при обработке турбинных лопаток из жаропрочных сплавов;

несмотря на съем металла на атомарном уровне, точность копирования значительно ниже, чем у большинства способов размерной обработки, — погрешности достигают нескольких десятых долей или единиц миллиметров. Причиной является отклонение распределения местной плотности тока от идеальной. Из-за наличия межэлектродного зазора, сглаживающего благодаря своему сопротивлению различия в плотностях тока на соседних участках, относительное изменение плотности тока на двух соседних участках, не равно отстоящих от катода, будет тем меньше, чем больше зазор. До определенных пределов, критических для каждой конфигурации и размера полости, снижение зазора возможно, однако в дальнейшем это приводит к росту сопротивления движению электролита, уменьшению его скорости и возникновению в загрязненной отходами среде опасных замыканий.

Указанные ограничения в значительной степени устраняются при переходе от непрерывного подвода энергии к комбинированному, состоящему из двух фаз: а) непрерывной (на стадии предварительного съема металла, когда точность может быть небольшой, а качество поверхности еще несущественно); б) прерывистой, состоящей, в свою очередь, из двух последовательных этапов — собственно импульсного подвода, обусловливаемого импульсным источником питания, и так называемого циклического, получаемого в результате механического разведения и сведения электродов периодически по определенному циклу, когда зазор может доводиться до самых минимальных значений. При относительно больших площадях обработки процесс может начинаться прямо с импульсного, минуя непрерывный, и завершаться циклическим.

Импульсно-циклический подвод энергии позволяет использовать эффекты адаптации, стабилизации и «затухания» и этим частично снимает отмеченные выше ограничения, поскольку при прерывистой фазе минимально допустимая плотность тока должна обеспечиваться только в течение импульса, потребляемая же из сети энергия будет определяться средним, а не импульсным значением тока и потому будет значительно ниже. Минимально допустимое значение межэлектродного зазора уменьшается благодаря снятию или ослаблению гидродинамического ограничения, поскольку рабочая фаза съема металла и пауза, во время которой осуществляется удаление отходов (гидрооксидов и газов), разделены. Соответственно растет точность обработки. Увеличиваются и предельно допустимые размеры обрабатываемой поверхности соответственно снижению средней минимально допустимой плотности тока; этот эффект достигает двух-четырехкратных значений по сравнению с режимом непрерывного тока.

Повышенная работоспособность, стабильность, надежность и уровень автоматизации процесса и установки обусловливаются использованием эффектов стабилизации и адаптации: во время паузы на основании анализа состояния рабочей зоны специальным датчиком определяется момент включения очередного импульса или цикла, когда исключается опасность короткого замыкания. Таким образом, длительность и количество импульсов в серии определяются автоматически и поддерживаются такими, чтобы обеспечить заданные технологические параметры, из которых главные точность и качество поверхности. Часть параметров (температура, степень очистки электролита и др.) автоматически стабилизируются.

В целом режим работы ЭХ-установки задается специальным программным устройством, регламентирующим последовательность перехода от непрерывных к импульсным и циклическим режимам, т.е. от предварительной к получистовой и чистовой обработке; адаптация осуществляется автоматически на каждом переходе. Система генерирования импульсов органически связана с системой адаптивного и программного управления.

Применение импульсного тока при относительно небольших номинальных мощностях не исключает использования непрерывного подвода больших мощностей там, где это связано с уникальными технологическими задачами обработки сложных по форме изделий больших размеров из спецсплавов, когда требования точности менее значимы, чем требования по производительности.

Светолучевая технология. Для светолучевой размерной обработки применяются преимущественно твердотельные оптические квантовые генераторы-лазеры. Электрическая энергия от источника питания подводится в виде импульсов напряжения к лампе накачки, которая является промежуточным преобразователем электрической энергии в световое излучение с широким спектром частот. Это излучение преобразуется лазером в монохроматичный узкий пучок, который и осуществляет рабочий процесс, в данном случае размерную обработку — выполнение отверстий, щелей, сеток в проводниках и диэлектриках любой твердости и вязкости, сварку, термоупрочнение и многое другое. Основной вид взаимодействия — тепловое, результатом которого является испарение и удаление вещества из облученного участка.

Ультразвуковая технология. Этот вид электротехнологии основан на преобразовании электрической энергии в механическую с помощью пьезокерамических высокочастотных преобразователей. Ультразвуковые колебания преобразователя, воз-

действия на заготовку, позволяют делать в ней отверстия диаметром десятки и сотни микрометров, глубиной до нескольких миллиметров.

Комбинированные технологии. К комбинированным технологиям относят: плазменно-механическую обработку, алмазно-химическое и алмазно-эрозионное шлифование, ультразвуковую ЭХ-обработку.

При плазменно-механической обработке в дополнение к традиционному механическому резанию осуществляется подогрев детали с помощью плазмотрона, при этом температура в струе плазмы достигает 5000—10 000 °С. Интенсивный нагрев приводит к снижению усилия резания и повышению стойкости резца. Теплота вводится либо через оплавленную канавку, либо прогревом, исключающим плавление. Плазменно-механическая обработка применяется для обработки крупных цилиндрических или слабо конических заготовок из жаростойких, нержавеющих и подобных им труднообрабатываемых сплавов, встречающихся, в частности, в энергомашиностроении.

В *алмазно-химическом* и *алмазно-эрозионном шлифовании* применяется одинаковый инструмент — вращающийся круг, на периферию или торец которого нанесен алмазный слой токопроводящей основы.

В процессе алмазно-электрохимического шлифования круг подключен к катоду источника постоянного напряжения (2—12 В), а шлифуемая заготовка — к аноду. Выступающие алмазные зерна ограничивают межэлектродный зазор, в котором находится рабочая жидкость — электролит, обладающий незначительным коррозионным воздействием. Растворение анода-заготовки и перевод припуска в легко удаляемый алмазными зернами слой снижают усилие резания, повышают производительность и стойкость круга. Процесс особенно эффективен при обработке твердых и магнитных сплавов, заточке инструмента.

Алмазно-электроэрозионное шлифование основано на эрозионном разрушении токопроводящей связки, результатом чего является регулируемое электрическое вскрытие новых алмазных зерен и поддержание круга в «заостренном» состоянии. Рабочая среда — обычно шлифовальная жидкость.

Ультразвуковая ЭХ-обработка основана на совмещении ультразвукового и ЭХ-воздействия на обрабатываемую заготовку. При этом достигается многократное увеличение производительности объемного формообразования в твердосплавных изделиях. При воздействии ультразвуковых колебаний на поверхность заготовки, находящейся в среде проводящей абразивной суспензии, зерна абразива разрушают пассивирующую пленку, которая возникает при ЭХ процессе, открывая возможность продолжения анодного растворения. В свою очередь при ЭХ-процессе растворяется преимущественно связка (кобальт в сплавах типа ВК), что облегчает последующее удаление ультразвуковым воздействием твердых карбидов вольфрама.

ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫЕ КОПИРОВАЛЬНО-ПРОШИВОЧНЫЕ СТАНКИ

К этой группе относится 2/3 общего парка станков. В них наиболее широкое распространение в отечественной и зарубежной практике получили безнакопительные генераторы импульсов.

В большинстве схем безнакопительных импульсных генераторов основными элементами являются источник питания, силовые коммутирующие приборы и токоограничивающие (ТО) элементы. На рис. 60.85 представлена типовая структурная схема генератора, обязательными элементами которой являются источник питания *ИП*, последовательные коммутирующие приборы *К1* и *К2*, управляемые задающим генератором *ЗГ*, и ТО-элемент. Генераторы различаются по типу ТО-элемента (активный или индуктивный), а также по способу включения коммутирующего прибора *К*: последовательно с *ЭП* или параллельно ему (штриховая линия). Применение ТО-резистора позволяет легко варьировать ток разряда и постоянную времени разрядной цепи, увеличивает надежность ограничения тока. Поэтому, несмотря на низкий КПД, большие размеры и массу, ТО-резисторы широко используются в сочетании с транзисторными последовательными коммутаторами, прерывающими цепь нагрузки.

Схема силовой цепи одного из таких генераторов представлена на рис. 60.86. Генератор содержит источник постоянного напряжения — трехфазный понижающий трансформатор *Т*, выпрямитель *В* и фильтр *LC*, коммутатор *VT*, прерывающий цепь нагрузки, и регулируемый резистор *R* с малой собственной постоянной времени (отношением собственной распределенной индуктивности к сопротивлению).

При включении на холостом ходу происходит резонансный заряд конденсатора *С* фильтра через последовательно соединенные индуктивности рас-

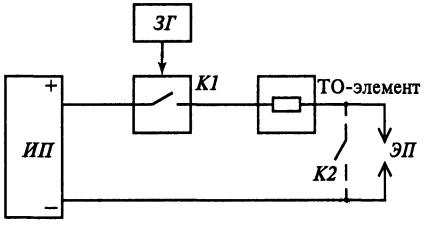


Рис. 60.85. Схема безнакопительного генератора для питания эрозионных станков

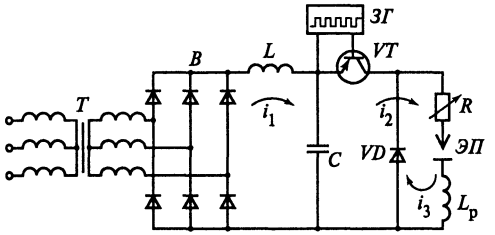


Рис. 60.86. Схема транзисторного безнакопительного генератора импульсов

сеяния силового трансформатора *T*, реактор *L* и выпрямитель *B*. При разомкнутой цепи нагрузки конденсатор *C* может зарядиться до напряжения, составляющего 1,7—1,9 номинального напряжения на выходе выпрямителя. На это напряжение необходимо выбрать конденсатор *C* и транзисторный коммутатор *VT*. В некоторых случаях целесообразно конденсатор *C* шунтировать на короткое время (до 200—800 мкс) резистором, резко снижающим добротность резонансного контура. Транзисторный коммутатор *VT* включается и выключается с частотой и скважностью импульсов задающего генератора *ЗГ*. При включении *VT* напряжение подается к *ЭП*. При пробое *ЭП* фронт импульса тока i_2 определяется постоянной времени разрядной цепи, включающей распределенную индуктивность этой цепи L_p, и, кроме того, частотными характеристиками *VT*. После выключения *VT* энергия, запасенная в индуктивности L_p, обусловливает ток i_3 по цепи *ЭП* — L_p — *VD* — *R*.

Описанная схема с небольшими отличиями реализована в отечественных генераторах типа ШГИ и в большинстве генераторов зарубежных фирм.

Широкодиапазонные генераторы импульсов типов ШГИ-125-100, ШГИ-40-440, ШГИ-20-440/3, ШГИ-63-440, ШГИ-62-44/2-3, ШГИ-16-880 имеют около 100 рекомендуемых режимов обработки с возможностью регулирования формы, максимального значения частоты и скважности импульсов тока и напряжения.

Генераторы серии ШГИ позволяют формировать силовые импульсы прямоугольной или близкой к ней формы. В отличие от других генераторов в них возможно получение импульсов тока гребенчатой формы для малоизносной обработки.

В качестве типичной приведем структурную схему генератора ШГИ-63-440 (рис. 60.87). Задающий генератор *ЗГ* имеет три выходных канала: силовых импульсов, защитных (низкочастотных, кратных по длительности периоду основной частоты) импульсов и поджигающих импульсов длительностью от 0,9 до 2 мкс.

Импульсы к выходам силовых *Б1—Б6* и высокочастотного *БВЧ* блоков поступают через предварительные усилители мощности *ПУМ*, расположенные в блоке с *ЗГ* и имеющие на выходе схемы совпадения.

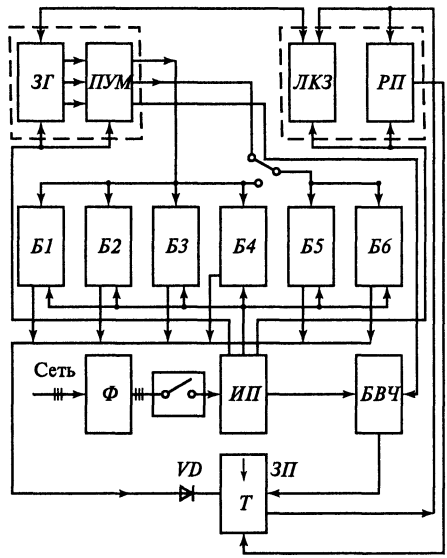


Рис. 60.87. Функциональная схема широкодиапазонного генератора типа ШГИ-63-440:

ЗГ — задающий генератор; *ПУМ* — предварительный усилитель мощности; *Б1—Б6* — силовые блоки; *БВЧ* — блок высокой частоты; *ИП* — источник питания; *Ф* — помехоподавляющий фильтр; *ЛКЗ* — устройство для ликвидации коротких замыканий; *РП* — регулятор подачи

Напряжение питания силовых блоков составляет 80 В. Блоки *Б5*, *Б6* могут подключаться либо к первому, либо ко второму *ПУМ*. Высокочастотный блок *БВЧ* с импульсным напряжением 220 В является источником силовых импульсов с частотой 440 кГц, а при работе станка на более низких частотах — источником поджигающих импульсов.

После пробоя *ЭП* поджигающим импульсом напряжение на нем падает до 20 В, открывается разделительный диод *VD* и от источника питания с напряжением 80 В через силовые блоки и *ЭП* проходит силовой импульс тока, максимальное значение, длительность и форма которого определяются параметрами токоограничивающих резисторов и длительностью импульсов *ЗГ*.

Работа идентичных силовых блоков с различными частотами позволяет получать гребенчатую форму импульсов тока в нагрузке, а при поочередном включении всех блоков от канала силовых импульсов — пакеты прямоугольных импульсов.

Устройство ликвидации коротких замыканий *ЛКЗ*, унифицированное для генераторов всей серии ШГИ, прерывает ток на выходе генератора при коротком замыкании электродов.

В генератор встроен регулятор рабочей подачи электродов *РП*, исполнительным элементом которого является двигатель постоянного тока.

Силовые блоки генераторов серии ШГИ собраны на транзисторах с импульсным током $I_к$ = 5—10 А, допустимым напряжением $U_{кэ}$ =100—200 В и граничной частотой в схеме с общим эмиттером 10—20 МГц. Кроме того, в состав каждого блока входят цепи предусиления, позволяющие переключать силовые транзисторы от относительно маломощного входного сигнала, и в ряде случаев ТО-резистор.

Компоновка блоков определяется выходными параметрами генератора, в частности мощностью и верхним диапазоном генерируемых частот.

В мощных генераторах (средний ток 50 А и более с диапазоном частот до десятков килогерц) целесообразно иметь силовые блоки со встроенными или расположенными рядом ТО-резисторами. Это упрощает монтаж и существенно уменьшает распределенную индуктивность разрядной цепи. Токоограничивающие резисторы могут быть выполнены из маломощных резисторов типа ПЭВ, постоянная времени которых при значениях сопротивления 100—200 Ом не превышает 0,2—0,4 мкс.

При проектировании силовых блоков большое значение имеет выбор схемы запуска выходных транзисторов. Для резкого сокращения времени рассасывания неосновных носителей из области базы мощных транзисторов при их работе в режиме коммутатора необходимо выбирать степень насыщения транзистора при его открывании не выше 1,4 или подавать на базу транзистора в момент его запирания запирающее напряжение от источника с малым внутренним сопротивлением.

В серийных генераторах используется только второй способ, поскольку автоматическое изменение базового тока транзистора в зависимости от коллекторного тока сопряжено при высоких частотах коммутации с усложнением схемы.

Однако схемы, сочетающие оба указанных способа, весьма перспективны, так как позволяют повысить частоту коммутаций и снизить рассеиваемую в мощных транзисторах и самих блоках энергию.

Силовой блок генератора ШГИ-125-100М состоит из предварительного усилителя, шести предоконечных усилителей и шести включенных параллельно силовых каскадов.

Силовые блоки генераторов ШГИ-40-440Б, ШГИ-63-440, ШГИ-20-440/3 отличаются тем, что вместо шести предоконечных усилителей на транзисторах типа П-605Б применен один мощный транзистор *VT2* (рис. 60.88) типа КТ-805А. Транзисторы этого же типа используются в качестве выходных *VT3* во всех этих генераторах. При открытом транзисторе *VT1*, когда входной импульс на его базе отсутствует, открыт и транзистор *VT2* и запирающее

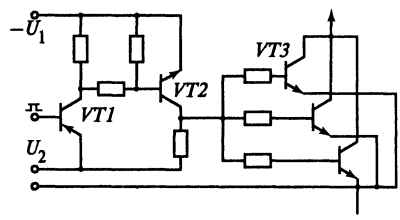


Рис. 60.88. Схема транзисторного силового блока

смещение через ТО-резисторы поступает к базам выходных транзисторов. Это уменьшает время рассасывания неосновных носителей из области баз выходных транзисторов и позволяет уменьшить размеры блока. При подаче входного импульса *VT1* и *VT2* запираются и выходные транзисторы открываются за счет положительного напряжения U_2.

Блоки поджигающих импульсов формируют импульсы с повышенной амплитудой напряжения, обеспечивающие надежный пробой *ЭП*.

В генераторах ШГИ-125-200М и ШГИ-40-440Б в блоках поджигающих импульсов применены последовательно соединенные транзисторы с шунтирующими *RC*-цепочками для устранения перенапряжений. В генераторах ШГИ-63-440 и ШГИ-20-440/3 использована схема с автоматическим управлением напряжением на двух последовательно соединенных транзисторах.

В целях получения поджигающих импульсов с амплитудой до 350 В в генераторах ШГИ-63-44/2 и ШГИ-44/3 для обработки больших площадей вместо специальных блоков поджигающих импульсов применены силовые блоки, нагрузкой которых служат повышающие импульсные трансформаторы. У этих трансформаторов, как и у входных маломощных трансформаторов, служащих для запуска последовательно соединенных коммутирующих каскадов, в целях уменьшения индуктивностей рассеивания первичные и вторичные обмотки выполняются перевитыми проводами.

Параметры транзисторных генераторов серии ШГИ представлены в табл. 60.49.

Для генераторов применены шкафы четырех типоразмеров. Четыре модели имеют многоконтурный выход. Электрооборудование станков малого типоразмера встроено в генераторы на рабочие токи 16 и 40 А, предназначенные для питания таких станков.

Источники питания вырезных станков. Вырезные работы осуществляются используемой в качестве электрода латунной, медной или вольфрамовой проволочкой диаметром 0,02—0,3 мм, натянутой между двумя роликами и движущейся относительно заготовки. Между проволочкой, поливаемой рабочей жидкостью, и деталью возбуждаются кратковременные — от долей микросекунды до 5—8 мкс —

Таблица 60.49. **Технические данные транзисторных генераторов серии ШГИ для питания электроэрозионных копировально-прошивочных станков**

Тип	Номинальный рабочий ток, А	Диапазон частот, кГц	Максимальная потребляемая мощность, кВт	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Число выходов
ШГИ-16-880Б	16	3—880	2,0	400×600×1600	150	1
ШГИ-40-440А, ШГИ-40-440Б	40	8—440	4,0	1000×600×1550	430	1
ШГИ-63-440	63	1—440	6,0	1100×600×1700	500	1
ШГИ-20-440/3	20×3	1—440	6,0	1100×600×1700	500	3
ШГИ-20-440/3П	20×3	1—440	6,0	1100×600×1700	500	3
ШГИ-125-100	125	0,4—100	7,5	800×1400×1800	700	1
ШГИ-63-44/2	63×2	1—44	12	(1100×1600×1700) × 2	1000	2
ШГИ-63-44/3	63×3	1—44	18	(1100×1600×1700) × 3	1500	3
ШГИ-40-440М*	40	1—440	4,0	600×600×1800	350	1
ШГИ-63-440М*	80	1—440	7,0	600×600×1800	350	1
ШГИ-80-88/4-2М*	80×4	1—88	28,0	(600×600×1800) × 4	1500	4
	80×2	1—88	14,0	(600×600×1800) × 2	1700	4

Окончание табл. 60.49

Тип	Длина выходного кабеля, м	Максимальная производительность станка, $мм^3/мин$		Минимальная шероховатость обработанной стали, мкм	Минимальная шероховатость обработанной стали (при износе инструмента 1—2 %), мкм
		Сталь 45 (катод), медь М1 (анод), объемный относительный износ анода, 20—40 %	Сталь 45 (катод), медь М1 (анод), объемный относительный износ анода, 10 %		
ШГИ-16-880Б	1,2	100	90	0,2	1,5—2,0
ШГИ-40-440А, ШГИ-40-440Б	1,2	320	300	0,5	2,5
ШГИ-63-440	2,5	550	500	0,5	2,5
ШГИ-20-440/3	2,5	550	500	0,5	2,5
ШГИ-20-440/3П	2,5	550	500	0,5	2,5
ШГИ-125-100	2,5	1000	1100 (1500)	1,2	3,5
ШГИ-63-44/2	4,5	1000	1200	3—4	5,0
ШГИ-63-44/3	4,5	1400	1900	3—4	5,0
ШГИ-40-440М*	2,5	320	—	0,5	2,5
ШГИ-63-440М*	2,5	600	—	0,5	2,5
ШГИ-80-88/4-2М*	4,5	3500	—	2	4

* Генераторы серии ШГИ-М выпускаются с блоками программного и адаптивного управления, позволяющими полностью автоматизировать процессы ЭЭО на копировально-прошивочных операциях.

разряды, каждый из которых «снимает» (в основном испаряет) частичку металла заготовки, частично при этом разрушается сама проволочка. Диапазон амплитуды тока от нескольких ампер до сотен ампер при амплитуде импульсов напряжения 300—500 В и частоте повторения импульсов 8—200 кГц. Благодаря кратковременности действия тока и большой паузе (скважность примерно 5—10) тонкая проволочка выдерживает электрические перегрузки, в сотни раз превышающие номинальные.

Выбор типа и схемы генератора определяется не только указанными параметрами, но и характером нагрузки, зависящей также от вида рабочей жидкости. При диэлектрике (керосин, деионизиро-

ванная вода) приемлемы релаксационные генераторы с выходным емкостным накопителем, транзисторным ключом в цепи заряда (отключающим цепь разряда от цепи заряда в момент импульса) и ТО-резистором. Если жидкость проводящая (промышленная вода с противокоррозионными добавками), необходимо во избежание электролиза и саморазряда накопителя вводить выходной трансформатор или включенный параллельно нагрузке реактор (среднее напряжение на выходе генератора при этом равно нулю или близко к нему).

Генераторы коротких импульсов для станков с проводящей средой являются более универсальными и пригодны также для непроводящих рабочих жидкостей. Имеются два типа универсальных генераторов, один из которых выполняется на высокочастотных тиратронах, другой — на тиристорах.

В генераторах первого типа имеется зарядная цепь, содержащая реактор, диод и накопительный конденсатор, который заряжается до напряжения, близкого к удвоенному выпрямленному. При включении импульсного водородного тиратрона (тип ТГИ-1-700/25) конденсатор разряжается и на вторичной стороне выходного импульсного трансформатора возникает импульс тока. Частота импульсов достигает нескольких десятков килогерц при длительности от долей до единиц микросекунд. Необходимость в высоком зарядном напряжении (10—15 кВ), ограниченный срок службы тиратрона, узкий диапазон частот и сложность изготовления импульсного трансформатора являются недостатками данной схемы.

Применение взамен тиратронов тиристоров серии ТБ, ТЧ и ТЧИ лежит в основе генераторов другого типа, например промышленного генератора типа ГКИ-300-200А. В генераторе используется схема, показанная на рис. 60.89. Для уменьшения частоты коммутации тиристоров применены две параллельные ячейки *VS1—C1—VS3* и *VS2—C2—VS4*, работающие попеременно. Конденсатор *C1* (или *C2*) заряжается при включении тиристора *VS1* (или *VS2*) и разряжается через *VS3* (*VS4*) и *L3*, *C3* на нагрузку, параллельно которой включена индуктивность *L2*. Заряд формируется с помощью реактора *L1*, имеющего рекуперационную обмотку, а разрядный импульс — с помощью контура *L3—C3* и реактора *L2*, имеющего магнитопровод с прямоугольной петлей гистерезиса.

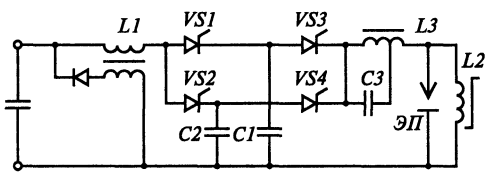


Рис. 60.89. Электрическая схема тиристорного генератора импульсов типа ГКИ-300-200А

В генераторе имеется также блок с транзисторным генератором, позволяющий получать импульсы длительностью до 1 мкс при частоте до 200 кГц, что обеспечивает получение шероховатости 2 мкм и менее.

Технические данные тиристорного генератора коротких импульсов ГКИ-300-200А приведены ниже:

Напряжение сети, В	380^{+19}_{-38}
Частота сети, Гц	50
Номинальная амплитуда выходного тока (при R = 0,06 Ом), А	300
Частота, кГц	8, 22, 44, 88, 200
Потребляемая мощность, кВ · А	2,0
Габаритные размеры (ширина×глубина×высоту), мм	400×600×1800
Масса, кг	250

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Диапазон используемых для объемной ЭХ-обработки напряжений (12—24 В), токов (от сотен до десятков тысяч ампер) совпадает с параметрами источников питания гальванических ванн. Совпадают также общие требования обеспечения длительного режима работы при колебаниях напряжения сети, точности стабилизации тока или напряжения, равной 5 % при изменении тока в диапазоне $(0{,}1—1)I_{ном}$. К специальным требованиям относится необходимость обеспечения высокого быстродействия защиты при металлическом коротком замыкании.

Базовой моделью источников питания для ЭХ-обработки являются преобразователи серии ВАК.

Унифицированный источник питания ЭХ-станков представляет собой преобразователь с тиристорным регулированием выходного напряжения. Трехфазное напряжение сети выпрямляется после понижающего трансформатора тиристорами, включенными по схеме с уравнительным реактором. Импульсные режимы обеспечиваются блоком импульсного регулирования, содержащим задающий генератор, определяющий заданную длительность (4—6 мс и выше) импульсов и пауз, и синхронизатор, обеспечивающий равномерную загрузку фаз трансформатора. Специальными для ЭХ-станка являются также блоки автоматического регулирования подачи электродов и блок защиты от коротких замыканий.

Для сокращения продолжительности опасного тока в случае короткого замыкания, разрушающего электроды, устанавливается тиристорный короткозамыкатель. Блок защиты получает сигнал от специального датчика коротких замыканий, который реагирует на провалы напряжения длительностью

Таблица 60 50 **Технические данные выпрямительных агрегатов серии ВАК, работающих с электрохимическими станками**

Параметр	ВАК-1600-24	ВАК-3200-24	ВАК-6300-24	ВАК-12500-12
Выпрямленное напряжение, В	3—24	3—24	3—24	3—12
Номинальный ток, А	1600	3200	6300	1250
Номинальная выходная мощность, кВт	38,4	76,8	151,2	250
Минимальная длительность импульса, мс	—	4—6	—	—
Габаритные размеры агрегата (длина × ширину × высоту), мм	1700×1765×800	1900×2315×900	2945×3038×1800	2375×2995×2400
Модель ЭХ копировально-прошивочного станка	4421 4421ФЦ*	4422 (4423) 4А423ФЦ*	4432 4А23ФЦ*	4424 —

* Буквы ФЦ обозначают наличие адаптивно-программного управления

в десятки микросекунд, отсеивает ложные сигналы и выдает команды на открытие тиристора короткозамыкателя, отвод электрода и выключение источника питания.

Основные данные источников питания, используемых в ЭХ-станках, приведены в табл. 60.50.

Источники питания светолучевых станков. Поскольку нагрузкой генератора импульсов является импульсная лампа накачки, его электрические характеристики мало зависят от технологического объекта Электрический разряд, возбужденный в газовой среде лампы накачки при прохождении через нее импульса тока, образует в малом объеме разрядной камеры практически мгновенно плазму, допускает частое повторение и легко управляется.

Источник питания лампы накачки представляет собой типичный генератор с емкостным накопителем и с регулируемыми энергией, частотой и скважностью импульсов. Блок питания *БП* (рис 60.90) заряжает конденсатор *С*, при разряде которого через импульсную лампу накачки *ИЛ* протекают импульсы тока с длительностью от долей до десятков миллисекунд и амплитудой до 10^5 А. Устройство управления *УУ* синхронизирует работу зарядной цепи и блока возбуждения *БВ* разряда в лампе.

Для лазерных установок размерной обработки наиболее применимы трубчатые импульсные лампы, представляющие собой заполненный газом баллон из специального кварцевого стекла с необходимой спектральной полосой пропускания, в который вводятся электроды. Трубка — прямая или изогнутая (в соответствии с назначением) — заполняется обычно ксеноном под давлением в несколько килопаскалей. Разряд возбуждается управляющим электродом — изолированной металлической пластинкой или навитой в несколько рядов на внешней поверхности разрядной трубки проволокой.

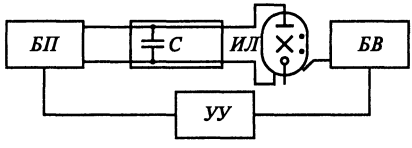


Рис. 60.90. Схема твердотельного технологического лазера

Технические данные импульсных ламп накачки приведены ниже.

	ИФП-1200	ИФП-5000
Диаметр лампы и расстояние между электродами, мм	7×120	11×250
Тип лазерной установки	«Квант-9»	
Емкость батареи конденсаторов мкФ	800	2000
Начальное рабочее напряжение, кВ	1,3	1,7
Предельное напряжение, кВ	1,7	2,2
Длительность разрядки, мс	0,7	6,0
Частота импульсов, Гц	1	1
Срок службы, тыс вспышек	100	200
Энергия излучения лазера, Дж	8	15

В технологических установках предъявляются высокие требования к стабильности энергетических характеристик лазерного излучения, которую, очевидно, необходимо обеспечить за счет стабильности параметров излучения лампы накачки и питающих ее электрических импульсов. Источник питания лампы накачки должен генерировать импульсы тока в диапазоне от долей до единиц, иногда до сотни герц при средней потребляемой мощности (с учетом низкого КПД лазера) до нескольких

Таблица 60.51. **Технические данные импульсных источников питания для ламп накачки**

Тип	Средняя мощность, кВт	Максимальный потребляемый из сети ток в режиме короткого замыкания, А	Напряжение питания, В	Габаритные размеры, мм
БП-2000-3,0	3,0	2,2	220	1005×595×595
БП-2000-9,0	9,0	1,5	3× 380	1275× 595× 595
БП-5000-0,6	1,5	1,6	220	815×595×595
БП-5000-1,8	4,5	1,0	3×380	1125×595×595
БП-5000-3,6	9,0	1,5	3×380	1275×595×595

Примечание. Выходное напряжение, В, и ток зарядки, А, содержатся в обозначении типа.

киловатт. Общий КПД системы преобразования электрической энергии в лазерное излучение составляет несколько процентов.

Унификация элементов питания лазерных установок привела к разделению их на типовые блоки, каждый из которых может самостоятельно использоваться и совершенствоваться. Такими типовыми блоками являются зарядные устройства накопительных конденсаторов, разрядные контуры, содержащие лампы накачки, устройства управления и защиты. Основными энергетическими блоками являются зарядное устройство, состоящее обычно из источника тока (в частности, на базе индуктивно-емкостного преобразователя — ИЕП), и тиристорный зарядный коммутатор. Заряд с неизменным током обеспечивает по сравнению с другими способами в 1,5—2 раза более высокий КПД, доходящий до 80—85 %, $\cos\varphi \approx 1$. При разряде накопителя, когда сопротивление лампы накачки резко падает и создается режим, близкий к короткому замыканию, сеть не испытывает толчков. В схеме зарядного устройства имеется возможность регулирования продолжительности заряда, т.е. конечного напряжения на конденсаторе, либо при постоянном времени зарядки — тока, т.е. изменения энергии.

Промышленностью выпускаются импульсные источники питания типа БП (табл. 60.51), которые входят в комплект питания ламп накачки (модуляторов). Промышленные лазерные установки для размерной обработки имеют общую механическую базу — станок марки 4222.

Технические данные станка марки 4222, приведены ниже:

Энергия излучения, Дж, не более 2
Длительность импульса, мкс ..... 100—400
Диаметр обрабатываемых отверстий, мкм ..... 20—200
Глубина обрабатываемых отверстий при многоимпульсном воздействии, мм, не более 4
Скорость обработки отверстий диаметром 100 мкм в заготовках толщиной до 0,1 мм, отверстий/ч 9000
Мощность станка, кВт 3
Габаритные размеры, мм:
станка ..... 650×1100×1245
блок питания ..... 100×570×1030
блок охлаждения ..... 430×390×600
системы ЧПУ ..... 300×400×1000
Масса станка (включая систему ЧПУ), кг 900

Лазерный станок предназначен для обработки отверстий, резания труднообрабатываемых материалов, в том числе для обработки отверстий в электродных системах газоразрядных индикаторных панелей, сетках, керамических деталях электронной техники, для профилирования многогранных резцов из эльбора и т.п. Станок оснащен специальной системой ЧПУ (исполнение 422Ф2), управляющей перемещением стола по двум координатам и работой квантового генератора.

Оптический квантовый генератор с активным элементом, например на стекле, активированном неодимом, может работать в режимах свободной генерации, модулированной ультразвуковыми колебаниями. Наличие ультразвуковой модуляции излучения способствует повышению точности обработки.

В станке использована проекционная схема локализации излучения, позволяющая регулировать световое пятно в зоне обработки в широком диапазоне без фокусирующего объектива. Обработку можно также производить при установке детали в фокальной плоскости объектива.

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ СТАНКИ

В настоящее время новые ультразвуковые генераторы выполняются в основном на полупроводниковых приборах — транзисторах и тиристорах.

Применение тиристорных инверторов в качестве источников питания электроакустических преобразователей пока ограничено из-за низких частотных свойств тиристоров и сложности схемы управления, вследствие чего их преимущества перед транзисторными генераторами проявляются только при большой выходной мощности (4 кВт и выше). Наиболее широко в настоящее время применяются ультразвуковые генераторы на транзисторах. Так как параметры транзисторов непрерывно улучшаются, они являются наиболее перспективными приборами и для новых разработок ультразвуковых генераторов.

Генераторы предназначены для работы с пьезокерамическими преобразователями.

Ультразвуковой генератор УЗГ-4-0,1 с независимым возбуждением состоит из трех каскадов: задающего генератора, предварительного усилителя и усилителя мощности. Задающий генератор выполнен по схеме с индуктивной обратной связью. Предварительный усилитель, так же как и выходной каскад, работает в режиме переключения и собран по полумостовой двухтактной схеме. В цепи вторичной обмотки выходного трансформатора стоит катушка корректирующего фильтра и нагрузка — пьезокерамический преобразователь.

Ультразвуковой генератор с автоматической подстройкой частоты типа УЗГ8-0,1/22 (рис 60.91) предназначен для питания ультразвуковых станков. Нагрузкой генератора служит магнитострикционный преобразователь *M*. Генератор состоит из двух каскадов, первый — возбудитель в виде блокинг-генератора на транзисторах *VT1*, *VT2*, питаемый от выпрямителя с выходным напряжением E_1. Выходной каскад собран по полумостовой схеме на транзисторах *VT3*, *VT4*. Нагрузка *M* подключена к выходу генератора через согласующие трансформатор *T2*, контур *C1* — *L1* — *C2* — *L2* и дифференциальный трансформатор обратной связи *T3*. Напряжение обратной связи с трансформатора *T3* подается на базовые цепи транзисторов *VT1* и *VT2* и осуществляет синхронизацию работы возбудителя. В генераторе предусмотрена ступенчатая регулировка мощности в диапазоне от 10 до 100 % номинальной.

Параметры ультразвуковых генераторов представлены в табл. 60.52.

Плазменно-механическая обработка. При такой обработке используется источник питания типа АПР-403 и плазмотрон ПВР-402, применяемые также и для плазменной резки.

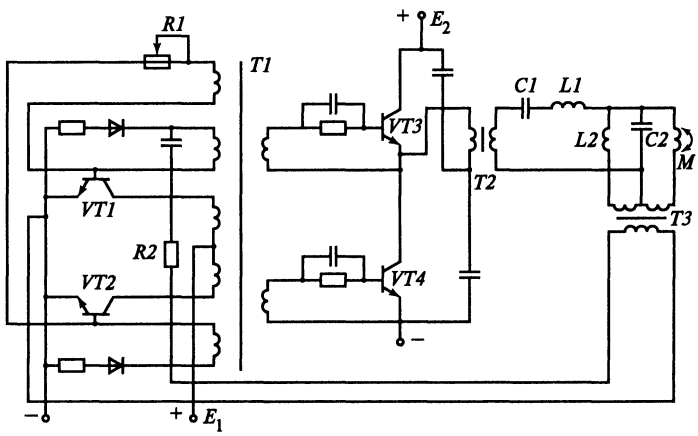


Рис. 60.91. Схема генератора ультразвуковых колебаний типа УЗГ8-0,1/22

Таблица 60.52. **Технические данные ультразвуковых генераторов**

Параметр	УЗГ4-0,1	УЗГ8-0,1/22	УЗГ-0,25	УЗГ3-0,4/33	УЗГ5-0,63	УЗГ10-1,6
Мощность, потребляемая от сети, В · А	150	180	400	800	1200	2000
Напряжение питающей сети, В	220	220	220	220	380	380
Рабочая частота, кГц	18 ± 1,35	22 ± 1,65	18 ± 1,35	22 ± 1,65	22 ± 1,65	18 ± 1,35
Выходная мощность, Вт	100	100	250	400	630	1600
Габаритные размеры, мм	320×170×170	380×370×230	400×310×190	234×525×565	462×610×423	520×680×427

Технические данные установки АПР-403 и плазмотрона ПВР-402, приведены ниже

Напряжение питающей трехфазной сети 50 Гц, В	380
Потребляемая мощность, кВт	120
Номинальный ток, А	400
Пределы регулирования тока, А	150—400
Номинальный режим ПВ, %	100
Напряжение холостого хода, В, не более	300 ± 10 %
Пределы регулирования напряжения на дуге, В	100—200
Плазмообразующий газ	Воздух
Габаритные размеры, мм	1710×874×910

Алмазно-электрохимическое и алмазно-эрозионное шлифование Источник питания — генератор импульсов типа ШГИ, применяемый при ЭЭО, или специальные упрощенные преобразователи типа ИТТ-35 и ИТТ-9

Технические данные плоскошлифовальных (3Э731, 3Э754ЛФ1) и заточных (3672, 36222Э) алмазно-электрохимических станков, приведены ниже

	3Э731	3Э754ЛФ1	3672	3622Э
Обрабатываемая поверхность	Плоскости на изделиях из твердых сплавов, жаропрочных и нержавеющих сталей	—	Плоские задняя и передняя поверхности фрез, зенкеров, зенковок, разверток	Задняя и передняя поверхности резцов
Диаметр круга, мм	250	До 300	—	—
Частота вращения круга, об/мин	2300	1460	3000	2540
Мощность привода шпинделя, кВт	5,5	13	2,2	1,5
Источник питания				
тип	—	ВАКГ-12/6-3200-4	—	ВАКР-630-12У4
напряжение, В	—	8—12	2, 4, 6, 13	8
наибольший ток, А	—	3200	400	300
Габаритные размеры станка (длина × ширину × высоту), мм	2540×1380×2330	3960×3530×2280	2440×2400×1800	1490×1280×1500
Масса, кг	5500	6900	4055	950

Источники питания (трехфазная сеть 380 В) имеют следующие технические данные

	ИТТ-35	ИТТ-9
Наибольшая потребляемая мощность, кВт	1	1
Частота выходных импульсов Гц	50	50
Диапазон регулирования выходного напряжения на холостом ходу, В		
амплитуда импульсов	27—75	27—75
среднее значение	0,5—0,9	0,2—4
Диапазон регулирования длительности импульсов выходного напряжения	85—160	120—180

ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

При импульсном электрическом разряде в жидкости происходит быстрое выделение энергии в канале разряда В результате давление в канале разряда значительно превышает внешнее, канал быстро расширяется, что приводит к возникновению ударной волны и потоков жидкости Кроме того, из канала разряда, имеющего высокую температуру, в окружающую среду поступает излучение, в том числе и ультрафиолетовое, которое поглощается на небольшом расстоянии (примерно 1 см) Наличие ударной и звуковой волн, расходящихся потоков жидкости, излучения из канала открывает возможности технологического использования разряда в жидкости К разработанным технологиям с импульсным разрядом в жидкости относятся

формообразование (штамповка) плоских и цилиндрических деталей,

дробление и измельчение горных пород,

разрушение негабаритов в горнорудной промышленности и бетонных блоков,

очистка литья от формовочной смеси,

развальцовка труб,

эхолокация водоемов,

обеззараживание воды,

обработка нефтяных скважин в целях увеличения их производительности,

обработка скважин для захоронения жидких экологически опасных веществ в целях увеличения их приемистости,

разрушение камней в органах человека и т д

Применение электрического разряда в жидкости целесообразно тогда, когда возможно использовать особенности технологии К таким особенностям относятся высокие скорости обработки при формообразовании, когда меняются пластические

свойства материала заготовки, упрощение технологической оснастки (не требуется пуансон, для получения детали достаточно матрицы), возможность совершать механическую работу с большой мощностью в труднодоступном месте (например, в глубокой скважине или в теле человека), строгое дозирование воздействия и т.д.

Механические проявления импульсного разряда в жидкости принято называть электрогидравлическим эффектом, а установки с использованием этого эффекта — электрогидравлическими. В качестве рабочей среды в таких установках используется, как правило, техническая вода.

Обычно электрогидравлическая установка состоит из накопителя энергии *НЭ* (рис. 60.92), зарядного устройства *ЗУ* и технологического блока *ТБ*, содержащего некоторый объем жидкости, систему электродов, между которыми создается импульсный разряд, и обрабатываемый объект, располагаемый вблизи канала разряда *К*.

Накопитель энергии, как правило, представляет собой батарею импульсных конденсаторов высокого напряжения емкостью *С*. Конденсаторная батарея соединяется с электродной системой в технологическом блоке через разрядник *Р*, наличие которого позволяет зарядить батарею до требуемого напряжения от зарядного устройства *ЗУ* со сравнительно небольшим током. Соединение накопителя энергии с технологическим блоком выполняется малоиндуктивным, для чего используются специальные коаксиальные кабели высокого напряжения. Применение коаксиальных кабелей помимо уменьшения индуктивности разрядной цепи ослабляет электромагнитные поля вблизи работающей установки.

Разрядник *Р* может быть управляемым или неуправляемым. Он может быть двухэлектродным или трехэлекродным (тригатрон). В некоторых случаях разрядник помещают в звукоизолирующий корпус. В установках с большой частотой следования разрядов промежуток разрядника продувается сжатым воздухом, а электроды охлаждаются водой.

Наличие технологического блока характерно для установок, предназначенных для обработки транспортабельных деталей или материалов (например, деталей в машиностроении и металлообработке, сырья в горнорудной промышленности и

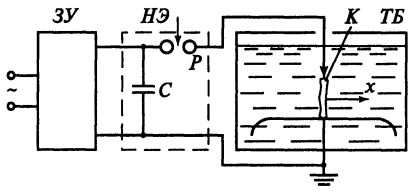


Рис. 60.92. Схема электрогидравлической установки

промышленности строительных материалов и т.д.). В таких электрогидравлических установках, как установки для разрушения негабаритных кусков горных пород, эхолокации водоемов, технологический блок отсутствует и вместо него используется перемещаемая электродная система, погружаемая в шпур, заполненный жидкостью, или в водоем.

Принцип работы типичной электрогидравлической установки поясняют графики изменения во времени основных электрических параметров, приведенные на рис. 60.93. До момента t_1 происходит зарядка накопителя; напряжение на конденсаторе C растет до $U_1 = 10^3—10^5$ В. В момент t_1 накопитель подключается к искровому промежутку в жидкости и начинается процесс электрического пробоя промежутка. По завершении пробоя в момент t_2 наступает канальная стадия разряда. Напряжение u_C за время $t_2 — t_1$ несколько падает (до $U_{пр}$) из-за стекания заряда с конденсатора C вследствие электропроводности сред в промежутке. Если при пробое ток i, протекающий через промежуток, растет незначительно, то по завершении пробоя он резко возрастает. Обычно ток в течение канальной стадии имеет форму, близкую к синусоидальной с большим затуханием. Форма напряжения в промежутке $u_к$ отражает нелинейность его сопротивления. Импульс мощности p, развиваемой в канале, имеет форму, близкую к треугольной.

В тех случаях, когда потери энергии за время пробоя $t_2 — t_1$ недопустимо велики или при рабочем напряжении не обеспечивается стабильный пробой промежутка при требуемом расстоянии между электродами, перед каждым разрядом электроды закорачиваются тонкой проволочкой, которая взрывается под действием тока разряда.

При разряде или электрическом взрыве проволочки в жидкости возникают ударная волна давления и пульсирующая газовая полость, изменение положения которых относительно оси канала во времени показано на рис. 60.94, *а* соответственно кривыми *1* и *2*. Ударная волна распространяется от канала разряда, давление на ее фронте падает, и на

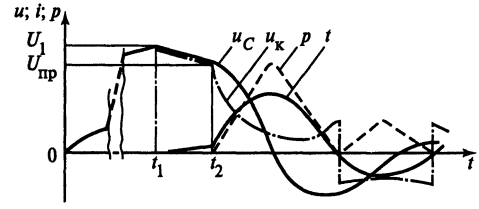


Рис. 60.93. Изменение напряжения на конденсаторе u_C, на канале разряда $u_к$, разрядного тока i и мощности p во времени t

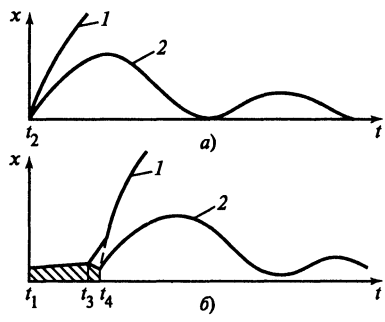


Рис. 60.94. Изменение положения ударной волны (кривые *1*) и границы газовой полости (кривые *2*) при разряде в жидкости, вызванном пробоем (*а*) и взрывом проводника (*б*)

некотором расстоянии x от оси канала разряда ударная волна переходит в звуковую.

Канал разряда в начале процесса расширяется с максимальной скоростью. После прекращения протекания тока полость канала разряда вследствие инерционности окружающей среды продолжает расширяться, достигает предельных размеров и затем начинает сжиматься. При расширении полости температура и давление газа в ней падают, а при сжатии повышаются, что приводит к затухающим пульсациям полости. Обычно период колебаний полости на несколько порядков превышает длительность разряда. Максимальные размеры полости в зависимости от энергии, выделившейся при разряде, и условий протекания гидродинамических процессов в технологическом блоке составляют от нескольких до десятков сантиметров.

В случае применения взрывающейся проволочки картина механических проявлений несколько изменяется (рис. 60.94, *б*). С момента подключения накопителя t_1 начинается разогрев проволочки и происходит сравнительно медленное увеличение ее диаметра. К моменту начала электрического взрыва t_3 от отдельных участков проволочки отделяются слабые ударные волны, распространяющиеся со скоростью, близкой к скорости звука. В момент завершения взрыва t_4 возникает мощная ударная волна, обгоняющая ранее возникшие, и далее процесс протекает так же, как и при разряде вследствие пробоя промежутка.

Из-за потерь энергии в соединительных проводах и элементах накопителя, в канале разряда и в газовой полости только незначительная часть накопленной энергии подводится при пробое промежутка или взрыве проволочки к объекту обработки. Однако при разряде в жидкости достигаются высокие концентрации энергии и скорости обработки, что и определяет области применения электрогидравлических установок. Это прежде всего высокоскоростное деформирование металлов, разрушение и дробление хрупких материалов, очистка металлических деталей от формовочных смесей, окалины, эхолокация водоемов и т.п.

Расчет электрического пробоя. В момент подключения накопителя энергии к промежутку в воде (t_1 на рис 60.93) начинается процесс пробоя. В зависимости от максимального значения напряженности электрического поля в промежутке между электродами, электрической проводимости воды, расстояния между электродами процессы пробоя могут качественно изменяться, и поэтому не существует единого подхода при расчете времени пробоя и степени снижения напряжения (потерь энергии) накопителя за время пробоя $t_2 - t_1$.

Если напряженность электрического поля в промежутке не превышает критического значения $E_{кр}$ (для воды с электрической проводимостью $\sigma = 10^{-2}$ См/м $E_{кр} = 3{,}6$ МВ/м), то разряд наступает в момент закипания жидкости. Пробой этого вида принято называть тепловым.

При тепловом пробое промежутка с однородным полем и постоянным во времени приложенным напряжением время пробоя

$$t_{пр} = \frac{c\beta l^2}{\sigma_0 \alpha U} \ln \frac{1 + \alpha T_2}{1 + \alpha T_1},$$

где l — расстояние между электродами; c, β — удельные теплоемкость и плотность воды; σ_0 — удельная проводимость воды при 0 °С; α — температурный коэффициент проводимости; T_1 — начальная температура; T_2 — температура начала парообразования.

Если $t_{пр} > 10^{-4}$ с, то $T_2 = 100$ °С. При меньших $t_{пр}$ возможен перегрев воды выше 100 °С.

Вольт-секундная характеристика промежутков с однородным полем с учетом перегрева воды имеет вид

$$U_{пр} = \sqrt{\frac{l^2}{\sigma_0 t_{пр}} \left(200 + 345\, e^{-(t_{пр}/\tau)^{2/3}}\right)},$$

где $\tau = 3 \cdot 10^{-5}$ с.

Наибольшее расстояние между электродами, при котором возможен тепловой пробой, в случае использования емкостного накопителя энергии с емкостью C

$$l_{max} = \frac{2c\beta S(T_2 - T_1)}{CE_{кр}^2},$$

где S — площадь неизолированной поверхности электрода, контактирующая с водой.

Расчет теплового пробоя в промежутках с неоднородным полем затруднен, так как распределение

электрического поля в промежутке зависит не только от приложенного напряжения и размеров электродной системы, но и от изменяющейся во времени электрической проводимости воды, зависящей от температуры. Поэтому расчет пробоя может быть выполнен численными методами. Однако для оценок времени пробоя промежутков с неоднородным полем можно воспользоваться формулами для однородного поля, подставив в них среднюю напряженность электрического поля. Такой подход оказывается возможным вследствие выравнивания электрического поля при локальном нагреве воды в местах с наибольшей напряженностью поля.

При напряженности электрического поля выше $E_{кр}$ имеет место лидерный пробой; в этом случае процесс пробоя рассчитывается с помощью вольт-секундных характеристик промежутков.

На рис. 60.95 приведены вольт-секундные характеристики промежутков. По оси абсцисс отложено время воздействия напряжения на стержне, необходимое для пробоя единицы длины промежутка. Приведенные вольт-секундные характеристики получены при прямоугольной форме приложенного напряжения и при удельной проводимости $\sigma = 2{,}5 \cdot 10^{-2}$ см/м.

Как следует из данных рис. 60.95, в электрогидравлических установках целесообразно использовать промежутки типа стержень — плоскость с резко неоднородным полем, время пробоя которых наименьшее (при положительной полярности напряжения на стержне при $U > 25$ кВ или при любой полярности напряжения при более низких напряжениях). Симметричные промежутки типа стержень — стержень используются лишь в редких случаях, когда с потерями энергии за время пробоя можно не считаться.

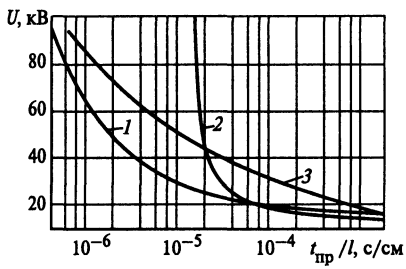


Рис. 60.95. Вольт-секундные характеристики промежутков в воде:

1 — стержень — плоскость, положительная полярность; *2* — стержень — плоскость, отрицательная полярность; *3* — стержень — стержень

Вольт-секундные характеристики промежутков стержень — плоскость при положительной полярности напряжения описываются формулой

$$t_{пр} = \frac{al}{(U - U_0)^2},$$

где a — постоянная ($a = 3{,}6 \cdot 10^5$ В$^2 \cdot$ с/м); U_0 — напряжение, соответствующее напряженности $E_{кр}$. При форме электрода-стержня, близкой к гиперболической,

$$U_0 = \frac{E_{кр}}{2} r \ln \frac{4l}{r},$$

где r — радиус закругления конца электрода.

Вольт-секундные характеристики промежутков в воде при форме напряжения, имеющей место в электрогидравлических установках, описываются следующим уравнением:

$$la = \frac{U_1^2 C R_{эк}}{2}\left[1 - \exp\left(-\frac{2t_{пр}}{CR_{эк}}\right)\right] -$$

$$- 2U_1 U_0 C R_{эк}\left[1 - \exp\left(-\frac{t_{пр}}{CR_{эк}}\right)\right] + U_0^2 t_{пр},$$

где U_1 — напряжение, до которого был заряжен конденсатор C; $R_{эк}$ — эквивалентное сопротивление промежутка при пробое.

Сопротивление $R_{эк}$ определяется из параллельного соединения сопротивлений растеканию токов с неизолированной поверхности электрода и с поверхностей лидеров, проросших до противоположного электрода — плоскости.

Считая неизолированную поверхность электрода сферой с площадью, равной площади неизолированного участка электрода S, сопротивление $R_{эк}$ можно найти из уравнения

$$R_{эк} = 1/\sigma(2\sqrt{\pi S} + bl/2),$$

где b — коэффициент, учитывающий количество параллельно развивающихся лидеров и зависящий от напряжения,

$$b = 2 \cdot 10^{-4} U_1.$$

Максимальное расстояние между электродами, при котором возможен пробой,

$$l_{max} = \left\{\frac{U_0^2 C}{ab\sigma}\left[\frac{U_1^2}{U_0^2} - 4\frac{U_1}{U_0} + 3 + \ln\frac{U_1^2}{U_0^2}\right] + \frac{4\pi S}{b^2}\right\}^{\frac{1}{2}} - \frac{2\sqrt{\pi S}}{b}.$$

Поскольку в выражение для U_0 входит $l = l_{max}$, расчет максимального расстояния по приведенному выражению производится методом последовательных приближений. При этом необходимо за-

даться некоторым значением U_0, подставить его в выражение для l_{max} и рассчитать значение U_0 для полученного l_{max}. При расхождении U_0 с принятым в начале расчета необходимо расчет повторить.

Расстояние между электродами, при котором будут иметь место заданные потери энергии при пробое (заданное напряжение на конденсаторе C в момент завершения пробоя $U_{пр}$), рассчитывается по формуле

$$l_\eta = \frac{C}{ab\sigma}\left\{\left[U_1^2(1-\eta) - 4U_1U_0(1-\sqrt{\eta}) - U_0^2\ln\eta\right] + \right.$$

$$\left. + \frac{4\pi S}{b^2}\right\}^{1/2} - \frac{2\sqrt{\pi S}}{b},$$

где $\eta = U_{пр}^2/U_1^2$.

Приведенная формула справедлива при $U_{пр} > U_0$.

Если $U_1 >> U_0$, то

$$l_\eta = \left[CU_1^2(1-\eta)/ab\sigma + 4\pi S/b^2\right]^{1/2} - \frac{2\sqrt{\pi S}}{b}.$$

Расчет электрических характеристик канала разряда. Сопротивление канала разряда нелинейно. В момент t_{max} максимума тока I_{max}, сопротивление

$$R = 4{,}4\cdot 10^7 I_{max}^{-1{,}5}.$$

При колебательном разряде

$$R\exp\left(\frac{-3\gamma}{2\sqrt{1-\gamma^2}}\arcsin\sqrt{1-\gamma^2}\right) =$$

$$= 4{,}4\cdot 10^7 l U_{пр}^{-3/2}(L/C)^{3/4};$$

при апериодическом

$$R\left(\gamma+\sqrt{\gamma^2-1}\right)^{\frac{-3\gamma}{2\sqrt{\gamma^2-1}}} = 4{,}4\cdot 10^7 l U_{пр}^{-3/2}(L/C)^{3/4},$$

где $\gamma = R/2\sqrt{L/C}$; L — индуктивность цепи разряда.

Значение R может быть определено из графиков рис. 60.96, где по оси абсцисс отложена величина

$$A = 4{,}4\cdot 10^7 l U_{пр}^{-3/2}(L/C)^{3/4}$$

в пределах 1—10 Ом. Графиками рис. 60.96 можно пользоваться и при других порядках величины A, при этом соответственно меняются и порядки величин R и $\sqrt{L/C}$. Штриховой линией на рис. 60.96 показана граница между колебательными и апериодическими разрядами.

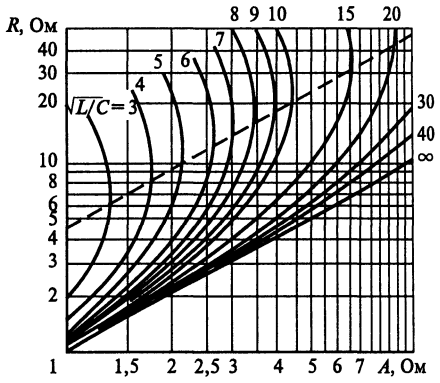


Рис. 60.96. Зависимость сопротивления канала разряда R от A при различных значениях $\sqrt{L/C}$

Импульс, развиваемый в канале, имеет форму, близкую к треугольной, с максимальным значением

$$P_{max} = 4{,}4\cdot 10^7 l U_{пр}^{1/2}(C/L)^{1/4}\times$$

$$\times\exp\left(\frac{-\gamma}{2\sqrt{1-\gamma^2}}\arcsin\sqrt{1-\gamma^2}\right)$$

и временем нарастания

$$t_{max} \approx \frac{0{,}8\sqrt{LC}}{\sqrt{1-\gamma^2}}\arcsin\sqrt{1-\gamma^2},$$

составляющим примерно 0,8 времени достижения максимума тока.

Крутизна импульса мощности, отнесенная к единице длины промежутка между электродами, Вт/(с · м), используемая для оценочных расчетов гидродинамических характеристик канала,

$$dp/dt = 5{,}5\cdot 10^7 U_{пр}^{1/2} C^{-1/4} L^{-3/4}\times$$

$$\times\frac{\sqrt{1-\gamma^2}\exp\left(\frac{-\gamma}{2\sqrt{1-\gamma^2}}\arcsin\sqrt{1-\gamma^2}\right)}{\arcsin\sqrt{1-\gamma^2}}.$$

При $\gamma = 0{,}55$ на активном сопротивлении канала разряда развивается предельно возможная мощность. Удельная крутизна этой мощности

$$dp_{max}/dt = 3{,}4\cdot 10^7 U_{пр}^{1/2} C^{-1/4} L^{-3/4}.$$

Длина промежутка, соответствующая предельно возможной мощности, называется оптимальной и равна

$$l_{опт} = 8\cdot 10^{-9} U_{пр}^{3/2}(C/L)^{1/4}.$$

При этой длине время нарастания импульса мощности $t_{max} \approx \sqrt{LC}$, а длительность спада приблизительно в 2,5 раза больше.

Связь параметров канала разряда и волны сжатия с электрическими характеристиками установки. Физические характеристики канала разряда и параметры волны сжатия до момента максимума мощности слабо изменяются во времени и рассчитываются по следующим формулам:

давление в канале разряда, Па,

$$p_a = \frac{4{,}5 \cdot 10^{-20} (dp/dt)^{2/3}}{4{,}3 \cdot 10^{-19} + 3{,}9 \cdot 10^{-21} (dp/dt)^{1/6}};$$

скорость расширения канала, м/с,

$$da/dt = 7{,}9 \cdot 10^{-2} (dp/dt)^{1/4};$$

температура плазмы, К,

$$T = 56 (dp/dt)^{1/6};$$

плотность частиц в канале, $м^{-3}$,

$$n \approx \frac{57 (dp/dt)^{1/2}}{4{,}3 \cdot 10^{-19} + 3{,}9 \cdot 10^{-21} (dp/dt)^{1/6}};$$

радиус канала к моменту t_{max}, м,

$$a_{t_{max}} = 6{,}3 \cdot 10^{-2} (dp/dt)^{1/4} (LC)^{1/2} \frac{\arcsin\sqrt{1-\gamma^2}}{\sqrt{1-\gamma^2}}.$$

При расстоянии между электродами, равном $l_{опт}$,

$$a_{t_{max}} = 7{,}5 \cdot 10^{-2} (dp/dt)^{1/4} (LC)^{1/2};$$

скорость ударной волны, м/с,

$$D = 7{,}5 \cdot 10^2 \{1 + [1 + 4{,}4 \cdot 10^{-8} (dp/dt)^{1/2}]^{1/2}\};$$

давление на фронте ударной волны, Па, вблизи канала (на расстоянии от оси канала $x_0 \le Dt_{max}$)

$$p_ф = 6{,}4 (dp/dt)^{1/2}.$$

Скорость выделения энергии при $t > t_{max}$ начинает уменьшаться, и параметры всех физических характеристик канала разряда изменяются. Это в первую очередь относится к давлению в канале разряда, которое к концу первого полупериода колебаний тока уменьшается почти на порядок.

При $x \le 2{,}5l$ ударная волна является цилиндрической. В этой области давление на фронте волны, Па, рассчитывается по формуле

$$p_ф = 6{,}1 x^{-1/2} W_1^{5/8} T_1^{-3/4},$$

где W_1 — количество энергии, выделившейся в течение первого полупериода T_1 колебаний разрядного тока и отнесенной к единице длины межэлектродного промежутка, Дж/м; эти величины рассчитываются по формулам:

$$W_1 = 6{,}9 \cdot 10^7 U_{пр}^{1/2} C^{3/4} L^{1/4} \times \exp\frac{-\gamma}{2\sqrt{1-\gamma^2}} \times \frac{\arcsin\sqrt{1-\gamma^2}}{\sqrt{1-\gamma^2}};$$

$$T_1 = \frac{\pi\sqrt{LC}}{\sqrt{1-\gamma^2}}.$$

При расстоянии между электродами $l_{опт}$

$$W_1 \approx CU_{пр}^2 / 2l_{опт};$$

$$T_1 \approx 3{,}8\sqrt{LC}$$

и давление, Па,

$$p_ф \approx 1{,}6 \cdot 10^6 U_{пр}^{5/16} C^{1/4} L^{-7/32} x^{-1/2}.$$

С увеличением расстояния от оси канала разряда волна сжатия перерождается из цилиндрической в сферическую.

В области $2{,}5l < x < 5l$ происходит уменьшение максимального давления примерно на 30 % по сравнению со значением, соответствующим $x = 2{,}5l$.

Расчет давления при $x > 5l$ производится по формуле

$$p_ф = 0{,}7 p_{ф(x=2{,}5l)} (5l/x)^{-1{,}1}.$$

Приведенные выше выражения относятся к разрядам, возникающим при пробое промежутка. Если в установке между электродами используется взрывающаяся проволочка, энергетические характеристики канала становятся другими, даже если диаметр проволочки предельно мал. Это связано, вероятно, с тем, что образующийся после взрыва канал менее искривлен и его сопротивление оказывается при тех же параметрах установки в несколько раз меньше, чем сопротивление канала, образованного в результате пробоя промежутка.

Давление на фронте волны сжатия зависит от материала и диаметра взрывающейся проволочки. Вблизи канала разряда, где волна близка к цилиндрической, давление практически не зависит от длины проволочки. Давление максимально при электрическом взрыве, происходящем в момент, близкий к моменту достижения максимума разрядного тока.

Поскольку электрический взрыв проволочки, осуществляемый в электрогидравлических установках, относится к категории сравнительно медленных взрывов, для его завершения достаточно достижения проводником жидкого состояния. Затем быстро возникают частичные дуги в разрывах проводника, переходящие в сквозной канал разря-

да. Момент плавления материала проводника определяется так называемым удельным действием A_I (интегралом квадрата плотности тока по времени). Для алюминия $A_I = 4 \cdot 10^{16}$ А$^2 \cdot$с/м^4, для меди $A_I = 1{,}05 \cdot 10^{17}$ А$^2 \cdot$с/м^4.

Диаметр проволочки, м, при котором имеет место максимальное давление,

$$d = 0{,}85 \sqrt[4]{\frac{CU^2}{2A_I}} \sqrt{C/L}.$$

Вдали от канала разряда давление волны сжатия зависит не только от диаметра проволочки, но и от ее длины. Давление максимально при наибольшей скорости выделения энергии в канале разряда, т.е. при колебательных сильно затухающих разрядах.

Помимо давления важным параметром для многих технологических процессов является деформация обрабатываемой детали в зависимости от диаметра проволочки. При этом оптимальный диаметр проволочки по условию максимальной деформации или наибольшего перемещения обрабатываемого объекта может не совпадать со значением по условию максимального давления.

Для достижения наибольшей деформации диаметр проволочки при сохранении той же длины должен быть на 20—30 % больше, чем диаметр, при котором наблюдается наибольшее давление.

Схемы разрядных контуров установок. Кроме простейшей схемы разрядной цепи, показанной на рис. 60.92, в электрогидравлических установках используются более сложные схемы со вспомогательными устройствами, обеспечивающими электрический пробой одного или нескольких промежутков в технологическом блоке.

В тех случаях, когда рабочее напряжение накопителя энергии недостаточно для пробоя промежутка и нецелесообразно использовать взрывающиеся проволочки (например, в установках с большой частотой следования разрядов), для пробоя применяются вспомогательные источники высокого напряжения.

Одним из них является генератор импульсных напряжений *ГИН*, подключенный к промежутку в жидкости (рис. 60.97, *а*). Рабочее напряжение *ГИН* и его емкость выбираются из условия обеспечения электрического пробоя промежутка *П* в воде с заданной удельной проводимостью и при известных размерах электродной системы. Схема рис. 60.97, *а* применяется при сравнительно больших индуктивностях разрядных цепей, а также в случае использования управляемого (чаще всего многозазорного) разрядника *Р*, выдерживающего номинальное напряжение *ГИН* и срабатывающего от пускового импульса, поступающего с некоторым запаздыванием после срабатывания *ГИН*.

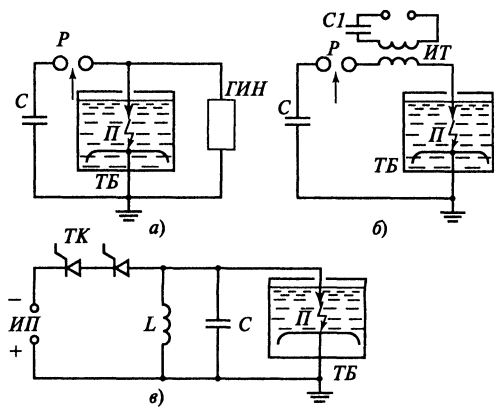


Рис. 60.97. Схемы для исследования пробоев промежутков *П* в технологических блоках *ТБ*

Иногда может оказаться достаточным для срабатывания установки обеспечение незавершенного (частичного) пробоя промежутка в воде под действием *ГИН*.

Особенностью электрогидравлической установки с описанным способом пробоя промежутка в технологическом блоке является выполнение изоляции электрода и соединительных проводов, идущих от накопителя энергии, на напряжение, превышающее номинальное напряжение *ГИН*. В некоторых случаях в таких схемах в разрядную цепь накопителя включают дополнительную развязывающую индуктивность.

На рис. 60.97, *б* приведена схема с включением последовательно в разрядную цепь накопителя импульсного трансформатора *ИТ*, создающего необходимое для пробоя промежутка *П* напряжение и затем пропускающего по вторичной обмотке ток разряда накопителя энергии. Такой трансформатор обычно питается от малоиндуктивного конденсатора *С1*, заряжаемого от вспомогательного выпрямителя.

Недостатком такого способа пробоя является внесение в разрядную цепь дополнительной индуктивности. В целях снижения этой индуктивности применяют кабельные *ИТ* с малыми индуктивностями рассеяния, а также трансформаторы с магнитопроводами, насыщающимися при протекании по вторичной обмотке тока разряда накопителя.

В некоторых установках проблема инициирования разряда решается по-иному, например путем введения в промежуток струи электролита, в которой легче происходит пробой, или путем создания продольного магнитного поля, оказывающего влияние на процесс пробоя при сравнительно небольших рабочих напряжениях установки.

В схемах рис. 60.97, *а*, *б* в разрядный контур входит управляемый или неуправляемый разрядник *Р*. Наличие разрядника необходимо для обеспечения заряда емкостного накопителя *С* от выпрями-

теля высокого напряжения со сравнительно небольшим зарядным током. Наличие разрядника приводит к дополнительным потерям энергии в нем, повышенному шуму при работе установки и к ограничению частоты повторения разрядов. Введение в установку мощного зарядного устройства индуктивного накопителя энергии (рис. 60.97, *в*) позволяет устранить эти недостатки.

Индуктивность L заряжается через управляемый тиристорный коммутатор *ТК* от источника постоянного напряжения *ИП*, например от сети 220—380 В с выпрямителем. После накопления в магнитном поле катушки L требуемой энергии тиристорный коммутатор *ТК* выключается и переключает ток индуктивности I_L в параллельно соединенные промежуток *П* и конденсатор C. До возникновения разрядных процессов промежуток обладает активным сопротивлением

$$R \approx 1/2\sigma\sqrt{\pi S},$$

а напряжение на промежутке можно записать в виде

$$U = U_{\max} \sin \omega t.$$

Выбор индуктивности L и зарядного тока I_L должен производиться так, чтобы пробой промежутка *П* завершился в момент, близкий к моменту максимума напряжения $U_{\max}$. При этом $U_{\max} \approx U_{\text{пр}}$ и

$$\frac{\pi}{2\omega} \approx t_{\text{пр}} = \frac{3c\beta r^2}{2\alpha\sigma U_{\text{пр}}^2}\left(\frac{U_{\text{пр}}^2}{U_0^2} - 1\right).$$

Соответствующее значение индуктивности определяется из выражения

$$L = \frac{4t_{\text{пр}}^2}{\pi^2 C}\left(1 + \frac{L}{2R^2 C\left(1 + \dfrac{L}{4R^2 C}\right)^2}\right).$$

При $\gamma' = 2R\sqrt{C/L} > 1$

$$I_L = \frac{U_{\text{пр}}\sqrt{\gamma'^2 - 1}}{2R \sin \operatorname{arctg}\sqrt{\gamma'^2 - 1}},$$

а при $\gamma' < 1$

$$I_L = \frac{U_{\text{пр}}\gamma'}{2R}\left(\frac{1 - \sqrt{1 - \gamma'^2}}{1 + \sqrt{1 - \gamma'^2}}\right).$$

При использовании электрического разряда для обработки деталей с большой поверхностью целесообразно использовать не один, а несколько искровых промежутков в жидкости. В этом случае применяются многоконтурные установки, в которых на каждый промежуток разряжается отдельный накопитель энергии.

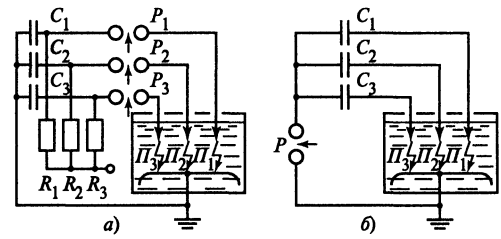


Рис. 60.98. Многоконтурные схемы с индивидуальными разрядниками (*а*) и с общим разрядником *P* (*б*)

На рис. 60.98, *а* приведена схема генератора, в котором накопители с емкостью C_1—C_3 заряжаются от общего источника через развязывающие резисторы сопротивлением R_1—R_3, а разряжаются на промежутки $П_1$—$П_3$ через индивидуальные управляемые разрядники P_1—P_3. В общем случае каждый накопитель может содержать собственный выпрямитель с регулируемым зарядным напряжением. Установив требуемые моменты подачи пусковых импульсов разрядников, можно обеспечить необходимые последовательность возникновения разрядов в технологических блоках и временны́е интервалы между ними.

Поскольку электроды промежутков $П_1$—$П_3$ могут располагаться недалеко друг от друга, возможно их взаимное влияние в стадии пробоя и вынос потенциала на электроды разрядников при срабатывании одного или нескольких из них. Это приводит к необходимости использования в установке разрядников, надежно управляемых при изменении приложенного к ним напряжения в широком диапазоне.

Несколько меньшими технологическими возможностями обладает многоконтурная схема, приведенная на рис 60.98, *б*. В ней используется один разрядник P, включенный в общий для всех контуров провод. При такой схеме исключается возможность регулирования интервала времени между разрядами в промежутках $П_1$—$П_3$, поскольку напряжение на них подается одновременно. Заряд конденсаторов емкостью C_1—C_3 производится до одного и того же напряжения от выпрямителя через рабочие промежутки в технологическом блоке. Оба вывода конденсаторов должны быть изолированы на рабочее напряжение.

Несмотря на отмеченные недостатки, схема рис. 60.98, *б* чаще всего используется в многоконтурных установках вследствие простоты выполнения коммутирующего разрядника P.

В табл. 60.53—60.56 приводятся основные параметры некоторых электрогидравлических установок.

Таблица 60.53. **Основные данные электрогидравлических установок для очистки литья**

Параметр	Модель 67511	Модель 36313	«Искра-15»	«Искра-30»
Размеры обрабатывасмой детали, мм	250×250×500	1000×800×400	3150×2500×1250	3200×2000×1250
Масса детали, кг, не более	25	315	2500	10 000
Установленнаямощность, кВ · А	50	60	120	150
Накапливаемая энергия, кДж	5	15	5	10
Емкость, мкФ	4	12	4	8
Количество разрядных контуров	2	6	6—8	2
Габаритные размеры установки, м	8,03×3,96×1,7	14×10×7,5	12,2×8,5×7,95	18×6×4
Масса установки, кг	9700	35 000	65 000	52 500

Окончание табл. 60.53

Параметр	Модель 36215	«Искра-18»	Модель 36121А	Модель 36131А	Модель 36141А
Размеры обрабатываемой детали, мм	5000×3200×2000	7500×3400×2500	1800×1000×700	3500×2000×1000	5600×3000×2000
Масса детали, кг, не более	25 000	30 000	2500	8000	25 000
Установленная мощность, кВ · А	280	262	75	210	212
Накапливасмая энергия, кДж	20	10	5	10	10
Емкость, мкФ	16	8	4	8	8
Количество разрядных контуров	2	2	1	1	1
Габаритные размеры установки, м	26×10×5	39×10×5	6,6×4,35×2,4	16×8,8×4,5	19×9,6×5
Масса установки, кг	65 000	77 000	11 000	30 000	46 000

Примечания: 1. Рабочее напряжение всех установок 50 кВ.
2. Разряд инициируется пробоем промежутков.
3. Модели 36313 и «Искра-15» — конвейерные, модели 36121А, 36131А, 36141А — тупиковые.

МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

Под магнитно-импульсной обработкой материалов понимают использование импульсных магнитных полей и электродинамических сил для формообразования, сборочных операций (например, опресовки наконечников, соединения тяг), вырубки отверстий в тонких проводящих заготовках и т.д. Магнитно-импульсная обработка металлов, как и электрогидравлическая, относится к высокоскоростным методам обработки. При ней достижимы скорости деформации 200—500 м/с. Формообразование также осуществляется при использовании только матрицы. Особенностью магнитно-импульсной обработки является отсутствие инструмента. Его роль выполняет магнитное поле. Силы, действующие на заготовку, являются объемными, а не поверхностными, как при любых других способах обработки. Магнитно-импульсная обработка может проводиться через диэлектрические материалы, например внутри стеклянного сосуда в вакууме или в газовой среде заданного состава.

Импульсные электродинамические силы. Если в проводнике протекает ток объемной плотностью J, то при наличии собственного или внешнего магнитного поля с индукцией B на единицу объема материала проводника действует сила

$$F = JB.$$

Эта сила перпендикулярна направлениям J и B, и ее направление может быть определенно по правилу «левой руки».

Таблица 60.54. **Основные данные электрогидравлических прессов**

Параметр	«Удар-1»	«Удар-12М»	«Удар-20С»	«Удар-11»	«Удар-17»	«Удар-16К»	ПЭГ-100М
Наибольшая накапливаемая энергия, кДж	12,5	10	20	150	80	80	100
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	10	10	10	50	50	50	50
Наибольшие размеры заготовки, мм: при вытяжке:							
длина	2500	400	500	2000	2400	—	1550
ширина	1200	400	500	2000	1400	—	1150
при формовке:							
диаметр	—	300	500	—	—	600	—
высота	—	275	700	—	—	1000	—
Масса установки, кг	50 000	3350	6600	94 000	60 000	46 300	32 000

Таблица 60.55. **Основные данные серийно выпускаемых электрогидравлических установок для закрепления труб в трубных решетках теплообменных аппаратов**

Параметр	ТО223	ТО226
Наибольшая накапливаемая энергия, кДж	20	40
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	50	50
Размеры трубы, мм:		
диаметр	8—35	8—40
толщина стенки	До 2,5	До 3,5
Толщина трубной решетки, мм	20—120	20—220
Масса установки, кг	7000	8000

Для участков замкнутого контура, находящихся в собственном магнитном поле, направление электродинамических сил совпадает с направлением деформации контура, при которой максимально увеличивается его индуктивность.

Электродинамическую силу, действующую на проводник в направлении x, можно выразить через ток i и индуктивность L цепи:

$$F = \frac{i^2}{2}\frac{\partial L}{\partial x}.$$

На единичный проводник с током действуют электродинамические силы, стремящиеся сжать проводник.

В импульсных режимах кратковременно удается достигать высокой плотности тока в металлах без их термического разрушения.

Таблица 60.56. **Основные данные серийно выпускаемых электрогидравлических прессов**

Параметр	Т1220	Т1223	«Удар-21»	Т1229	Т1232
Наибольшая накапливаемая энергия, кДж	10	20	40	80	160
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	10	10	10	50	50
Наибольшие размеры заготовок, мм: плоских:					
длина	400	650	—	1400	2000
ширина	400	650	—	1400	2000
пространственных:					
диаметр	250	450	250	—	1500
высота	275	450	300	—	1200
Масса установки, кг	3355	8000	10 000	50 000	80 000

При отсутствии теплообмена с окружающей средой из баланса энергии можно записать

$$A_I = \int_0^t J^2\,\mathrm{d}t = \frac{c\beta}{\alpha\rho_0}\ln\frac{1+\alpha T_2}{1+\alpha T_1},$$

где t — время протекания тока; c и β — удельные теплоемкость и плотность материала; ρ_0 — удельное сопротивление материала при 0 °С; α — температурный коэффициент сопротивления; T_1 и T_2 — начальная и конечная температуры проводника, °С.

Связь между температурой T_2, теплофизическими константами материала и интегралом плот-

ности тока A_I устанавливается следующим уравнением:

$$T_2 - T_1 \approx \frac{1}{\alpha}\left[\exp\left(\frac{\alpha\rho_0 A_I}{c\beta}\right) - 1\right].$$

При малых перепадах температуры

$$T_2 - T_1 \approx \frac{\rho_0 A_I}{c\beta}.$$

Из приведенных выражений при известном законе изменения плотности тока во времени устанавливается связь между временем протекания тока и нагревом с учетом теплофизических констант материала. При использовании в качестве источника тока конденсатора C, заряженного до напряжения U,

$$A_I = CU^2/2RQ^2,$$

где R — активное сопротивление цепи разряда; Q — сечение проводника.

За время примерно 10^{-6} с через металлы можно пропускать токи плотностью около 10^{10} А/м^2, причем температура проводника может не превышать температуры плавления или температуры, при которой теряются прочностные свойства материала.

Индукции магнитного поля, реализуемые в импульсных режимах без разрушения катушки (индуктора), обтекаемой током, достигают приблизительно 80 Тл, а при использовании разрушающихся индукторов разового применения — 200 Тл. Эти значения намного превышают индукции насыщения ферромагнитных материалов, поэтому последние не используются в технике сильных магнитных полей.

Высокие плотности тока и индукции магнитного поля, реализуемые сравнительно просто путем разряда конденсаторов, позволяют получать большие электродинамические силы, превышающие предел прочности большинства конструкционных материалов.

Импульсные электродинамические силы используются для ускорения проводников в импульсном электроприводе и для деформации различных заготовок. Последнее направление, бурно развивающееся в настоящее время, иногда называют магнитной штамповкой.

Деформация или ускорение проводников осуществляется в импульсном магнитном поле либо при пропускании через проводник тока от генератора, либо при протекании по проводнику тока, индуцированного расположенным рядом индуктором. В последнем случае суммарные электродинамические силы, действующие на проводник, выражаются через давление магнитного поля

$$p = \frac{B_1^2 - B_2^2}{2\mu_0},$$

где B_1 и B_2 — индукции магнитного поля у поверхности обрабатываемой заготовки со стороны индуктора и за заготовкой; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

Как видно из приведенной формулы, давление на заготовку равно разнице плотностей энергии магнитных полей перед заготовкой и за ней.

Если поле не проникает за заготовку, то $B_2 = 0$ и давление максимально.

Важную роль при магнитно-импульсной обработке играют поверхностный эффект и эффект близости. От проявления поверхностного эффекта зависят глубина проникновения электромагнитного поля в заготовку, распределение электродинамических сил по толщине заготовки, проникновение поля за заготовку. Этот эффект используется в некоторых установках, например, для создания притягивающих усилий. Подбирая параметры установки так, чтобы поле проникало за заготовку, и осуществляя быструю компенсацию магнитного поля в пространстве между индуктором и заготовкой, получают усилия, действующие на заготовку в направлении к индуктору.

Эффект близости влияет на распределение тока по сечению заготовки и виткам индуктора, вытесняя ток в направлении, противоположном направлению электродинамических сил.

На рис. 60.99 приведены наиболее типичные схемы разрядных контуров установок для магнит-

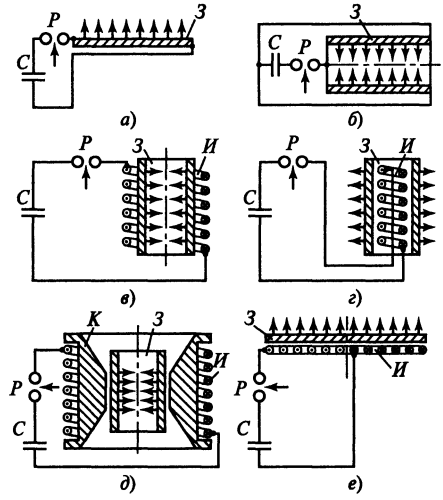


Рис. 60.99. Разновидности магнитно-импульсной обработки

но-импульсной обработки материалов. Наиболее простые из них — первые две, в которых обрабатываемая заготовка *3* включается последовательно в цепь разряда, состоящую из заряженного конденсатора *C* и разрядника *P*. В установке, схема которой показана на рис. 60.99, *а*, электродинамические силы создаются за счет взаимодействия тока в заготовке с магнитным полем, созданным током в обратном проводе, проложенном в непосредственной близости от заготовки. Заготовка или отдельные ее участки движутся в направлении действия электродинамических сил, показанных стрелками. В зависимости от задачи обработки за заготовкой размещается матрица той или иной формы. Аналогично осуществляются и другие операции магнитно-импульсной обработки. В этом случае вместо заготовки включается подвижная мембрана, передающая импульсное давление на предмет обработки или в упругую среду.

Операции обжима заготовок из проводящего материала (формообразование, сборка, прессование материалов внутри заготовки и т.д.) наиболее просто осуществляются на установке, схема которых соответствует показанной на рис. 60.99, *б*. Обратный токопровод выполняется обычно в виде трубки и вместе с заготовкой *3* образует коаксиальную малоиндуктивную систему. Основным недостатком этого способа обработки являются трудности получения требуемых больших разрядов токов, что связано со сложностями конструктивного выполнения источника тока, и обеспечения контакта токопроводящих проводников с заготовкой.

В установках с индукторами *И* (рис. 60.99, *в*) в значительной степени облегчается решение этих проблем. Так, многовитковый индуктор *И* вместе с заготовкой *3* образует понижающий трансформатор, и суммарный ток, протекающий по заготовке, может во много раз превышать ток первичной цепи.

С помощью индуктора *И* осуществляются операции обжима и раздачи (формообразование, сборка, вырубка отверстий, сварка и т.д.) в соответствии со схемами рис. 60.99, *в*—*е* (последняя служит для обработки плоских заготовок). При обработке заготовок с малыми размерами используют концентраторы *К* магнитного потока (рис. 60.99, *д*), представляющие собой массивные детали сложной формы из хорошо проводящего и механически прочного материала. Концентратор имеет не показанную на рис. 60.99, *д* узкую аксиальную щель и представляет собой незамкнутый виток. Вместе с многовитковым намотанным на него индуктором концентратор образует понижающий трансформатор, а вместе с заготовкой — трансформатор с коэффициентом трансформации, близким к единице. Металл стенок щели концентратора выполняет функции проводов, соединяющих оба трансформатора.

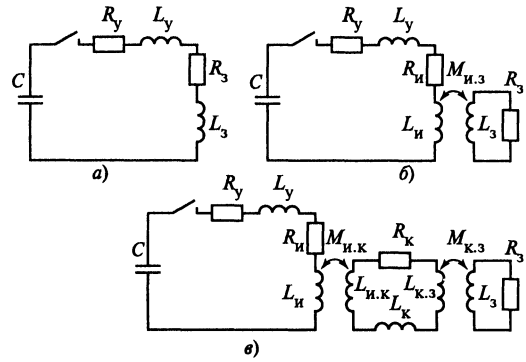


Рис. 60.100. Схемы замещения разрядных цепей установок с пропусканием тока через заготовку (*а*), с индуктором (*б*) и концентратором (*в*)

Электрические схемы замещения разрядных контуров различных установок, используемые для расчетов переходных процессов, приведены на рис. 60.100. В них входят внутренние индуктивности и активные сопротивления установок $L_у$ и $R_у$, индуктивности и активные сопротивления заготовок $L_з$ и $R_з$. При использовании индукторов необходимо учитывать их индуктивности $L_и$ и активные сопротивления $R_и$, а также взаимную индуктивность $M_{и.з}$ (рис. 60.100, *б*). Наиболее сложной является схема замещения разрядной цепи с концентратором (рис. 60.100, *в*). В нее кроме упомянутых элементов входят взаимные индуктивности индуктор — концентратор $M_{и.к}$, и концентратор — заготовка $M_{к.з}$, а также активное сопротивление концентратора $R_к$, индуктивности участков концентратора, граничащих с обмоткой $L_{и.к}$, с заготовкой $L_{к.з}$, и в щели $L_к$.

Все эти схемы приводятся к одной, состоящей из последовательно соединенных конденсатора *C*, заряженного до напряжения *U*; суммарных индуктивности *L* и активного сопротивления *R*.

Для установок с пропусканием тока по заготовке

$$R = R_у + R_з, \quad L = L_у + L_з;$$

с использованием индуктора

$$R = R_у + R_и + R_з L'/L_з,$$

$$L = L_у + L_и - L'$$

и с применением концентратора

$$R = R_у + R_и +$$

$$+ \frac{\omega^2 M_{и.к}^2 (R_к + R_з L''/L_з)}{(R_к + R_з L''/L_з)^2 + \omega^2 (L_{и.к} + L_к + L_{к.з} - L'')^2},$$

$$L = L_{\text{у}} + L_{\text{и}} - \frac{\omega^2 M_{\text{и.к}}^2 (L_{\text{и.к}} + L_{\text{к}} + L_{\text{к.з}} - L'')}{(R_{\text{к}} + R_{\text{з}} L''/L_{\text{з}})^2 + \omega^2 (L_{\text{и.к}} + L_{\text{к}} + L_{\text{к.з}} - L'')^2},$$

где $\omega = 1/\sqrt{LC}$ — угловая частота разрядного тока;

$$L' = \frac{M_{\text{и.з}}^2}{L_{\text{з}}(1 + R_{\text{з}}^2/\omega^2 L_{\text{з}}^2)}; \quad L'' = \frac{M_{\text{к.з}}^2}{L_{\text{з}}(1 + R_{\text{з}}^2/\omega^2 L_{\text{з}}^2)}.$$

Расчет параметров магнитно-импульсных установок. Разрядный ток в магнитно-импульсных установках имеет колебательный характер. Нелинейности элементов R и L обычно слабо сказываются на форме тока, поэтому он может быть найден из решения уравнения переходного процесса для линейной цепи:

$$i = \frac{U}{\omega L \sqrt{1 - R^2 C/4L}} e^{-Rt/2L} \sin\left(\omega \sqrt{1 - R^2 C/4L}\, t\right).$$

Электродинамические силы в простейших случаях (например, для установок, показанных на рис. 60.99, *а*, *б* и имеющих схему замещения, приведенную на рис. 60.100, *а*) находятся по уравнению

$$F = \frac{U^2 C}{2L(1 - R^2 C/4L)} \times$$

$$\times e^{-Rt/L} \sin^2\left(\omega \sqrt{1 - R^2 C/4L}\, t\right) \frac{\partial L}{\partial x}.$$

Аналогично можно рассчитать электродинамические силы, действующие на заготовку, при использовании индукторов или концентраторов. Для этого необходимо определить ток в заготовке, что нетрудно сделать при заданном токе разряда i и известных параметра схем рис. 60.100, *б*, *в*.

Другой подход к определению электродинамических сил заключается в расчете энергии магнитного поля, сосредоточенного в пространстве между индуктором (или концентратором) и заготовкой. Для этого рассчитывается величина

$$W = (L_{\text{и}} - L')i^2/2,$$

а в случае применения концентратора

$$W = (L_{\text{к.з}} - L')i_{\text{к}}^2/2,$$

где $i_{\text{к}}$ — ток в концентраторе.

Давление магнитного поля на заготовку

$$p = W/S\Delta_{\text{экв}},$$

где S — обрабатываемая площадь заготовки; $\Delta_{\text{экв}}$ — эквивалентный зазор между индуктором и заготовкой, равный сумме геометрического зазора $\Delta_{\text{г}}$, половины глубины проникновения поля в заготовку и половины глубины проникновения в материал индуктора:

$$\Delta_{\text{экв}} = \Delta_{\text{г}} + \sqrt{(\rho_{\text{з}} + \rho_{\text{и}})/2\omega\mu_0}.$$

Здесь $\rho_{\text{з}}$ и $\rho_{\text{и}}$ — удельное сопротивление материалов заготовки и индуктора.

При заданных материале заготовки, толщине δ и обрабатываемой поверхности расчет процесса обработки начинается с выбора собственной частоты процесса разряда.

Частота не должна быть очень высокой, так как при этом будет нагружаться только поверхностный слой заготовки и трудно обеспечить эффективное использование накопленной в конденсаторе C энергии из-за конечного значения $L_{\text{у}}$. Эффективность обработки падает и при чрезмерно низкой частоте вследствие просачивания поля за заготовку. Чтобы удовлетворить эти противоречивые требования частота должна лежать в пределах

$$1/\sqrt{10 L_{\text{у}} C} \geq \omega \geq 2\rho_{\text{з}}/\mu_0 \delta^2.$$

Затем определяются требуемый максимальный ток разряда

$$I_{\text{м}} = U\sqrt{C/L} \exp\left(\frac{-R/2\sqrt{L/C}}{\sqrt{1 - R^2 C/4L}}\right) \times$$

$$\times \arcsin\sqrt{1 - R^2 C/4L} = \omega \sqrt{2C\Delta_{\text{экв}} PS}$$

и индуктивность системы индуктор — заготовка

$$L_{\text{и}} - L' = 1/\omega^2 C,$$

которую необходимо обеспечить путем выбора конструктивных размеров и числа витков индуктора.

Значения $R_{\text{з}}$ рассчитываются с использованием глубины проникновения электромагнитного поля:

$$\Delta = \sqrt{2\rho/\mu_0 \omega},$$

а при расчетах $L_{\text{з}}$ и $M_{\text{и.з}}$ индуктор и заготовка замещаются тонкими плоскими катушками с расстоянием между ними $\Delta_{\text{экв}}$.

Аналогично рассчитываются параметры и в случае применения концентратора магнитного потока.

Генераторами импульсных токов в магнитно-импульсных установках являются малоиндуктивные емкостные накопители энергии. Зарядное напряжение накопителей обычно составляет 5—20 кВ.

Накопители комплектуются из импульсных конденсаторов. В установках с большой накапливаемой энергией конденсаторы объединяются в блоки, имеющие собственные коммутаторы разрядного тока. Блочный принцип построения накопителя позволяет достигнуть малых значений ин-

дуктивностей и активных сопротивлений разрядной цепи L_y и R_y, избежать опасности взрыва конденсаторов при их повреждении в процессе зарядки. Внутренняя индуктивность разрядной цепи установки может быть сведена до 10^{-8} Гн.

В установках используют импульсные конденсаторы с бумажно-масляной изоляцией с пропиткой конденсаторным либо касторовым маслом или соволом. При небольшом числе параллельно соединенных конденсаторов для достижения высокой частоты разрядного тока выбирают конденсаторы с малой внутренней индуктивностью.

Конденсаторы в установке или в пределах блока объединяются параллельно малоиндуктивной ошиновкой. Применяют два типа ошиновки: кабельную и плоскую, выполняемую широкими шинами, накладываемыми непосредственно на выводы конденсаторов.

В качестве коммутаторов разрядного тока используют воздушные или вакуумные разрядники и игнитроны. В простейших установках применяют механические коммутаторы — двухэлектродные разрядники, срабатывающие при сближении электродов. Если требуется точно синхронизировать разряд с работой остального, например измерительного, оборудования или обеспечить одновременную работу отдельных разрядников, используют управляемые разрядники — тригатроны или игнитроны.

Накопитель заряжается от источника высокого постоянного напряжения, включающего в себя повышающий трансформатор, выпрямитель, защитные резисторы и устройства для регулирования зарядного напряжения и его измерения. Необходимым элементом установки является заземляющее устройство, разряжающее конденсаторы через резистор с малым сопротивлением и закорачивающее выводы конденсаторов после окончания работы. Зарядное устройство и накопитель энергии размещаются, как правило, в металлическом заземленном корпусе, дверцы которого снабжаются блокировкой.

Разрядный контур соединяется с заземленным корпусом установки в одной точке — обычно в месте присоединения индуктора.

Ответственным элементом установки является индуктор или концентратор. Он рассчитывается и изготавливается для каждого типа заготовки или технологической операции и заменяется при переходе на обработку другой детали. Индуктор при разрядах подвергается воздействию таких же электродинамических сил, что заготовка. Кроме того, его изоляция испытывает электрические нагрузки. Поэтому обеспечение термической, механической и электрической стойкости индуктора является сложной технической задачей. Накопленный опыт разработки индукторов и конденсаторов отражен в [60.49].

В табл. 60.57 приводятся основные параметры некоторых установок для магнитно-импульсной обработки.

ЭЛЕКТРОННО-ИОННАЯ (АЭРОЗОЛЬНАЯ) ТЕХНОЛОГИЯ

Под электронно-ионной (аэрозольной) технологией понимается воздействие электрических полей на заряженные частицы материалов, взвешенные в газообразной или жидкой среде, в целях придания им упорядоченного движения, необходимого для осуществления определенных технологических процессов. Такими процессами являются электрогазоочистка, нанесение порошковых покрытий в электрическом поле, электросепарация, электропечать и т.д.

Во всех случаях частицам жидкости или твердого вещества сообщается некоторый заряд. Электрическое поле, воздействуя на заряженные частицы материалов, организует их движение в определенном направлении. Так, в газоочистке частицы осаждаются на электродах и таким образом удаляются из газа; при электроокраске или нанесении порошковых покрытий частицы равномерно покрывают изделие; при электросепарации частицы, различающиеся физическими свойствами, собираются в различных приемных устройствах.

Характерными особенностями данного вида технологии являются:

1) универсальность метода: частицы любых материалов, как проводящих, так и изоляционных, могут быть заряжены и в заряженном состоянии могут быть подвергнуты воздействию электрического поля;

2) использование материалов в диспергированном, т.е. мелко раздробленном состоянии, в связи с чем имеется возможность прецизионного управления и организации непрерывного процесса;

3) использование разнообразных форм силового воздействия электрического поля на материалы.

В процессах электронно-ионной (аэрозольной) технологии основную роль играют три стадии:

1) зарядка частиц материала;

2) организация необходимых форм движения материалов в электрическом поле;

3) формирование готового продукта, которое часто происходит на электродах или в приэлектродной области.

Особую роль в электронно-ионной технологии играет коронный разряд, позволяющий объединить стадии зарядки и управления движением частиц. Обычно используется коронный разряд при отрицательной полярности напряжения, поскольку в этом случае обеспечиваются наибольшие значения про-

Таблица 60.57. **Технические данные установок для магнитно-импульсной обработкой металлов**

Тип установки	Запасаемая энергия, кДж	Номинальное напряжение, кВ	Собственная частота разрядного контура, кГц	Производительность, операции/ч	Тип конденсатора	Тип коммутатора	Количество коммутаторов	Масса, кг	Размеры в плане с учетом обслуживания, м
МИУ-3,5	3,5	5	—	250	ИМУ-5-140	Тригатрон	1	320	2,0×1,5
МИУ-0506/1	5	6	30	600	ИК-6-150	Игнитрон ИРТ-1	2	300	1,2×1,0
МИУ-6	6	6	20	360	МИОМ-4	Механический	1	800	1,2×1,0
ИУ-20/ПН	10	10	20	80	КИМ-17	Тригатрон	1	1600	3,0×3,0
МИУА-10/5	10	5,2	24	600	ИК-6-150	Игнитрон	1	1600	3,5×3,5
МИУ-20/1	20	20	50	360	КИМ-6м	Тригатрон	1	2400	3,0×3,0
МИУ-20/5	20	20	50	360	КИМ-17	»	1	1500	2,0×3,0
ИУ-20/4ПР	20	20	60	360	КИМ-17	»	1	1550	2,0×3,0
МИУА-20/5	20	5,2	—	420	ИК-6-150	Игнитрон ИРТ-2	1	2310	3,5×3,5
МИУ-30	30	20	50	200	КИМ-17	Тригатрон	1	2000	4,0×3,0
МИУА-40/10	40	9,5	—	360	ИК-6-150	Игнитрон ИРТ-2	2	4200	5,0×5,0
МИУА-80/10	80	9,5	—	240	ИК-6-150	То же	4	6215	7,3×5,0
МИУ-100	100	20	30	60	КИМ-17	Тригатрон	10	5500	10×2,3

Примечание. Установка типа ИУ-20/4ПР предназначена для сварки труб, а ИУ-20/ПН — для обработки металлов с предварительным нагревом.

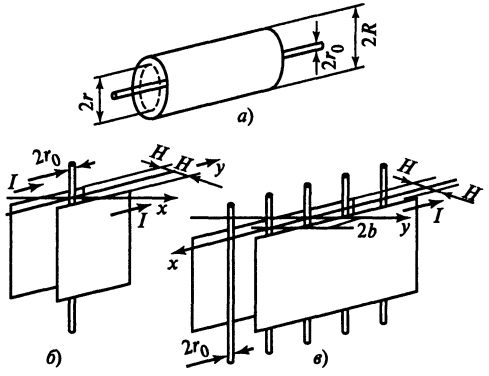


Рис. 60.101. Системы электродов:
а — коаксиальные цилиндры; *б* — провод между плоскостями; *в* — ряд проводов между плоскостями

бивного напряжения. Чаще всего применяются системы электродов, показанные на рис. 60.101.

Распределение напряженности поля в промежутке между коаксиальными цилиндрами

$$E_r = \sqrt{\frac{I}{2\pi\varepsilon_0 k}\left[1-\left(\frac{r_0}{r}\right)^2\right]+\left(E_0\frac{r_0}{r}\right)^2},$$

где k — подвижность ионов [для отрицательных ионов воздуха в среднем можно принять $k = 2$ см^2/(В · с)]; I — ток коронного разряда на единицу длины провода: E_0 — начальная напряженность.

В условиях развитой короны при $r >> r_0$ формула для напряженности упрощается:

$$E_r = \sqrt{I/2\pi\varepsilon_0 k}.$$

Распределение напряженности поля коронного разряда для систем с цилиндрическими проводами рассчитывается по методу Дейча—Попкова [60.50, 60.51].

Для системы провод между плоскостями (см. рис. 60.101)

$$E_y = \frac{D}{\sin\dfrac{\pi y}{2H}}\sqrt{2\sin^2\frac{\pi y}{4H}+\frac{B}{H^2}};$$

для системы ряд проводов между плоскостями

$$E_y = D\ \operatorname{ctg}\frac{\pi y}{2b}\sqrt{\operatorname{lnch}\frac{\pi y}{2b}+\frac{B}{b^2}},$$

где $D = \sqrt{2J_r r_0/(k\varepsilon_0)}$; $J_r = I/2\pi r_0$ — средняя плотность тока на поверхности коронирующего провода; $B = \pi^2\varepsilon_0 k E_0^2 r_0/(8J_r)$. Ток коронного разряда определяется из уравнения вольт-амперной характеристики для соответствующей системы электродов [60.51].

Зарядка частиц осуществляется:

1) путем осаждения на поверхность частицы ионов из объема газа, окружающего частицу;

2) путем электростатической индукции, которая происходит в результате разделения зарядов при контакте частицы с электродом, находящимся под напряжением;

3) путем механической, химической и тепловой электризации.

Зарядка частиц путем осаждения ионов на их поверхность наиболее часто используется в аппаратах электронно-ионной технологии. Это объясняется относительной простотой осуществления этого метода и большим зарядом, приобретаемым частицами. Частицу достаточно поместить во внешнюю область коронного разряда, т.е. в ту область разрядного промежутка, где имеется объемный униполярный заряд. Осаждение ионов на поверхность частицы происходит под действием внешнего электрического поля, поля поляризации частицы и сил зеркального отображения, а для частиц размером 1,0 мкм и менее — в результате диффузии ионов и поверхности частицы. Препятствует движению частиц к поверхности сила отталкивания между ионами, находящимися на частице, и ионами, приближающимися к ее поверхности. Очевидно, зарядка частицы прекращается в тот момент, когда отталкивающая сила становится равной сумме всех притягивающих. При этом достигается максимальный, или, как его называют, предельный заряд.

Для частиц размером 2 мкм и более влиянием процессов диффузии можно пренебречь, и предельный заряд определять по формуле Потенье:

$$q_m = 4\pi\varepsilon_0 k_\varepsilon a^2 E,$$

где a — радиус частицы; ε_0 — электрическая постоянная; $k_\varepsilon = 1 + 2(\varepsilon_r - 1)/(\varepsilon_r + 2)$; ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость.

Для проводящей частицы $\varepsilon_r \to \infty$ и

$$q_m = 12\pi\varepsilon_0 a^2 E.$$

Динамика процесса зарядки описывается соотношением

$$q_t = q_m t/[t + 4\varepsilon_0/(en_0 k)],$$

где e — заряд электрона; n_0 — концентрация ионов во внешней области коронного разряда.

При характерной концентрации ионов 10^8 см$^{-3}$ за 0,01 с частица приобретает 45 % предельного заряда, за 0,1 с — 90 %. Для частиц размерами 0,5 мкм и менее зарядка определяется процессом диффузии и описывается уравнением

$$en_0 kt = \varepsilon_0\left[\mathrm{Ei}\left(\frac{k}{D}\frac{q_t}{4\pi\varepsilon_0 a}\right) - 0{,}5772 - \ln\left(\frac{k}{D}\frac{q_t}{4\pi\varepsilon_0 a}\right)\right],$$

где $\mathrm{Ei}(x)$ — интегральная показательная функция; D — коэффициент диффузии.

В промежуточной области (размеры частиц 0,2—2 мкм) с достаточной для практики точностью заряд частиц можно вычислить как сумму зарядов, рассчитанных по формуле Потенье и по диффузионному заряду.

Заряды сферических частиц, находящихся на электроде в электрическом поле, рассчитываются по формуле

$$q = \frac{2\pi^3}{3} E a^2.$$

К этому предельному значению стремятся заряды частиц, оторвавшихся под действием электрических сил от поверхности электрода. Реальные значения заряда обычно существенно ниже предельного из-за влияния контактного сопротивления и стекания заряда при отрыве частицы.

Варианты конструкции устройств для зарядки частиц путем их контакта с электродом представлены на рис. 60.102. Частицы могут заряжаться, скатываясь из бункера по наклонной плоскости (рис. 60.102, *а*) или соприкасаясь с металлической сеткой (рис. 102, *б*). Особое значение данный способ зарядки имеет для жидких материалов, например при электроокраске. Это обусловлено тем, что жидкость нужно не только зарядить, но и распылить. В отношении порошковых материалов следует отметить, что для проводящих частиц метод электростатической индукции позволяет получить большие значения заряда на единицу массы порошка, чем в поле коронного разряда, а для диэлектрических — наоборот.

Механическая, химическая или тепловая электризация происходит при взаимном трении или разрыве контакта разнородных материалов, в результате некоторых химических реакций, при нагревании и охлаждении. В электронно-ионной технологии эти виды зарядки играют в основном роль

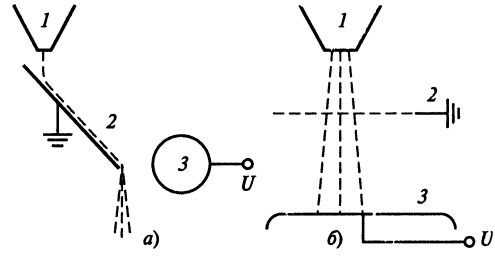


Рис. 60.102. Устройства для контактной зарядки:
а — частицы скатываются по наклонной плоскости из бункера (*1* — бункер; *2* — наклонная плоскость; *3* — цилиндрический электрод); *б* — частицы соприкасаются с металлической сеткой (*1* — бункер; *2* — металлическая сетка; *3* — плоский электрод)

сопутствующих явлений, с которыми, однако, нельзя не считаться. В электросепарации различия в электризации при трении и нагревании используются для разделения материалов по физическим свойствам.

Движение частиц, находящихся в воздушной среде и в электрическом поле, происходит под действием следующих сил:

1) тяжести:

$$\boldsymbol{F}_g = m\boldsymbol{g};$$

2) силы, обусловленной действием электрического поля,

$$\boldsymbol{F}_q = \boldsymbol{E}q;$$

3) силы, обусловленной неравномерным распределением напряженности электрического поля. Для сферической частицы

$$\boldsymbol{F}_E = 2\pi\varepsilon_0 a^3 \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \operatorname{grad} E^2;$$

4) силы сопротивления среды движению частицы. При обычных атмосферных условиях она оказывает существенное влияние на движение частиц и определяет их установившуюся скорость.

Расчет силы сопротивления среды составляет одну из основных задач при анализе поведения частиц в аппаратах электронно-ионной технологии. В общем случае она может быть рассчитана по формуле

$$F_c = c_x \frac{\gamma_{ср}|\upsilon - \upsilon_{ср}|^2}{2} S,$$

где S — площадь миделева сечения, для сферической частицы $S = \pi a^2$; $\gamma_{ср}$ — плотность среды; c_x — коэффициент трения; υ — скорость движения частицы; $\upsilon_{ср}$ — скорость движения среды.

Коэффициент трения c_x является функцией числа Рейнольдса $\mathrm{Re} = |\upsilon - \upsilon_{ср}| a\gamma_{ср}/\mu$ (μ — вязкость среды) и определяется зависимостью, представленной на рис. 60.103. Можно пользоваться аппроксимацией в виде

$$c_x = \frac{24}{\mathrm{Re}}(1 + 0{,}167\mathrm{Re}^{2/3}).$$

В инженерных расчетах целесообразно использовать линейную аппроксимацию силы сопротивления

$$F_c = 6\pi\mu a k_c(\upsilon - \upsilon^*),$$

где k_c и υ^* — параметры линейной аппроксимации в соответствующем диапазоне значений числа Re.

Частица, находящаяся в электрическом поле, под влиянием момента, обусловленного взаимодействием поля с поляризационными зарядами, стремится развернуться длинной осью вдоль направления действия поля. Электрические силы не являются единственным фактором, способствующим приобретению частицей определенной ориентации. Движущиеся частицы под действием гидродинамического момента стремятся повернуться таким образом, чтобы испытываемое ими сопротивление движению было наибольшим. Такое положение соответствует ориентации удлиненных частиц длинной осью перпендикулярно направлению движения. В зависимости от соотношения моментов частица может располагаться различным образом относительно направления действующих сил и направления движения. В частности, возможны случаи, когда частица в электрическом поле располагается длинной осью перпендикулярно направлению вектора напряженности электрического поля

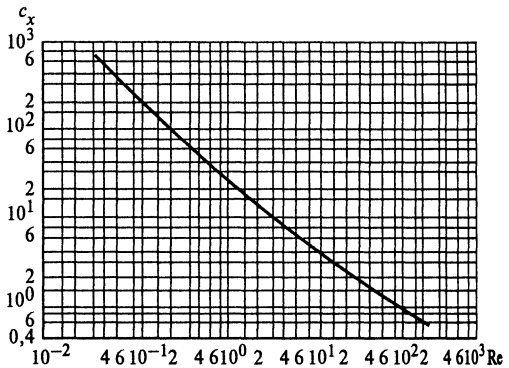


Рис. 60.103. Зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса для сферических частиц

Основными силами, определяющими движение частиц в электротехнологических установках, являются электрическая сила и сила сопротивления среды. Для частиц радиусом 10 мкм и более существенное значение приобретает ускорение свободного падения, поскольку скорость седиментации (движения частиц под действием ускорения свободного падения) становится соизмеримой с электрической составляющей.

Рассмотрим наиболее простой случай — движение заряженной сферической частицы в однородном электрическом поле.

Скорость установившегося движения в стоксовском приближении ($\mathrm{Re} < 0{,}5$) определяется из условия равенства электрической силы и силы сопротивления среды (с учетом поправки Кенингема ν).

$$Eq = 6\pi\mu a\nu/(1 + A_к l_м/a),$$

или

$$\vartheta = EqB_к,$$

где

$$B_к = (1 + A_к l_м/a)/(6\pi\mu a).$$

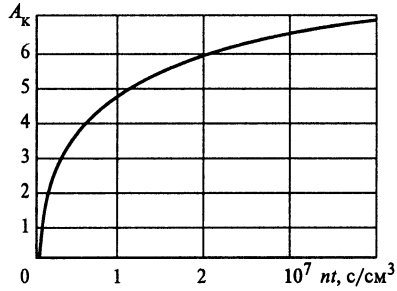


Рис. 60.104. Зависимость параметра $A_к$ от времени заряда и концентрации ионов

Механическая подвижность частицы, определяемая как скорость движения под действием единичной силы, в стоксовском приближении равна:

$$B_к = 1/(6\pi\mu a),$$

В данном случае $B_к$ обозначает, что механическая подвижность записана с учетом поправки Кенингема.

Принимая во внимание, что частица приобретает заряд в поле униполярного коронного разряда, можно записать (с учетом диффузионной и ударной зарядки)

$$q = 4\pi\varepsilon_0 a\frac{D}{K}A_к + 4\pi\varepsilon_0 k a^2 E,$$

где $A_к$ определяется по кривой рис. 60.104.

Следовательно,

$$\vartheta = \frac{2\varepsilon_0}{\mu}\left(\frac{\varepsilon_r Ea}{\varepsilon_r + 2} + \frac{AD}{3K}\right)\left(1 + A_к\frac{l_m}{a}\right)E = B_q E.$$

Электрическая подвижность частицы B_q по аналогии с подвижностью ионов K означает скорость движения частицы, имеющей заряд q в электрическом поле единичной напряженности.

Для частиц размером $a > 1$ мкм в последней формуле вторыми слагаемыми в скобках можно пренебречь. Таким образом, для крупных частиц скорость движения пропорциональна размеру частиц и квадрату напряженности поля. Для очень маленьких частиц ($a < 0{,}1$ мкм) основную роль играет диффузионная зарядка (преобладает второе слагаемое в первой скобке). Благодаря влиянию поправки Кенингема получаем, что скорость движения частиц возрастает с уменьшением размера. При таком характере изменения скорости должен быть минимум, который и наблюдается в действительности при a = = 0,1—0,3 мкм (рис. 60.105). При расчете скорости движения частиц радиусом 10 мкм и более следует учитывать отклонение сопротивления среды от стоксовского. Соответственно темпы роста скорости с увеличением размера частиц уменьшаются.

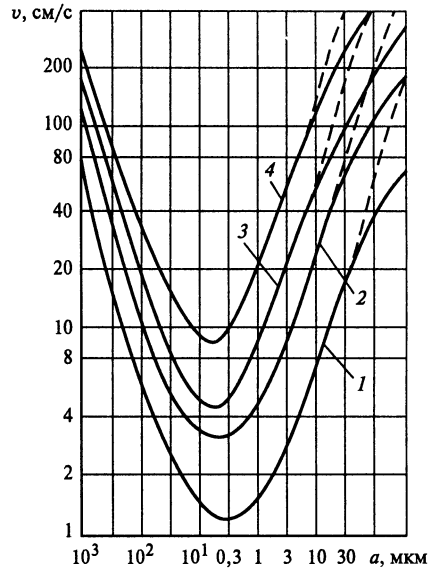


Рис. 60.105. Зависимости скорости движения сферических частиц в электрическом поле от радиуса:
1 — E = 0,1 МВ/м; *2* — E = 0,2 МВ/м; *3* — E = = 0,3 МВ/м; *4* — E = 0,5 МВ/м; штриховые линии — сопротивления по Стоксу

Движение заряженной частицы из состояния покоя в электрическом поле рассчитывается в соответствии с уравнением

$$m\frac{d\upsilon}{dt} = Eq - k_c 6\pi\mu a(\upsilon - \upsilon^*).$$

Здесь использована линейная аппроксимация силы сопротивления среды.

Решение уравнения

$$\upsilon = \upsilon_{уст}\left[1 - \exp\left(-\frac{k_c t}{\tau}\right)\right],$$

где $\upsilon_{уст} = EqB/k_c + \upsilon^*$; $\tau = Bm = 2\gamma a^2/(9\mu)$; γ — плотность частицы.

Постоянная времени определяет характерное время изменения скорости частицы. Например, этому значению пропорционален путь, проходимый частицей до полной остановки, когда она, обладая начальной скоростью υ_0, попадает в воздушную среду,

$$l_и = \int_0^\infty \upsilon_0 \exp(-t/\tau)\,dt = \upsilon_0\tau.$$

Этот параметр носит название длины инерционного пробега.

Наличие большого числа частиц, принимающих участие в технологическом процессе, может изменить закономерности поведения одиночных частиц. При этом играют роль следующие факторы:

1) изменение закона движения частиц вследствие того, что возмущение среды, вносимое частицей, передается соседней при уменьшении расстояния между ними. Имея в виду, что эти возмущения распространяются на расстояние, примерно равное (20—50) a, и что в технологических установках относительная объемная концентрация частиц не превышает 0,1—0,01 %, можно сделать вывод, что указанным влиянием можно пренебречь;

2) изменение закона зарядки частиц. При движении в поле коронного разряда аэрозоля с достаточно высокой концентрацией частиц электрическое поле в промежутке перераспределяется и плотность объемного заряда ионов снижается. Первое влияет на предельный заряд частиц, размер которых превышает 1 мкм, а второе — на скорость зарядки и при ограниченном времени пребывания частиц в зарядном устройстве на приобретенный ими заряд.

Влияние концентрации частиц проявляется различным образом в зависимости от направления движения аэрозоля по отношению к направлению электрического поля. При движении частиц в основном вдоль силовых линий поля распределение напряженности и суммарной плотности объемного заряда (частиц и ионов) не меняется. Ток коронного разряда изменяется в соответствии с соотношением

$$I_к = I'_к - \left(\frac{k}{B}\right) N_t,$$

где $I'_к$ — ток коронного разряда при отсутствии частиц; N_t — число частиц, поступающих в разрядный промежуток в единицу времени; B и k — соответственно подвижности частиц и ионов.

При движении аэрозоля перпендикулярно направлению электрического поля влияние концентраций определяется безразмерным параметром

$$D_к = k_\varepsilon \xi S H,$$

где $\xi = q/q_m$ — степень недозарядки частиц по отношению к предельному заряду; S — суммарная площадь поверхности частиц в единице объема газа; H — межэлектродное расстояние.

С увеличением параметра $D_к$ концентрация ионов и ток коронного разряда уменьшаются. Условия, при которых ток коронного разряда снижается до нуля соответствуют «запиранию» коронного разряда ($D_к = D_{к.з}$). Влияние концентрации частиц на характеристики коронного разряда в системе электродов ряд проводов между плоскостями иллюстрируют рис. 60.106, 60.107.

Из анализа влияния заряженной дисперсной фазы на поле и ток коронного разряда следует, что, если принять снижение тока на 30 % и изменение напряженности поля на 10 % допустимыми, влия-

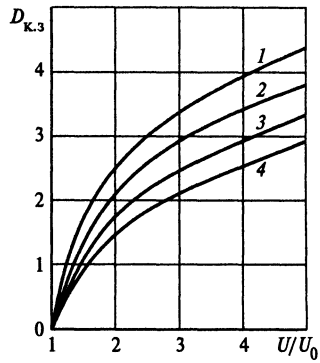


Рис. 60.106. Зависимость параметра $D_{к.з}$ от приложенного напряжения U (U_0 — начальное напряжение):

1 — $\pi H/2b = 1{,}5$; $\pi r_0/2b = 10^{-3}$; *2* — $\pi H/2b = 4$; $\pi r_0/2b = 10^{-3}$; *3* — $\pi H/2b = 10$; $\pi r_0/2b = 10^{-3}$; *4* — $\pi H/2b = 10$; $\pi r_0/2b = 10^{-1}$

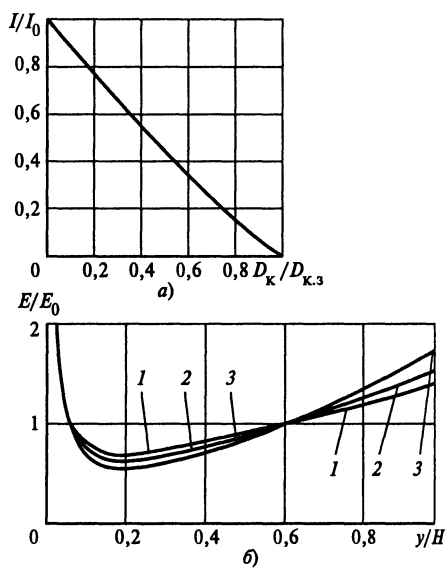


Рис. 60.107. Влияние концентрации частиц на характеристики коронного разряда:

а — степень уменьшения тока I (I_0 — ток при отсутствии частиц); *б* — распределение напряженности при $\pi H/2b = 4$, $\pi r_0/2b = 0{,}02$, $U/U_0 = 3$ (*1* — $D_к = 0$; *2* — $D_к = 0{,}4$; *3* — $D_к = 1{,}2$)

нием концентрации в условиях развитой короны можно пренебречь при $D_к < 0{,}8$;

3) влияние процесса электростатического рассеяния, обусловленного кулоновскими силами отталкивания и играющего существенную роль даже

при отсутствии внешнего поля при высокой концентрации униполярно заряженных частиц.

ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЫ

Одним из наиболее совершенных способов очистки промышленных газов от пыли и жидких частиц является очистка в электрофильтрах. Электрофильтры оказывают малое гидравлическое сопротивление потоку газа, обеспечивают высокую степень очистки, пригодны для использования в самых различных условиях, в том числе при высокой температуре и для химически активных газов. Они применяются в цементной, химической, металлургической промышленности и на тепловых электростанциях. Электрофильтры бывают трубчатые и пластинчатые.

Трубчатые электрофильтры (рис. 60.108, *а*) — аппараты с вертикальным потоком газа. Подлежащие очистке газы проходят внутри трубчатых осадительных электродов, по оси которых располагаются коронирующие провода. В поле коронного разряда частицы заряжаются, под действием электрического поля движутся к осадительным электродам и осаждаются на них. Слой пыли удаляется периодическим встряхиванием электродов.

Пластинчатые электрофильтры (рис. 60.108, *б*), — аппараты, имеющие осадительные электроды в виде пластин, расположенных на некотором расстоянии друг от друга. Между пластинами размещены коронирующие электроды, укрепленные на рамах. В одном корпусе электрофильтра может быть расположено несколько независимых последовательно расположенных систем электродов или, как говорят, электрических полей. Разделение полей с независимым электрическим питанием и встряхиванием позволяет обеспечить максимальное напряжение на каждой системе электродов в зависимости от местных условий.

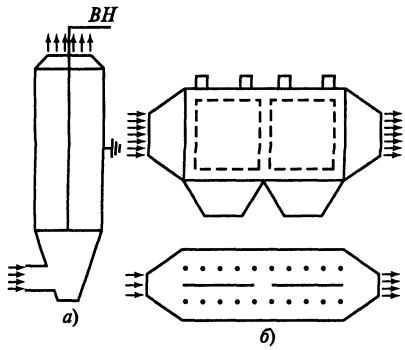


Рис. 60.108. Виды электрофильтров:
а — трубчатый; *б* — пластинчатый

Электрическое поле в пластинчатых электрофильтрах несколько слабее, чем в трубчатых, но их проще изготовить и в них легче обеспечить встряхивание электродов.

Основной характеристикой работы электрофильтров является степень очистки газов. Она определяется содержанием пыли в газе до поступления в электрофильтр z_1 и после выхода из него z_2:

$$\eta = (z_1 - z_2)/z_1 = 1 - z_2/z_1.$$

Связь степени очистки газов в электрофильтре с его конструктивными параметрами выражается формулой

$$\eta = 1 - \exp(-\chi v_{oc} S/w),$$

где v_{oc} — скорость движения частиц к осадительному электроду; S — площадь осадительных электродов; w — объемный расход газа; χ — поправочный коэффициент.

Из формулы следует, что степень очистки газов растет с увеличением скорости дрейфа частиц по направлению к осадительному электроду и с увеличением длины электродов, но уменьшается с ростом межэлектродного расстояния и скорости газа. Современные электрофильтры обеспечивают степень очистки газов, равную 97—99 %.

Скорость движения частиц к осадительному электроду пропорциональна размеру частиц и квадрату напряженности поля. Следовательно, в первую очередь в электрофильтре осаждаются крупные частицы. Квадратичный характер зависимости скорости дрейфа от напряженности свидетельствует о целесообразности работать при максимально возможном напряжении.

Скорость осаждения частиц в пластинчатых электрофильтрах рассчитывается по формуле

$$v_{oc} = B_к q_{ср} E_{oc},$$

где $B_к$ — подвижность частиц с учетом поправки Кенингема; $q_{ср}$ — заряд частиц, рассчитанный по средней напряженности поля $E_{ср} = U/H$; E_{oc} — напряженность поля у осадительного электрода.

Поправочный коэффициент $\chi = 1{,}1$—$1{,}3$ учитывает неравномерный характер распределения концентрации частиц в промежутке электрофильтра и дополнительную их зарядку в области сильного поля вблизи коронирующих электродов.

Осаждение частиц на электроды из области газа, непосредственно примыкающей к электродам, происходит под действием электрического поля. Убыль частиц в этой области восполняется в результате перемещения частиц из остального межэлектродного пространства под действием поля и за счет увлечения частиц турбулентными пульсациями газа. Благодаря сравнительно большой скорости газа в электрофильтре (1,2—1,5 м/с) и значительным размерам межэлектродного промежутка

течение газа в электрофильтрах всегда турбулентное ($Re > 2 \cdot 10^3$). Увлечение частиц турбулентными пульсациями газа аналогично молекулярной диффузии и способствует выравниванию распределения концентрации частиц по сечению (турбулентная диффузия).

Окончательное распределение концентрации зависит от относительного влияния этих факторов, определяемого параметром

$$\mu_0 = BqE_{ср}H/D_0,$$

где D_0 — коэффициент турбулентной диффузии в средней части промежутка.

Параметр μ_0 представляет собой отношение скорости направленного движения частиц под действием поля к средней скорости переноса частиц под действием турбулентной диффузии.

При $\mu_0 > 100$ влиянием турбулентной диффузии можно пренебречь, при $\mu_0 < 1$ устанавливается практически равномерное распределение концентрации. В электрофильтрах значение параметра μ_0 таково, что коэффициент D_0 составляет 1,1—1,3.

На основании численных расчетов процесса осаждения частиц в пластинчатых электрофильтрах с учетом перечисленных выше факторов для коэффициента χ получена следующая аппроксимационная формула:

$$\chi = \alpha + \beta v_{oc} L/(UH),$$

где

$$\alpha = \frac{E_{oc}H}{U}(0{,}745 - 0{,}121 \cdot 10^{-3} kU_0/D_0);$$

$$\beta = 0{,}14 + 0{,}86 \cdot 10^{-3} kU_0/(D_0\mu_0^{0{,}86}),$$

здесь U — приложенное напряжение; U_0 — начальное напряжение коронного разряда.

На степень очистки газов в электрофильтрах существенное влияние может оказать проскок частиц через неактивные зоны. Неактивные зоны представляют собой части объема электрофильтра между коронирующей системой и верхней стенкой, а также между коронирующей системой и бункерами для уловленной пыли, в которых влияние электрического поля ослаблено. Для получения высокой очистки газов размеры неактивных зон при конструировании электрофильтров должны быть сведены до минимума.

Существенное влияние на работу электрофильтров оказывает унос осажденной пыли с электродов. Возвращение в поток даже малой доли осажденной пыли может привести к заметному ухудшению очистки газов и несоответствию расчетам по теоретической формуле.

Повторный унос частиц с электродов определяется следующими процессами:

1) процессом перезарядки и отталкивания от электрода частиц с малым удельным сопротивлением;

2) выбиванием частиц из слоя при осаждении новых частиц;

3) непосредственным отрывом частиц от слоя под действием потока воздуха. Если распределение потока воздуха в электрофильтре неблагоприятное, т.е. у осадительных электродов не созданы зоны с пониженной скоростью потока, то эта составляющая вторичного уноса может быть большой;

4) уносом пыли при встряхивании электродов.

Для обеспечения минимального повторного уноса необходимы:

1) оптимальная скорость газа с небольшой турбулентностью и равномерным распределением потока;

2) рациональная частота встряхивания и ускорение при встряхивании, обеспечивающие сбрасывание пыли с крупных агрегатов;

3) специальная конструкция электродов.

Коронирующие электроды можно разделить на две группы. К первой группе относятся электроды, которые не имеют фиксированных коронирующих точек. При отрицательной короне коронирующие точки располагаются вдоль электрода на разных расстояниях друг от друга в зависимости от состояния поверхности электрода. Типичные представители электродов этой группы: круглый — диаметром 2—4 мм, квадратный — со стороной 3—4 мм и штыкового сечения, вписывающийся в квадрат со стороной 4—5 мм (рис. 60.109, *а*). Ко второй группе относятся электроды с фиксированными точками разряда по их длине. Типичными представителями этих электродов являются колючая проволока, пилообразные и игольчатые электроды (рис. 60.109, *б*). Электроды второй группы при равных напряжениях и межэлектродных расстояниях обеспечивают значительно больший ток короны, чем электроды первой группы. Легче обеспечивается необходимая механическая прочность.

Исследования показали, что обобщенной характеристикой качества коронирующего электрода является максимальная мощность, потребляемая коронным разрядом. Игольчатые электроды при соответствующем выборе шага между иглами ($l = 40$—80 мм) обеспечивают наибольшую мощность, потребляемую коронным разрядом.

Осадительные электроды электрофильтров также имеют разнообразную форму; они должны иметь гладкую поверхность без острых углов, необходимую для обеспечения высокой напряженности поля, и полости, позволяющие стряхивать пыль с минимальным вторичным уносом.

В последние годы стремятся использовать так называемые электроды желобчатой формы. Они изготавливаются прокаткой из рулонной стали, по-

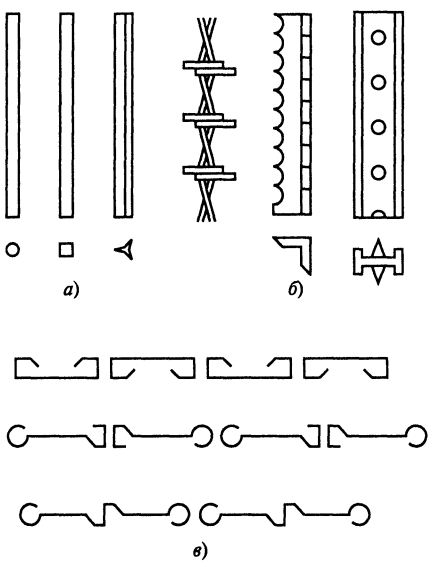


Рис. 60.109. Электроды электрофильтров:

а — гладкие коронирующие электроды; *б* — коронирующие электроды с фиксированными точками разряда; *в* — осадительные электроды

этому значительно проще в производстве и дешевле. Имеется ряд вариантов таких электродов (рис. 60.109, *в*). Все они имеют желоба для отвода стряхиваемой пыли в бункер. При работе с такими электродами удается снизить до минимума вторичный унос пыли и обеспечить работу электрофильтра с оптимальными электрическими показателями.

Для успешной работы электрофильтра важное значение имеет установка коронирующих проводов точно по оси между осадительными пластинами. Оптимальное расстояние между пластинами 250—300 мм. Шаг между коронирующими проводами 100—200 мм. Такие параметры имеют большинство электрофильтров.

Существенное влияние на эффективность работы электрофильтра оказывает удельное электрическое сопротивление пыли. Пыль с удельным сопротивлением до 10^2 Ом · м улавливается плохо, так как при осаждении частицы быстро перезаряжаются и отталкиваются от электрода. Пыль с удельным сопротивлением 10^2—10^8 Ом · м хорошо улавливается в электрофильтрах. Заряды частиц пыли равномерно стекают на осадительный электрод по мере подхода новых частиц из газового промежутка.

Частицы с удельным сопротивлением выше 10^8 Ом · м наиболее трудно улавливаются в электрофильтрах. На слое пыли накапливается заряд как за счет осаждения заряженных .частиц, так и за счет потока ионов основного коронного разряда. Стекание происходит очень медленно из-за большого удельного электрического сопротивления пыли. В результате нарастания напряжения на слое его электрическая прочность нарушается, в слое формируются каналы разряда, в которых непрерывно происходит ионизация. В промежутки электрофильтра внедряются положительные ионы, которые противоположны по знаку ионам основного коронного разряда.

Разрядные процессы в слое с высоким сопротивлением, которые носят название обратной короны, приводят к существенному снижению степени очистки газов в электрофильтрах за счет:

1) уменьшения заряда частиц из-за осаждения ионов противоположного знака;

2) уменьшения напряженности поля у осадительного электрода при наличии обратной короны, когда подъем напряженности к осадительному электроду, характерный для обычных электрофильтров без обратной короны, будет отсутствовать;

3) снижения пробивного напряжения вследствие изменения характера распределения поля.

Для получения высокой степени очистки скорость газа должна находиться в пределах 1,0—1,5 м/с. Преимущественно используются коронирующие ленточно-игольчатые и ленточно-зубчатые и С-образные профилированные осадительные электроды. Расстояние между осадительными электродами составляет 0,275 м. Число полей меняется от двух до четырех.

Электрофильтры унифицированной серии УГ (табл. 60.58) применяются для очистки дымовых газов после котлов тепловых электростанций, вращающихся печей и мельниц цементных заводов, мартеновских печей и т.д. Унифицированные электрофильтры УГТ предназначены для очистки газов от пыли при их температуре до 425 °С на предприятиях химической промышленности, цветной металлургии, нефтехимии и т.д. Электрофильтры УВ — однопольные аппараты с вертикальным ходом газа, применяются после котлов с производительностью до 220 т/ч, на цементных заводах с печами небольшой производительности, на алюминиевых заводах, на агломерационных фабриках. Мокрые электрофильтры применяются для тонкой очистки газов от пыли, туманов, смолистых и других веществ и снабжаются системой удаления пыли с электродов водой. Имеется ряд аппаратов различной конструкции в зависимости от конкретного назначения.

ЭЛЕКТРООКРАСКА

Окраска изделий является одним из технологических процессов, в которых применение электрического поля оказалось эффективным. В отличие от пневматического распыления, при котором потери краски составляют около 50 %, при электроокраске они не превышают 10 %. Благодаря взаимодействию заряженных частиц краски покрытие получается плотным и ровным.

Таблица 60.58. **Технические данные электрофильтров**

Параметр	УГ1	УГ2	УГ3	УГТ1	УГТ2	УВ	Мокрые
Площадь активного сечения, $м^2$	10—15	26—74	88—265	30—80	50—80	22—72	8—20
Длина поля, м	2,5	2,5	4,0	2,5	2,5	4—5,8	—
Высота поля, м	4,2	7,5	12,2	7,5	10	7,5	3,4—4,6
Площадь осаждения, $м^2$	420—633	950—6291	$(9,9—36,9)10^3$	—	—	$(1,17—3,9)10^3$	$22,5—1,03 \cdot 10^3$
Общая длина коронирующих электродов, 10^3 м	1,12—1,68	4,53—16,9	25,4—101	—	—	1,58—3,46	0,29—14,2
Предельная температура, °С	250	250	250	425	425	250	35

Процесс распыления в электрическом поле происходит следующим образом. Образующаяся на выходе из распылителя капля краски растет до тех пор, пока действующие на нее электрические силы не превысят силы поверхностного натяжения. Происходит нарушение устойчивости поверхности на кончике капли и как следствие выброс тонкой струйки. Далее эта тонкая струйка дробится на мелкие капли. Выброс тонкой струйки является условием мелкодисперсного распыления жидкости в электрическом поле.

На процесс распыления жидкости оказывают наибольшее влияние напряженность поля в непосредственной близости от распылителя, поверхностное натяжение, проводимость, вязкость жидкости, а также расход жидкости, т.е. скорость ее поступления в зону распыления.

При малой напряженности поля распыление не происходит, так как электрическая сила недостаточна, чтобы преодолеть силу поверхностного натяжения. От распылителя отрываются крупные капли под действием своего веса. Радиус кривизны кромки распылителя стремятся уменьшить, чтобы получить необходимую напряженность поля при возможно низком напряжении. В реальных установках рабочие напряжения достигают 80—100 кВ при межэлектродном расстоянии 200—300 мм, а напряженность поля на кромке распылителя составляет около 10 МВ/м и выше.

Если поверхностное натяжение велико, то возможно, что раньше, чем произойдет нарушение устойчивости поверхности капли, начнется коронный разряд, препятствующий дальнейшему увеличению напряженности поля у поверхности капли. Исследования показывают, что в электрическом поле плохо распыляются жидкости с коэффициентом поверхностного натяжения, превышающим $(4—5)10^5$ Н/см.

Проводимость краски оказывает решающее влияние на процесс накапливания заряда на капле жидкости. Жидкости с очень большим удельным сопротивлением (10^8 Ом · м и более) не распыляются в электрическом поле. Чем ниже сопротивление, тем быстрее накапливается заряд и больше сила, воздействующая на каплю. Однако при уменьшении сопротивления (10^2 Ом · м и ниже) распыление краски опять прекращается. Это связано с увеличением объемного заряда частиц краски, внедряемого в промежуток. Этот объемный заряд уменьшает напряженность поля на кромке распылителя. Оптимальное удельное сопротивление жидкостей, хорошо распыляющихся в электрическом поле, лежит в пределах $10^5—10^6$ Ом · м.

Очень вязкие жидкости также плохо распыляются в электрическом поле, поскольку вязкость жидкости ограничивает возможность выброса тонкой нити. С увеличением вязкости растет диаметр нити и соответственно размер капель, на которые она дробится. Вязкость краски должна быть не более 0,07 Па · с.

Для каждого типа распылителя имеется оптимальный расход краски, когда устанавливается баланс между количеством подтекающей жидкости и количеством жидкости, которая может распылиться при данной напряженности поля.

В промышленности применяются две различные системы электроокраски: электростатическая и окраска с механическим распылением.

Электростатическая окраска заключается в зарядке и распылении жидкости за счет электростатических сил, действующих на каплю, находящуюся на кромке распылителя. Заряженные частицы распыленной жидкости движутся в электрическом поле по направлению к изделию.

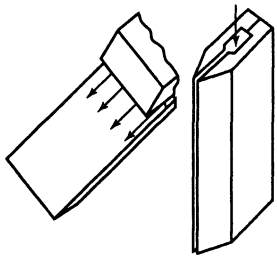


Рис. 60.110. Электростатический распылитель

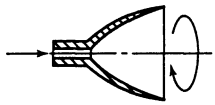


Рис. 60.111. Вращающийся распылитель

К электростатическим относятся лотковые, щелевые распылители (рис. 60.110). Распыление происходит на кромке наклонного лотка или на краю пластины, помещаемой на выходе из щели. Эти распылители применяются для нанесения покрытий на изделия плоской формы с большой площадью поверхности. Подача краски на единицу длины кромки невелика — около 1 г/(см · мин).

Вращающиеся электростатические распылители имеют в 1,5—2 раза больший расход краски благодаря тому, что равномерное распределение краски по длине кромки обеспечивается центробежными силами. Наиболее употребительным является чашечный распылитель (рис. 60.111). Подача краски осуществляется на внутреннюю поверхность чаши, которая вращается с частотой 1,5—3 тыс. об/мин. Применяются чаши, изготавливаемые из полимерного материала с добавкой графита, диаметром от 40 до 150 мм. Перемещая распылитель в любом направлении, можно получать равномерные покрытия изделий, имеющих достаточно сложную форму.

Механическое распыление в сочетании с последующей зарядкой и движением частиц в электрическом поле составляет второе направление в электроокраске. В данном случае электрические силы не участвуют в распылении жидкости.

Применяются следующие системы неэлектрического распыления краски: центробежная, пневматическая, безвоздушная.

Центробежное распыление происходит на кромке диска или чаши, вращающихся с очень большой частотой (20—40 тыс. об/мин). В результате действия центробежных сил на пленку краски она отрывается с большой скоростью от распылителя и при взаимодействии с окружающим воздухом разбивается на капли (рис. 60.112).

При безвоздушном распылении капли краски ускоряются относительно неподвижного воздуха за счет того, что она подается к распылителю под большим давлением (до 12 МПа).

Сравнивая методы электромеханического и электростатического распыления, необходимо отметить, что электростатические распылители обеспечивают более ровное и гладкое покрытие на деталях и наименьшие потери краски. Электромеханические распылители обеспечивают бóльшую производительность, лучше окрашивают полости и углубления в деталях, налагают значительно меньше ограничений на краски. Недостатками этих распылителей являются относительно небольшая степень зарядки частиц и как следствие — потери краски, составляющие 20—30 %.

Проблема разработки технологии получения порошковых слоев возникла в связи с широким внедрением полимерных материалов для получения технологических, защитных и декоративных покрытий. Полимерный порошок образует сплошное покрытие при соприкосновении с предварительно нагретой поверхностью изделия; если он наносится на холодное изделие, то покрытие превращается в сплошное при последующей термообработке.

В первом случае используется вибровихревое напыление, во втором случае напыление производится в электрическом поле и порошковый слой удерживается на поверхности изделия за счет электрических сил. Напыление в электрическом поле позволяет получить полимерные покрытия более высокого качества и в настоящее время является основным способом.

Применяются два варианта организации напыления порошковых покрытий в электрическом поле: а) в камерах с электрическим псевдокипящим слоем; б) с помощью распылителей.

Камеры с электрическим псевдокипящим слоем (рис. 60.113) применяются для нанесения покрытий на изделия различной конфигурации малого размера. Слой порошка переводится во взвешенное состояние потоком воздуха, поступающим через пористую перегородку. Электрическое поле создается между электродом, помещаемым в слой порошка, и заземленным изделием. Частицы порошка, приобретая заряд, движутся в электрическом поле по направлению к изделию, образуя покрытие. Кроме того, электрическое поле способствует увеличению высоты кипящего слоя, повышает его однородность. Существенное влияние на зарядку оказывают процессы трибоэлектризации при контактировании частиц друг с другом, со стенками камеры и электродом, находящимся под высоким потенциалом.

Получению равномерных по толщине покрытий способствует вращение изделий. Производительность процесса может быть повышена за счет

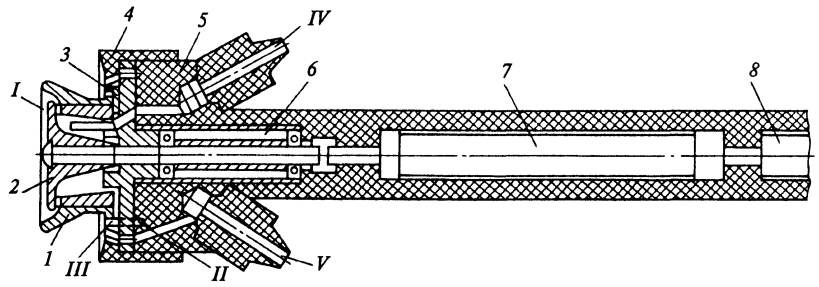


Рис. 60.112. Центробежно-вихревой электрораспылитель:

1 — чаша с турбиной; *2* — рассекатель; *3* — сопловой аппарат; *4* — накидная гайка; *5* — корпус, *6* — вал с подшипниками; *7* — ограничительное сопротивление; *8* — кабель; *I* — отверстия для выхода краски на кромку чаши; *II* — каналы для подачи воздуха на вращение чаши; *III* — лопатки турбины; *IV* — подача лакокрасочного материала; *V* — подача воздуха на формирование факела

выбора расположения электродов относительно изделия.

Качество получаемых покрытий зависит от дисперсного состава и физико-химических свойств полимерных порошков.

Все промышленные порошковые краски — полидисперсные системы. Они имеют, как правило, большой разброс по размеру частиц, лежащий в пределах 10—100 мкм для порошков, наносимых электростатическими распылителями, и 10—300 мкм для порошков, наносимых в кипящем слое.

Выделяют две группы порошков — термопластичные и термореактивные. Первые образуют покрытия без химических превращений из-за сплавления частиц при нагревании. При последующем нагревании после охлаждения они не теряют свою пластичность.

Порошки второй группы формируют покрытия в результате сплавления частиц и протекания в расплавленном материале химических реакций. Такие покрытия необратимы, неплавки и нерастворимы. По объему производства термореактивные порошки значительно превосходят пластичные, они составляют до 80 % общего выпуска полимерных порошков.

Ведущие производители порошков для нанесения электростатическим способом в России: АО НПФ «Пигмент», ООО «Эколоп» (г. Санкт-Петербург), ЯПО «Лакокраска» (г. Ярославль), «Завод порошковых красок» (Москва). Наибольшее применение среди термореактивных порошков имеют эпоксидные, эпоксидно-полиэфирные (гибридные) и полиэфирные порошки. В меньшей степени используются (по причине повышенной стоимости) полиуретановые и полиакрилатные материалы.

Время отверждения составляет от 40 до 3 мин при температуре 100—200 °С. Толщина покрытий обычно составляет от 30 до 150 мкм.

Эпоксидные порошки пользуются наибольшим спросом при промышленном применении. Они хорошо защищают изделие от коррозии в воде, почве и в атмосферных условиях, могут использоваться в качестве электрической изоляции. Однако при эксплуатации эпоксидных покрытий на открытом воздухе под воздействием ультрафиолетовых лучей наблюдается ухудшение их декоративных свойств. Этот недостаток отсутствует у эпоксидно-полиэфирных материалов.

Распылители применяются при нанесении полимерных покрытий на изделия размером 150 мм и более. В основном используются пневмоэлектрические распылители. Установка для напыления состоит из пистолета-распылителя; дозирующего устройства; источника высокого напряжения; системы рекуперации.

Дозирующее устройство предназначено для подачи в распылитель в необходимом количестве аэрозоля полимерного порошка. Забор порошка обычно производится из кипящего слоя воздушным эжектором. Источник высокого напряжения служит для питания зарядного устройства и электродной системы, создающей электрическое поле между распылителем и изделием. Система рекуперации обеспечивает сбор и возврат порошка, не попавшего на изделие, препятствует загрязнению окружающего пространства.

В зависимости от способа зарядки частиц распылители разделяются на распылители с внешней зарядкой; распылители с внутренней зарядкой; распылители с трибоэлектрической зарядкой.

Распылители с внешней зарядкой представляют собой обычное пневматическое распыливающее устройство с коронирующими электродами на выходе. Покидая распылитель, частицы приобретают заряд в поле коронного разряда. В качестве коронирующего электрода чаще всего используется игла.

В устройствах с внутренней зарядкой частицам сообщается заряд внутри пистолета. Размеры факе-

ла регулируют с помощью рассекателя, устанавливаемого на выходе из пистолета. Распылители с внешней и внутренней зарядкой обеспечивают примерно одинаковые удельные заряды частиц на уровне 10^{-3} Кл/кг.

На качество получаемых покрытий оказывает влияние обратная корона, возникающая с уже нанесенного полимерного порошкового слоя. При интенсивной обратной короне возникают многочисленные кратеры, ухудшающие внешний вид покрытия. Вместе с тем начальная стадия обратной короны способствует получению более однородных по толщине покрытий за счет уменьшения скорости осаждения частиц на участках с обратной короной. Условия возникновения обратной короны облегчены для распылителей с внешней зарядкой за счет подзарядки слоя потоком ионов. Поэтому предпочтительным является использование распылителей с внутренней зарядкой.

В трибоэлектрических распылителях частицы получают заряд при движении пылегазовой смеси по штангам, соединяющим распылитель с дозирующим устройством. Распылители могут работать без источника высокого напряжения, и в этом их преимущество. Наиболее просто решаются вопросы электро- и пожаробезопасности. Недостатком этих распылителей является сильная зависимость качества напыления от влажности порошка и воздуха и от химического состава полимера.

Вопросы обеспечения электро- и пожаробезопасности играют важную роль при организации процесса напыления. Задача сводится к снижению вероятности возникновения пробоя и уменьшению энергии, выделяющейся в канале разряда, до значений ниже минимальной энергии вспышки пылегазовой смеси. Первое направление реализуется путем применения источников с крутопадающей характеристикой, а второе — за счет снижения выходной емкости распылителя, например при уменьшении длины кабеля между источником питания и распылителем, а также установки ограничительного резистора непосредственно перед распылителем.

Важным преимуществом с этой точки зрения обладают распылители со встроенным источником питания, который совмещен с распыливающим устройством. На рис. 60.114 представлен распылитель с внутренней зарядкой и встроенным источником питания высокого напряжения.

Внутри корпуса *2* распылителя расположены трансформатор высокого напряжения *12* и блок выпрямления и умножения напряжения *11*. К трансформатору через разъем *13* подводится напряжение 36 В, 10—15 кГц. Высокое напряжение 30 кВ с выхода блока умножения поступает через ограничи-

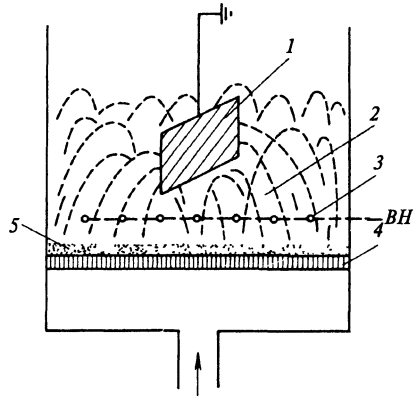


Рис. 60.113. Установка для напыления в электрическом кипящем слое:

1 — дсталь; *2* — кипящий слой; *3* — коронирующие провода; *4* — пористая перегородка; *5* — слой порошка

тельный резистор *10* на зарядное устройство. Зарядка частиц происходит в коронном разряде между иглой *9* и перфорированным электродом *6*. Пылегазовая смесь поступает через штуцер *7* и трубку *5* непосредственно в область сильного поля вблизи иглы. Для того чтобы исключить осаждение порошка на диэлектрический конус *4* и электрод *6* внутри зарядного устройства, производится подача чистого воздуха через штуцер *8*. Далее заряженная пылегазовая смесь через канал *3* поступает на выход распылителя. Необходимые размеры факела регулируются сменными рассекателями *1*.

Производительность распылителя составляет до 20 кг/ч порошка, расход воздуха — до 140 л/мин, чистого воздуха — 70 л/мин при давлении около 0,2 МПа.

Напыление полимерных покрытий в электрическом поле является перспективным и бурно развивающимся направлением Во многих случаях эта технология вытесняет лакокрасочные покрытия, так как не требует дорогих растворителей, меньше загрязняет окружающую среду, обеспечивает более высокое качество покрытий.

Для примера рассмотрим комплект распылительного порошкового оборудования (КРВП). В него входят: ручной электропневматический распылитель со встроенным источником высокого напряжения 40 В/80 кВ; преобразователь напряжения с 50 Гц до 20 кГц для питания источника высокого напряжения распылителя; пневмораспределитель сжатого воздуха для питания бункера-дозатора; бункер-дозатор порошка с эжектором.

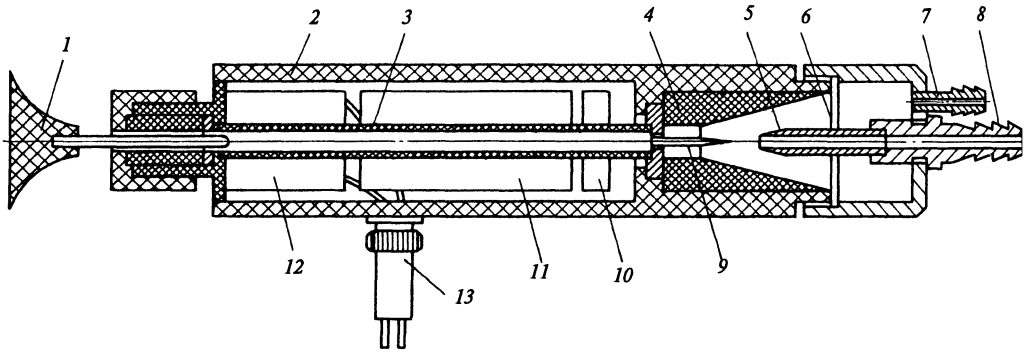


Рис. 60.114. Распылитель РПУ-1В

Технические данные распылительного оборудования:

Питание:	
напряжение, В	220
частота, Гц	50
мощность, Вт	15
Рабочий ток, мкА	5—60
Выходное напряжение, кВ	0—90
Полярность напряжения	Отрицательная
Ток короткого замыкания	Равен рабочему току
Исполнение	IP54
Масса КРВП, кг, не более	100
Габаритные размеры КРВП, мм, не более	680×658×1414
Масса порошка, г, не более	600

Оборудование КРВП обеспечивает: высокую производительность процесса окрашивания — до 3 $м^2$/мин; получение покрытий толщиной 40—300 мкм, в том числе многослойных, на изделиях с поверхностью любой степени сложности; универсальность по отношению к материалу напыления; любые порошковые полимеры, в том числе с «металлическим» эффектом, стеклоэмали и др.; полную электро- и искробезопасность распылительного оборудования, удобство и простоту обслуживания.

СЕПАРАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ

Сепарация материалов основана на том, что различие в физических свойствах приводит к различию в поведении отдельных компонентов смеси в электрическом поле. Известны следующие виды разделения материалов.

1. Разделение, основанное на различии в электрической проводимости. Работа сепараторов данного типа основана на различии в поведении проводящих и диэлектрических частиц на электроде, находящемся под высоким потенциалом. Проводящие частицы быстро приобретают заряд, аналогичный по знаку заряду электрода, отталкиваются от него и улетают. Частицы с высоким удельным сопротивлением приобретают заряд медленнее и соответственно удерживаются на электроде большее время. На рис. 60.115 представлена схема коронного барабанного сепаратора. В последнее время активно используется второй вид аппарата для разделения по проводимости — пластинчатый электрический сепаратор (рис. 60.116).

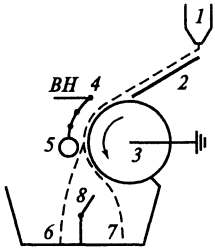


Рис. 60.115. Схема коронного барабанного сепаратора:

1 — питатель; *2* — наклонная плоскость; *3* — барабан; *4* — коронирующие электроды; *5* — диэлектрический цилиндр; *6*, *7* — приемники; *8* — разделительная перегородка

2. Разделение, основанное на различии в электризации трением. В результате трения двух различных материалов о третий заряды, получаемые этими материалами, различаются по значению, а часто и по знаку. Указанное свойство используется в конструкции трибоэлектрического сепаратора, представленного на рис. 60.117. Частицы электризуются при движении по наклонной плоскости и разделяются в электростатическом поле.

3. Разделение, основанное на использовании пироэлектрического эффекта. При нагревании смеси разнородных минералов некоторые из них заря-

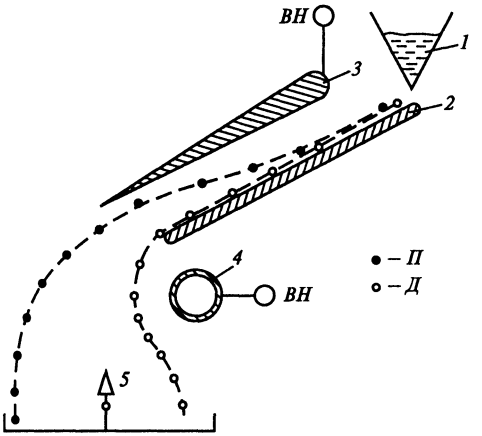


Рис. 60.116. Схема пластинчатого наклонного электростатического сепаратора:

1 — пылепитатель; *2* — зарядный электрод; *3* — верхний электрод—крыло; *4* — нижний отклоняющий электрод—цилиндр; *5* — отсекатель; *П* — частицы-проводники; *Д* — диэлектрические частицы

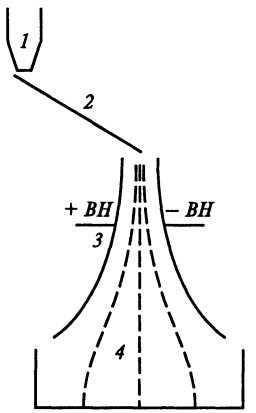


Рис. 60.117. Трибоэлектрический сепаратор:

1 — бункер; *2* — наклонная плоскость; *3* — электроды; *4* — перегородка

жаются положительно, другие — отрицательно. Пропуская термически обработанный порошок через электрическое поле, разделяют порошок по компонентам.

4. Разделение, основанное на различии в диэлектрической проницаемости. В этом случае используется сила, действующая на незаряженную диэлектрическую частицу в неоднородном электрическом поле. Если диэлектрическая проницаемость частицы больше, чем среды, то частица втягивается в область с наибольшей напряженностью, если наоборот — выталкивается. Подбирая соот-

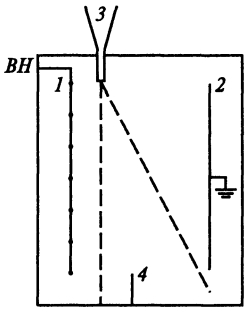


Рис. 60.118. Схема коронного камерного сепаратора:

1 — коронирующие электроды; *2* — осадительная плоскость; *3* — питатель; *4* — приемник

того, что компоненты смеси минералов будут двигаться в противоположных направлениях и выделяться в различных приемниках.

5. Разделение, основанное на различии массы частиц. На этом принципе работает коронный камерный сепаратор (рис. 60.118). Частицы разного размера падают в промежутке между коронирующим *1* и осадительным *2* электродами. На начальном участке движения они заряжаются и приобретают горизонтальную составляющую скорости. В результате движения в горизонтальном направлении под действием электрического поля и в вертикальном под действием ускорения свободного падения частицы достигают осадительного электрода, причем место осаждения частиц зависит от их массы, а при однородных частицах — от их размера. В верхней части осадительного электрода собираются самые мелкие частицы, а в нижней — самые крупные. Камерные электросепараторы используются для разделения порошков по размеру частиц.

Широкое промышленное применение получили в основном два метода: сепарация по проводимости и трибоэлектрическая сепарация.

Технические данные барабанных электросепараторов, применяемых в промышленности, представлены в табл. 60.59. Барабанные электросепараторы используются при обогащении железных руд, в цветной металлургии, для доводки редкоземельных и алмазных концентратов. Трибоэлектрическая сепарация применяется при обогащении калийных солей, фосфатных руд, полевых шпатов. Пластинчатые электростатические сепараторы нашли применение при обогащении титановых руд. Технологические данные пластинчатых электросепараторов представлены в табл. 60.60.

До последнего времени коронные барабанные электросепараторы считались лучшим видом аппарата, поскольку они обеспечивали высокую степень извлечения полезного продукта из руды (свы-

Таблица 60 59 **Технические данные барабанных электросепараторов**

Параметр	СЭП-2	СЭС-1000М	СЭС-2000	ЭКС-1250	ЭКС-3000	СЭП-1
Производитсльность на один питатель, т/ч	2	2	4	2	5	2
Число каскадов	3	Любое	Любое	2	1	3
Число барабанов	8	»	»	2	1	6
Диаметр барабана, мм	300	125,150	150	130	160	150
Ширина питателя, мм	1000	1000	2000	1250	3000	1000
Частота вращения барабана, об/мин	4—420	110—800	430, 460, 490	300, 400, 450	350, 465, 656	40—240
Рабочее напряжение, кВ	До 40	До 20	До 20	До 20	До 20	До 20
Максимальная крупность материала, мм	1,5	3	1,5	3	3	1,5
Мощность, кВт (без нагревательных элементов)	1,47	2,25	2,25	3,43	2,55	1,57
Масса, т	8,9	3,9—16,4	6,3—22	2,2	2,2	4,83

Таблица 60.60. **Технические данные пластинчатых электросепараторов**

Параметр	ЛЭСС	СПЭТ-600	СПЭТ-1200
Число каскадов	1	1	3—9
Число питателей	1	1—2	8
Производительность на один питатель, т/ч	0,03	0,35	1,5
Ширина питателя, мм	90	600	2×1200
Максимальная крупность материала, мм	0,5	0,5	0,5
Рабочее напряжение, кВ	До ±20	До ±20	До ±20
Мощность, кВт (без нагревательных элементов)	0,2	0,5	0,5

ком коронного барабанного сепаратора является наличие вращающихся частей и привода, работающего в сильно запыленной среде. Истирание барабана и износ щеток, с помощью которых снимаются частицы, прилипшие к барабану, вызывают необходимость в частом ремонте оборудования. Это усложняет эксплуатацию электросепараторов. Поэтому проявляется тенденция к преимущественному использованию конструкций сепараторов свободного падения и пластинчатых сепараторов.

ЭЛЕКТРОГРАФИЯ

Электрография — процесс отображения текстовой или графической информации с использованием электрических полей. Электрографические печатающие устройства используются:

в качестве устройств копировально-множительной техники;

в качестве печатающих устройств в ЭВМ, системах автоматизированного проектирования и автоматизации научных исследований, в информационно-измерительных системах;

в качестве маркирующих устройств и при нанесении структурных покрытий.

В электропечати выделяются два направления: электрофотография и электрокаплеструйная технология.

Электрофотографические устройства обеспечивают более высокую скорость и разрешающую способность печати, электрокаплеструйные более просты по устройству и дешевы.

В основе электрофотографического способа лежит свойство фотополупроводника, нанесенного тонким слоем на подложку, изменять свою электрическую проводимость под действием света.

На первой стадии процесса производится электризация полупроводника, т.е. на поверхность полупроводникового слоя наносятся электрические заряды того или иного знака. Постоянная времени разрядки слоя в темноте, определяемая диэлектрической проницаемостью и удельным электрическим сопротивлением слоя, может быть достаточно большой, так что заряды на поверхности сохраняются в течение времени, существенно превышающего время, необходимое для выполнения последующих операций.

После электризации производится экспонирование слоя, которое принципиально не отличается от экспонирования обычных фотографических материалов. Оно может производиться как в фотографических камерах, так и контактным методом. В процессе экспонирования благодаря фотопроводимости полупроводника уменьшается сопротивление слоя, что приводит к стеканию зарядов с тех участков поверхности, которые подверглись воздействию света. Оставшийся после экспонирова-

ния поверхностный заряд образует скрытое электростатическое изображение.

Проявление скрытого электростатического изображения производится с помощью заряженного порошка. Если заряд частиц проявляющего порошка противоположен по знаку остаточному поверхностному заряду, то частицы преимущественно будут оседать в местах с наибольшей плотностью поверхностного заряда. В результате на поверхности полупроводникового слоя образуется порошковое изображение. Электростатическое изображение можно проявить не только заряженными порошками, но и непосредственным сканированием потенциального рельефа и превращением его в оптическое изображение на экране электронно-лучевой трубки.

Следующим этапом процесса является перенос слоя на несветочувствительную подложку, например бумагу. Далее производится фиксация порошкового изображения на бумаге. Обычно на бумагу переносится незначительная часть порошка, что позволяет получить несколько копий с одного изображения на полупроводниковом слое. Наиболее простой и распространенный способ фиксации изображения — термический при соответствующем подборе порошка.

Использовать явление фотопроводимости для фотографирования впервые предложил русский изобретатель Е.Е. Горин в 1916 г. В 1928 г. голландская фирма «Филипс» применила эффект проявление скрытого электростатического изображения с помощью измельченных частиц красителя, нанесенного на поверхность фотопроводника. И, наконец, американский физик У.Ф. Карлсон в 1938 г. объединил принцип формирования электростатического изображения на поверхности фотопроводника с принципом его проявления порошком красителя, положив начало современной электрографии.

Кроме описанного известны еще два метода электрографии: устойчивой поляризации и устойчивой электропроводности. В основе первого способа лежит обнаруженная в 1937 г. способность некоторых диэлектриков при одновременном действии электрического поля и света переходить в электретное состояние, которое сохраняется длительное время. В электрофотографии на фотоэлектретах диэлектрик поляризуется избирательно в соответствии со световым изображением на слое. Второй метод — устойчивой электропроводности — известен с 1952 г., и в его основу положена способность некоторых фотополупроводников приобретать электропроводность при освещении и сохранять ее длительное время после выключения света. Время, в течение которого сохраняется электропроводность, зависит от материала фотопроводника.

Рассмотрим материалы, обладающие свойством фотопроводности. На практике пользуются материалами с удельным темновым сопротивлением 10^{13} Ом · м и более. При освещении слоя удельное сопротивление должно уменьшаться в 10^3—10^5 раз.

Электрофотографические слои должны иметь высокую фотоэлектрическую чувствительность, которая характеризует способность слоя уменьшать сопротивление при освещении его светом определенной длины волны и интенсивности.

Светочувствительность исследованных электрофотографических слоев указана в табл. 60.61.

Широкое применение нашли материалы на основе селена и оксида цинка. Они в наибольшей мере удовлетворяют предъявляемым требованиям: имеют высокое удельное электрическое сопротивление, обладают необходимой спектральной чувствительностью, позволяют получать тонкие слои, обладающие достаточной механической прочностью.

Для создания репродукций с помощью электрофотографического материала толщина светочувствительного слоя должна быть 8—12 мкм. Такой слой обладает оптимальными фотографическими характеристиками.

Применяются различные методы получения электрофотографических слоев. Например, слои из оксида цинка получают путем нанесения тонкого слоя суспензии порошка на бумагу и последующего высушивания. Такие слои предназначены для однократного использования, обладают наибольшей разрешающей способностью (до 100 линий/мм), обеспечивают качественное изображение с передачей полутонов, но чувствительность их мала.

Слои из селена наносят на металлические пластины напылением в вакууме. Эти слои предназначены для многократного использования. Разрешающая способность при этом получается в 2—3 раза меньше, но чувствительность слоев на основе селена в несколько раз выше.

Таблица 60.61

Фотопроводник	Относительная чувствительность	Светочувствительность в системе ASA
Сера	1	0,002
Антрацен	4	0,008
Поливинилкарбазол	7	0,014
Слой цинка в связующем	100	0,2
Сенсибилизированный красителями слой оксида цинка в связующем	500	1,0—2,0
Аморфный селен	500	1,0
Сплав селена и теллура	1000	2,0
Сульфид кадмия, легированный марганцем и кислородом, со связующим	5000—15 000	10—30

В последние годы значительное внимание уделяется использованию в электрофотографии органических фотопроводников (например, поливинилкарбазола).

Рассмотрим основные стадии электрофотографического процесса. Из различных способов зарядки полупроводниковых слоев преимущественно применяется зарядка в поле коронного разряда. Коронирующие электроды представляют собой или тонкие вольфрамовые провода диаметром 0,02—0,1 мм, или иглы. Важное значение имеет равномерность распределения заряда по слою. Это достигается путем применения ряда проводов или игл вместо одного провода, путем перемещения слоя относительно коронирующих проводов, использования дополнительных экранов. При зарядке слоев на основе оксида цинка используется коронный разряд отрицательной полярности, так как в этом случае происходит более быстрое восстановление сопротивления слоя после пребывания на свету.

В электрофотографии используются несколько способов проявления скрытого электростатического изображения. По характеру взаимодействия частиц проявляющего вещества с заряженными участками слоя различают проявление двух основных типов: сухое и жидкостное. Имеется много разновидностей сухого метода проявления: каскадный, «магнитной кистью», меховыми валиками, аэрозольный.

Метод сухого каскадного проявления наиболее распространен для селеновых фотослоев многократного использования. Каскадный проявитель обычно состоит из двух компонентов: крупнозернистого носителя и мелкодисперсного (проявляющего) порошка. Вещества-носители для данного проявляющего порошка должны выбираться таким образом, чтобы при трении частиц носителя о частицы тонера последние приобретали заряды, противоположные по знаку зарядам электростатического изображения. Размеры частиц тонера обычно составляют 5—20 мкм, частицы носителя достигают 300—700 мкм. От размера частиц тонера зависит качество получаемого изображения: чем меньше частицы, тем выше разрешающая способность отпечатка. При слишком малом размере резко повышается оптическая плотность фона (вуаль) изображения. При проявлении изображения носитель обеспечивает равномерное перемещение проявляющего состава по поверхности слоя. Благодаря контактно-электрическому взаимодействию на каждой частице носителя удерживается значительное количество частиц тонера. Проявление состоит в том, что частицы тонера отрываются от носителя и осаждаются на заряженных участках слоя. В качестве носителей применяют кварцевый песок, стеклянные шарики, полистирол. Самое широкое распространение получили стеклянные шарики, покрытые пленкой смолы. Стеклянные или полистирольные шарики легко перекатываются по пластине и меньше царапают слой, чем кварцевый песок.

Каскадный способ проявления используется в большинстве отечественных и зарубежных моделей копировально-множительных аппаратов. В основном каскадный способ проявления применяют при копировании штриховых изображений. Несмотря на ряд таких достоинств, как малый расход проявляющего порошка, приемлемый уровень вуали, отсутствие пыли, каскадный метод проявления имеет серьезные недостатки, заключающиеся в том, что он не обеспечивает высокую скорость проявления, плохо проявляет полутоновые изображения, а также однотонные сплошные участки изображения, т.е. дает так называемый «краевой эффект».

В методе проявления «магнитной кистью» также применяются носитель и проявляющий порошок, но частицы носителя обладают магнитными свойствами. Притягиваясь к магниту, они располагаются нитями вдоль силовых линий поля. При перемещении электрофотографического слоя относительно «магнитной кисти» происходит проявление электростатического изображения, которое по механизму не отличается от каскадного проявления.

В методе аэрозольного проявления доставка частиц к поверхности электрофотослоя осуществляется потоком воздуха. Используются высокодисперсные порошки с размером частиц 0,1—1,0 мкм, что дает возможность получать изображения с очень высоким разрешением. Аэрозольный метод позволяет получать не только штриховые, но и полутоновые отпечатки. Конструктивное оформление установки для аэрозольного проявления во многом подобно установкам для напыления порошковых покрытий в электрическом поле.

Существенным недостатком проявления заряженными порошками является «краевой эффект», который заключается в том, что при проявлении больших равномерно заряженных площадей получается контурное изображение. Причиной является то, что электрическое поле, создаваемое зарядами электростатического изображения и связанными с ним зарядами на подложке, выходит за пределы слоя только на краях изображения, где и происходит преимущественное осаждение частиц порошка. В наименьшей мере «краевой эффект» выражен при аэрозольном методе проявления. Для ослабления «краевого эффекта» применяют дополнительные электроды, расположенные непосредственно над электрофотографическим слоем, и слои с регулярными неоднородностями.

При работе со слоями многократного использования после операции проявления следует перенос порошкового изображения на бумагу и закрепление изображения.

Сущность переноса порошкового изображения заключается в том, что частички тонера, из которых состоит видимое изображение, могут быть после проявления перенесены электростатическим полем на бумагу. Для этого на бумагу, наложенную на фотослой, наносят заряды, совпадающие по знаку с первоначальным зарядом слоя.

Для закрепления порошкового изображения на копиях в современных электрофотографических аппаратах применяются следующие способы: а) термический с использованием трубчатых излучателей; б) термоконтактный; в) термосиловой; г) термический с использованием трубчатого излучателя в фокусирующем отражателе; д) импульсный. По энергетическим затратам все указанные способы близки друг к другу, за исключением термического с трубчатыми отражателями, КПД которого существенно ниже остальных.

Для проявления и закрепления изображения применяют и жидкие проявители. В этом случае используют трибоэлектрический эффект, наблюдаемый между порошком тонера и жидкостью с низкой электропроводностью, например бензином, керосином, бензолом и т.д. Чтобы частицы тонера все время находились во взвешенном состоянии в жидкости, ее постоянно перемешивают. Экспонирование электрофотографического слоя производится через слой жидкого проявителя. При этом тонер откладывается в тех местах, где имеются заряды, и сразу же закрепляется с помощью того же растворителя. Этот метод позволяет получать отпечатки с максимально возможной для электрофотографии разрешающей способностью (200—250 линий/мм).

Качество изображения при использовании жидких проявителей значительно выше, чем при сухом проявлении. Причина этого в том, что в жидком проявителе все частицы тонера обладают одинаковым зарядом в противоположность сухому проявлению. В результате при сухом проявлении частицы осаждаются и на освещенных участках слоя, образуя фон изображения.

В настоящее время промышленностью серийно выпускаются и эксплуатируются электрофотографические аппараты различного назначения. В качестве примера на рис. 60.119 представлена структурная схема копировального аппарата, предназначенного для оперативного копирования административной, информационной и технической документации без изменения масштаба и с уменьшением. Аппарат позволяет копировать листовые и сброшюрованные оригиналы форматов А4 и А3 с приближенным воспроизведением тонов на копиях. Впервые в нашей стране для экспонирования изображения применена конструкция с подвижным столиком оригинала при неподвижных элементах оптической системы.

Нашли применение электрографические аппараты для получения многокрасочных копий с цветных оригиналов. Один из вариантов принципиальной схемы электрофотографического аппарата с использованием промежуточного носителя записи ленточного типа и классического электрофотографического процесса, аналогичного рассмотренному выше, представлен на рис. 60.120. Копируемый цветной оригинал *1* укладывают на предметное стекло, где он периодически освещается импульсными лампами *2*. Световое изображение оригинала через объектив *3* и соответствующий светофильтр из блока светофильтров проецируется на движущуюся поверхность панхроматического фотопроводящего транспортера *5*, на который предварительно наносятся заряды с помощью за-

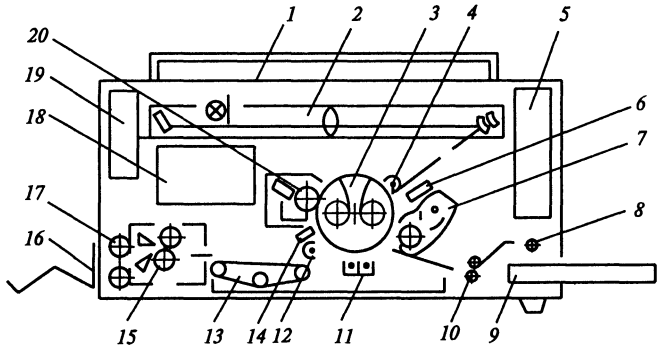


Рис. 60.119. Схема электрографического аппарата:

1 — столик оригинала; *2* — блок экспонирования; *3* — цилиндр с гибким промежуточным носителем; *4* — устройство зарядки; *5* — блок управления; *6, 12, 14* — устройстве нейтрализации; *7* — устройство проявления; *8, 10* — ролики подачи бумаги; *9* — кассета с бумагой; *11* — устройство переноса; *13* — транспортер; *15* — устройство закрепления; *16* — приемный лоток; *17* — выводные ролики; *18* — блоки питания высокого напряжения; *19* — вентиляторы; *20* — устройство очистки

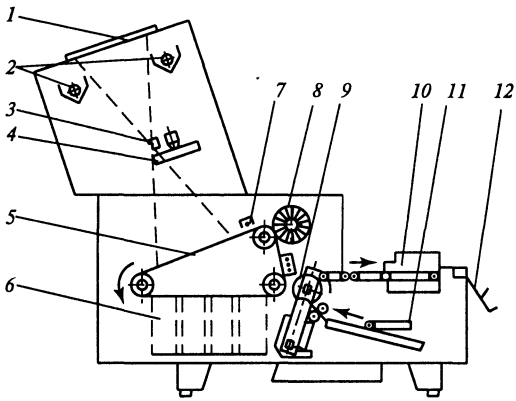


Рис. 60.120. Схема аппарата многокрасочного электрофотографического копирования:

1 — цветной оригинал; *2* — импульсные лампы; *3* — объектив; *4* — блок светофильтров; *5* — панхроматический фотопроводящий транспортер; *6* — блок проявления с четырьмя проявляющими камерами; *7* — зарядное устройство; *8* — узел очистки; *9* — цилиндр переноса; *10* — закрепляющее устройство; *11* — самонаклад; *12* — приемный лоток

рядного устройства *7*. Блок светофильтров *4* содержит светофильтры синего, зеленого, красного и нейтрального серого цветов, а блок проявления *6* — четыре устройства проявления способом «магнитной кисти» с тонерами соответственно желтого, пурпурного, голубого и черного цветов. Проявляющие устройства работают последовательно.

При проецировании изображения оригинала через синий светофильтр скрытое изображение на фотопроводящей поверхности ленточного типа визуализируется тонером желтого цвета. Последующее экспонирование через зеленый, а затем красный светофильтры визуализируется соответственно тонерами пурпурного и голубого цветов. Для получения черно-белой копии с многоцветного оригинала имеются нейтрально-серый светофильтр и проявляющее устройство с тонером черного цвета.

Поверхность фотопроводящего слоя очищается от избытка тонера в узле очистки *8*. Листы бумаги с самонаклада *11* подаются в захваты цилиндра переноса *9*. Изображения, образованные на поверхности фотопроводящего слоя и проявленные тонером соответствующего цвета, переносятся последовательно на лист бумаги, находящийся на цилиндре переноса, под действием электрического поля. Синхронная работа всех элементов аппарата обеспечивает точность совмещения перенесенных изображений разных цветов на листе бумаги и высокое качество копирования. После переноса многокрасочное изображение фиксируется в закрепляющем устройстве *10* и готовая копия поступает в приемный лоток *12*.

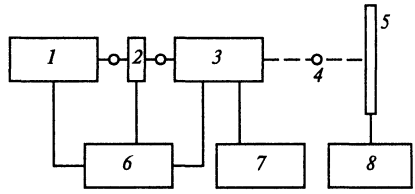


Рис. 60.121. Обобщенная функциональная схема электрокаплеструйного устройства:

1 — эмиттер капель; *2* — зарядное устройство; *3* — блок управления струей; *4* — капля; *5* — подложка (бумага); *6* — синхронизирующее устройство; *7* — задающий генератор; *8* — механизм привода

В *электрокаплеструйных устройствах* используется принцип электростатического управления струей монодисперсных заряженных капель по аналогии с электронно-лучевыми осциллографом или дисплеем. Обобщенная функциональная схема электрокаплеструйного устройства приведена на рис. 60.121.

Эмиттер капель генерирует однородную прямолинейную капельную струю, которая получает индукционную или ионную зарядку капель в зарядном устройстве. Блок управления отклоняет струю по одной или двум координатам, прерывает и очищает ее от сателлитов (капель меньшего размера). Для обеспечения качественного процесса печати эмиссия капель, их зарядка и управление ими должны быть синхронными. Эту функцию выполняет синхронизирующее устройство. Механизм привода осуществляет взаимное перемещение печатающей головки и подложки.

Электрокаплеструйные устройства обладают рядом достоинств: простотой конструкции за счет одностадийности печати, высокой надежностью благодаря отсутствию в печатающей головке механических подвижных элементов, большой скоростью печати. Скорость печати при последовательном формировании знаков в виде матрицы точек 5×7 превышает 1000 знаков в секунду.

Электрокаплеструйные устройства используются для вывода информации, печати, маркировки и выполнения ряда других высокоточных технологических операций. Ассортимент возможных знаков охватывает русский и латинский алфавиты, служебные и условные обозначения, метки, графические элементы. В качестве поверхностей, на которые производится печать, можно использовать материалы с самыми различными свойствами и различной формы. Достигнутая разрешающая способность и гибкость алгоритмов управления позволяют получить большое число градаций оптической плотности как черно-белых, так и цветных изображений. Гибкость управления позволяет обеспечить нужное цветовоспроизведение за счет варь-

ирования цветами красок, качеством материала подложек, знакообразующими растрами и разрешающей способностью.

Основные параметры электрокаплеструйных устройств: скорость печати, связанная с частотой каплеобразования; качество печати, определяемое стабильностью процесса каплеобразования; толщина и плотность обводки знаков, зависящие от диаметра капель; надежность, достигаемая за счет простоты конструкции печатающей головки и устройства управления; универсальность, связанная с возможностью регулирования частоты каплеобразования и диаметра капель, — определяются способом эмиссии капель. При струйной печати эмиссия капель в основном осуществляется импульсным давлением, высоким давлением и электростатическим полем.

Способ эмиссии капель импульсным давлением заключается в выбросе из сопла одной капли чернил на каждое импульсное изменение давления внутри камеры с чернилами. Каплеобразование происходит в том случае, если давление в импульсе достаточно для преодоления сил поверхностного натяжения в капиллярном сопле и приобретения каплей кинетической энергии для отрыва ее от сопла. Для получения импульсного давления используются пьезоэлектрические, магнитострикционные, электрогидродинамические и другие преобразователи. В печатающей головке используется принцип импульсного бесклапанного насоса. Давление в импульсе достигает 350—500 кПа, скорость капель на вылете — 2—3 м/с, максимальная частота каплеобразования — 8—10 кГц, что позволяет получить скорость печати до 300 знаков/с. Диаметр капилляров, через которые выбрасывается капля, составляет 25—40 мкм.

К недостаткам этой системы относятся высокие требования к точности изготовления относительно сложной механической системы печатающей головки и к свойствам используемых чернил.

Использование эмиссии капель высоким давлением позволило существенно повысить скорость печати. Печатающая головка в этом случае (рис. 60.122) состоит из форсунки *1* и часового камня *6* с соплом диаметром 20—100 мкм. Продольные колебания струи обеспечиваются системой пьезокристаллов (пьезокерамических элементов) *3*, управляемых от генератора синусоидального напряжения *5* (20—100 кГц). Насос высокого давления *14* (300—500 кПа) подает чернила через фильтр *15* в форсунку из чернильницы *13* и отсасывает неиспользованные чернила из ловушки *11*.

Под действием высокого давления из сопла с большой скоростью (20 м/с) выбрасывается струя проводящих чернил, которая на некотором расстоянии от сопла дробится на капли. Пьезоэлектрический преобразователь модулирует скорость истечения струи и тем самым синхронизирует дробление струи на капли. При отрыве капли приобретают индукционный заряд под действием напряжения на электроде *7* и далее при полете отклоняются в поле плоского конденсатора *9*. Незаряженные капли попадают в ловушку *11*. Развертка знака при знакоформировании обеспечивается по одной координате за счет отклонения полем, а по другой — относительным перемещением печатающей головки и бумаги.

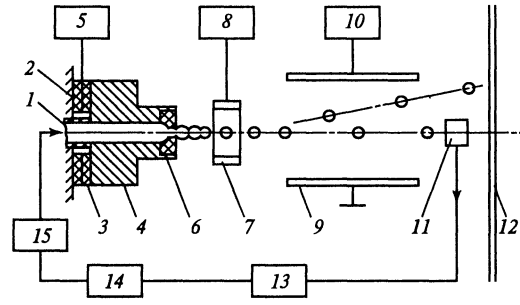


Рис. 60.122. Схема электрокаплеструйного устройства с эмиссией капель высоким давлением:

1 — форсунка; *2* — крепление головки к корпусу устройства; *3* — пьезокерамические элементы; *4* — концентратор вибрации; *5* — генератор синусоидального напряжения; *6* — часовой камень с соплом; *7* — заряжающий электрод; *8* — блок питания зарядного устройства; *9* — конденсатор; *10* — блок питания высокого напряжения; *11* — ловушка капель; *12* — подложка (бумага); *13* — камера с чернилами; *14* — насос; *15* — фильтр

Способ эмиссии капель высоким давлением также предъявляет особые требования к герметичности, прочности крепления и качеству изготовления элементов печатающей головки. Жесткие требования предъявляются и к чернилам по проводимости, вязкости, поверхностному натяжению, чистоте. Устройство усложняется тем, что необходима система точной синхронизации каплеобразования, зарядки и перемещения бумаги. Однако возможность получить частоту каплеообразования до 100 кГц позволяет увеличить скорость печати до 1500 знаков при матрице 5×7.

Наконец, еще один способ — эмиссия капель электрическим полем реализуется по аналогии с электростатическим распылением жидкости при электроокраске с тем отличием, что в качестве электрода используется капилляр. Привлекательной в этом способе является простота конструкции печатающей головки, так как в ней отсутствует сочетание высокого давления с высокочастотной вибрацией. Основной проблемой является обеспечение стабильного размера и заряда капель при распылении. Трудно исключить сопутствующие мелкие капли, которые существенно ухудшают качест-

во печати. Требование по использованию жидкостей с малой удельной электрической проводимостью в узком диапазоне [(0,5—1,0)10^7 См/м] существенно уменьшает заряд частиц и ограничивает возможность их управления электрическим полем. Наибольшая скорость печати определяется предельной частотой каплеобразования, которая составляет 10 кГц.

Источники питания для установок электронно-ионной технологии должны обеспечивать высокое напряжение (несколько десятков киловольт и выше) при относительно небольших потребляемых токах (от 10^{-5} до 10 А).

В настоящее время применяются источники питания трех видов: 1) выпрямители высокого напряжения; 2) выпрямители с умножением напряжения; 3) электростатические генераторы.

Выпрямитель высокого напряжения состоит из регулятора напряжения, повышающего трансформатора и собственно выпрямителя.

Регулятор напряжения поддерживает напряжение на установке в заданных пределах. Выполнение регуляторов зависит от потребляемой мощности и требований к управлению. Регулирование может быть ручным и автоматическим. Наибольшее распространение автоматическое регулирование напряжения получило в системах питания электрофильтров, где необходимо поддерживать напряжение на максимально возможном уровне. Для регулирования напряжения применяются автотрансформаторы, потенциал-регуляторы, магнитные усилители, тиристорные регуляторы и т.д.

Трансформаторы по конструкции не отличаются от обычных силовых трансформаторов. Однако они предназначены для внутренней установки и поэтому имеют значительно меньший запас электрической прочности.

Выпрямление переменного тока производится полупроводниковыми диодами.

Выпрямители с умножением напряжения применяются в тех случаях, когда требуется высокое напряжение при очень малом потребляемом токе (около 10^{-4} А). Они оказываются более компактными и имеют меньшую массу по сравнению с трансформаторно-выпрямительными установками.

Электростатические генераторы преобразуют механическую энергию в электрическую благодаря механическому перемещению зарядов против сил электрического поля. Транспортером зарядов служат твердые тела — проводники и диэлектрики. В соответствии с этим и делятся электростатические генераторы. Транспортеры выполняются в виде ленты, дисков, цилиндров, стержней.

На рис. 60.123 представлена схема генератора с проводящим цилиндрическим транспортером. Неподвижная часть генератора — статор состоит

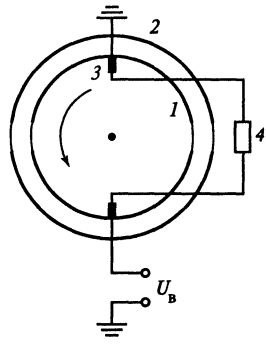


Рис. 60.123. Схема цилиндрического генератора с транспортером-проводником

из изолированных друг от друга полуцилиндров *2*, к которым подводится напряжение возбуждения. Вращающаяся часть — ротор также состоит из двух изолированных половин *1*, с которыми соприкасаются щетки *3*, соединенные с нагрузкой *4*. В пространстве между статором и ротором при включенном напряжении возбуждения возникает электрическое поле, а на полуцилиндрах ротора индуцируются заряды разных знаков. Эти заряды максимальны при совпадении положения полуцилиндров статора и ротора, при повороте на 180° заряд каждого полуцилиндра ротора опять достигает максимума, но с противоположным знаком. Поскольку щетки попеременно касаются каждой из половин ротора, в нагрузке будет протекать ток неизменного направления.

Мощность генератора определяется площадью активной поверхности ротора и статора, частотой вращения и плотностью энергии в рабочем зазоре машины. Последняя связана с напряжением возбуждения и соответствующим ему значением напряженности в пространстве между ротором и статором. Предельная напряженность определяется электрической прочностью среды. Электростатические генераторы заполняются газом под давлением, однако это приводит к увеличению потерь на трение при вращении ротора.

Более широкое распространение в качестве источников питания устройств электроокраски при напылении порошковых покрытий получили электростатические генераторы с транспортером из диэлектрика (рис. 60.124). Изоляционный транспортер зарядов *1* движется с некоторой скоростью (ротор). Элементы статора осуществляют зарядку (*2а*, *2б*) и разрядку (*3а*, *3б*) поверхности транспортера. Зарядное и разрядное устройства состоят из ионизаторов *2а* и *3а* и индукторов *2б* и *3б*. В зарядном устройстве индуктор заземлен, а в разрядном соединен с нагрузкой *4*.

При приложении между индуктором и ионизатором зарядного устройства напряжения возбужде-

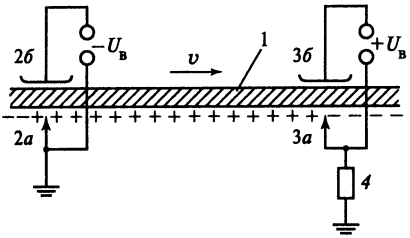


Рис. 60.124. Схема генератора с транспортером-диэлектриком

ния $U_в$, превышающего критическое, на ионизаторе, представляющем собой тонкую проволоку, тонкую пластинку или ряд игл, возникает электрический разряд. Образующиеся ионы осаждаются на поверхности транспортера и уносятся им.

К полюсу высокого напряжения между индуктором и ионизатором прикладывается напряжение $U_в$ противоположного знака. На ионизаторе возникает разряд также обратного знака, благодаря чему с транспортера снимается заряд, который и создает ток через нагрузку. Подключение к электродам полюса высокого напряжения $U_в$ связано с трудностями. Вместе с тем можно обеспечить разряд с ионизатора в поле заряда, доставленного с транспортером, поэтому в большинстве конструкций генераторов ионизатор *3а* и индуктор *3б* электрически объединяют.

Среди различных видов генераторов с транспортером из диэлектрика нашли распространение генераторы с цилиндрическим ротором. Обычно они заполняются водородом при давлении 1—2 МПа. Разработаны генераторы мощностью от десятков ватт до нескольких киловатт.

Достоинствами электростатических генераторов являются надежность работы, стабильность напряжения на выходе, отсутствие пульсации, малые размеры и масса.

60.9. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВАРКИ

ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ СВАРОЧНОЙ ДУГИ

В сварочной технике различают три способа использования электрической дуги:

1) открытая дуга, горящая в воздухе, парах металла и компонентах электродных покрытий (используется в основном при ручной сварке);

2) закрытая дуга, горящая под флюсом в парах металла и флюса (используется при автоматической и полуавтоматической сварке под флюсом);

3) защищенная дуга, горящая в защитных газах: аргоне, гелии, диоксиде углерода и др. (находит применение при автоматической и ручной сварке как плавящимся, так и неплавящимся электродом).

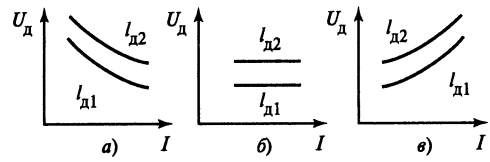


Рис. 60.125. Вольт-амперные характеристики дуги:
а — падающий участок; *б* — жесткий участок; *в* — возрастающий участок; $l_д$ — длина дуги ($l_{д2} > l_{д1}$)

Зависимость напряжения от тока $[U_д = f(I)]$ при постоянной длине дуги $l_д$ (вольт-амперная характеристика дугового разряда — ВАХ) в общем случае имеет три участка:

падающий (рис. 60.125, *а*) при малых значениях, жесткий (рис. 60.125, *б*) при средних и возрастающий (рис. 60.125, *в*) при больших значениях тока. Форма и рабочий участок ВАХ дугового разряда при данном способе сварки кроме тока определяется составом газовой атмосферы, материалом электродов, их размерами и др. Так, при ручной дуговой сварке чаще всего используется падающий или жесткий участок, при автоматической под флюсом — жесткий или возрастающий, при автоматической и полуавтоматической сварке в защитных или инертных газах — возрастающий.

В зависимости от используемого (рабочего) участка ВАХ сварочной дуги для обеспечения устойчивой работы системы источник питания — сварочная дуга необходимо выбирать тот или иной вид внешней характеристики источника $[U_и = f(I)]$. Система источник питания — сварочная дуга работает устойчиво, без корректирующих обратных связей (например, при постоянной скорости подачи электрода), если коэффициент устойчивости

$$K_у = (\partial U_д/\partial I - \partial U_и/\partial I) > 0.$$

Поэтому при падающей ВАХ дуги система работает устойчиво при крутопадающей внешней характеристике источника, причем в рабочей точке должно выдерживаться соотношение $|\partial U_и/\partial I|_р > |\partial U_д/\partial I|_р$. При жесткой ВАХ дуги ($|\partial U_д/\partial I|_р = 0$) источник должен иметь падающую внешнюю характеристику ($\partial U_и/\partial I < 0$), а при возрастающей ВАХ дуги можно использовать источник с падающей, жесткой или возрастающей характеристикой. Однако при использовании источника с возрастающей внешней характеристикой необходимо, чтобы $|\partial U_и/\partial I|_р < |\partial U_д/\partial I|_р$.

При дуговой сварке плавящимся электродом регулярно происходит короткое замыкание (КЗ) дугового промежутка, например при возбуждении ду-

ги и при переходе капли расплавленного металла с электрода в сварочную ванну. Моменты КЗ и горения дуги чередуются, причем длительность каждого процесса измеряется долями секунды. Напряжение и ток переходного процесса отличаются от их значений в режиме устойчивого горения, поэтому при использовании источников, которые имеют большую длительность переходных процессов, это может привести к обрыву дуги или затруднить ее возбуждение. Сварочные трансформаторы обладают малой электромагнитной инерцией, а у сварочных генераторов она больше. Проверку показателей сварочных свойств источников питания для дуговой сварки осуществляют по ГОСТ.

Источники питания для сварки различают: по роду тока — переменного (трансформаторы и генераторы повышенной частоты) и постоянного тока (генераторы, преобразователи и выпрямители); по виду внешних характеристик — с падающей, жесткой или пологовозрастающей характеристикой; по способу установки — стационарные и передвижные; по назначению — одно- и многопостовые, универсальные и специализированные, для ручной, автоматической и полуавтоматической дуговой сварки плавящимся и неплавящимся электродом в защитных, инертных газах и под флюсом, для плазменно-дуговой сварки и резки и электрошлаковой сварки; по схеме подключения — одно- и трехфазные.

Требования, предъявляемые к сварочным источникам питания. Источники питания сварочной дуги должны удовлетворять следующим основным требованиям:

1. Напряжение холостого хода источника должно быть достаточным для возбуждения дуги и безопасным для человека.

2. После возбуждения дуги напряжение источника должно уменьшаться до значений, соответствующих напряжению горения дуги.

3. При изменении длины дуги не должно происходить значительного изменения сварочного тока.

4. При КЗ ток в цепи должен превышать рабочий ток при сварке не более чем на 40 %.

5. Источник питания должен обеспечивать возможность легкого и плавного регулирования сварочного тока.

6. Источник питания должен обладать хорошими динамическими свойствами.

7. КПД источника питания должен быть достаточно высоким.

Выпускаемое сварочное оборудование имеет единую систему обозначений, которая состоит из буквенной и цифровой частей (рис. 60.126).

А — вид изделия (А — агрегат, В — выпрямитель, И — источник питания, П — преобразователь, Т — трансформатор);

Б — вид сварки (Д — дуговая, П — плазменная);



Рис. 60.126. Структура обозначения оборудования для сварки

В — способ сварки (О — открытой дугой, Ф — под флюсом, Г — в защитном газе). Отсутствие буквы означает ручную сварку штучным электродом. Дополнительно могут использоваться буквы М — для многопостовой сварки, И — импульсной, Б — с бензиновым двигателем, Д — с дизельным двигателем. Первые две или одна цифры — номинальный сварочный ток в сотнях ампер, последующие две цифры — регистрационный номер;

Г — климатическое исполнение (У — умеренный, Т — тропический или ХЛ — холодный); последующая цифра обозначает категорию помещения, для которого оборудование предназначено (1 — открытый воздух, 2 — палатки-прицепы и кузова автомобилей, 3 — помещения с естественной вентиляцией, 4 — помещения с принудительной вентиляцией и отоплением, 5 — помещении с повышенной влажностью).

Сварочные однопостовые трансформаторы. Сварочные однопостовые трансформаторы изготавливаются для сварки и наплавки — ручной дуговой и автоматической под флюсом на первичное напряжение 220 и 380 В. Сварочный трансформатор должен обеспечивать горение дуги при всех токах в пределах регулировочного диапазона при номинальном первичном напряжении, а также при понижении его на 10 % и падении напряжения в соединительных проводах сварочной цепи, не превышающем 2 В.

Технические данные некоторых сварочных трансформаторов приведены в табл. 60.62.

Сварочные трансформаторы (рис. 60.127) можно разделить по способу получения падающей характеристики на три группы.

1. Трансформаторы с нормальным рассеянием и отдельным дросселем *1* (рис. 60.127, *а*), включенным последовательно в сварочную цепь. Сварочный ток плавно регулируется изменением зазора a между подвижной и неподвижной частями. При $a = 0$ сварочный ток минимальный, при максималь-

Таблица 60.62. **Технические данные сварочных трансформаторов**

Параметр	СТЭ-24У	СТЭ-34У	СТН-500-1	СТН-700	ТСД-500	ТСД-1000	ТСД-2000
Пределы регулирования сварочного тока, А	100—500	150—700	150—700	200—900	200—600	400—1200	800—2200
Вторичное напряжение холостого хода, В	65	60	60	60	80	69 и 78	72 и 84
Номинальная мощность, кВ · А	23	30	32	43,5	42	78	180
КПД при номинальном режиме, %	83	86	85	85	87	90	90
Масса трансформатора и дросселя (реактора), кг	130/90	160/100	275	380	450	510	675

Окончание табл. 60.62

Параметр	ТД-102	ТД-306	ТД-300	ТД-500	ТД-502	ТДФ-1001	ТДФ-1601
Пределы регулирования сварочного тока, А	55—175	90—300	60—385	90—650	100—560	400—1200	600—1800
Вторичное напряжение холостого хода, В	80	80	61—79	60—76	60—76	68—71	74—79
Номинальная мощность, кВ · А	11,4	19,4	20	32	26,5	82	170
КПД при номинальном режиме, %	72	72	88	85	85	87	88
Масса трансформатора и дросселя (реактора), кг	38	71	137	210	240	720	1000

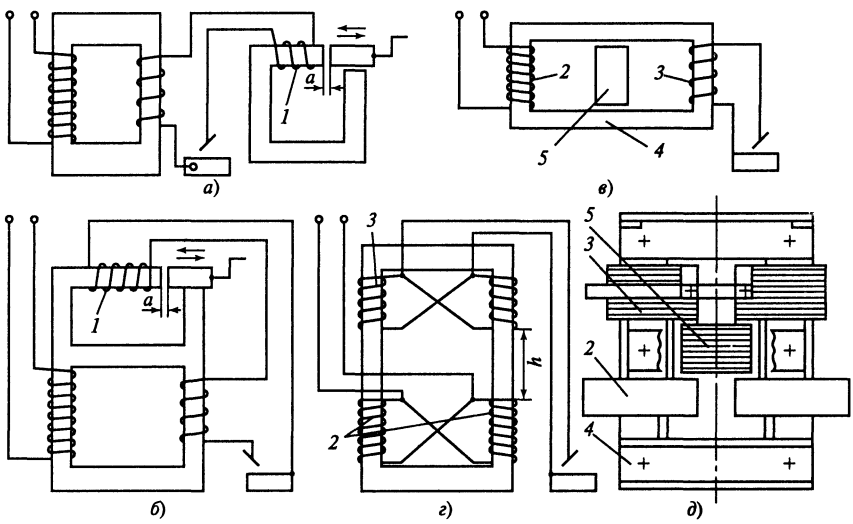


Рис. 60.127. Схемы трансформаторов:

а — с нормальным магнитным рассеянием и отдельным дросселем; *б* — с реактивной обмоткой на общем магнитопроводе; *в* — с размещением обмоток на разных стержнях магнитопровода; *г* — с удалением первичных обмоток от вторичных; *д* — с магнитным шунтом в магнитопроводе

ном зазоре — максимальный. По этой схеме выпускаются передвижные трансформаторы СТЭ-24У, СТЭ-34У.

2. Трансформаторы с увеличенным магнитным рассеянием. Увеличенные потоки рассеяния создаются:

путем размещения первичной обмотки *2* и вторичной обмотки *3* на разных стержнях магнитопровода *4* (рис. 60.127, *в*);

путем удаления первичных обмоток *2* от вторичных *3* (рис. 60.127, *г*);

путем размещения в окне магнитопровода *4* магнитного шунта *5* — подвижного или неподвижного (рис. 60.127, *в* и *д*). Иногда эти способы комбинируются.

Выпускаются следующие трансформаторы такого типа: с подвижным магнитным шунтом СТАН-0, СТШ-250, СТШ-500, СТШ-500-80; с неподвижным магнитным шунтом и помещенной на нем обмоткой управления ТДФ-1001 и ТДФ-2001; с подвижными вторичными обмотками ТС-300, ТС-500, ТСК-300, ТСК-500, ТД-102, ТД-300, ТД-500.

Кроме того, для сварки используются трансформаторы типа ТСД-500-1, ТСД-1000-4, ТСД-2000-2 и СТН-350, СТН-500, СТН-500-1, СТН-700, которые являются по свойствам смешанными, так как сочетают свойства как трансформаторов типа СТЭ, так и трансформаторов типа ТДФ.

3. Трансформаторы с жесткой характеристикой (для электрошлаковой сварки) ТШС-1001-1, ТШС-3000-1 (однофазные) и ТШС-600-3, ТШС-1000-3, ТШС-3000-3 (трехфазные) имеют секционные первичные и вторичные обмотки для регулирования вторичного напряжения.

В *трансформаторах типа СТШ*, принципиальная схема которых приведена на рис. 60.127, *д*, первичная обмотка *2* закреплена в нижней части магнитопровода *4*, а вторичная *3* — в верхней. Магнитный шунт *5*, расположенный между обмотками, состоит из двух частей, которые могут раздвигаться или сдвигаться. Когда части шунта раздвинуты, магнитный поток рассеяния уменьшен — сварочный ток максимален, а когда сдвинуты — минимален.

Трансформаторы для ручной дуговой сварки типа ТД обладают увеличенным индуктивным рассеянием обмоток и имеют внешние характеристики падающей формы. Магнитопровод трансформаторов — стержневого типа. Конструкция трансформатора позволяет перемещать катушки вторичной обмотки. Катушки первичной обмотки неподвижны и закреплены у нижнего ярма. Вторичные катушки перемещаются с помощью ходового винта, пропущенного через верхнее ярмо. Трансформатор снабжен переключателем диапазонов сварочного тока. Пределы регулирования сварочного тока I_2 обеспечиваются для всех трансформаторов при рабочем напряжении на выводах трансформатора $U_2 = 20 + 0{,}04I_2$.

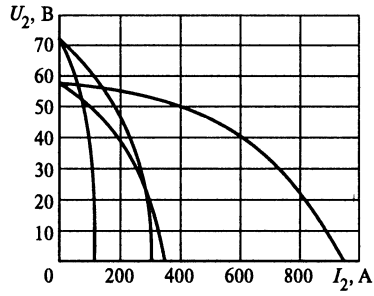


Рис. 60.128. Внешние регулировочные характеристики трансформатора ТД-500

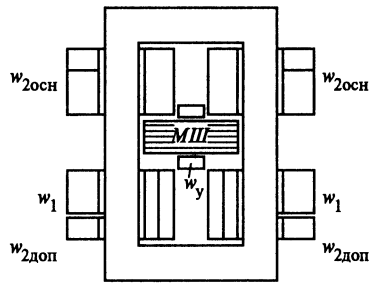


Рис. 60.129. Конструкция магнитопровода и размещение обмоток трансформатора ТДФ-1001

Принципиальная схема трансформатора типа ТД приведена на рис. 60.127, *г*. На рис. 60.128 приведены внешние характеристики трансформатора ТД-500.

Трансформаторы ТДФ-1001 и *ТДФ-1601* — стационарные, в этих трансформаторах первичные и вторичные обмотки разнесены на значительное расстояние.

Сварочные трансформаторы типа ТДФ (рис. 60.129) имеют магнитопровод стержневого типа, в котором размещен магнитный шунт *МШ* с обмотками управления w_y. На каждом стержне магнитопровода размещены первичная w_1 и вторичная w_2 обмотки трансформатора. Вторичная обмотка состоит из двух частей: основной части $w_{2осн}$, расположенной у верхнего ярма магнитопровода, и дополнительной, витки $w_{2доп}$ которой размещены у нижнего ярма. Трансформаторы типа ТДФ имеют ступенчато-плавное регулирование сварочного тока. Ступенчатое регулирование осуществляется переключением катушек вторичной обмотки, плавное в пределах ступени — путем изменения тока подмагничивания в обмотке шунта w_y. Большему току подмагничивания соответствует больший сварочный ток и наоборот.

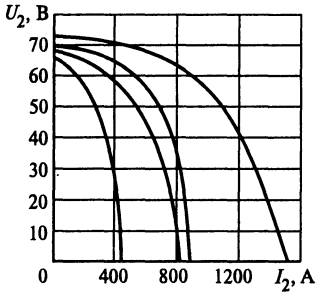


Рис. 60.130. Внешние регулировочные характеристики трансформатора типа ТДФ

Внешние характеристики трансформаторов типа ТДФ приведены на рис. 60.130.

Источники питания постоянного тока для автоматической, полуавтоматической и ручной дуговой сварки и наплавки можно разделить на вращающиеся электромашинные преобразователи и сварочные выпрямители.

В зависимости от схемы получения падающей характеристики различают сварочные генераторы:

1) с намагничивающей обмоткой независимого возбуждения и размагничивающей последовательной обмоткой;

2) с параллельным самовозбуждением и размагничивающей последовательной обмоткой.

Технические данные некоторых сварочных преобразователей приведены в табл. 60.63.

Преобразователь ПС-300-1 состоит из асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и сварочного генератора типа ГСО-300, смонтированных в одном корпусе. Генератор ГСО-300 с самовозбуждением и размагничивающей последовательной обмоткой имеет падающие внешние характеристики. Принципиальная электрическая схема генератора ГСО-300 приведена на рис. 60.131, *а*. Намагничивающая обмотка возбуждения $w_в$ генератора получает питание от основной и дополнительной щеток, при этом напряжение на щетках практически не зависит от сварочного тока. Падающая внешняя характеристика (рис. 60.131, *б*) создается за счет размагничивающего действия последовательной обмотки $w_р$ с использованием взаимодействия магнитных потоков обмоток возбуждения $Ф_в$ и размагничивающей последовательной $Ф_р$ и поперечной реакции якоря. Регулирование сварочного тока у генератора ГСО-300 ступенчато-плавное. Ступенчатое регулирование (положение *2* или *3* переключателя) осуществляется путем изменения числа витков обмотки $w_р$, плавное — регулированием в пределах каждой ступени тока $I_в$ в цепи намагничивающей обмотки.

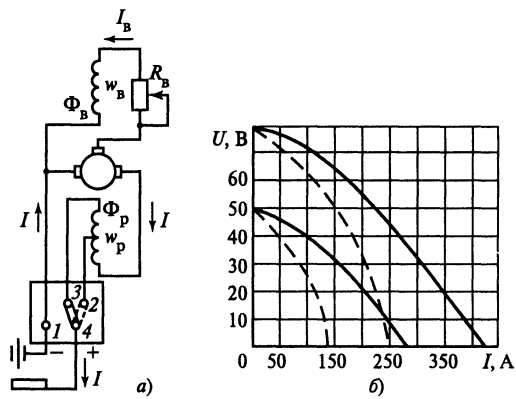


Рис. 60.131. Электрическая схема (*а*) и внешние характеристики (*б*) генератора ГСО-300 с самовозбуждением и размагничивающей последовательной обмоткой

Преобразователь ПС-500 (рис. 60.132, 60.133) состоит из генератора постоянного тока ГС-500 и асинхронного двигателя. Исполнение генератора — однокорпусное, защищенное. Генератор ГС-500 относится к генераторам с намагничивающей параллельной и размагничивающей последовательной обмотками возбуждения. Генератор имеет четыре основных и четыре дополнительных полюса. Намагничивающая обмотка размещена на всех четырех основных полюсах, а размагничивающая последовательная — только на двух основных полюсах.

Преобразователь ПД-501 имеет однокорпусное исполнение, приводом является трехфазный асинхронный двигатель, а генератором — генератор типа ГСО-500, имеющий независимое возбуждение и последовательную размагничивающую обмотку. Принципиальная электрическая схема генератора ГСО-500 отличается от схемы на рис. 60.131, *а* тем, что обмотка независимою возбуждения $w_в$ получает питание от выпрямительного блока через феррорезонансный стабилизатор напряжения.

На рис. 60.134 приведены внешние характеристики генератора ГСО-500. Сплошными линиями показаны внешние характеристики при установке генератора на ступень больших токов, штриховыми — на ступень малых токов.

Преобразователь ПСГ-500-1 имеет встроенный трехфазный асинхронный двигатель и генератор ГСГ-500-1 с самовозбуждением (рис. 60.135, *а*), который имеет жесткие внешние характеристики (рис. 60.135, *б*) что достигается путем применения специальной схемы самовозбуждения. Магнитная система генератора имеет четыре основных полюса и четыре добавочных, обеспечивающих безыскровую работу щеток. Катушки обмотки возбуждения w_1, расположенные на ненасыщенных полюсах,

Таблица 60.63. **Основные технические данные преобразователей постоянного тока**

Параметр	С независимым возбуждением и последовательной размагничивающей обмоткой				
	ПСО-120	ПСО-300А	ПД-303	ПСО-500	ПС-1000III
Тип генератора	ГСО-120	ГСО-300А	—	ГСО-500	СГ-1000III
Напряжение холостого хода, В	48—65	55—80	65	58—86	90
Пределы регулирования сварочного тока, А	30—120	75—300	80—300	125—600	300—1200
Мощность преобразователя, кВ · А	4,0	12,5	10	28	45
Размеры, мм:					
длина	1055	1015	1052	1275	1465
ширина	550	590	508	770	770
высота	730	980	996	1080	910
Масса, кг	155	400	331	780	1600

Окончание табл. 60.63

Параметр	С самовозбуждением и последовательной размагничивающей обмоткой				С самовозбуждением и жесткой характеристикой
	ПД-101	ПС-300-1	ПСО-300М	ПС-500	ПСГ-500-1
Тип генератора	ГД-101	ГСО-300	ГСО-300М	ГС-500	ГСГ-500-1
Напряжение холостого хода, В	80	75	50—76	62—80	40
Пределы регулирования сварочного тока, А	15—135	75—320	80—380	120—600	60—500
Мощность преобразователя, кВ · А	7,5	14	14	28	28
Размеры, мм:					
длина	—	1026	1200	1400	1052
ширина	—	590	755	770	590
высота	—	838	1180	1100	1013
Масса, кг	222	430	600	940	500

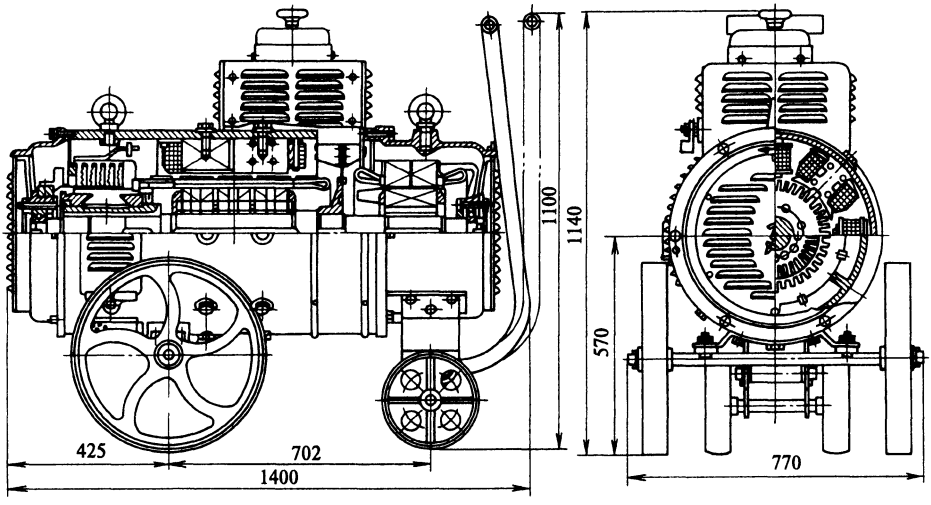


Рис. 60.132. Сварочный преобразователь ПС-500

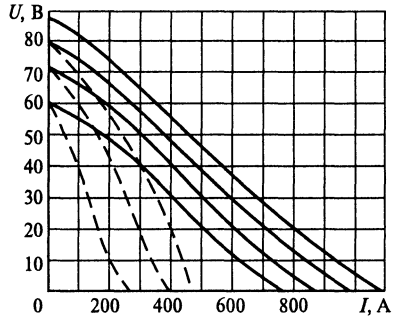


Рис. 60.133. Внешние характеристики генератора ГС-500

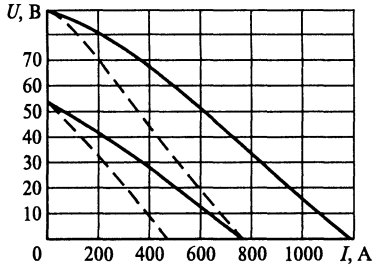


Рис. 60.134. Внешние характеристики генератора ГСО-500

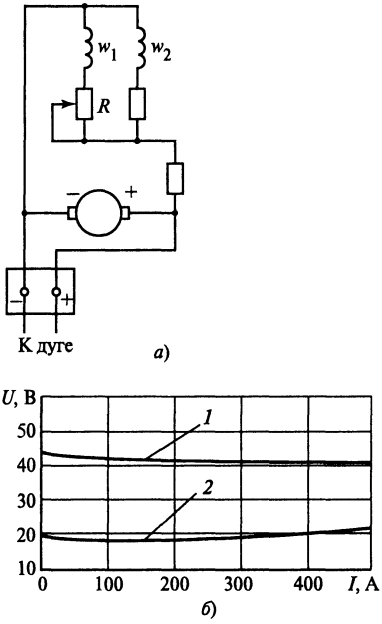


Рис. 60.135. Электрическая схема (*а*) и внешние характеристики (*б*) генератора ГСГ-500-1:

1 — малое сопротивление *R*; *2* — большое сопротивление *R*

и катушки обмотки возбуждения насыщенных полюсов w_2 включены параллельно. Регулирование выходного напряжения генератора осуществляется резистором *R*, включенным в цепь обмотки возбуждения, расположенной на ненасыщенных полюсах. Сварочный генератор ГСТ-500-1 имеет пределы изменения выходного напряжения от 16 до 40 В.

Сварочные выпрямители. В последние годы в связи с развитием силовой полупроводниковой техники выпрямители (табл. 60.64) получают все большее применение в установках для питания сварочной дуги. Сварочный выпрямитель состоит из трансформатора с устройством для регулирования тока и выпрямительного блока, собранного по трехфазной мостовой схеме.

Динамические свойства выпрямителей из-за меньшей электромагнитной инерции лучше, чем генераторов постоянною тока. Отсутствие вращающихся частей и коллектора делает выпрямители более надежными и простыми, чем генераторы постоянного тока; КПД выпрямителей также несколько выше, чем сварочных преобразователей с генераторами постоянного тока.

Однопостовые сварочные выпрямители с падающими внешними характеристиками ВД-306 и ВД-502 выполнены передвижными, рассчитаны на перемежающийся режим работы при принудительном воздушном охлаждении. Для формирования падающей внешней характеристики и плавного регулирования сварочного тока использован управляемый реактор, включенный во вторичную цепь трансформатора. Выпрямитель ВД-502 стабилизирован. Установленный выпрямленный ток в диапазоне 100—500 А поддерживается с точностью 2,5 % при понижении напряжения сети на 10 %.

Однопостовые сварочные выпрямители с жесткими внешними характеристиками выпускаются отечественной промышленностью типов ВДГ и ВСЖ. Выпрямители ВДГ — передвижные, рассчитаны на повторно-кратковременный режим работы, ПВ = 60 % при принудительном воздушном охлаждении.

Выпрямители ВДГ-302 и ВДГ-601 предназначены для комплектации сварочных полуавтоматов унифицированной серии. Упрощенная схема стабилизированного выпрямителя ВДГ-302 приведена на рис. 60.136. Регулирование напряжения — плавно-ступенчатое. Ступенчатое регулирование производят путем изменения коэффициента трансформации трансформатора *T*, плавное регулирование в пределах каждой ступени — управляемым трехфазным дросселем насыщения *A*. Соединению первичной обмотки треугольником с использованием отводов соответствует первая ступень регулирования рабочего напряжения; соединению полных обмоток треугольником — вторая ступень регулирования; соединению обмоток с использованием от-

Таблица 60.64. **Основные технические данные сварочных выпрямителей**

Параметр	Тип выпрямителя							
	с падающей внешней характеристикой		с жесткой внешней характеристикой		универсальные			
	ВД-306	ВД-502	ВДГ-302	ВДГ-601	ВДУ-305	ВДУ-504	ВДУ-1201	ВДУ-1601
Продолжительность цикла сварки, мин	5	10	—	—	10	10	Продолжительный	
Пределы регулирования тока, А	45—315	50—500	50—315	100—700	50—315	100—500	300—1250	500—1600
Номинальное рабочее напряжение, В	33	40	38	66	38	50	66	66
Напряжение холостого хода, В	70	80	55	90	70	80	100	100
Первичная мощность, кВ · А, не более	24	42	19	69	23	40	120	155
Габаритные размеры, мм:								
длина	780	550	748	900	634	1100	1400	1150
ширина	772	850	1045	1250	975	800	850	900
высота	850	1062	953	1125	760	940	1250	1850
Масса, кг	164	370	275	570	240	380	850	950

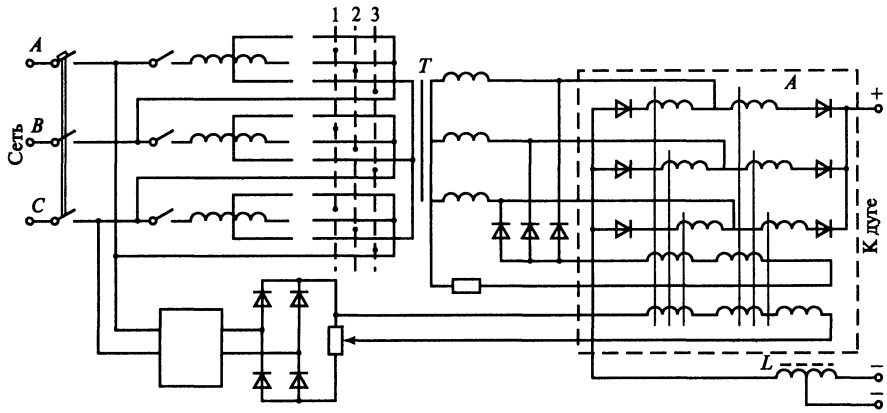


Рис. 60.136. Упрощенная электрическая схема выпрямителя ВДГ-302

водов звездой — третья ступень регулирования. Обмотки переключаются пакетно-кулачковым переключателем на три положения (*1—3*).

Источники питания серии ВДУ называют универсальными сварочными выпрямителями, так как их электрические схемы предусматривают переключение для работы как с жесткими, так и с падающими внешними характеристиками. Универсальные сварочные выпрямители серии ВДУ обеспечивают плавное дистанционное регулирование выходных тока и напряжения, стабилизацию режима при изменении напряжения сети. Выпрямители типов ВДУ-306, ВДУ-604 предназначены для однопостовой сварки в углекислом газе и ручной сварки штучными электродами, выпрямители ВДУ-1201 и ВДУ-1601 — для автоматической сварки под флюсом и в защитных газах.

Многопостовые сварочные выпрямители предназначены для одновременного снабжения энергией нескольких сварочных постов. Применяются в основном при ручной дуговой сварке.

Выпрямители серии ВДМ с реостатным регулированием выполняются на кремниевых диодах и имеют жесткую внешнюю характеристику, что обеспечивает независимость работы отдельных сварочных постов. Для получения падающих ха-

рактеристик и регулирования тока на каждом сварочном посту используют ступенчатый балластный реостат. Преимущества многопостовых систем связаны с небольшой первоначальной стоимостью оборудования, простотой обслуживания, высокой загрузкой и высокой экономичностью многопостового выпрямителя. Основной недостаток связан со значительными потерями энергии в реостатах, снижающих КПД сварочных постов.

В табл. 60.65 приведены технические данные выпрямителей серии ВДМ.

Выпрямитель ВДУМ-4×401 с тиристорным регулированием многопостовой имеет единый трансформатор и независимые тиристорные блоки с самостоятельным устройством фазового управления для каждого поста.

Как видно из рис. 60.137, выпрямитель состоит из общего силового трансформатора *T*, четырех независимых силовых тиристорных выпрямителей, блоков фазового управления *БФУ* с датчиками тока на магнитных усилителях *A* и дросселей *L* в цепи выпрямленного тока, которые и образуют собственно четыре поста выпрямителя. В отличие от однопостовых выпрямителей дроссель *L* не только выполняет в данном случае функции сглаживания и ограничения пиков тока в процессе сварки, но и является разделительным дросселем, обеспечивающим независимость работы постов и тиристорных выпрямительных блоков. Многопостовой выпрямитель разработан по простой шестифазной схеме выпрямления с нулевой точкой.

Таблица 60.65. **Основные технические данные выпрямителей серии ВДМ**

Параметр	ВДМ-1001	ВДМ-1601
Номинальный сварочный ток, А, при ПВ = 100 %	1000	1600
Номинальное рабочее напряжение, В	60	60
Напряжение холостого хода, В	70	70
Первичная мощность, кВ · А	74	120
КПД %	90	90
Масса, кг, не более	420	770
Габаритные размеры, мм:		
длина	1100	1050
ширина	700	850
высота	900	1650
Число постов	7	9
Номинальный ток поста, А, при ПВ = 60 %	315	315

Выпрямитель имеет падающие и жесткие внешние характеристики (рис. 60.138). Падающие характеристики получаются за счет введения обратной связи по току, жесткие — при совместном действии обратной связи по току и напряжению. Выпрямитель обеспечивает стабилизацию параметров при колебаниях напряжения сети, дистанционное

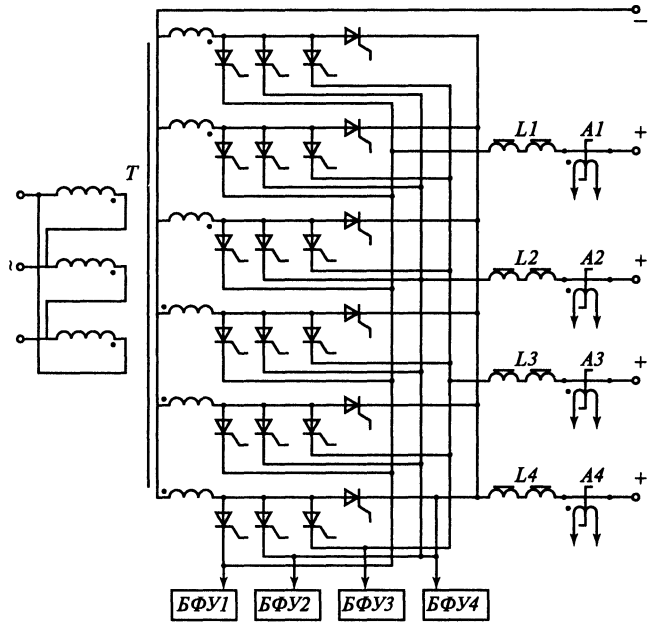


Рис. 60.137. Упрощенная электрическая схема силовой части многопостового сварочного выпрямителя ВДУМ-4×401

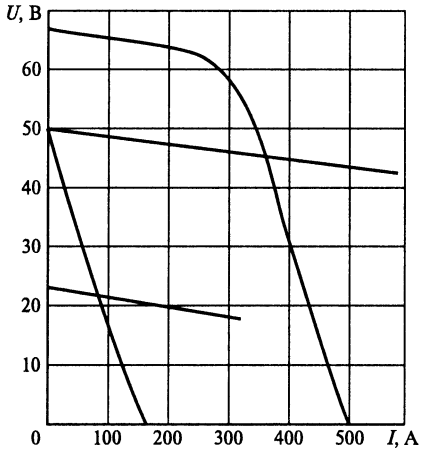


Рис. 60.138. Внешние характеристики сварочного выпрямителя ВДУМ-4х401

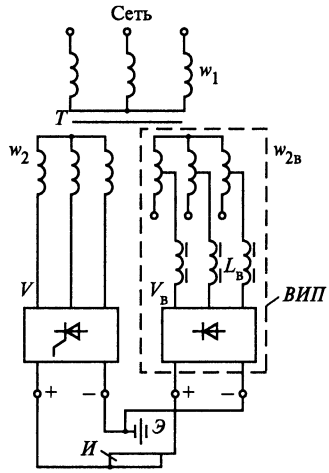


Рис. 60.139. Электрическая схема силовой цепи источников питания серии ВСВУ

регулирование тока, напряжения и включение сварочного режима

Параметры выпрямителя приведены ниже

Номинальный сварочный ток поста при ПВ = 60 %, А	400
Номинальное рабочее напряжение, В, при работе на характеристиках	
жестких	45
падающих	36
Напряжение холостого хода, В, не более	75
Пределы регулирования рабочего напряжения, В, при работе на характеристиках	
жестких	18—45
падающих	24—36
Пределы регулирования сварочного тока, А	100—400
Первичная мощность, кВ · А	100
КПД, %, не менее	75
Габаритные размеры, мм	
длина	1350
ширина	850
высота	1200
Число сварочных постов	4
Масса кг, не более	790

Специализированные источники питания. Большинство специализированных источников питания серии ВСВУ, ВСД, ВСП, ВПР, ТИР (табл 60 66) выпускаются на номинальное напряжение питающей сети 380 В, с номинальной относительной продолжительностью включения нагрузки 60 %, продолжительностью цикла сварки 60 мин, предназначены для работы в умеренных климатических условиях в помещениях с естественной вентиляцией при температуре окружающей среды не ниже +5 °С, выполнены с применением обратной связи по току и напряжению В указанных источниках предусмотрено управление формой, значением и продолжительностью импульса тока, обеспечена стабилизация сварочного тока в пределах ±2,5 % при изменении напряжения питающей сети ±10 % и температуры окружающей среды от 5 до 35 °С

Источники питания серии ВСВУ (рис 60 139) выпускаются на токи 40, 80, 160, 315, 610 А и предназначены для автоматической сварки сжатой дугой неплавящимся электродом *Э* изделий *И* из сталей и титановых сплавов в непрерывном и импульсном режимах с автоматическим плавным ре-

Таблица 60 66 **Основные технические данные специализированных источников питания**

Параметр	ВСВУ-80	ВСВУ-630	ВСВ-1000	ВСВ-2000	ВСП-160	ВСП-1000	ТИР-300Д
Номинальный сварочный ток, А	80	630	1000	2000	160	1000	300
Пределы регулирования тока, А	3—90	10—700	25—1000	25—2000	40—180	150—1100	10—300
Номинальное рабочее напряжение, В	30	30	30	30	—	—	30
Напряжение холостого хода, В	180	480	1150	2150	240	1150	480
Масса, кг, не более	—	—	45	45	16—34	16—60	65

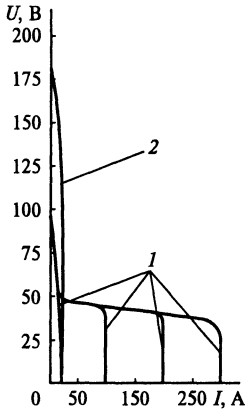


Рис. 60.140. Внешние характеристики источника питания ВСВУ-315:

1 — силового блока; *2* — блока ВИП

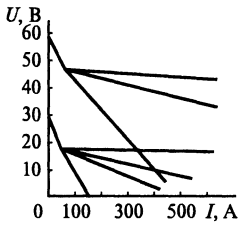


Рис. 60.141. Внешние характеристики источника питания ВСП-1000

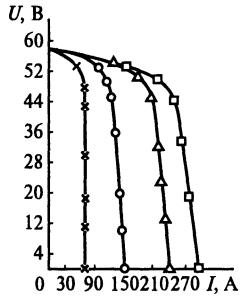


Рис. 60.142. Внешние характеристики источника питания ТИР-300Д

гулированием нарастания тока в начале и снижением в конце сварки, изменением формы импульса сварочного тока от прямоугольного до треугольного и с плавным регулированием тока дежурной дуги от 2 до 30 % номинального. Основными элементами источника являются силовой трехфазный трансформатор *T*, имеющий одну первичную обмотку w_1 и две вторичные: основную w_2 и вспомогательную $w_{2в}$.

Напряжение от вторичной обмотки подается на основной силовой выпрямитель *V*. Основной источник ($w_2 - V$) имеет пологопадающую характеристику (рис. 60.140). Вспомогательный источник питания *ВИП* содержит дополнительно к $w_{2в}$ и $V_в$ три линейных дросселя $L_в$ с разъемными ферромагнитными магнитопроводами и имеет крутопадающую характеристику. Путем изменения зазора в разъемном магнитопроводе дросселя устанавливают требуемый ток возбуждения дуги. Вспомогательный источник питания обеспечивает необходимое напряжение холостого хода, а для возбуждения дуги неконтактным способом в источнике установлен осциллятор типа ОСППЗ-300-М1.

Источники питания серии ВСВ предназначены для автоматической сварки сталей и титановых сплавов погруженной дугой неплавящимся электродом, обеспечивают возбуждение дуги на минимальном токе касанием электродом изделия и плавное нарастание тока в начале сварки и его снижение при заварке кратера (конец сварки).

Источники питания серии ВСП выпускаются на номинальный ток сварки 160, 215, 1000 А и предназначены для дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитных газов сталей, титановых и алюминиевых сплавов, имеют плавно регулируемую падающую характеристику со значительным превышением тока короткого замыкания над рабочим (рис. 60.141).

Источники питания серии ВПР выпускаются на номинальный ток сварки 80, 315, 630 А и предназначены для плазменной резки сталей, титановых и алюминиевых сплавов, имеют повышенное напряжение холостого хода — 180 и 250 В.

Универсальный источник питания типа ТИР-300Д предназначен для дуговой сварки сталей, титановых, алюминиевых и магниевых сплавов неплавящимся электродом, а также для ручной сварки покрытым электродом. В источнике использованы силовой трансформатор с малым магнитным рассеянием и дроссель насыщения, имеющий раздельные рабочие обмотки, коммутируемые тиристорами, что обеспечивает получение крутопадающей характеристики (рис. 60.142). Источник обеспечивает стабильное горение дуги, поддержание заданного значения тока и плавное увеличение тока с 5 А при возбуждении дуги до заданного значения примерно за 0,6 с и его уменьшение при гашении дуги.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВАРКИ

Автоматы для дуговой сварки. Автоматы для дуговой сварки могут быть: с плавящимся или неплавящимся электродом; одно- или многоэлектродные; для сварки в защитных газах или под флюсом;

сварочные тракторы; самоходные сварочные головки или установки для автоматической сварки.

При работе автоматы для дуговой сварки обеспечивают: зажигание дуги, поддержание требуемого режима сварки, подачу электродной или присадочной проволоки, перемещение автомата, сварочной головки или изделия, подачу флюса или защитного газа в зону дуги и окончание процесса сварки.

Основные технические данные, конструктивные особенности и назначение некоторых автоматов (тракторов) для дуговой сварки приведены в табл. 60.67 и 60.68, а на рис. 60.143 дан внешний вид трактора АДС-1000-4.

Аппараты для электрошлаковой сварки. Электрошлаковая сварка основана на использовании теплоты, выделяющейся в жидком шлаке при прохождении через него сварочного тока.

При электрошлаковой сварке изделие устанавливается так, чтобы шов занимал вертикальное положение. Сварочное пространство для предупреждения вытекания металла из места сварки с двух сторон ограничивается медными накладками — ползунами, охлаждаемыми водой. Сварочный аппарат перемещается вдоль кромок снизу вверх и постепенно заполняет весь зазор между ними расплавляемым присадочным металлом.

Аппараты для электрошлаковой сварки классифицируются по способу перемещения вдоль свариваемого шва:

1) рельсовые автоматы, перемещающиеся по вертикальным рельсам, устанавливаемым параллельно шву;

2) безрельсовые автоматы, перемещающиеся непосредственно по свариваемому изделию.

Основные технические данные, конструктивные особенности и назначение некоторых аппаратов для электрошлаковой сварки приведены в табл. 60.69, а на рис. 60.144 показан внешний вид аппарата А-535.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Машины общего назначения для точечной, рельефной, шовной и стыковой электрической контактной сварки изготавливаются по техническим требованиям, в которых предусмотрены параметрические ряды машин по продолжительным сварочным токам, номинальным усилиям сжатия и осадки, а также установлены номинальные вылеты электродов.

Для машин контактной сварки принята система обозначения, позволяющая определить тип оборудования, значение главного параметра и некоторые другие данные.

Оборудование любого типа обозначено буквами и цифрами (см. рис. 60.126). Первая буква характеризует изделие: установка — У, автомат — А, полуавтомат — П, машина — М и т.д. Вторая буква ука-

Таблица 60.67. **Технические данные сварочных тракторов**

Тип трактора	Напряжение питающей сети, В	Номинальный сварочный ток, А	Электродная проволока		Скорость сварки, м/ч	Вместимость бункера, $дм^3$	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
			Диаметр, мм	Скорость подачи, м/ч				
Для сварки под флюсом								
АДФ-500	380, 220	500	1,6—2,5	150—720	15—70	4	590×265×425	28
ТС-33	380	800	1,0—4,0	85—670	8—35	1,6	800×400×465	45
ТС-17М1У3	380, 220	1000	1,6—5,0	52—400	16—126	6,5	715×345×540	45
АДС-1000-5У3	380, 220	1000	2,0—5,0	60—360	12—120	6	1010×350×670	55
АДФ-1001У3	380	1000	2,0—5,0	18—360	12—120	6	1050×365×655	60
АДФ-1201	380	1250	2,0—6,0	60—360	12—120	—	1050×365×655	70
АДФ-1602У3	380	1600	3,0—6,0	18—360	12—120	6	1050×365×655	60
Для сварки в защитных газах								
ТС-49	380	250	0,8—1,2	210—320	50—75	—	500×230×440	21
АДСП-2	380	400	1,0—2,5	100—800	10—80	—	730×600×1050	63
АДГ-502У4	380	500	1,2—2,0	30—720	18—180	—	845×365×670	55
АДПГ-500-1	380	500	0,2—2,0	150—720	15—70	—	425×265×570	22
АСУ-6У	220	750	1,6—2,0	66—660	13—51	—	—	36
«Горизонт»	220	1000	3,0—4,0	150—600	10—60	—	950×470×450	55

Таблица 60.68. **Назначение и конструктивные особенности сварочных тракторов**

Тип трактора	Конструктивные особенности	Назначение
	Для сварки под флюсом	
АДФ-500	Скорость подачи электродной проволоки и сварки регулируется плавно; скорость подачи не зависит от напряжения на дуге	Сварка углеродистой стали
ТС-33	Скорость подачи электродной проволоки регулируется ступенчато независимо от напряжения на дуге; трактор снабжается специальным экраном с водяным охлаждением и колпаком для отсасывания газа; сварка может производиться внутри и вне колесной базы	Сварка полуоткрытой дугой листовых конструкций из алюминиевых сплавов
ТС-17М1	Скорость подачи электродной проволоки регулируется ступенчато	Сварка стыковых соединений с разделкой и без разделки кромок, нахлесточных и угловых соединений
АДС-1000-5	Скорость подачи электродной проволоки и сварки регулируется плавно; скорость подачи зависит от напряжения на дуге	То же
	Для сварки в защитных газах	
ТС-49	Скорость подачи электродной проволоки и сварки регулируется ступенчато	Сварка нахлесточных швов
АДСП-2	В комплект входит сварочная головка АГП-2	Сварка углеродистой и легированной стали, а также легких сплавов
АДГ-502, АДГ-500-1	Скорость подачи электродной проволоки и сварки регулируется плавно; скорость подачи не зависит от напряжения на дуге	Сварка на постоянном токе углеродистой стали
«Горизонт»	Скорость подачи электродной проволоки и сварки регулируется плавно	Сварка кольцевых швов

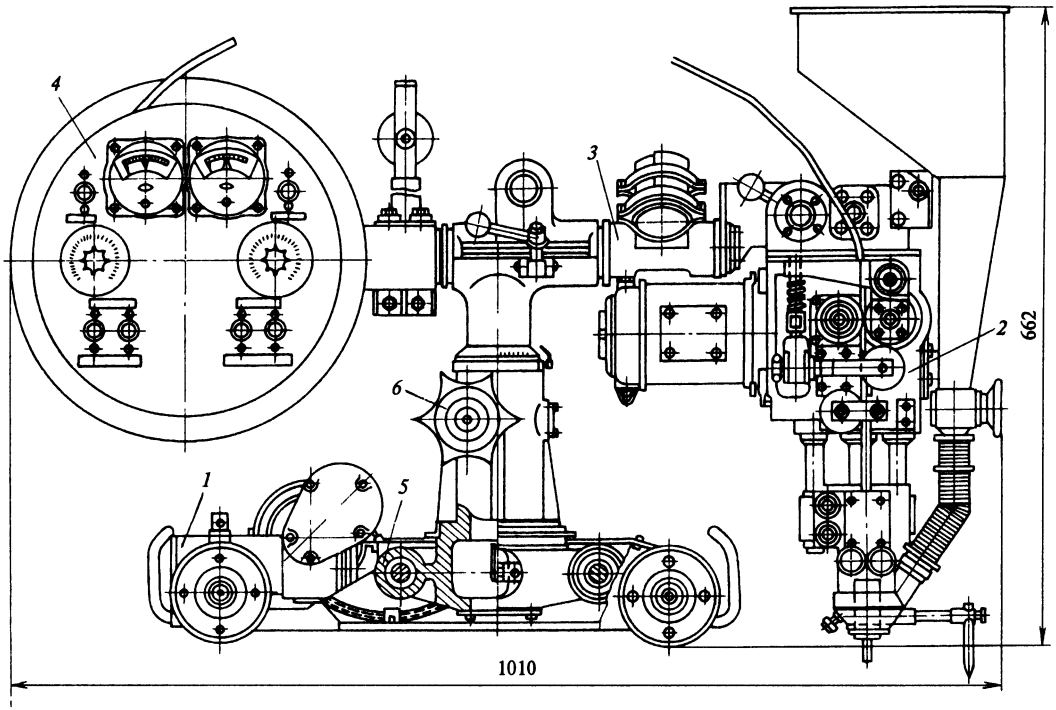


Рис. 60.143. Универсальный сварочный трактор АДС-1000-4:

1 — самодвижущаяся тележка; *2* — автоматическая головка; *3* — коромысло; *4* — пульт управления; *5* — поперечный суппорт; *6* — поворотный механизм

Таблица 60.69. **Технические данные аппаратов для электрошлаковой сварки**

Тип аппарата	Толщина свариваемого металла, мм	Сварочный ток на электрод, А	Число электродов, шт.	Размер электродов, мм	Скорость, м/ч		Габаритные размеры, мм	Масса, кг
					сварки	подачи электрода		
Рельсового типа								
А-820МУ4	18—50	700	1	∅2,5—3,0	4—15	58—580	350×250×650	16
А-433Р	150	750	1	∅3,0	2,6—21	60—400	392×440×800	75
А-736	500	750	1	∅3,0	1—5	160—320	340×240×490	—
А-372Р	20—250	1000	3	∅0,3	1—10	150—480	1200×730×1560	320
А-535У4	450	1000	3	∅3,0	0,4—9	60—480	1600×820×1070	380
А-550	200	3000	1	200×20	0,3—8	6,8—10	1200×575×2580	3780
Безрельсового типа								
А-612У4	20—100	1000	1	∅0,3	0,4—4	130—444	750×370×870	70
А-645	800	2000	6	∅3,0	0,5—10	60—150	380×440×550	35
Подвесного типа								
А-532	16—400	1000	3	∅3,0	0,5—10	150—500	—	340
А-535К	16—300	1000	3	∅3,0	0,4—9	65—480	1600×820×1070	380

Примечание. Напряжение питающей сети 380 В, частота 50 Гц.

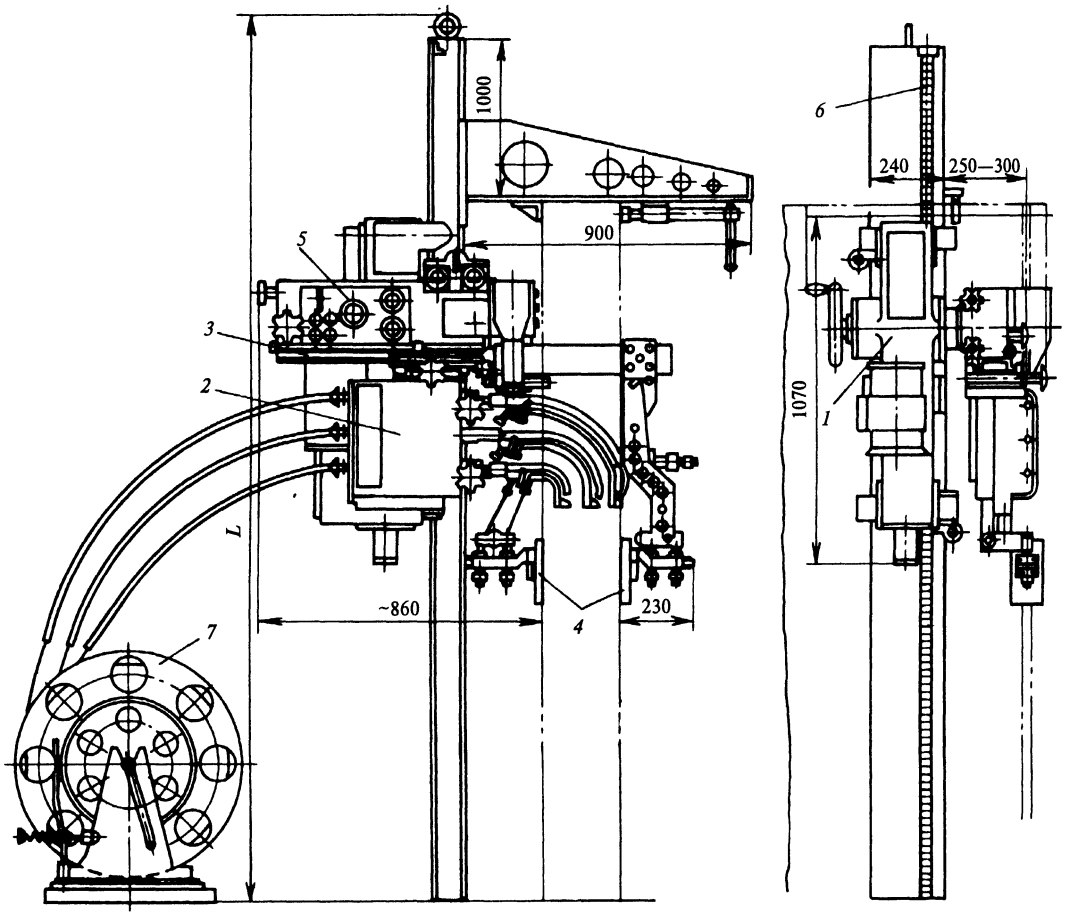


Рис. 60.144. Аппарат А-535 для электрошлаковой сварки:

1 — ходовая тележка; *2* — трехэлектродная головка; *3* — механизм перемещения; *4* — формирующее устройство (накладки); *5* — пульт управления; *6* — рельс; *7* — катушка с проволокой

зывает вид контактной сварки: точечная — Т, рельефная — Р, шовная — Ш, стыковая — С. Если в буквенное обозначение входит третья буква, то она указывает либо конструктивное исполнение (многоэлектродная — М), либо тип источника питания (постоянного тока — В, конденсаторная — К и т.д.).

Первые две цифры числовой части обозначения указывают сварочный ток в килоамперах для точечных, рельефных, шовных и стыковых машин для сварки методом сопротивления или усилие осадки 10 кН для машин стыковой сварки методом оплавления. Вторые две цифры указывают номер конструктивного исполнения данного типа машины. Машина для точечной сварки с номинальным сварочным током 12,5 кА обозначается МТ-1217, машина для шовной сварки с номинальным током 32 кА — МШ-3204 и т.д.

Отечественная промышленность выпускает широкую номенклатуру машин для контактной сварки, которые могут быть классифицированы следующим образом:

по виду получаемых при сварке соединений — точечные, шовные, рельефные, стыковые;

по конструктивному исполнению — стационарные, подвесные, радиального типа, прессового типа, с встроенным трансформатором, с отдельным трансформатором и др.;

по типу источника сварочного тока — переменного или постоянного тока, низкочастотные, конденсаторные;

по типу усилия сжатия — с постоянным или переменным усилием;

по нормируемым техническим требованиям — группы А (с повышенной стабильностью параметров), группы Б (с нормальной стабильностью параметров).

Оборудование для контактной сварки рассчитано на питание от сети переменного тока частотой 50 Гц напряжением 380 В.

Максимальное вторичное напряжение холостого хода должно быть не выше 36 В; отношение вторичного максимального тока к минимальному должно быть 1,8 и более. Вторичный ток можно регулировать: ступенчато — путем изменения вторичного напряжения сварочного трансформатора и плавно — путем фазового регулирования выпрямителя.

Машина должна быть снабжена отключающими устройствами, рассчитанными на максимальную мощность.

Машины рассчитываются на номинальную работу при колебаниях напряжения питающей сети от –10 до +5 % номинального.

В машинах для контактной сварки предусматривается водяное охлаждение электродов, токоподводов, электрододержателей, вторичного витка сварочного трансформатора и других частей вторичного контура.

Машины для точечной сварки. Серийные машины для точечной сварки изготавливают на номинальные токи: до 40 кА при питании от однофазной сети переменного тока; до 160 кА при питании от трехфазной сети переменного тока; конденсаторные.

Наибольшее распространение в современных машинах для точечной сварки получил пневматический привод сжатия электродов.

Для сварки низколегированной стали выпускаются стационарные машины с радиальным ходом верхнего электрода (табл. 60.70). Машину типа МТ-604 выпускают в двух вариантах: с пневматическим и с механическим приводом сжатия электродов. В машинах с радиальным ходом установлены бесконтактные регуляторы цикла сварки, синхронные тиристорные контакторы и воздушные распределители с электропневматическим управлением. Машина типа МТ-810 показана на рис. 60.145. Отличительной особенностью машин этого типа является горизонтальное размещение пневматического привода *5* сжатия электродов на силовой стойке корпуса *1* машины.

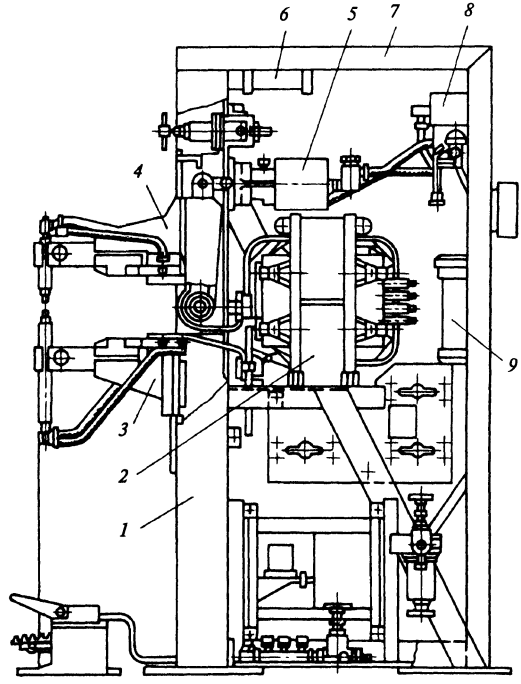


Рис. 60.145. Машина для точечной сварки типа МТ-810:

1 — корпус; *2* — сварочный трансформатор; *3* — нижний кронштейн; *4* — угловой рычаг; *5* — пневмопривод; *6* — регулятор цикла сварки; *7* — Г-образный кожух; *8* — электропневматический клапан; *9* — автоматический выключатель

Таблица 60.70. **Технические данные однофазных машин для точечной сварки с радиальным ходом верхнего электрода**

Параметр	МТ-604	МТ-810	МТ-1214	МТ-1614
Напряжение сети, В	220/389	380	380	380
Мощность, кВ · А	14,8	20	50	85
Первичный ток, А	67/38,6	52,5	132	224
Сварочный ток, кА	6,3	8	12,5	16
Число ступеней регулирования	4	8	8	8
Вылет электродов, мм	250	300	400	500
Усилие сжатия электродов, кН	2	3	5	6,3
Диапазон толщин свариваемых деталей из низкоуглеродистой стали, мм	0,2—2	0,25—3	0,5—4	0,5—5
Число сварок в минуту	180	200	200	200
Расход охлаждающей воды, л/ч	140	180	210	230
Габаритные размеры, мм:				
высота	1237	1410	1574	1574
ширина	452	410	430	410
длина	833	1083	1230	1340
Масса, кг	200	325	440	540
Тип регулятора цикла сварки	РЦС-301	РЦС-403	РЦС-403	РЦС-403

Таблица 60.71. **Технические данные однофазных машин переменного тока для точечной сварки**

Параметр	МТ-1217	МТ-1222	МТ-1223	МТ-1617	МТ-1618	МТ-2002	МТ-2517	МТ-4017
Мощность, кВ · А	65	60	85	110	100	221	170	495
Сварочный ток, кА	12,5	12,5	12,5	16	16	20	25	40
Число ступеней регулирования	6	8	8	6	6	8	—	8
Вылет электродов, мм	500	500	500	500	500	1250	500	500
Усилие сжатия электродов, кН	3	6	15	6	6	20	12	25
Диапазон толщин свариваемых деталей из низкоуглеродистой стали, мм	0,7—1,5	0,5—5	—	0,8—2,3	0,8—2,3	1—4	1—4	2,5—8
Быстродействие, ход/мин	250	375	150	300	300	150	150	70
Расход воды, л/ч	700	600	700	700	700	1000	1000	1100
Габаритные размеры, мм:								
высота	1810	1900	2250	1820	1695	2320	2200	2370
ширина	490	386	550	490	450	590	550	590
длина	1425	1340	1700	1425	1420	2450	1685	1600
Масса, кг	750	440	1110	800	800	1680	1200	1430

Машины МТ-1214 и МТ-1614 имеют идентичное с машиной МТ-810 исполнение и отличаются друг друга только размерами и техническими данными. Кроме того, машина МТ-1614 имеет двухпоршневой пневмопривод, обеспечивающий дополнительный ход верхнего электрода (табл. 60.71).

Для сварки низкоуглеродистых и легированных сталей и сплавов выпускаются однофазные машины переменного тока с прямолинейным ходом верхнего электрода (табл. 60.72). Машины этой группы имеют пневматические приводы сжатия электродов, снабжены бесконтактными регулято-

Таблица 60.72. **Технические данные машин для точечной сварки**

Параметр	МРВР-4001	МТВ-6304	МТВ-8002	МТВ-16002
Мощность, кВ · А	350	600	600	1200
Сварочный ток, кА	40	63	80	160
Число ступеней регулирования	6	8	8	8
Вылет электродов, мм	800—1200	1500	1500	1700
Усилие сжатия электродов, кН	1—12	2—50	4—70	13—200
Диапазон толщин свариваемых деталей из легированной стали и титановых сплавов, мм	2,5	0,5—5	0,8—5	3—10
Номинальный темп работы, циклы/мин	60	60	20	10
Расход охлаждающей воды, л/ч	3000	3200	4800	7200
Габаритные размеры, мм:				
высота	1637	2550	1750	4000
ширина	900	950	1160	1160
длина	3020	3660	3455	3635
Масса, кг	2640	4200	6600	14 000

рами цикла сварки, синхронными тиристорными прерывателями и сварочными трансформаторами с обмотками, залитыми эпоксидным компаундом.

Для точечной сварки крупногабаритных изделий из легированных сталей, легких сплавов, титановых сплавов и низкоуглеродистой стали выпускают стационарные машины с выпрямлением тока (табл. 60.72). Машины предназначены для питания от сети трехфазного переменного тока. Машину со сварочным током на 40 кА выпускают с радиальным ходом верхнего электрода, остальные машины — прессового типа.

Для сварки изделий из легких сплавов, легированных и жаропрочных сталей, а также из сплавов других цветных металлов серийно выпускаются конденсаторные машины (табл. 60.73). В этих машинах сварку производят за счет энергии, запасенной в батарее электролитических конденсаторов низкого напряжения, которые заряжаются от сети переменного тока до определенного напряжения через управляемый выпрямитель. Переключающим устройством батарею разряжают через первичную обмотку сварочного трансформатора, а на сварочном токе во вторичной обмотке этого трансформатора осуществляют сварку. К преимуществам машин для конденсаторной сварки следует отнести стабильность сварочного импульса, к недостаткам — сложность и более высокую стоимость. Выпускаются также конденсаторные машины малой мощности, применяемые в приборостроении, радиоэлектронике, электротехнике и в других отраслях промышленности (табл. 60.74).

Машина МТК-1601 (рис. 60.146) может работать с одним или двумя импульсами сварочного то-

Таблица 60.73. **Технические данные конденсаторных машин для точечной сварки**

Параметр	МТК-5001	МТК-6301	МТК-8004
Мощность, кВ · А	20	40	70
Номинальный сварочный ток, кА	50	63	80
Максимальная емкость батареи конденсаторов, мФ	105	167	315
Усилие сжатия электродов, кН:			
сварочное	1,5—5	1,5—10	1,8—25
ковочное	5—17	3—22	7—50
Номинальный вылет электродов, мм	600	1200	1500
Рекомендуемые толщины свариваемых деталей из сплавов алюминия и титана, мм	0,3—1,5	0,5—2	0,3—2,5
Расход охлаждающей воды, л/ч	800	900	3000
Габаритные размеры, мм:			
высота	2400	2550	3190
ширина	2460	2710	3820
длина	1000	910	1260
Масса, кг	2700	4500	6000

Примечание. Напряжение сети 380 В. Рабочий ход верхнего электрода 20 мм.

Таблица 60.74. **Технические данные конденсаторных машин малой мощности**

Парамстр	ТКМ-14	ТКМ-15	МТК-1601
Мощность, кВ · А	0,3	0,6	2,0
Номинальный сварочный ток, кА	—	—	16,0
Максимальная емкость батареи конденсаторов, мФ	0,75	0,6	3,2
Усилие сжатия электродов, Н	0,5—70	10—500	90—630
Вылет электродов, мм	150	150	150
Рскомендусмая толщина, сваривасмых дсталей, мм	Никель 0,1—0,2	Низкоуглсродистая сталь	
		0,5—0,7	0,05—0,8
Габаритные размеры, мм:			
высота	1000	685	1365
ширина	780	800	940
длина	1285	1285	980
Масса, кг	200	200	400

ка. В этой машине регулируются: емкость батареи конденсаторов, коэффициент трансформации сварочного трансформатора, напряжение заряда батареи конденсаторов, усилие сжатия электродов, скорость опускания верхнего электрода, время паузы между импульсами сварочного тока, полярность импульса, при автоматической работе — число сварок в единицу времени.

Крупногабаритные, громоздкие изделия, точечная сварка которых затруднена или невозможна на стационарных сварочных машинах, сваривают с помощью подвесных машин, или клещей, со встроенными трансформаторами. Особенно широко применяются такие машины в автомобилестроении, для сварки арматурных каркасов железобетонных изделий и т.д.

Подвесные машины состоят из сварочного трансформатора, закрепленного на специальном подвесном устройстве, и сварочных клещей, которые являются рабочим инструментом. Клещи соединяются со сварочным трансформатором одним или двумя токоведущими гибкими кабелями. Для облегчения пользования клещи подвешивают на стальном тросе с пружинами или грузовым противовесом. Машины комплектуются тиристорными контакторами и регуляторами цикла сварки. Сварочные трансформаторы подвесных машин имеют повышенное вторичное напряжение, так как

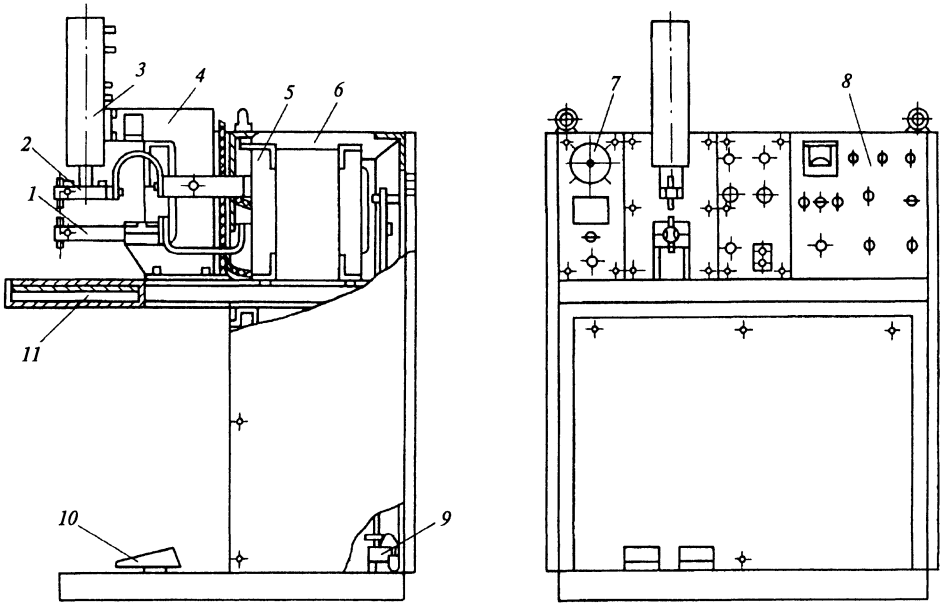


Рис. 60.146. Конденсаторная машина для точечной сварки типа МТК-1601:

1 — нижний элсктрододсржатсль; *2* — верхний элсктрододсржатсль; *3* — пнсвматичсский привод сжатия; *4* — кронштсйн крсплсния пнсвмопривода; *5* — сварочный трансформатор; *6* — корпус машины; *7* — пнсвматическое устройство; *8* — пульт управлсния; *9* — систсма охлаждсния; *10* — педальная кнопка; *11* — горизонтальный столик

Таблица 60.75. **Технические данные машин для сварки плоских арматурных каркасов**

Параметр	МТМ-90	МТМС-10×35	АТМС-14×75-7-1	МТМ-35	МТМ-32
Число сварочных трансформаторов	2	10	18	4	5
Сварочный ток одного трансформатора, кА	12,5	8	12,5	25	20
Усилие одного пересечения, кН	5	2	5	10	10
Ширина свариваемого каркаса, мм	600	2000	3800	1200	3000
Диаметр продольных стержней, мм	3—10	3—8	3—12	12—40	12—32
Габаритные размеры, мм					
высота	1700	1685	1776	1500	1960
ширина	3200	2950	5000	3250	3580
длина	2810	2480	3442	2300	2740
Масса, кг	3085	3500	8000	4600	5500

Таблица 60.76. **Технические данные машин для рельефной сварки**

Параметр	МР-2517	МР-4017	МР-6303	МР-8001	МР-10002
Мощность, кВ · А	160	368	600	850	1300
Номинальный сварочный ток, кА	25	40	63	80	100
Число ступеней регулирования	6	8	16	16	16
Расстояние между электродными плитами, мм	330	330	450	450	450
Максимальное усилие сжатия плит, кН	16	24	30	30	80
Быстродействие, ход/мин	150	70	60	60	60
Габаритные размеры, мм:					
высота	2200	2370	3330	3330	3650
ширина	531	590	1030	1030	1030
длина	1470	1250	1550	1550	1550
Масса, кг	615	1430	3000	3000	3650

Примечание. Вылет (до центра плиты) 300 мм.

соединительные токоведущие кабели имеют высокое сопротивление, а в случае применения двух кабелей и индуктивное сопротивление.

Для сварки плоских каркасов из горячекатаной и холоднотянутой проволоки, используемых в производстве железобетонных изделий, серийно выпускаются специализированные многоэлектродные машины (табл. 60.75). Рабочий цикл машины задается программным устройством.

Машины для рельефной сварки. Эти машины по конструкции мало отличаются от аналогичных машин для точечной сварки. Однофазные машины переменного тока с одним сварочным трансформатором выпускают на токи 25 и 40 кА; это машины с пневматическим приводом сжатия и прямолинейным ходом верхнего электрода. От точечных машин они отличаются конструкцией электродов, выполненных в виде двух плит с Т-образными пазами для установки приспособлений и закрепления свариваемых деталей, меньшими вылетами и повышенной жесткостью корпуса. Кроме того, выпускаются рельефные машины на сварочные токи 63, 80 и 100 кА с двумя однофазными трансформаторами. Технические данные машин серии МР приведены в табл. 60.76.

Машины для шовной сварки. Машины для шовной сварки во многом подобны машинам для точечной сварки и отличаются в основном конструкцией электродных частей и наличием привода вращения электродов. У машин для шовной сварки электроды выполнены в виде роликов, между которыми зажимают свариваемые детали. Один или оба ролика соединяют с приводом вращения. Серийно выпускаются стационарные машины для шовной сварки с питанием силовой части от однофазной сети переменного тока на сварочные токи 10—32 кА (табл. 60.77), что позволяет сваривать изделия из низкоуглеродистой стали толщиной от 0,5 + 0,5 до 3 + 3 мм (рис. 60.147).

Для шовной сварки изделий из легированной стали и легких сплавов используются машины с выпрямлением тока на сварочные токи 16, 63 и 120 кА (табл. 60.78).

Машины для стыковой сварки. Машины для стыковой сварки находят применение для соединения стержней, труб, арматуры железобетона, рельсов и т.п. Для стыковой сварки сопротивлением се-

Таблица 60.77. **Технические данные однофазных машин для шовной сварки**

Параметр	МШ-1001	МШ-1601	МШ-2001	МШ-3201
Мощность, кВ · А	31	75	127	323
Сварочный ток, кА	10	16	20	32
Число ступеней регулирования	8	8	6	6
Вылет электродов, мм	400	400	800	800
Усилие сжатия электродов, кН	25	50	80	120
Скорость сварки, м/мин	1—5	0,8—4,5	0,4—4,5	0,4—4,5
Диапазон толщин свариваемых деталей из низкоуглеродистых сталей, мм	0,5—1,2	0,5—1,5	0,5—1,8	0,8—3,0
Расход охлаждающей воды, л/ч	350	450	1100	2500
Габаритные размеры, мм:				
высота	1405	1770	2295	2360
ширина	520	510	720	720
длина	1270	1455	2395	2395
Масса, кг	526	620	1350	1700

Таблица 60.78. **Технические данные машин для шовной сварки постоянным током**

Параметр	МШВ-1601	МШВ-6301	МШ-12001
Мощность, кВ · А	133	533	1100
Номинальный сварочный ток, кА	16	63	120
Номинальный длительный вторичный ток, кА	11,2	36	56
Число ступеней регулирования	8	24	8
Вылет электродов, мм	1500	1200	1300
Усилие сжатия электродов, кН	2—20	2—20	6—50
Скорость перемещения детали при непрерывном вращении роликов, м/мин	0,2—0,8	0,2—0,8	—
Рекомендуемые толщины свариваемых деталей из коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и легких сплавов, мм	0,3—3,0	0,3—3,0	1,5—5
Габаритные размеры, мм:			
высота	2680	2770	3725
ширина	960	1000	1300
длина	3320	3525	3735
Масса, кг	3700	6300	8500

рийно выпускают стационарные машины с ручными эксцентриковыми механизмами зажатия и пружинными механизмами подачи на номинальные сварочные токи 4, 5 и 8 кА.

Для стыковой сварки оплавлением низкоуглеродистых и легированных сталей, а также цветных металлов выпускают серию унифицированных машин МСО (табл. 60.79, рис. 60.148). Промышленностью выпускаются специальные рельсосварочные машины для контактной стыковой сварки непрерывным оплавлением непосредственно на железнодорожных путях. Такие машины можно использовать и в стационарных условиях. Привод всех механизмов машины — гидравлический (табл. 60.80).

Системы управления машинами контактной сварки. Особенностью цикла сварки является кратковременность составляющих его элементов. Надежность сварных соединений зависит от правильности выбранного режима сварки и его стабильной повторяемости, что определяет особые требования к аппаратуре управления, которая должна быть максимально автоматизирована, малоинерционна, должна обладать высокой чувствительностью, точностью работы и эксплуатационной надежностью. При помощи аппаратуры управления осуществляются: включение, регулирование и выключение сварочного тока; регулирование последовательности и продолжительности отдельных операций цикла сварки, в том числе и времени протекания тока; изменение частоты вращения роликов шовной машины или скорости перемещения подвижной плиты (стыковые машины); включение и регулирование усилия сжатия электродов и т.п. В контактных машинах преобладает аппаратура управления однофазными машинами — регуляторы времени, прерыватели, вентильные контакторы. Регуляторы цикла сварки регулируют ток и стабилизируют его при колебаниях напряжения сети. Большинство однофазных машин переменного тока оснащено тиристорными контакторами, при этом достигается значительный технико-экономический эффект вследствие упрощения схем включения тиристоров, уменьшения рассеиваемых энергетических потерь, повышения стабильности работы и уменьшения габаритных размеров. Контакторы на

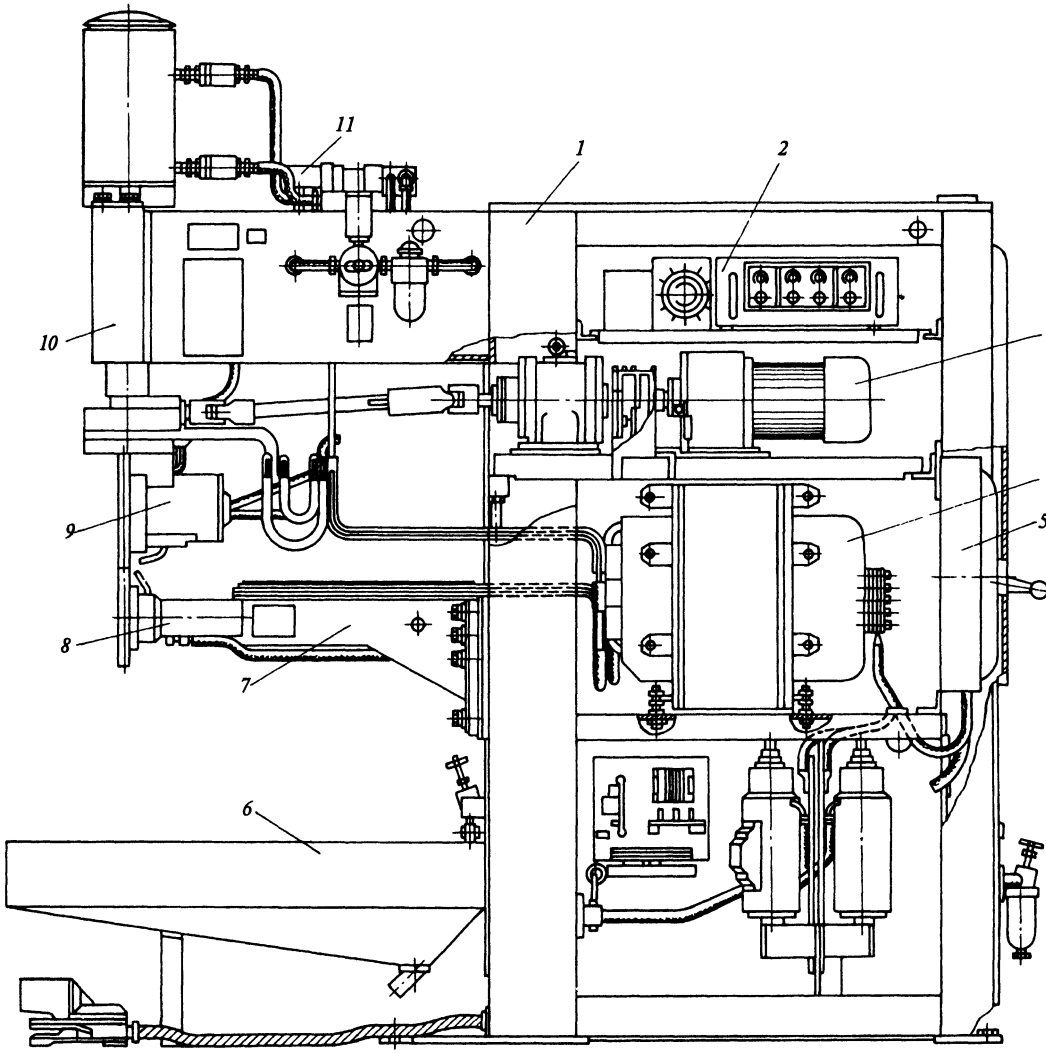


Рис. 60.147. Машина для шовной сварки типа МШ-3201:

1 — корпус машины; *2* — регулятор цикла сварки; *3* — электромеханический привод; *4* — сварочный трансформатор; *5* — автоматический выключатель; *6* — корыто для слива воды; *7* — кронштейн нижнего электрода; *8* — нижний электрод; *9* — верхний электрод; *10* — пневматический привод сжатия электродов; *11* — элементы управления приводом сжатия электродов

тиристорах различных типоразмеров различаются коммутируемым током (табл. 60.81).

На рис. 60.149 представлена схема тиристорного контактора КТ-1У4. Импульсы управления с частотой 100 Гц поступают на тиристоры *V1M* и *V2M*, но включается только тот, анод которого находится под положительным потенциалом. Цепочка *R1*, *R2*, *C1* ограничивает скорость восстановления напряжения на тиристорах во время коммутации тока в целях предотвращения возможности самопроизвольного включения, а также снижает импульсы перенапряжений. Все применяемые контакторы имеют импульсное управление и могут работать только с регуляторами, оснащенными фазоимпульсными выходными устройствами. В контактных машинах принято обязательное водяное охлаждение тиристоров.

Последовательность действия механизмов машины для точечной сварки определяется регулятором времени или регулятором цикла сварки, которые либо являются самостоятельными устройствами, либо входят в виде отдельного функционального блока в состав шкафов управления сварочными машинами и работают по определенной заранее установленной программе.

Таблица 60.79. **Технические данные машин для стыковой сварки оплавлением**

Параметр	МСО-0801	МСО-0802	МСО-2301	МСО-602
Номинальная мощность, кВ · А	24		100	190
Номинальный длительный вторичный ток, кА	5		12,5	12,5
Номинальный сварочный ток, кА	6,3		18	25
Номинальное усилие, кН:				
зажатия	16		50	125
осадки	8		25	63
Диапазон свариваемых сечений, мм^2, из сталей:				
низкоуглеродистых	50—160		100—800	200—2000
легированных	50—100		100—300	200—800
Максимальная производительность при сварке низкоуглеродистой стали, сварки/ч	600	150	350	250
Габаритные размеры, мм:				
высота	1450	1440	1240	1367
длина	860	1000	2000	2265
ширина	1085	1080	900	1110
Масса, кг	1000	1000	1700	2500

Примечание. Напряжение сети 380 В.

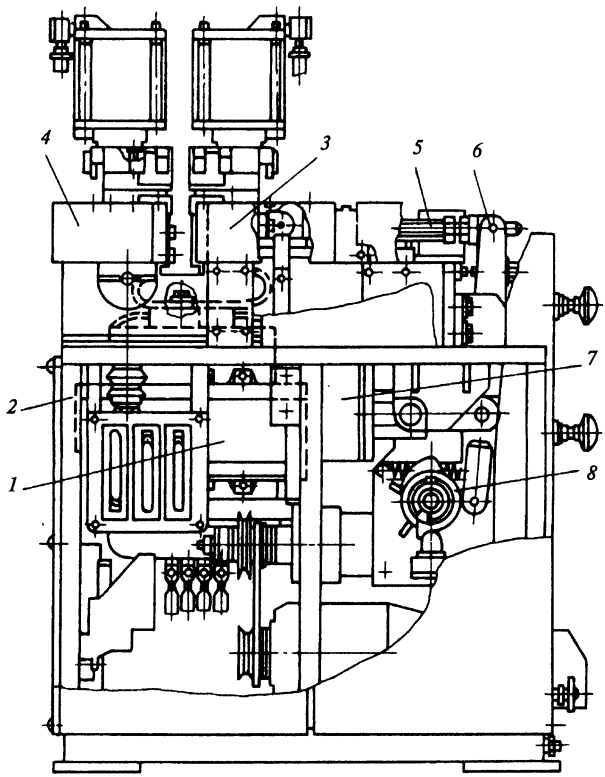


Рис. 60.148. Машина для стыковой сварки оплавлением типа МСО-0801:

1 — сварочный трансформатор; *2* — корпус машины; *3* — каретка с подвижным зажимом; *4* — неподвижный зажим; *5* — тяга; *6* — рычаг пневмопривода осадки; *7* — пневмопривод осадки; *8* — моторно-кулачковый привод оплавления

Таблица 60.80. **Технические данные универсальных машин для стыковой сварки рельсов**

Параметр	К-190П	К-355	К-617	АСГЦ-150-3
Мощность, кВ · А	150	150	150	100
Номинальный длительный вторичный ток, кА	16	14	9	11,2
Номинальное усилие, МН:				
зажатия	1,0	1,25	0,32	0,03
осадки	0,5	0,45	0,16	0,12
Площадь свариваемых сечений, мм^2	Менее 10 000	3000—10 000	1000—4000	380
Габаритные размеры, мм:				
высота	2500	1140	1450	2550
ширина	1080	1050	1850	2150
длина	3200	1810	1600	3130
Масса, кг	7800	2375	3660	4850

Примечание. Напряжение сети 380 В.

Таблица 60.81. **Технические данные тиристорных контакторов**

Параметр	КТ-01У4	КТ-02У4	КТ-03У4	КО-04У4
Напряжение сети, В	380	220	380	380
Номинальный ток, А, при ПВ, %:				
50	200	800/700*	800/700*	1300/1200*
20	250	850/750	850/750	1400/1300
5	—	1000/850	1000/850	1600/1500
Максимальный ток при ПВ 20 %, А	280	1100/900	1100/900	1800/1600
Номинальный ток тиристора, А	200	500	500	800
Номинальный расход охлаждающей воды, л/мин	2	2	2	6
Габаритные размеры, мм:				
ширина	320	325/420**	375/420**	375/420**
высота	300	430/650	470/650	470/650
длина	260	260/340	260/340	260/340
Масса, кг	6,9	17/30**	17/30**	17/30**

* В числителе указан номинальный ток при длительности включения не более 0,5 с, в знаменателе — при длительности включения до 20 с.

** В знаменателе указаны размеры и масса контакторов закрытого исполнения.

Примечание. Температура охлаждающей воды не более 40 °С; длительность импульса управления не менее 100 мкс; максимальное импульсное напряжение 900 В.

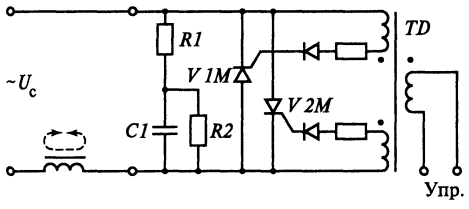


Рис. 60.149. Электрическая схема тиристорного контактора КТ-1У4

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

60.1. **Свенчанский А.Д.** Электрические промышленные печи. Ч. 1. Электрические печи сопротивления. М.: Энергия, 1975.

60.2. **Электротермическое** оборудование: Справочник / Под ред. А.П. Альтгаузена. —2-е изд. М.: Энергия, 1980.

60.3. **Миронов Ю.М. Миронова А.Н.** Электрооборудование и электроснабжение электротермиче-

ских плазменных и лучевых установок. М.: Энергоатомиздат, 1991.

60.4. **Арендарчук А.В., Бородачев А.С., Филиппов В.И.** Общепромышленные печи периодического действия. М.: Энергоатомиздат, 1990.

60.5. **Общепромышленные** электропечи непрерывного действия / А.В. Арендарчук, Н.М. Катель, В.Я. Липов и др. М.: Энергия, 1977.

60.6. **Мармер Э.Н., Мурованная С.Г.** Электропечи для термовакуумных процессов. М.: Энергия, 1977.

60.7. **Романов Д.И.** Электроконтактный нагрев металлов. М.: Машиностроение, 1981.

60.8 **Соседов В.П., Чалых Е.Ф.** Графитизация углеродистых материалов. М.: Металлургия, 1987.

60.9. **Материалы** для электротермических установок: Справочное пособие / Н.В. Большакова, К.С. Борисанова, В.И. Бурцева и др. М.: Энергоатомиздат, 1987.

60.10. **Сплавы** для нагревателей / Л.Л. Жуков, И.М. Племянникова, М. Н. Миронова и др. М.: Металлургия, 1985.

60.11. **Привалов С.М.** Электробытовые устройства и приборы. СПб.: Лениздат, 1994.

60.12. **Варшавский А.С., Волкова Л.В., Костылев В.А.** Бытовые нагревательные электроприборы. М.: Энергоиздат, 1981.

60.13. **Чукаев Д.С.** Электрификация городского быта. М.: Высшая школа, 1974.

60.14. **Кацевич Л.С.** Теория теплопередачи и тепловые расчеты электрических печей. М.: Энергия, 1977.

60.15. **Попов А.Н.** Отечественное электропечное оборудование нового поколения для электросталеплавильного комплекса производительностью до 1,2 млн т // Электрометаллургия. 2000. № 7. С. 2—9.

60.16 **Аншин В.Ш., Крайз А.Г., Мейксон В.Г.** Трансформаторы для промышленных электропечей / Под ред. А.Г. Крайза. М.: Энергоиздат, 1982.

60.17. **Крутянский М.М., Малиновский В.С., Хотин В.А.** Перевод дуговых сталеплавильных электропечей на постоянный ток как средство решения экологических проблем // Электротехническая промышленность. Электротермия. 1984. № 4. С. 8—9.

60.18. **Рысс М.А.** Производство ферросплавов. М.: Металлургия, 1975.

60.19. **Актуальные** проблемы создания дуговых и рудотермических печей: Сб. научн. трудов ВНИИЭТО. М.: Энергоатомиздат, 1984. С. 54—83.

60.20. **Рудовосстановительные** электропечи: Сб. научн. работ ВНИИЭТО. М.: Энергоатомиздат, 1988.

60.21. **Неуструев А.А., Ходоровский Г.Л.** Вакуумные гарниссажные печи. М.: Металлургия, 1967.

60.22. **Гитгарц Д.А.** Автоматизация плавильных электропечей с применением микроЭВМ. М.: Энергоатомиздат, 1984.

60.23. **Электрошлаковые** печи / Б.И. Медовар, Л.М. Ступак и др.; Под ред. Б.Е. Патона. Киев: Наукова думка, 1978.

60.24. **Машиностроение:** Энциклопедия. Машины и агрегаты металлургического производства. Т. IV-5 / Н.В. Пасечник, В.М. Синицкий и др.; Под ред. В.М. Синицкого, Н.В. Пасечника. М.: Машиностроение, 2000.

60.25. **Кувалдин А.Б.** Индукционный нагрев ферромагнитной стали. М.: Энергоатомиздат, 1988.

60.26. **Кувалдин А.Б.** Теория индукционного и диэлектрического нагрева. М.: Издательство МЭИ, 1999.

60.27. **Преобразователи** частоты серии ТПЧ / Промышленный каталог. 05.73.06-98. М.: Информэлектро, 1998.

60.28. **Васильев А.С.** Ламповые генераторы для высокочастотного нагрева. Л.: Машиностроение, 1990.

60.29. **Княжевская Г.С., Фирсова М.Г., Килькеев Р.Ш.** Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов. Л.: Машиностроение, 1989.

60.30. **Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З.** Электронно-лучевая технология: Пер с нем. М.: Энергия, 1980.

60.31. **Электронные** плавильные печи / Под ред. М. Я. Смелянского. М.: Энергия, 1971.

60.32. **Мовчан Б.А., Тихановский А.Л., Курапов Ю.А.** Электронно-лучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов. Киев: Наукова думка, 1973.

60.33. **Башенко В.В.** Электронно-лучевые установки. Л.: Машиностроение, 1972.

60.34. **Конструктивные** особенности вакуумных установок для нанесения покрытия электронно-лучевым способом: Обзор / А.Н. Жунда, Э.В. Ядин., А.Л. Емельянов и др. Рига: ЛатНИИНТИ, 1987.

60.35. **Электротермическое** оборудование: Справочник / Под ред. А. П. Альтгаузена. —2-е изд. М.: Энергия, 1980.

60.36. **Теория** термической электродуговой плазмы. Ч. 1. Методы математического исследования плазмы / Под ред. М.Ф. Жукова, А.С. Коротеева. Новосибирск: Наука, 1987.

60.37. **Термохимические** катоды / М.В. Жуков, А.С. Пустогаров, Г.Б. Дандарон, А.И. Тимошевский Новосибирск: СО АН СССР, 1985.

60.38. **Гордеев В.Ф., Пустогаров А.В.** Термоэмиссионные дуговые катоды. М.: Энергоатомиздат, 1988.

60.39. **Коротеев А.С., Миронов В.М., Свирчук Ю.С.** Плазмотроны: конструкции, характеристики, расчет. М.: Машиностроение, 1993.

60.40. **Плазмохимические** реакции и процессы / Под ред. Л.С. Полака. М.: Наука, 1977.

60.41. **Бугаенко Л.Т., Кузьмин М.Г., Полак Л.С.** Химия высоких энергий. М.: Химия, 1988.

60.42. **Каламазов Р.У., Цветков Ю.В., Кальков А.А.** Высокодисперсные порошки вольфрама и молибдена. М.: Металлургия, 1988.

60.43. **Туманов Ю.Н.** Низкотемпературная плазма и высокочастотные электромагнитные поля в процессах получения материалов для ядерной энергетики. М.: Энергоатомиздат, 1989.

60.44. **Маленькая** энциклопедия / Под ред. С.А. Ахманова и др. «Квантовая электроника». М.: Советская энциклопедия, 1969.

60.45. **Волков И.В., Вакуленко В.И.** Источники электропитания лазеров. Киев: Техніка, 1976.

60.46. **Справочник** по технологии лазерной обработки / В.С. Коваленко, В.П. Кошляров, В.П. Дятел и др. Киев: Техніка, 1985.

60.47. **Аллен Л., Джонс Д.** Основы физики газовых лазеров. М.: Наука, 1970.

60.48. **Маршак И.С.** импульсные источники света. М.: Госэнергоиздат, 1963.

60.49. **Андерсон Дж.** Газодинамические лазеры: Введение. М.: Мир, 1979.

60.50. **Сафонов А.Н., Микульшин Г.Ю.** Лазерные технологические комплексы. М.: Металлургия, 1993.

60.51. **Минеев А.Р.** Энергосберегающая статистическая и динамическая оптимизация параметров и структур компьютеризированных электроприводов (на примере электрических печей) // Электротехника. 1998. № 10. С. 15—22.

60.52. **Минеев А.Р., Рубцов В.П.** Статистические и динамические показатели качества работы электротехнических установок (на примере электропечей) // Электротехника. 2000. № 1. С. 42—51.

60.53. **Минеев Р.В., Бадажков О.А., Игнатов И.А.** Опыт эксплуатации дуговых печей малой и средней емкости. М.: Металлургия, 1988.

60.54. **Гитгарц Д.А., Изаксон-Демидов Ю.А., Каллистратов В.А.** Системы автоматического управления электротермическими установками с применением УВК на базе микроЭВМ // Электротехника. 1984. № 2. С. 45—47.

60.55. **Минеев А.Р., Рубцов В.П.** Статистические показатели электропотребления и методы облегчения работы цехового электротехнического оборудования (на примере электропечей) // Электротехника. 2000. № 5. С. 48—54.

60.56. **Муканов Д.М., Савченко В.Л., Самыгин Р.П.** Регулятор мощности для дуговых сталеплавильных и ферросплавных печей // Сталь. 1987. № 3. С. 37—39.

60.57. **Минеев А.Р.** Разработка методов и структур прогнозирования режима работы электротермических установок // Электротехника. 1997. № 10. С. 54—57.

60.58. **Минеев Р.В., Антипанов А.Н.** Новые методы энергосберегающего управления с ЭВМ при производстве никеля: Сб. трудов ВНИПИэнергопрома. 1992. Т. 2. С. 452—457.

60.59. **Дмитриев И.Ю., Минеев А.Р., Рубцов В.П.** Новые возможности особо точного управления электрометаллургическими процессами на базе современных достижений микропроцессорной техники // Электрометаллургия. 2000. № 11. С. 26—31.

60.60. **Лившиц А.Л., Отто М.Ш.** Импульсная электротехника. М.: Энергоатомиздат, 1983.

60.61. **Донский А.В., Келлер О.К., Кратый Г.С.** Ультразвуковые электротехнологические установки. Л.: Энергоиздат, 1982.

60.62. **Волков Ю.С., Лившиц А.Л.** Введение в теорию формообразования электрофизикохимическими методами. Киев: Вища школа, 1978.

60.63. **Электроимпульсная** обработка металлов / А.Л. Лившиц, А.Т. Кравец, И.С. Рогачев, А.Б. Сосенко. М.: Машиностроение, 1967.

60.64. **Попилов Л.Я.** Справочник по электрическим и ультразвуковым методам обработки материалов. Л.: Машиностроение, 1971.

60.65. **Лившиц А.Л., Рогачев И.С., Отто М.Ш.** Генераторы импульсов. М.: Энергия, 1970.

60.66. **Фрунгель Ф.** Импульсная техника. генерирование и применение разрядов конденсаторов: Пер. с нем. М.: Энергия, 1965.

60.67. **Размерная** электрическая обработка материалов / Б.А. Артамонов, А.Л. Винницкий, Ю.С. Волков, А.В. Глазков. М.: Высшая школа, 1978.

60.68. **Отто М.Ш., Коренблюм М.В.** Схемы и конструкции генераторов для питания электроэрозионных станков. М.: Информэлектро, 1977.

60.69. **Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н.** Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение, 1975.

60.70. **Волков И.В., Вакуленко В.И.** Источники электропитания лазеров. Киев: Техніка, 1976.

60.71. **Импульсные** источники света / Под ред. И.С. Маршака. М.: Энергия, 1978.

60.72. **Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А.** Основы электронно-лучевой обработки. М.: Машиностроение, 1978.

60.73. **Седыкин Ф.В.** Размерная электрохимическая обработка деталей машин. М.: Машиностроение, 1976.

60.74. **Сафронов А.И., Бондаренко Н.Н., Розман Я.Б.** Источники технологического тока для электрохимических станков и гальванических ванн. М.: НИИмаш, 1975.

60.75. **Коренблюм М.В., Левит М.Л., Лившиц А.Л.** Адаптивное управление электроэрозионными станками М.: НИИмаш, 1978.

60.76. **Электрохимические** и электрофизические станки: Каталог / Под ред. А.Л. Лившица. М.: НИИмаш, 1978.

60.77. **Принципы** построения и оптимизации схем индуктивно-емкостных преобразователей / И.В. Волков, В.И. Губаревич, В.Н. Исаков и др. Киев: Наукова думка, 1981.

60.78. **Булатов О.Г., Царенко А.И.** Тиристорно-конденсаторные преобразователи. М.: Энергоиздат, 1982.

60.79. **Наугольных К.А., Рой Н.А.** Электрические разряды в воде М.: Наука, 1971.

60.80. **Оборудование** и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта / Г.А. Гулый, П.П. Малюшевский, С.А. Петрусенко и др. М.: Машиностроение, 1977.

60.81. **Малюшевский П.П.** Основы разрядно-импульсной технологии. Киев: Наукова думка, 1983.

60.82. **Мазуровский Б.Я., Сизёв А.Н.** Электрогидравлический эффект в листовой штамповке. Киев: Наукова думка, 1983.

60.83. **Разрядно-импульсная** технология обработки минеральных сред / Г.Н. Гаврилов, Г.Г. Горовенко, П.П. Малюшевский, А.Г. Рябинин. Киев: Наукова думка, 1979.

60.84. **Кривицкий Е.В., Шамко В.В.** Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев: Наукова думка, 1979.

60.85. **Импульсные** методы обработки материалов. Минск: Наука и техника, 1977.

60.86. **Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т.** Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Харьков: Вища школа, 1977.

60.87. **Фукс Н.А.** Механика аэрозолей М.: Изд-во АН СССР, 1955.

60.88. **Основы** электрогазодинамики дисперсных систем / И.П. Верещагин, В.И. Левитов, Г.З. Мирзабекян, М.М. Пашин. М.: Энергия, 1974.

60.89. **Верещагин И.П.** Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. М.: Энергоатомиздат, 1985.

60.90. **Физические** основы электросепарации / Под ред. В. И. Ревнивцева М.: Недра, 1983.

60.91. **Дымовые** электрофильтры / Под ред. В.И. Левитова. М.: Энергия, 1980.

60.92. **Попков В.И., Глазов М.И.** Кинетика зарядки и динамика волокон в электрическом поле. М.: Наука, 1976.

60.93. **Сильные** электрические поля в технологических процессах (электронно-ионная технология) / Под ред. В.И. Попкова. М.: Энергия, 1969. Вып. 1. 1972. Вып. 2. 1979. Вып. 3.

60.94. **Олофинский Н.Ф.** Электрические методы обогащения М.: Недра, 1977.

60.95. **Аэрозоли** / К. Спурный, Ч. Йех, Б. Седлачек, О. Шторх: Пер. с чеш. / Под ред. К.П. Маркова и М.Н. Пчельникова. М.: Атомиздат, 1964.

60.96. **Технология** и оборудование для нанесения полимерных покрытий в электрическом поле / И.П. Верещагин, Л.Б. Котлярский, В.С. Морозов, М.М. Пашин и др. М.: Энергоатомиздат, 1990.

60.97. **Яковлев А.Д.** Химия и технология лакокрасочных покрытий. Л.: Химия, 1989.

60.98. **Электрофизические** основы техники высоких напряжений: Учебник для вузов / И.М. Бортник, И.П. Верещагин, Ю.Н. Вершинин и др.; Под ред. И.П. Верещагина, В.П. Ларионова. М.: Энергоатомиздат, 1993.

60.99. **Яковлев А.Д.** Порошковые краски. Л.: Химия, 1987.

60.100. **Сварка** в машиностроении: Справочник / Под ред. Ю.Н. Зорина. Т. 4. М.: Машиностроение, 1979.

60.101. **Патон Б.Е.** Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. М.: Машиностроение, 1974.

60.102. **Технология** и оборудование контактной сварки / Под ред. Б.Д. Орлова. М.: Машиностроение, 1975.

60.103. **Сергеев Н.П.** Справочник сварщика. М.: Высшая школа, 1975.

60.104. **Браткова О.Н.** Источники питания сварочной дуги: Учебник. М.: Высшая школа, 1982.

60.105. **Прох Л.Ц., Шпаков Б.М., Яворская Н.М.** Справочник по сварочному оборудованию. —2-е изд. Киев: Техніка, 1982.

Раздел 61

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОСВЕЩЕНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ

61.1. Световые величины и соотношения между ними 459
Обозначения основных световых величин и единиц измерения (459). Соотношения между световыми величинами (459).
6.1.2. Электрические источники света 462
Лампы накаливания (462). Люминесцентные лампы низкого давления (464). Люминесцентные лампы высокого давления ДРЛ, ДРИ и ДНаТ (466). Пускорегулирующие аппараты (469).
61.3. Электрические осветительные приборы.. 471
Основные характеристики осветительных приборов (471). Светильники (474). Прожекторы (485).
61.4. Проектирование и расчет искусственного освещения производственных помещений 489
Выбор нормируемых параметров (489). Выбор системы освещения, типов источников света и светильников и мест их размещения (492). Расчет мощности осветительной установки методом коэффициента использования (502). Расчет осветительной установки методом удельной мощности (502). Точечный метод расчета осветительной установки (504). Аварийное освещение (безопасности и эвакуационное), охранное и дежурное освещение (506).
61.5. Проектирование и расчет наружного освещения 509
Выбор нормируемых параметров (509). Наружное освещение городских и сельских поселений (510). Проектирование установок, выполненных светильниками (512). Проектирование установок, выполненных прожекторами заливающего света (512).
Список литературы 517

61.1. СВЕТОВЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ НИМИ

ОБОЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ СВЕТОВЫХ ВЕЛИЧИН И ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЯ

I, кд — сила света, единица — кандела.

Φ, лм; кд · ср — световой поток — эффективный поток излучения, определяемый спектральной чувствительностью глаза, единица — люмен.

M, лм/м^2; кд · ср/м^2 — светимость — плотность излучаемого (отражаемого) светового потока по площади поверхности излучающего (отражающего) тела.

E, лк; кд · ср/м^2 — освещенность — плотность светового потока по освещаемой поверхности, единица — люкс.

Q, лм · с; кд · ср · с — световая энергия, определяемая интегралом

$$Q = \int_0^t \Phi(t)\,\mathrm{d}t,$$

где $\Phi(t)$ — мгновенное значение светового потока.

H, лк · с; кд · ср · с/м^2 — световая экспозиция (количества освещения), определяется световой энергией, упавшей на единицу площади за данный промежуток времени.

L_α, кд/м^2 — яркость — плотность силы света по площади проекции излучающего (отражающего) тела в заданном направлении α. Выражение яркости записывается так: $L_\alpha = I_\alpha / A_\alpha$, где A_α — площадь проекции светящего тела на плоскость, перпендикулярную направлению α, отсчитываемому от нормали к поверхности излучающей площадью A (рис. 61.1); I_α — сила света в направлении α.

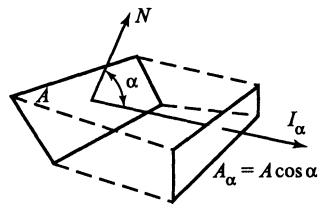


Рис. 61.1. К расчету яркости излучающей поверхности

СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ СВЕТОВЫМИ ВЕЛИЧИНАМИ

Световой поток излучающего тела (лампы, светильника) может быть рассчитан [61.2] по кривой силы света (КСС) на рис. 61.2 и таблице зональных телесных углов (табл. 61.1):

$$\Delta\Phi = 2\pi(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) I_\alpha,$$

где $\Delta\Phi$ — зональный световой поток, лм; $2\pi(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) = \omega$ — зональный телесный угол, ср, образованный двумя коническими поверхностями с углами раствора α_1 и α_2 (рис. 61.2); I_α — сила све-

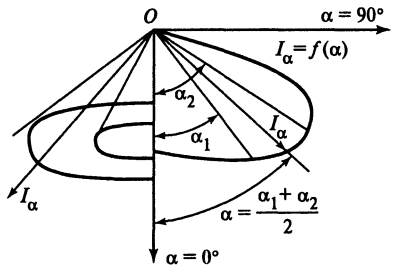


Рис. 61.2. К расчету зонального светового потока

Таблица 61.1. **Зональные телесные углы**

$\alpha_1 - \alpha_2$, град	$\alpha_{ср}$, град	ω, ср	$\alpha_{ср}$, град	$\alpha_1 - \alpha_2$, град
		$\Delta\alpha = 5°$		
0—5°	2,5	0,0239	177,5	175—180
5—10	7,5	0,0715	172,5	170—175
10—15	12,5	0,1186	167,5	165—170
15—20	17,5	0,1648	162,5	160—165
20—25	22,5	0,2098	157,5	155—160
25—30	27,5	0,2531	152,5	150—155
30—35	32,5	0,2945	147,5	145—150
35—40	37,5	0,3337	142,5	140—145
40—45	42,5	0,3703	137,5	135—140
45—50	47,5	0,4041	132,5	130—135
50—55	52,5	0,4349	127,5	125—130
55—60	57,5	0,4623	122,5	120—125
60—65	62,5	0,4862	117,5	115—120
65—70	67,5	0,5064	112,5	110—115
70—75	72,5	0,5228	107,5	105—110
75—80	77,5	0,5352	102,5	100—105
80—85	82,5	0,5435	97,5	95—100
85—90	87,5	0,5476	92,5	90—95
		$\Delta\alpha = 10°$		
0—10°	5	0,095	175	170—180
10—20	15	0,283	165	160—170
20—30	25	0,463	155	150—160
30—40	35	0,628	145	140—150
40—50	45	0,774	135	130—140
50—60	55	0,897	125	120—130
60—70	65	0,993	115	110—120
70—80	75	1,058	105	100—110
80—90	85	1,091	95	90—100

та источника по направлению, ориентируемому углом $\alpha_{ср} = 0{,}5(\alpha_1 + \alpha_2)$, кд. Полный световой поток источника $\Phi = \sum \Delta\Phi$.

В случае КСС, описываемых простыми аналитическими зависимостями, существует простая связь между световым потоком источника и его максимальной силой света. Например $\Phi = 4\pi I$ для равнояркого источника (I_α = const) шаровой формы; $\Phi = \pi I_{max}$ для косинусного источника дисковой формы ($I_\alpha = I_{max}\cos\alpha$); $\Phi = \pi^2 I_{max}$ для синусного источника цилиндрической формы ($I_\alpha = I_{max}\sin\alpha$).

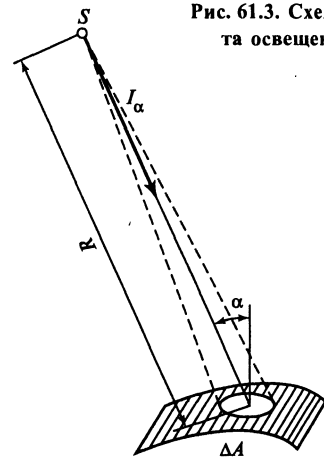


Рис. 61.3. Схема расчета освещенности

Освещенность E элемента площадью ΔA некоторой поверхности (рис. 61.3) определяется по закону

$$E = I_\alpha \cos\alpha / R^2.$$

Это выражение справедливо для расстояний R, начиная с которых сила света I_α остается постоянной. Если известен световой поток $\Delta\Phi$, падающий на элемент поверхности площадью ΔA, то освещенность, лм/м^2, $E = \Delta\Phi / \Delta A$.

Яркость L, равномерная по поверхности светящего тела и одинаковая по всем направлениям, связана со световым потоком Ф, излучаемым этим телом, выражением $L = \Phi/(\pi A)$, где A — площадь поверхности светящего тела, м^2. Так как отношение Φ/A, лм/м^2, есть светимость M, то выражение яркости для диффузных тел приобретает вид $L = M/\pi$, лм/(м$^2 \cdot$ ср). Следовательно, яркость таких тел и их светимость отличаются на постоянный коэффициент π.

Яркость поверхности тел, рассеивающих падающий на них световой поток равномерно по всем направлениям пространства (диффузных тел), зависит от освещенности E. Яркость для отражающих свет поверхностей

$$L = \rho E / \pi,$$

для пропускающих свет поверхностей

$$L = \tau E / \pi,$$

где ρ, τ, — коэффициенты отражения и пропускания материалов (см. § 61.2).

Светимость M диффузно отражающих или пропускающих свет поверхностей связана с их освещенностью через коэффициенты ρ или τ (см. § 61.2): $M = \rho E$, $M = \tau E$. В том случае, если поверхности имеют направленно-рассеивающее и смешан-

ное отражение или пропускание света, их яркость в данном направлении α рассчитывается по формуле

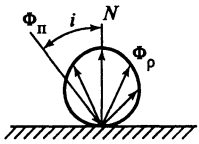
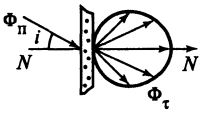
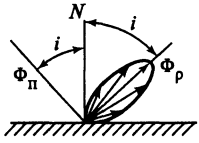
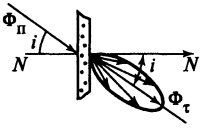
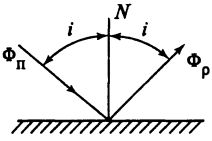
$$L_\alpha = r_\alpha E/\pi,$$

где r_α — коэффициент яркости поверхности (см. § 61.2).

Световой поток $\Phi_п$ падающий на некоторое тело, частично отражается (Φ_ρ), поглощается (Φ_α) и, наконец, пропускается (Φ_τ) этим телом. Потоки Φ_ρ, Φ_α, Φ_τ определяют оптические коэффициенты: отражения $\rho = \Phi_\alpha / \Phi_п$; пропускания $\tau = \Phi_\alpha / \Phi_п$; поглощения $\alpha = \Phi_\alpha / \Phi_п$.

Для любого материала $\tau + \rho + \alpha = 1$. Кроме этих коэффициентов материалы характеризуются еще кривыми рассеяния (табл. 61.2), дающими возможность судить о степени рассеяния отраженного или пропущенного ими светового потока. По характеру рассеяния светового потока материалы делятся на диффузные, т.е. равномерно рассеивающие, направленно-рассеивающие (с преимущественным

Таблица 61.2. **Значения коэффициентов ρ и τ для некоторых материалов**

Кривые рассеяния светового потока	Материал	ρ	τ
	С диффузным отражением света		
	Углекислый магний	0,92	—
	Оксид магния	0,91	—
	Мел, гипс	0,85	—
	Фарфоровая эмаль (белая)	0,80	—
	Белая бумага (ватман)	0,76	—
	Белая клеевая краска (побелка)	0,65	
	Необработанная поверхность черных металлов	0,15	—
	Уголь	0,08	—
	Нитроэмаль белая	0,70	—
	С диффузным пропусканием света		
	Стекло глушеное (массивное, толщина 2,3 мм)	0,5	0,35
	Стекло глушеное накладное (толщина 2,3 мм)	0,30	0,55
	Органическое стекло белое (толщина 2—3 мм)	0,35	0,50
	Стекло опаловое (толщина 2,3 мм)	0,20	0,70
	Светотехническая бумага желтоватого цвета с рисунком	0,35	0,40
	С направленно-рассеивающим отражением света		
	Алюминий травленый	0,62	—
	Полуматовый альзакированный алюминий	0,72	—
	Алюминиевая краска на нитролаке	0,55	—
	Неполированный никель	0,50	—
	Неполированная латунь	0,45	—
	С направленно-рассеивающим пропусканием света		
	Стекло с химической матировкой (толщина 2,3 мм)	0,08	0,80
	Стекло с механической матировкой (толщина 2 мм)	0,14	0,70
	Пергамент тонкий (белый)	0,40	0,40
	Шелк белый	0,30	0,45
	С направленным отражением (зеркальным)		
	Серебро свежеполированное	0,92	—
	Стекло посеребренное (зеркало)	0,85	—
	Альзакированный алюминий (полированный)	0,80	—
	Хром полированный	0,62	—
	Сталь полированная	0,50	—
	Латунь полированная	0,60	—
	Белая жесть	0,55	—
	С направленным пропусканием света		
	Стекло прозрачное (толщина 2 мм)	0,08	0,89
	Органическое стекло (толщина 2 мм)	0,10	0,85

Примечание. На схемах i — угол падения.

отражением или пропусканием по направлениям угла отражения или пропускания) и смешанно пропускающие (направленное и диффузное пропускание или отражение света).

Кривыми рассеяния могут являться как распределения относительных значений силы света $I_*(\alpha)$ в плоскости, проходящей через нормаль к образцу, так и распределения значений коэффициента яркости r_α в той же плоскости. Значение r_α равно отношению яркости рассматриваемой поверхности L_α к яркости $L_д$ идеально диффузной ($\rho = 1$; $L_д = \text{const}$) пластины при одинаковых условиях освещения. Для разных направлений пространства значения r_α могут быть меньше и больше единицы.

Коэффициенты ρ, τ, α необходимо знать для правильного определения нормируемой освещенности (см. табл. 61.2), расчета осветительных установок, а также для расчета яркости и светимости различных поверхностей. Характер рассеяния света материалами необходимо знать для правильного выбора осветительных средств при проектировании искусственного освещения. Например, блестящие поверхности (направленное отражение) при «точечных» светильниках (СВ) дают их изображение (блики), мешающие видимости объектов, расположенных на них. Блики могут быть устранены применением крупногабаритных СВ из рассеивающих материалов, светящих панелей и потолков.

61.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА

Электрические источники света (ИС) [61.1] по способу генерирования ими оптического излучения делятся на тепловые и люминесцентные. Первую группу составляют лампы накаливания (ЛН) — тепловое излучение, вторую разрядные лампы (РЛ) — электро- и фотолюминесценция специальных покрытий при прохождении тока через газ или пары металлов.

Основными параметрами электрических ИС являются: номинальная мощность, напряжение питающей сети и лампы, пусковые и рабочие токи, номинальный световой поток и световой поток через определенное время эксплуатации, световая отдача, измеряемая отношением светового потока к мощности (лм/Вт), средний или номинальный срок службы. Почти все эти параметры регламентируются ГОСТ или ТУ.

ЛАМПЫ НАКАЛИВАНИЯ

Для целей освещения находят широкое применение электрические [61.3] ЛН общего назначения (табл. 61.3), что объясняется простотой их эксплуатации и отсутствием специальных устройств для включения в электрическую сеть. Они могут быть вакуумными (тип В, от 15 до 25 Вт) и газополными (типы Г, Б, БК, от 40 до 1500 Вт). Лампы типов Г (со спиральным телом накала) и Б (с биспиральным) наполняются аргоном с добавлением 12—16 % азота. Лампы с криптоновым наполнением (тип БК) имеют световую отдачу на 10—20 % выше ламп с аргоновым наполнением. Ввиду высокой стоимости криптона им наполняются мало-

Таблица 61.3. **Основные характеристики ЛН общего назначения (по ГОСТ 2239—79)**

Мощность, Вт	Тип наполнения и тела накала	Номинальный световой поток, лм, при расчетном напряжении, В					Полная длина лампы, мм	Диаметр колбы лампы, мм
		130	220	225	235	240		
15	В	135	105	105	100	—	105	61
25	В	260	220	230	225	—	105	61
40	В	485	415	415	410	—	110	61
—	БК	520	460	460	450	—	98	51
60	Б	810	715	715	705	700	110	61
	БК	875	790	790	775	—	98	51
75	Б	—	950	950	935	—	110	61
	БК	—	1020	—	—	—	105	56
100	Б	1540	1350	1350	1335	1330	110	61
	БК	1630	1450	1450	1430	—	105	56
150	Г	2280	2090	2090	2065	2060	137	71
	Б	2100	—	—	—	—	137	71
200	Г	3200	2920	2920	2890	—	166	81
300	Г	4900	4610	4610	4560	—	184	91
500	Г	8700	8300	8300	8225	—	240	111
750	Г	—	13 100	13 100	—	—	309	151
1000	Г	19 100	18 600	18 600	18 450	—	309	151

мощные ЛН (от 40 до 100 Вт) со специальными грибовидными баллонами.

Вольфрамовая нить накала при большой ее длине может сворачиваться в спираль, биспираль (лампы типа Б), триспираль и образовывать различные конструктивные формы (цилиндрическую, кольцевую, прямоугольную и т.д.).

Вследствие нестабильности напряжения питающей сети в настоящее время выпускаются ЛН, допускающие колебание напряжения в диапазоне ±5 В от расчетного (см. табл. 61.3). Диапазон напряжения указывается на лампе, например 125—135, 215—225 В и т.д.

Для электрической сети повышенного напряжения выпускаются специальные ЛН с расчетным напряжением 235 и 240 В с тем же диапазоном его изменения. Расчетное напряжение 240 В применяется только для ЛН мощностью 60, 100, 150 Вт. Лампы на напряжение 235 и 240 В нецелесообразно применять при стабильном напряжении сети 220 В из-за резкого уменьшения их светового потока в такой сети. Условные обозначения ЛН общего назначения имеют такую структуру: тип наполнения и тела накала, вид колбы (если она не прозрачная), диапазон напряжения, номинальная мощность, номер разработки. Например, ЛН вакуумная, прозрачная колба, на напряжение 125—135 В, мощность 25 Вт, вторая разработка — В 125-135-25-2; ЛН со спиральным телом накала и аргоновым наполнением мощностью 150 Вт в матированной (МТ) колбе — ГМТ 215-225-150.

Средняя продолжительность горения ЛН общего назначения при расчетном напряжении (см табл. 61.3) должна быть не менее 1000 ч. Продолжительность горения каждой лампы должна быть не менее 700 ч. Световой поток каждой ЛН, измеренный после 750 ч горения при расчетном напряжении, должен быть не менее (в процентах начального): 72 % для ЛН мощностью 15 и 25 Вт при напряжении 125—135 В, 74 % для прочих напряжений; 85 % при мощности 40—200 Вт для всех напряжений (80 % для криптоновых ламп); 80 % при мощности 300, 500 Вт при напряжении 125—135 В, 85 % для прочих напряжений; 70 % при мощности 750, 1000 Вт при напряжении 125—135 В, 80 % для прочих напряжений.

Для местного освещения применяются специальные ЛН на пониженное напряжение сети (табл. 61.4).

Широкое распространение получили ЛН, колбы которых покрыты зеркальным отражающим слоем (табл. 61.5). Придавая ту или иную форму зеркальной части колбы, получают ЛН с определенной КСС. Так как ЛН с отражающими покрытиями имеют требуемую КСС, то для их применения используются световые приборы без оптических устройств, что значительно удешевляет СВ с ними.

Таблица 61.4. **Номинальные параметры ЛН местного освещения (МО) на напряжение 12, 24, 36 В**

Тип лампы	Мощность, Вт	Ф, лм	Диамстр колбы, мм	Полная длина, мм
МО12-15	15	200	61	108
МО12-25	25	380	61	108
МО12-40	40	620	61	108
МО12-60	60	1000	61	108
МО24-25	25	350	61	108
МО24-40	40	580	61	108
МО24-60	60	950	61	108
МО24-100	100	1740	66	129
МО36-25	25	345	61	108
МО36-40	40	580	61	108
МО36-60	60	950	61	108
МО36-100	100	1590	66	129

Таблица 61.5. **Зеркальные лампы накаливания (лампы-светильники)**

Тип лампы	Осевая сила света, кд	Срок службы, ч	Размеры, мм	
			Диамстр	Полная длина
Общего освещения				
ЗК215-225-40	540	1000	91	140
ЗК215-225-60	950	1000	91	140
ЗК215-225-100	1850	1000	91	140
ЗК215-225-150	1540	1500	130	186
ЗК215-225-200	2100	1500	130	186
ЗК215-225-300	3200	1500	127	186
ЗК215-225-500	5550	1500	180	267
ЗК215-225-750	16 500	1500	201	267
Местного освещения				
МО312-40	120	1000	71	109
МО312-60	195	1000	71	109
МО324-40	120	1000	71	109
МО324-60	190	1000	71	109
МО324-100	330	1000	81	128
МО336-40	105	1000	71	109
МО336-60	190	1000	71	109
МО336-100	360	1000	81	128
МО340-40	105	1000	71	109
МО340-60	180	1000	71	109
МО340-100	190	1000	81	128

Примечания: 1. Парамстры ламп МО340 указаны для расчетного напряжения 42 В. 2. Цоколь для ЛН-свстильников примснятся такой жс, как и для обычных ЛН соответствующей мощности.

Таблица 61.6. **Параметры ГЛН**

Тип лампы	Свстовой поток, клм	Размсры, мм			Срок службы, ч
		Диамстр	Длина	Длина спирали × диамстр	
ГЛН линейные общего освещения					
КГ220-1000-5	22	10,7	189	116 × 1,3	2000
КГ220-1500	33	10,7	254	186 × 1,3	2000
КГ220-2000-4	44	10,7	335	260 × 1,3	2000
КГ220-5000	110	10,7	520	275 × 3	3000
КГ220-10000	220	26,0	675	375 × 4,3	3000
КГ380-20000	440	36,0	890	570 × 6,6	2000
ГЛН малогабаритные на низкое напряжение					
КГМ30-300	8,9	14	65	Бсп* 9 × 5	20
КГМ27-400	10,8	25	85	Бсп* 9,5 × 5,7	250
КГМ6-25-25	0,35	10	36	Бсп* 2,7 × 1	200

* Бсп — биспираль.

Кроме того, ЛН с отражающими покрытиями не нуждаются в чистке, и при этом их световой поток и КСС более стабильны в процессе эксплуатации. Все это может обеспечить высокую экономичность осветительной установки с такими лампами.

Лампы накаливания очень чувствительны к изменению напряжения питающей сети.

Изменение основных параметров ЛН в процентах номинального значения при изменении напряжения сети на ±1 % примерно следующее: ток ±0,5 %, мощность ±1,5 %, световой поток ±3,5 %, срок службы ±13,0 %, световая отдача ±1,8 %.

Начиная с 60-х годов широкое распространение получили галогенные ЛН — ГЛН (табл. 61.6), на стенках которых при определенных условиях образуются галогениды вольфрама. Последние, испаряясь со стенок колбы ЛН, разлагаются на теле накала и возвращают ему атомы вольфрама. Таким образом галогенный цикл очищает колбу, и ГЛН отличаются большей стабильностью светового потока по сравнению с традиционными ЛН. Для реализации галогенного цикла применяют колбы из кварцевого стекла малого диаметра и тяжелые инертные газы при высоком давлении. Вследствие этого ГЛН имеют повышенную световую отдачу (или увеличенный срок службы).

В ГЛН применяют линейные или компактные тела накала. Первые выполнены в форме длинной спирали (с отношением длины к диаметру более 10), помещенной в кварцевую колбу трубчатой формы с торцевыми выводами. Вторые имеют спирали и колбы значительно меньшей длины. Обозначение ГЛН такое: К — колба из кварцевого стекла, И — йодная или Г — галогенная (бромистый метил или метилен), М — малогабаритная. Далее указываются номинальное напряжение (В), мощность (Вт) и номер разработки.

Цоколи линейных ГЛН бывают цилиндрическими с торцевым вводом (радиусом 7 мм у ЛН мощностью до 2 кВт и радиусом 27 мм у ЛН мощностью от 5 до 20 кВт) и плоскими металлическими (первая группа линейных ЛН и лампы типа КГМ).

На базе малогабаритных ГЛН создан широкий ассортимент зеркальных ламп-светильников с узким, средним и широким светораспределением (углы расходимости светового пучка от 3 до 60°). Наиболее распространенные значения диаметров световых отверстий этих ламп 38, 50 и 100 мм. Лампы этого типа идеальны для освещения витрин, декоративного освещения и акцентированной подсветки отдельных предметов. Лампы низкого напряжения могут включаться на сетевое напряжение с помощью электромагнитных или электронных трансформаторов.

ЛН всех групп и типов должны удовлетворять ГОСТ 19190—84. При эксплуатации ЛН необходимо использовать их только при соответствии напряжения, указанного на лампе, напряжению сети; не применять ЛН, мощность которых превышает максимально допустимую, указанную в паспорте светильника; соблюдать рекомендованное рабочее положение ЛН в пространстве; обращаться с ЛН как с хрупкими электро- и пожароопасными изделиями.

Продолжается совершенствование ЛН. В частности, использование покрытий на колбе, отражающих тепловое излучение на тело накала, привело к созданию ГЛН со световой отдачей 25 лм/Вт и сроком службы 3000 ч.

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ЛАМПЫ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Одним из наиболее эффективных и распространенных источников света является люминесцентная лампа (ЛЛ) низкого давления. По многообразию типов ЛЛ уступают лишь лампам накаливания. Прямые трубчатые лампы мощностью от 15 до 80 Вт с цветовыми и спектральными характеристиками,

Таблица 61.7. **Номенклатура и основные параметры энергоэкономичных (ЭЛЛ) и базовых ЛЛ**

Тип лампы		Номинальные значения характеристик					
		ЭЛЛ			ЛЛ		
ЭЛЛ	ЛЛ	Мощность, Вт	Световой поток, лм	Световая отдача, лм/Вт	Мощность, Вт	Световой поток, лм	Световая отдача, лм/Вт
ЛБ18-1	ЛБ20-1	18	1250	69,4	20	1200	60,0
ЛДЦ18	ЛДЦ20	18	850	47,2	20	850	42,5
ЛЕЦ18	ЛЕЦ20	18	850	47,2	20	850	42,5
ЛБ36	ЛБ40-1	36	3050	84,7	40	3200	80,0
ЛДЦ36	ЛДЦ40-1	36	2200	61,1	40	2200	55,0
ЛЕЦ36	ЛЕЦ40-1	36	2150	59,1	40	2190	54,8
ЛБ58	ЛБ65-1	58	4700	80,1	65	4800	73,8
ЛЕЦ58	ЛЕЦ65	58	3300	57,4	65	3400	52,3
ЛБЦТ36	ЛБЦТ40	36	3450	95,8	40	3000	75,0
ЛБЦТ36-1	ЛБЦТ40	36	3200	88,8	40	3000	75,0

Примечание. В настоящее время выпуск базовых ЛЛ и ЭЛЛ производится в соответствии с рекомендациями МЭК (публикация № 81).

позволяющими имитировать естественный свет различных оттенков, называют лампами общего назначения. Именно они обладают максимальной световой отдачей среди ламп данного типа (до 110 лм/Вт).

Все остальные люминесцентные лампы относятся к классу специальных. В основу их классификации положены различные признаки. Так, по мощности отличают маломощные ЛЛ (до 15 Вт) и мощные (более 80 Вт), по типу разряда — ЛЛ дуговые, тлеющего разряда и тлеющего свечения, по излучению — ЛЛ, имитирующие естественный свет, ЛЛ с улучшенным качеством цветопередачи, цветные ЛЛ и УФ-лампы, по форме колбы — ЛЛ прямые, фигурные (U- или W-образные, кольцевые, изогнутые). В отдельные группы следует выделить ЛЛ с направленным светораспределением (рефлекторные, щелевые, панельные), безртутные, амальгамные и др.

Трубчатые ЛЛ низкого давления (табл. 61.7) с дуговым разрядом в парах ртути по цветности излучения делятся на лампы белого света (ЛБ, цветовая температура 3500 К), тепло-белого света (ЛТБ, 2700 К), холодно-белого света (ЛХБ, 4850 К), дневного света (ЛД, 6500 К) и естественно-белого света (ЛЕ, 3900 К). Лампы типов ЛДЦ, ЛХБЦ, ЛТБЦ, ЛЕЦ и др. имеют дополнительное излучение в красной части спектра и обеспечивают лучшее качество цветопередачи. ЛЛ типа ЛБ обладают наибольшей световой отдачей и потому чаще всего используются в установках общего освещения.

ЛЛ маркируются так: первая буква — Л — люминесцентная, следующие буквы обозначают цветность, далее идут буквы, обозначающие особенности конструкции, например, Р — рефлекторная, У — U-образная, К — кольцевая, Б — быстрого пуска, А — амальгамная, Т — с трехполосным спектром излучения. Цифры, стоящие после букв, обозначают мощность лампы, Вт.

Средняя продолжительность горения всех типов ЛЛ 13 000—15 000 ч. Минимальное время безотказной работы 5200—6000 ч. Световой поток каждой ЛЛ после 70 % средней продолжительности горения должен быть не менее 70 % среднего номинального потока. Средняя яркость поверхности ЛЛ достаточно велика (колеблется от 5 до 20 ккд/м^2). Вследствие этого их открытая установка (без светильников), как правило, не допускается.

Люминесцентные лампы, как и прочие РЛ, при включении их в сеть переменного тока излучают переменный во времени световой поток. Глубина пульсаций светового потока оценивается коэффициентом пульсации, %: $K_п = (\Phi_{макс} - \Phi_{мин})100/2\Phi_{ср}$. Коэффициент пульсации всех типов равен 23 % (кроме ламп типа ЛДЦ, для которых $K_п$ = 43 %). Изменения параметров ЛЛ в зависимости от напряжения питающей сети даны на рис. 61.4.

Особенностями ЛЛ являются: включение в сеть только с пускорегулирующим аппаратом (ПРА); работа в ограниченном диапазоне температур (от 5 до 40 °С); большая чувствительность к отклонениям напряжения сети (рис. 61.4) (например, его снижение на 20 %, приводит к отказу в зажигании); повышение напряжения зажигания при повышенной влажности.

ЛЛ применяются для освещения общественных, жилых зданий и промышленных предприятий. Они экономичнее ЛН из-за высокой световой отдачи и большего срока службы. Одной из характерных тен-

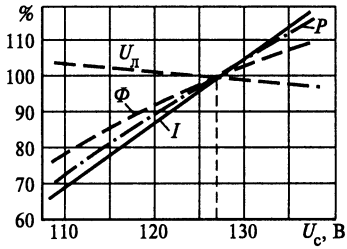


Рис. 61.4. Зависимость напряжения, светового потока, мощности и тока лампы ЛБ-15 от напряжения сети $U_с$

денций их развития является снижение диаметра разрядной трубки, вызванное необходимостью уменьшения расхода все чаще применяемых в настоящее время дорогих, но эффективных и высокостабильных узкополосных люминофоров с редкоземельными активаторами, а также интенсификацией производственного процесса. В результате появилось новое поколение ЛЛ — энергоэкономичных (ЭЛЛ) пониженной мощности: 18 вместо 20 Вт, 36 вместо 40 Вт и 58 вместо 65 Вт, уменьшенным диаметром колбы лампы (26 вместо 40 мм) и повышенной световой отдачей. В табл. 61.7 приведены сравнительные характеристики базовых ЛЛ и ЭЛЛ.

ЭЛЛ и базовые ЛЛ соответствующей мощности взаимозаменяемы. ЭЛЛ имеют стандартную длину, те же токи и напряжения. Световой поток их близок к значениям светового потока стандартных ламп. Даже в тех случаях, когда их поток на 2—5 % ниже, чем у базовых ЛЛ, их использование не приводит к уменьшению освещенности из-за более высокого КПД светильников и большей устойчивости светового потока ламп к повышенным температурам в светильниках. Дальнейшее совершенствование конструкции и технологии изготовления ЛЛ привело к появлению ламп мощностью 24, 39, 49 и 54 Вт и световой отдачей 90—100 лм/Вт в сверхтонких трубках (диаметр 16 мм). Лампы этого типа не взаимозаменяемы с ЭЛЛ и стандартными ЛЛ и должны применяться в специальных светильниках.

Создание люминофоров, излучающих в узкой полосе спектра, работающих при высоких плотностях облучения, позволило разработать компактные ЛЛ (КЛЛ) (табл. 61.8). Разряд в этих лампах происходит в трубках диаметром 10—13 мм уменьшенной длины. Габариты ламп уменьшены за счет того, что разрядная трубка либо изогнута U-образно, либо состоит из прямолинейных участков, соединенных перемычкой. Лампы имеют специальный цоколь (G23, G24 и др.). В некоторых типах КЛЛ стартер и конденсатор вмонтированы в корпус

Таблица 61.8. **Параметры некоторых типов КЛЛ**

Тип лампы	Мощность с ПРА, Вт	Средний световой поток, лм	Габаритные размеры, мм	Тип цоколя
КЛ7/ТБЦ	11,2	400	27 × 13 × 135	G 23
КЛ9/ТБЦ	12,8	600	27 × 13 × 167	G 23
КЛ11/ТБЦ	14,8	900	27 × 13 × 235	G 23
СКЛЭН-7	7,0	400	∅ 60 × 110	E 14
СКЛЭН-11	11,0	600	∅ 60 × 140	E 27
СКЛЭН-15	15,0	900	∅ 60 × 160	E 27
СКЛЭН-20	20,0	1200	∅ 60 × 160	E 27

цоколя. Для включения таких ламп в сеть требуется только ограничивающий и стабилизирующий ток элемент (например, дроссель). В других типах КЛЛ имеются разрядные трубки различной формы, пластмассовый корпус и стандартный резьбовой цоколь E27. Внутри корпуса смонтирован пускорегулирующий аппарат (как правило, электронный). Лампы этого типа могут, как и ЛН, использоваться без каких-либо дополнительных устройств.

Малые габариты КЛЛ дают возможность применять их вместо ЛН. Их использование в этом случае позволяет экономить до 75 % потребляемой электроэнергии, а большой срок службы (до 10 000 ч) позволяет редко вспоминать о необходимости их замены.

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ЛАМПЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДРЛ, ДРИ и ДНаТ

Наряду с трубчатыми ЛЛ низкого давления широкое применение нашли ртутно-кварцевые лампы высокого давления исправленной цветности типа ДРЛ (дуговая ртутная люминесцентная). В обозначении ламп цифры после букв соответствуют мощности ламп, Вт, далее в скобках — красное отношение и последняя позиция — номер разработки. Красное отношение — это световой поток лампы в красной части спектра (в диапазоне от 660 до 780 нм), выраженный в процентах ко всему световому потоку.

Лампа ДРЛ (табл. 61.9) состоит из кварцевой разрядной трубки, помещенной в стеклянный баллон эллипсоидной формы. На внутренней поверхности баллона нанесен слой люминофора — фосфатванадат иттрия, активированный европием, или смесь этого люминофора с ортофосфатами, активированными оловом. Видимое излучение ртутного разряда имеет сине-зеленый оттенок. Недостающее излучение в красной области спектра восполняется с помощью люминофора, преобразующего ультрафиолетовое излучение кварцевой горелки в види-

Таблица 61.9. **Основные параметры ламп ДРЛ**

Тип лампы	Мощность, Вт	Напряжение на лампе, В	Световой поток, клм	Диаметр колбы, мм	Полная длина, мм	Тип цоколя	Средний срок службы, тыс. ч
ДРЛ50(15)	50	95	1,9	56	130	E27/27	10
ДРЛ80(6)			3,3			E27/30	
ДРЛ80(10)	80	115	3,6	73	160	E27/30	12
ДРЛ80(15)			3,6			E27/27	
ДРЛ125(6)			5,9		184	E27/30	
ДРЛ125(10)	125	125	6,3	78	184	E27/30	12
ДРЛ125(15)			6,3		176	E27/27	
ДРЛ250(6)-4			13,0				
ДРЛ250(10)-4	250	130	13,5	91	227	E40/45	12
ДРЛ250(14)-4			13,5				
ДРЛ400(6)-4			23,5				
ДРЛ400(10)-4	400	135	24,0	122	292	E40/45	15
ДРЛ400(12)-4			24,0				
ДРЛ700(6)-3			40,6				
ДРЛ700(10)-3	700	140	41,0	152	368	E40/45	20
ДРЛ700(12)-3			41,0				
ДРЛ1000(6)-3			58,0				
ДРЛ1000(10)-3	1000	145	59,0	178	400	E40/45	18
ДРЛ1000(12)-3			59,0				
ДРЛ2000	2000	270	120	187	445	E40/55 × 47	6

Примечание. Параметры, кроме ДРЛ2000, — по ТУ 16-88. В скобках дано «красное» отношение.

мое. Использование высокого давления паров ртути, кварцевого стекла для горелки и люминофора, имеющего наибольшую яркость при температурах от 270 до 350 °С, позволяет увеличить удельную мощность и снизить габаритные размеры источника света. В связи с этим габаритная яркость ламп ДРЛ приблизительно в 10 раз превышает яркость ЛЛ.

Номинальное напряжение сети для ДРЛ мощностью от 50 до 1000 Вт — 220 В, ДРЛ 2000 должна питаться от линейного напряжения 380 В. Коэффициент пульсации светового потока ДРЛ $K_п$ = = 63—74 %. При изменении напряжения сети в пределах ±(10—5) % изменения светового потока $Ф_л$ и мощности $P_л$ рассчитываются по соотношениям: $\Delta Ф_л / Ф_л \approx 2{,}5 \Delta U_с / U_с$ и $\Delta P_л / P_л \approx 2 \Delta U_с / U_с$.

Основные области применения: наружное освещение, освещение промышленных предприятий с высотой потолков более 4 м; рабочее положение ДРЛ любое, однако горизонтальное не рекомендуется. Для облегчения зажигания большинство ДРЛ имеют кроме двух основных электродов еще два вспомогательных.

Наиболее современными источниками света являются металлогалогенные лампы (МГЛ), в колбу которых вводятся добавки в виде галогенидов разных металлов. Галогениды металлов испаряются легче, чем сами металлы. В горячей плазме галогениды распадаются, поэтому внутри разрядных колб МГЛ кроме ртути и аргона имеются пары металлов и их соединений. Это позволяет широко варьировать спектральное распределение изучения МГЛ и вследствие этого увеличивать их световую отдачу по сравнению с ДРЛ.

Для общего освещения применяются МГЛ типа ДРИ (дуговая, ртутная с иодидными добавками). Они имеют следующий состав металлогаллогенных добавок: первая группа — иодиды натрия, таллия и индия; вторая группа — иодиды натрия, скандия (иногда тория). Часть ламп ДРИ выполняются с иодидами редкоземельных металлов, имеющими сплошной спектр в видимой области.

Лампы типа ДРИ (табл. 61.10) по конструкции подобны лампам ДРЛ с двухэлектродными горелками. Они имеют прозрачные или рассеивающие свет внешние колбы эллипсоидной и цилиндрической форм. Внутри этих колб размещается кварцевая цилиндрическая горелка, где и происходит разряд в парах металлов и их иодидов. В маркировке МГЛ первые три буквы указывают тип, далее цифры обозначают мощность, а через дефис — номер разработки или модификации. Световая отдача ламп ДРИ колеблется от 70 до 110 лм/Вт. Коэффициент пульсации обычно 20—30 %.

Таблица 61.10. **Основные параметры МГЛ типа ДРИ**

Тип лампы	Напряжение, В	Ток, А	Свстовой поток, клм	Средняя продолжительность горения, тыс. ч	Диамстр, мм	Полная длина, мм	Тип цоколя
С добавками иодидов натрия и скандия, цветовая температура $T_{цв}$ = 4200 К							
ДРИ125	110	1,3	8,3	3	46	170	Е27/27
ДРИ175	110	1,8	12	4	46	211	Е27/27
ДРИ250-5	130	2,15	19	10	91	227	Е40/45
ДРИ250-6	130	2,15	19	3	60	227	Е40/45
ДРИ400-5	130	3,3	35	10	122	290	Е40/45
ДРИ400-6	130	3,3	32	3	62	290	Е40/45
ДРИ700-5	130	6,0	60	9	152	370	Е40/45
ДРИ700-6	130	6,0	56	3	80	350	Е40/45
ДРИ1000-5	230	4,7	90	9	176	390	Е40/45
ДРИ1000-6	230	4,7	90	3	80	350	Е40/65
ДРИ2000-6	230	9,2	200	2	100	430	Е40/65
ДРИ3500-6	230	16,0	350	1,5	100	430	Е40/65
ДМ3-3000	105	15/21	240	1,5	190	470	Специальный
С добавками иодидов натрия, таллия, индия, $T_{цв}$ = 5500 ± 500 К							
ДРИ-250	125	2,15	18,7	3	91	227	Е40/45
ДРИ-400	130	3,4	34,0	6	91	227	Е40/45
ДРИ-700	120	6,5	59,5	5	122	300	Е40/55 × 47

Лампа ДМ3-3000 — трехфазная, с тремя основными электродами, работает со специальным ПРА имеет уменьшенную пульсацию светового потока.

Номинальное напряжение сети для ДРИ мощностью от 50 до 700 Вт 220 В, ДРИ мощностью 1000 Вт и больше 380 В.

Параметры ламп ДРИ очень чувствительны к их положению во время горения. Обычно световой поток ламп в горизонтальном положении на 15—18 % ниже, чем в вертикальном. Для многих типов МГЛ регламентируется рабочее положение. Их эксплуатация в других положениях может привести к быстрому выходу ламп из строя. Изменение светового потока и мощности при изменении напряжения сети $U_с$ в пределах ±(10—15) % может быть рассчитано так же, как и для ламп ДРЛ.

Перспективы развития МГЛ заключаются в повышении световой отдачи до 120—130 лм/Вт, улучшении воспроизводимости и стабильности их цветовых характеристик, а также в увеличении срока службы.

Самыми экономичными современными источниками света являются натриевые лампы [61.10]. В них используется резонансное излучение атомов натрия (589 и 589,6 нм). Это обеспечивает их высокую световую отдачу. В натриевых лампах низкого (0,5—1,2 Па) давления (НЛНД) световая отдача может достигать 200 лм/Вт. Однако эти лампы имеют неудовлетворительную цветопередачу, так как их желтое излучение почти монохроматично. Они могут применяться в тех случаях, когда не требуется различать цветность объектов освещения (автострады, туннели, товарные станции и т.д.).

В натриевых лампах высокого давления (НЛВД) (табл. 61.11) используется разряд в парах натрия, ртути и зажигающем газе ксеноне. Рабочее давление паров натрия 7—20 кПа. При таком давлении резонансные линии натрия расширяются, занимая некоторую спектральную полосу. Это приводит к тому, что цвет излучения становится золотисто-белым. При этом световая отдача ламп достигает 100—130 лм/Вт. Коэффициент пульсации светового потока этих ламп $K_п$ = 82 %. Устройство ламп НЛВД типа ДНаТ (дуговые натриевые трубчатые) аналогично устройству ламп ДРИ. Внутри стеклянной цилиндрической колбы помещается разрядная трубка из поликристаллического оксида алюминия, инертного к парам натрия и хорошо пропускающего его излучение. Лампы ДНаТ питаются от сетевого напряжения 220 В. Как правило, для их стабильной работы и надежного включения требуются специальные ПРА с зажигающим устройством высокого напряжения. Они широко применяются для освещения улиц, автострад, площадей и больших открытых пространств. Перспективы развития ламп заключаются в увеличении световой отдачи и повышении надежности, расширении номенклатуры, улучшении цветности и снижении цены. В мар-

Таблица 61.11. **Параметры ламп ДНаТ и ДКсТ**

Тип лампы	Напряжение, В	Ток, А	Свстовой поток, клм	Срок службы, тыс. ч	Диамстр, мм	Полная длина, мм	Тип цоколя
ДНаТ-50	85	0,76	4	6	42	170	Е27
ДНаТ-70	90	1,0	6	10	42	170	Е27
ДНаТ-100	100	1,2	10	10	42	190	Е27, Е40
ДНаТ-150	100	1,8	15	15	48	220	Е40
ДНаТ-250	100	3,1	26	20	48	250	Е40
ДНаТ-400	100	4,6	50	20	48	278	Е40
ДКсТ-2000	40	49	35,7	0,3	26	366	Специальный
ДКсТ-5000	110	44	97,6	0,3	25	646	«
ДКсТ-10000	220	46	250	0,8	35	1260	«
ДКсТ-20000	380	56	694	0,8	35	1990	«
ДКсТ-50000	380	132	2230	0,5	42	2160	«

Примечания: 1. Положение горения ламп ДНаТ — любое, ламп ДКсТ — горизонтальное.
2. Лампы типа ДКсТ-2000 и ДКсТ-5000 применяются с балластом.

кировке ламп типа ДНаТ цифры обозначают их мощность в ваттах.

Для освещения территорий большой площади находят применение мощные ксеноновые трубчатые безбалластные лампы типа ДКсТ (см. табл. 61.11). Они зажигаются с помощью пускового устройства, вырабатывающего высокочастотный импульс высокого напряжения (до 30 кВ), под воздействием которого в лампе возникает разряд в ксеноне. Применение ламп ДКсТ для освещения карьеров, сортировочных станций и других объектов объясняется их большой мощностью (5, 10, 20 кВт; значение мощности содержится в обозначении типа), что резко сокращает число световых приборов и уменьшает эксплуатационные расходы. Кроме того, лампы ДКсТ выгодно применять при необходимости правильно передавать цвета освещаемых объектов.

ПУСКОРЕГУЛИРУЮЩИЕ АППАРАТЫ

Для ограничения тока дугового разряда в цепь газоразрядных ламп последовательно включаются балластные сопротивления (чаще всего индуктивные). Кроме того, имеется еще ряд элементов схемы включения газоразрядных ламп. Дроссель, компенсирующий конденсатор для повышения коэффициента мощности, конденсаторы, блокирующие радиопомехи, и зажигающее устройство объединяются в пускорегулирующие аппараты. Они делятся на три группы по способу зажигания: стартерного (условное обозначение УБ), быстрого и мгновенного зажигания. Основные типы ПРА для ЛЛ, ламп ДРЛ, ДРИ, ДНаТ приведены в табл. 61.12 и 61.13. Схемы зажигания ЛЛ импульсом напряжения с помощью стартеров показаны на рис. 61.5, *а—в*.

Бесстартерные ПРА быстрого зажигания тех же ламп (рис. 61.6) работают с помощью накальных трансформаторов НТ, которые предварительно на-

Таблица. 61.12. **Параметры основных видов ПРА для ЛЛ**

Тип	Рабочий ток, А	Коэффициснт мощности	Потери мощности, %	Масса, кг	Размсры (длина × ширину × высоту), мм
1УБИ-40/220-ВП-580	0,43	0,5	23	0,9	170 × 42 × 43
1УБИ-80/220-ВП-590	0,865	0,5	20	1,85	205 × 54 × 52
1УБИ-80/220-ВП-700	0,865	0,5	16	1,65	150 × 60 × 52
2УБИ-20/220-ВПП-800	0,37	0,55	24	0,72	150 × 39,5 × 36,5
2УБИ-20/220-ВПП-900	0,37	0,55	25	0,72	150 × 39,5 × 36,5
1УБИ-40/220-ВПП-800	0,43	0,5	24	0,72	145 × 42 × 42
1УБИ-65/220-ВПП-930	0,67	0,5	22	1,1	150 × 50 × 42

Таблица 61.13. **Параметры основных видов ПРА для ламп типов ДРЛ, ДРИ, ДНаТ**

Тип	Рабочий ток, А	Коэффициент мощности	Потери мощности, Вт, не более	Масса, кг, не более	Размеры (длина × ширина × высота), мм
1И70А36-000	1	0,4	15	1,45	105 × 82 × 70
1И70А36-007	1	0,4	15	1,56	115 × 70 × 60
1И80/50А36-200	0,8/0,62	0,5/0,4	10/9	1,4	105 × 82 × 70
1И80/50А36-207	0,8/0,62	0,5/0,4	10/9	1,56	115 × 70 × 60
1И80Н37-100	0,8	0,45	10	1,7	115 × 70 × 60
1И100А36-000	1,2	0,4	15	1,8	105 × 82 × 70
1И100А36-007	1,2	0,45	15	1,8	115 × 70 × 60
1И125А36-200	1,15	0,5	12	1,56	105 × 82 × 70
1И125А36-207	1,15	0,5	12	1,8	115 × 70 × 60
1И125А36-000	1,3	0,45	15	1,8	105 × 82 × 70
1И125А36-007	1,3	0,4	15	1,8	115 × 70 × 60
1И125А37-100	1,15	0,45	14	1,85	120 × 100 × 87
1И150А36-000	1,8	0,4	18	2,35	110 × 100 × 75
1И150А36-007	1,8	0,4	18	2,35	125 × 85 × 60
1И175А36-100	1,8	0,4	18	2,35	110 × 100 × 75
1И175А36-107	1,8	0,4	18	2,35	125 × 85 × 60
1И250А36-200	2,15	0,55	18	2,75	115 × 105 × 90
1И250А(Н)36-206	2,15	0,55	18	3,6	145 × 130 × 145
1И250А37-100	2,15	0,53	21	3,15	135 × 126 × 95
1И250А36-000	3,1	0,4	28	3,6	115 × 105 × 90
1И250П(Н)36-006	3,1	0,4	28	5,4	145 × 130 × 145
1И250А36-301	2,15	0,4	20	4	145 × 90 × 88
1И250Н36-302	2,15	0,4	20	6	175 × 105 × 205
1И400А(П)36-200	3,25	0,55	26	3,4	115 × 105 × 80
1И400П(Н)36-206	4,6	0,55	26	5,4	145 × 130 × 145
1И400Н37-100	3,3	0,53	27	4,7	140 × 142 × 100
1И400А(П)36-000	4,6	0,4	35	5,4	155 × 120 × 90
1И400П(Н)36-006	4,6	0,4	35	7	190 × 195 × 145
1И400Н36-303	3,3	0,55	26	5,6	180 × 90 × 88
1И400Н36-304	3,3	0,55	26	7,5	180 × 120 × 205
1И700Н36-200	5,45	0,6	35	5,9	155 × 120 × 90
1И700Н36-206	5,45	0,6	35	7	190 × 145 × 145
1И700Н36-040	4,7	0,4	40	8,5	164 × 155 × 150
1И700Н36-046	4,7	0,4	40	10	190 × 170 × 170
1И700Н36-303	4,7	0,4	37,5	8	180 × 90 × 100
1И700Н36-304	4,7	0,4	37,5	10,5	180 × 120 × 240
1И1000Н36-200	7,5	0,6	40	7,8	164 × 150 × 150
1И1000Н36-206	7,5	0,6	40	10	190 × 170 × 170

Примечание. Масса аппарата приведена без учета массы ИЗУ.

гревают катоды лампы. В момент возникновения разряда в лампе ток накала ПРА автоматически снижается. Для снижения напряжения зажигания вдоль лампы накладывается металлическая полоска. Иногда применяются бесстартерные ПРА мгновенного зажигания, осуществляемого с помощью импульса напряжения (500—600 В) при холодных катодах (автоэлектронная эмиссия). ПРА для ламп ДРЛ могут быть с дросселем (рис. 61.7, *а*) либо с трансформатором, имеющим большое рассеяние (рис. 61.7, *б*).

Для включения ламп ДРИ и ДНаТ применяются ПРА (рис. 61.7, *в*) с унифицированными устройствами импульсного зажигания (ИЗУ), основными

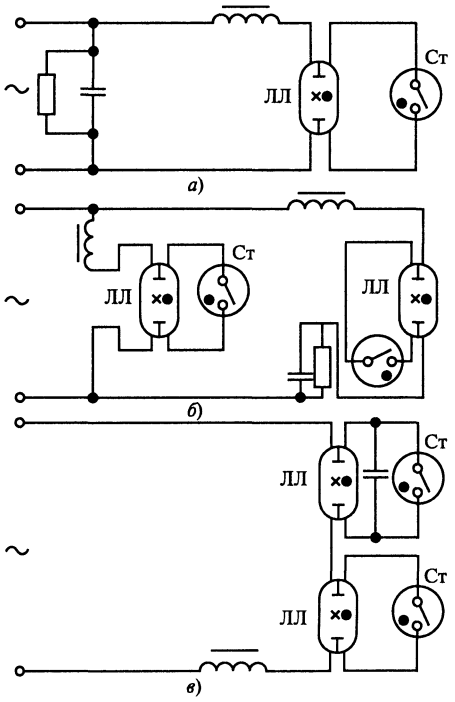


Рис. 61.5. Электрические схемы стартерных ПРА для люминесцентных ламп:

а — одноламповый, дроссели балластного типа; *б* — двухламповый антистробоскопический типа 2УБК; *в* — двухламповый типа 2УБИ; Ст — стартер; ЛЛ — люминесцентная лампа

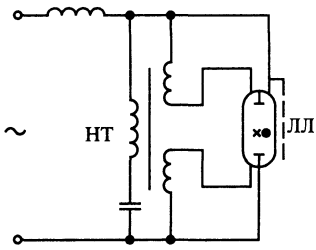


Рис. 61.6. Резонансная бесстартерная схема включения ЛЛ (НТ — накальный трансформатор)

элементами которых являются динисторы (диодные тиристоры). При работе ламп с ИЗУ повторное включение погасшей лампы возможно только после ее остывания — через 10—15 мин. Для мгновенного повторного зажигания ламп существуют специальные блоки мгновенного перезажигания (БМП), посылающие импульс высокого напряжения (40—60 кВ).

Все ПРА имеют обозначения, состоящие из ряда цифр и букв. Порядок их следования такой: на первом месте цифра, указывающая, какое количество ламп включает аппарат, на втором — буква, характеризующая сдвиг фаз потребляемого аппаратом тока: И – индуктивный; Е — емкостный; К — компенсированный; на третьем – мощность. Следующий далее буквенный индекс указывает группу аппарата по уровню шума: И — нормальный, П — пониженный, А — особо низкий; С — очень низкий. Две цифры после буквенного индекса указывают номер серии, а следующее далее трехзначное число указывает модификацию ПРА. В табл. 61.13 аппараты с номерами исполнения 000—046 предназначены для ламп ДНаТ, а с номерами 100, 107 и 301 — 304 — для ламп типа ДРИ.

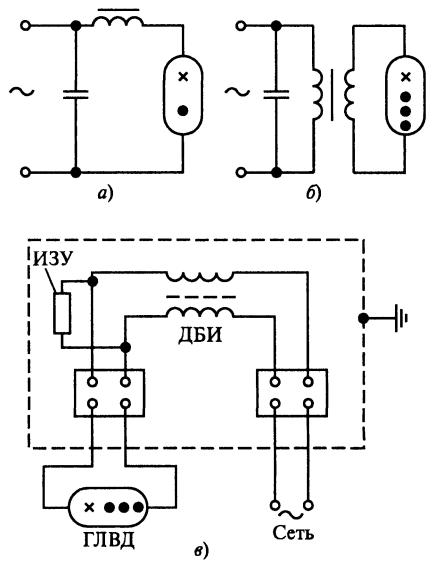


Рис. 61.7. Схемы включения газоразрядных ламп высокого давления:

а — ДРЛ с дросселем; *б* — с трансформатором, имеющим большое магнитное рассеяние; *в* — ДРИ и ДНаТ; ДБИ — балластный дроссель; ИЗУ —импульсное зажигающее устройство; ГЛВД — газоразрядная лампа высокого давления

61.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Осветительный прибор (ОП) состоит из двух главных частей — источника света (ИС) и оптического устройства (ОПУ), перераспределяющего световой поток источника в пространстве (отражающего, преломляющего, рассеивающего). ОПУ могут быть выполнены из зеркальных, преломляю-

щих, диффузных и направленно-рассеивающих светотехнических материалов.

Кроме ИС и ОПУ прибор имеет устройства коммутирующие, стабилизирующие и преобразующие электрический ток (ПРА). К конструкционным устройствам ОП относятся корпус, уплотняющие приспособления, узлы крепления ИС и ОПУ, установочные и другие узлы.

ОП можно делить на два класса: приборы ближнего действия — светильники (СВ) и приборы дальнего действия — прожекторы (ПР). Светильники применяются для освещения помещений и объектов, удаленных на расстояния, лишь в десятки раз большие, чем их размеры. ПР применяются на расстояниях, в сотни и тысячи раз больших их диаметров.

Светильники характеризуются мощностью источника; напряжением питающей сети; габаритными размерами (диаметр D, высота H); КСС, дающей зависимость значений силы света от углов α (см. рис. 61.2, табл. 61.14, 61.15); КПД $\eta = \Phi_{\text{п.св}}/\Phi_{\text{л}}$, (где $\Phi_{\text{п.св}}$ — полезный световой поток прибора; $\Phi_{\text{л}}$ — световой поток ИС); коэффициентом усиления $K_{\text{у}} = I_{\max\text{ св}}/I_{\text{ср}}$ (где $I_{\max\text{ св}}$ — максимальная сила света прибора; $I_{\text{ср}} = \Phi_{\text{л}}/4\pi$ — среднесферическая сила света ИС, для цилиндрических ИС иногда вместо $I_{\text{ср}}$ берут максимальную силу света лампы $I_{\max}$); защитным углом $\gamma = \operatorname{arctg}(h/(R+r))$, где h — расстояние от края светящего тела лампы до плоскости светового отверстия (рис. 61.8); R — радиус светового отверстия; вместо r подставляют или $r_{\text{н}}$ — радиус

Таблица 61.14. **КСС типовых СВ $\Phi_{\cup}$ = 1000 лм, ЛН, ДРЛ при $\Phi_{\text{л}}$ = 1000 лм**

α, град	$I = I_0 \cos n\alpha$ для различных КСС при n									α, град	ДРЛ	ЛН	Зеркальная лампа широкоизлучающая ЗН3С
	0,7841	1,0374	1,1038	1,2928	1,5109	1,7582	2,0402	2,3683	2,7471				
	Д-1	Д-2	Г-1	Г-2	Г-3	Г-4	К-1	К-2	К-3				
0	233,4	333,5	377,3	503,0	670,7	894,2	1192	1583	2120	0	78	91	114
5	232,9	332,0	375,5	499,8	664,8	883,8	1173	1549	2062	5	78	91	108
10	229,2	328,2	370,3	490,2	647,5	852,5	1183	1449	1893	15	78	89	107
15	228,5	321,2	361,2	474,6	618,5	801,1	1026	1288	1595	25	80	89	117
20	224,7	311,8	349,8	452,7	579,5	731,2	902	1952	1261	35	82	88	129
25	220,0	300,0	334,3	425,1	530,2	643,8	750	810	832	45	83	88	145
30	214,1	285,5	316,0	392,1	471,4	541,3	574	515	249	55	88	83	163
35	207,1	268,8	294,7	354,1	404,7	439,9	380	196	0	65	90	79	180
40	199,3	249,8	270,7	311,7	330,9	301,0	174	0		75	92	76	198
45	190,6	228,9	244,2	265,3	251,4	168,8	0			85	93	70	88
50	180,0	206,0	215,4	215,5	167,3	32,6				90	90	66	30
55	170,5	181,7	184,6	162,9	81,8	0				95	88	63	0
60	159,2	155,4	152,0	108,3	0					105	85	69	
65	147,1	128,1	118,2	52,6						115	80	78	
70	134,3	99,8	83,1	0						125	72	85	
72										135	70	89	
74										145	64	93	
75	121,0	70,6	47,4							155	62	94	
76										165	58	78	
78										175	57	28	
80	106,9	40,8	11,1							180	56	0	
82													
84													
85	92,5	10,8	0										
86													
88													
90°	77,7	0											

Таблица 61.15. **КСС СВ наружного освещения (для $\Phi_л$ = 1000 лм) в продольной (Пр) и поперечной (Пп) плоскостях**

Угол, град	ЖКУ01-400		РКУ03-400		РСУ03-250		«Рефлакс»		SGS306/406			РТУ04 -150	РТУ01 -125
	Пр	Пп	Пр	Пп	Пр	Пп	Пр	Пп	Пр		Пп		
									0°	80°			
0	180	180	200	200	220	220	200	200	180	180	180	0	15
10	180	180	180	200	210	220	220	170	230	180	180	0	23
20	175	200	170	205	170	220	240	130	270	165	180	5	30
30	125	215	150	215	150	220	270	100	330	150	180	10	37
40	100	220	135	225	130	220	300	80	360	90	200	20	42
50	75	250	125	240	100	240	400	60	300	70	210	35	45
60	50	275	80	300	60	440	520	50	180	60	240	45	48
70	25	315	50	260	10	360	670	30	0	0	210	52	54
80	0	100	50	50	0	100	0	0	—	—	0	60	58
90	0	0	0	0	0	0	—	—	—	—	—	62	56
100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	65	53
110	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	70	45
120	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	70	38
130	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	70	30
140	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	70	20
150	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	70	15
160	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	70	10
170	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	70	5
180°	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	70	0

Примечание. Для светильников типов «Рефлакс» и SGS306/406 КСС даны для светового потока СВ, равного 1000 лм.

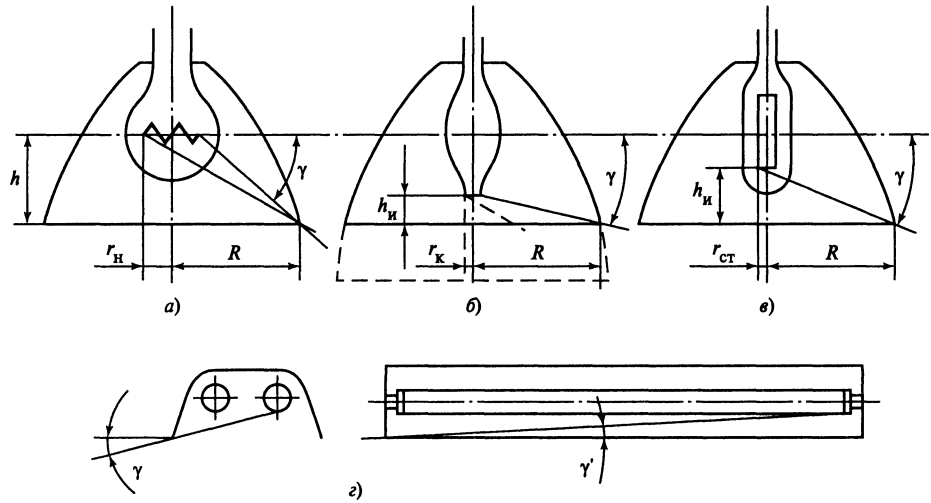


Рис. 61.8. Защитные углы светильников

тела накала ЛН или $r_к$ — радиус точки касания к колбе лампы ДРЛ; или $r_{ст}$ — радиус столба разряда ламп ДРИ, ДНаТ.

Прожекторы кроме мощности источника и его напряжения характеризуются диаметром D, углом охвата φ_{max} или фокусным расстоянием f; осевой I_0 или максимальной I_{max} силой света и 10 %-ным углом рассеяния α_{10}, в пределах которого сила света снижается в 10 раз по сравнению с ее осевым значением.

СВЕТИЛЬНИКИ

Защитный угол γ СВ (табл. 61.16) имеет важное значение для ограничения их слепящего действия. Круглосимметричные СВ характеризуются одним значением угла γ. Люминесцентные СВ характеризуются двумя значениями угла: γ в поперечной (перпендикулярной лампам) и γ' в продольной плоскости (рис. 61.8). Для обеспечения равенства указанных углов в люминесцентных СВ устраиваются экранирующие решетки с продольными и поперечными планками, выполненными из диффузных или зеркальных материалов.

Ограничение ослепленности, создаваемой СВ, достигается соответствующей высотой их подвеса, наименьшее значение которой, регламентируемое «Строительными нормами и правилами» (СНиП) [61.7], зависит от защитного угла, типа СВ и мощности применяемой лампы. Если в СВ применяется лампа накаливания с колбой из матированного стекла, то высота подвеса может быть снижена на 0,5 м по сравнению с нормируемой (табл. 61.16, 61.17). Если СВ с лампой накаливания имеет угол $\gamma \le 10°$, то он без рассеивателей не применяется. СВ с матированными лампами накаливания мощностью до 60 Вт либо с матированными рассеивателями и обычными лампами мощностью до 60 Вт не имеют ограничений по высоте подвеса. Высота подвеса СВ с лампами ДРЛ должна быть не менее 6 м при мощности лампы более 400 Вт и не менее 4 м при лампах мощностью 400 Вт и ниже.

По соотношению потоков, направляемых СВ в верхнюю $\Phi_{\cap}$ и нижнюю $\Phi_{\cup}$ полусферы, они делятся на СВ прямого (П) света ($\Phi_{\cup} \ge 0{,}8\Phi_{св}$), СВ преимущественно прямого (Н) света ($0{,}6\Phi_{св} < \Phi_{\cup} < 0{,}8\Phi_{св}$), СВ рассеянного (Р) света ($\Phi_{\cup} - \Phi_{\cap} \le \pm 0{,}2\Phi_{св}$), СВ преимущественно отраженного (В) света ($0{,}6\Phi_{св} < \Phi_{\cap} < 0{,}8\Phi_{св}$) и СВ отраженного (О) света ($\Phi_{\cap} \ge 0{,}8\Phi_{св}$). По КСС СВ прямого света делятся на глубокоизлучающие (кривые *К*, *Г*, *Д* на рис. 61.9, *а* и *б*) и широкоизлучающие (кривые *Л*, *Ш* на рис. 61.9, *б*). СВ рассеянного света могут иметь равномерную и синусную КСС (кривые *М*, *С* на рис. 61.9, *б*). СВ для внутреннего освещения помещений могут иметь все вышеперечисленные КСС; рациональные СВ наружного освещения должны быть СВ прямого света, широкоизлучающими.

Основные типы СВ внутреннего освещения промышленных и общественных зданий даны в табл. 61.16, а наружного освещения — в табл. 61.17. КСС для этих СВ приведены в табл. 61.14, 61.15.

«Правила устройства электроустановок» (ПУЭ) [61.12] различают СВ по степени защиты от попадания внутрь твердых посторонних тел, в частности пыли; по степени защиты персонала от соприкосновения с находящимися под напряжением частями, расположенными внутри оболочки изделия, а также по степени защиты от воды. Степень защиты характеризуется двумя цифрами. Первая — класс или подкласс СВ по степени его защиты от пыли и соприкосновения с частями, находящимися под напряжением, а вторая — степень защиты СВ от проникновения воды. По защите от пыли конструкции СВ делятся на три класса: пыленезащищенные — 2, пылезащищенные — 5, пыленепроницаемые — 6. Первый класс (2) имеет защиту от возможности прикосновения пальцами к частям СВ, находящимся под напряжением. Классы (5) и (6) имеют полную защиту от прикосновения с помощью любого вспомогательного устройства.

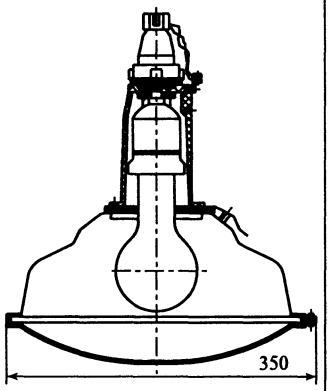
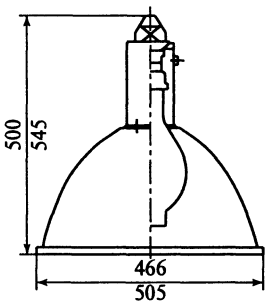
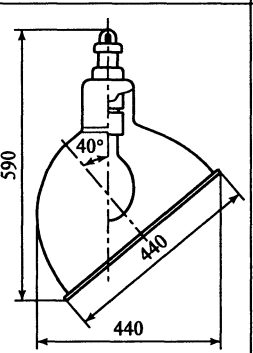
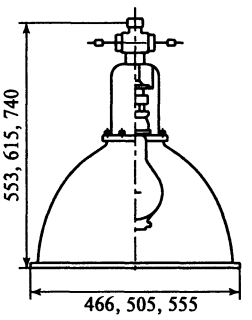
Пыленезащищенные СВ имеют два подкласса: открытые — 2 и перекрытые — 2′. Пылезащищенные делятся также на два подкласса: частично пылезащищенные — 5, полностью пылезащищенные — 5′. Пыленепроницаемые делятся на частично (6) и полностью (6′) непроницаемые.

По степени защиты от воды СВ делятся на семь групп: водонезащищенные — 0, каплезащищенные — 2, дождезащищенные — 3, брызгозащищенные — 4, струезащищенные — 5, водонепроницаемые — 7, герметичные — 8. Для обозначения степени защиты перед двумя цифрами ставятся буквы IP (Ingress Protection) во всех случаях, когда степени защиты СВ соответствуют степени защиты всего остального электрооборудования (первая цифра без штриха). Например, открытые СВ могут иметь степени защиты IP20, IP22, IP23, перекрытые — 2′3 и т.д. (в случае введения подклассов, обозначаемых цифрами со штрихами, буквы IP не ставятся).

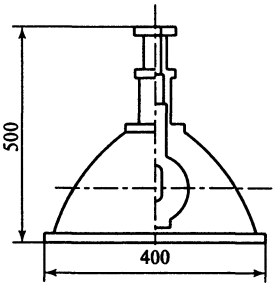
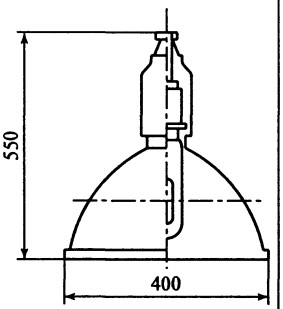
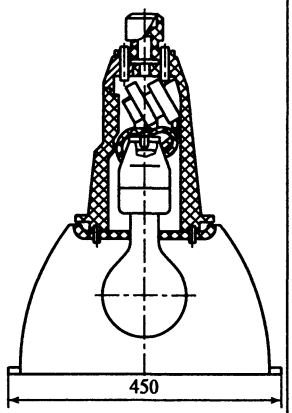
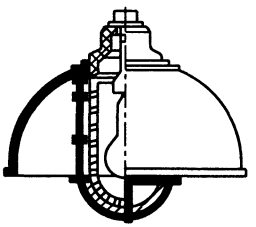
Взрывозащищенные СВ делятся на взрывонепроницаемые (В) — оболочка СВ выдерживает полное давление взрыва, продукты взрыва должны выходить из СВ через щели уже охлажденными; повышенной надежности против взрыва (Н) — должно быть исключено возникновение искр, электрической дуги или опасных температур на поверхности СВ.

ОП выпускаются в различных климатических исполнениях и предназначаются для эксплуатации в соответствующем климатическом районе. Климатическое исполнение изделия, предназначенного для эксплуатации на суше, реках, озерах и вообще в макроклиматичеких районах, имеет буквенное обозначение: для районов с умеренным климатом — У, с холодным — ХЛ, с влажным тропиче-

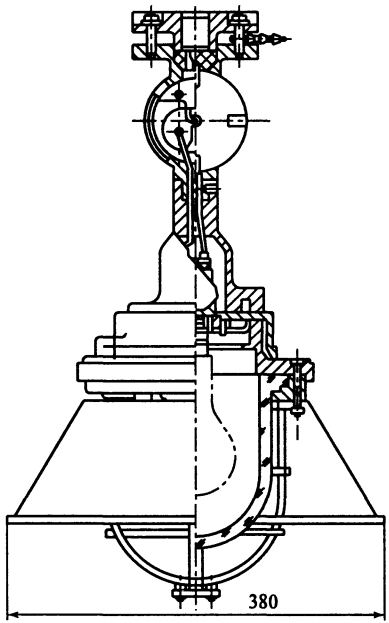
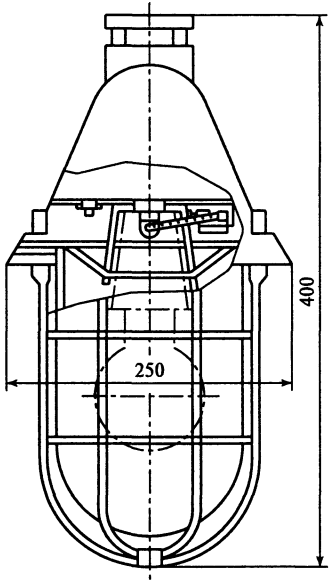
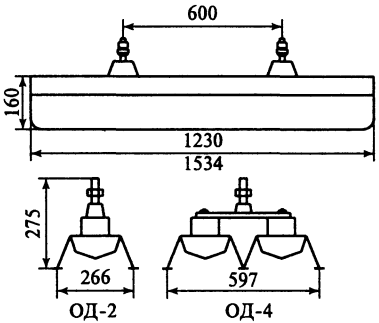
Таблица 61.16. **Основные типы ОП внутреннего освещения промышленных предприятий и общественных зданий**

Наименование, условное обозначение	СВ с диффузными отражателями				СВ с зеркальными отражателями
	НСП-22		РСП18	НСП 19, кососвет	РСП 05
	УПМ 15 открытый	УП-24 со стеклом			
Эскизный чертеж					
Тип лампы	ЛН		ДРЛ	ЛН	ДРЛ
Мощность лампы, Вт	500		250, 400 | 700, 1000	500 | 1000	250, 400 | 700, 1000
Класс	Прямого света		Прямого света	Прямого света несимметричный	Прямого света
Вид КСС* (для потока 1000 лм СВ выбирается в соответствии с табл. 61.15)	Д-2	Г-1	Д-3 | Д-1	—	Г-3 | К-1
КПД η; $\eta_{\cup}$**	0,77; 0,70	0,68; 0,67	0,70	0,77; 0,5	0,75
Защитный угол γ, град	15	—	20 | 15	—	15
Наименьшая высота подвеса, м	4	3	4 | 5	4 | 5	4 | 5
Степень защиты	5′0	IP52	IP20	5′0	IP20
Эксплуатационная группа	6	7	5	6	4 | 5
Вид материала	Т	Т	СТ	Т	М | СТ

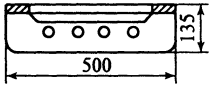
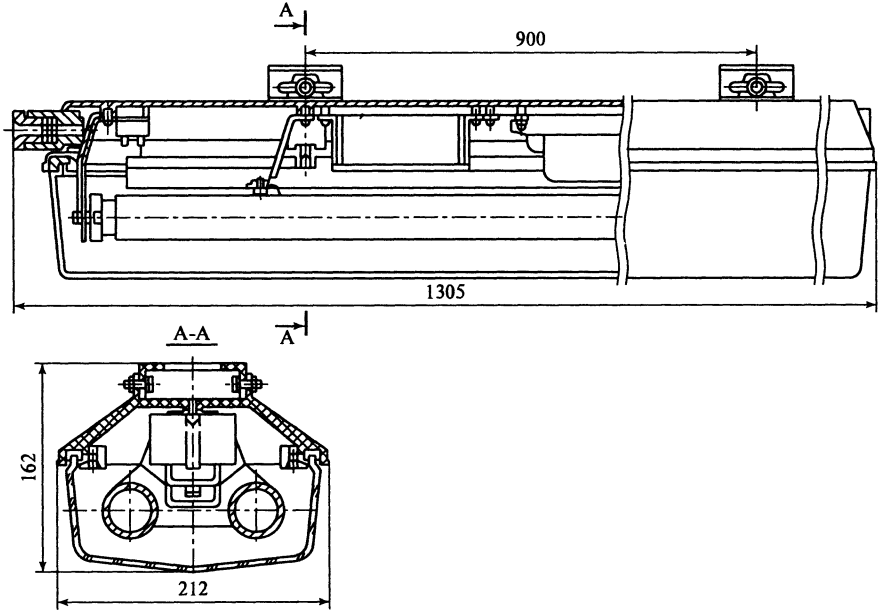
Продолжение таблицы 61.16

Наименование, условное обозначение	СВ с зеркальными отражателями				Для химических сред ПСХ
	ГСП-18	ЖСП-20	НСП 17		
			ГС	ГК	
Эскизный чертеж					
Тип лампы	ДРИ		ДНаТ	ЛН	ЛН
Мощность лампы, Вт	250, 400	700, 1000	250, 400	200, 500	1000	60
Класс	Прямого света		Прямого света	Прямого света		Преимущественно прямого света М
Вид КСС* (для потока 1000 лм СВ выбирается в соответствии с табл. 61.15)	Г-2	К-1	К-2	Г-4	К-1	Д-1/Д*
КПД η; $\eta_{\cup}$**	0,75; 0,72	0,70; 0,66	0,72; 0,69	0,80 0,75		0,60; 0,50
Защитный угол γ, град	15	20	20	—	30	—
Наименьшая высота подвеса, м	4	5	4	5	6	3
Степень защиты	IP20		5Ѳ	IP20	5Ѳ	IP54
Эксплуатационная группа	5		6	4	5	6
Вид материала	СТ		Т	СТ		Т

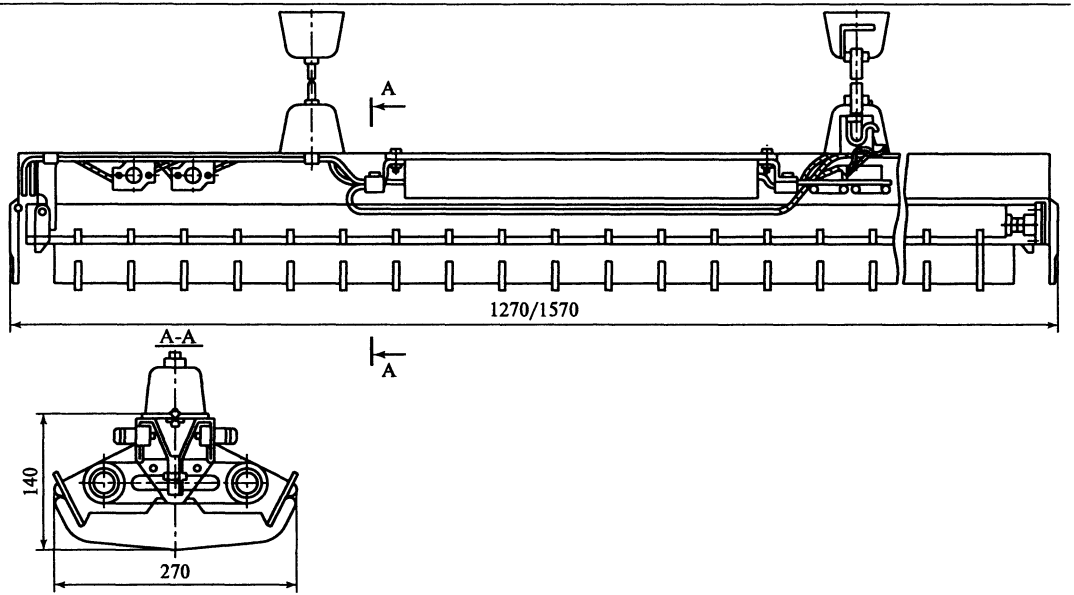
Продолжение таблицы 61.16

Наименование, условное обозначение	Взрывозащищенный		Повышенной надежности с отражателем		Люминесцентный с диффузным отражателем и планками
	ВЗГ-200АМС без отражателя	ВЗГ-200АМС с диффузным отражателем	Н4БН-150	Н4БН 300М	ЛСПО6
Эскизный чертеж					
Тип лампы	ЛН		ЛН		ЛБ
Мощность лампы, Вт	200		150	300	2 × 40 (2 × 36) | 2 × 80
Класс	Преимущественно прямого света	Прямого света	Преимущественно прямого света		Прямого света
Вид КСС (для потока 1000 лм СВ выбирается в соответствии с табл. 61.15)	М, Д-1 (Д)	Д-1	М/Д-1	М	Д-1 | Д-2
КПД η; $\eta_{\cup}$**	0,75; 0,55	0,60	0,55	0,60	0,70 | 0,60
Защитный угол γ, град	—	16	—	—	15 в двух главных плоскостях
Наименьшая высота подвеса, м	4	3	3	4	3 | 4
Степень защиты	2Exd ПIIТ3***		2Ex ПIIТ2***		IP20
Эксплуатационная группа	4	6	5	6	3 | 4
Вид материала	СТ	Т	Т		СТ

Продолжение таблицы 61 16

Наименование, условное обозначение	Люминесцентный с потолочным рассеивателем ЛСП13	Люминесцентный с рассеивателем уплотненный ЛПО25М
Эскизный чертеж		
Тип лампы	ЛБ	ЛБ
Мощность лампы, Вт	2 × 40(36) | 2 × 65(58)	2 × 40(36) | 12 × 65(58)
Класс	Преимущественно прямого света	Преимущественно прямого света
Вид КСС (для потока 1000 лм СВ выбирается в соответствии с табл. 61.15)	Д-2/Л	Д-2/Л
КПД η; $\eta_{\cup}$**	0,75; 0,7	0,50; 0,45
Защитный угол γ, град	—	—
Наименьшая высота подвеса, м	3	2,7; 3
Степень защиты	IP20	IP54
Эксплуатационная группа	4	6
Вид материала	СТ	СТ

Окончание табл. 61.16

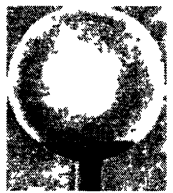
Наименование, условное обозначение	Люминесцентный подвесной с рассеивателем и решеткой ЛС004
Эскизный чертеж	
Тип лампы	ЛБ
Мощность лампы, Вт	2 × 40(36); 2 × 65(58)
Класс	Рассеянного света
Вид КСС (для потока 1000 лм СВ выбирается в соответствии с табл. 61.15)	М/Г-2
КПД η; $\eta_{\cup}$**	0,70; 0,50
Защитный угол γ, град	30
Наименьшая высота подвеса, м	В двух главных плоскостях 3
Степень защиты	IP20
Эксплуатационная группа	5
Вид материала	СТ

* КСС верхней полусферы / нижней полусферы.

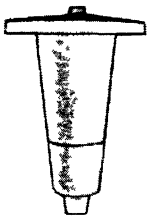
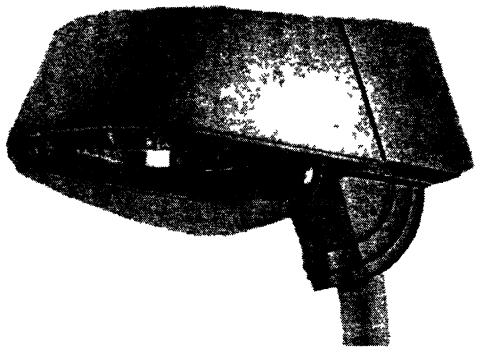
** η — поток в нижнюю полусферу, отнесенный к потоку лампы.

*** СВ экспортного исполнения повышенной надежности против взрыва с видом защиты «взрывонепроницаемая оболочка» подгруппы II, температурного класса 3 (от 200 до 300 °С).

Таблица 61 17 **Основные виды СВ наружного освещения**

Наименование, условное обозначение	Зеркальный консольный ЖКУ01-400 002-УХЛ1	Зеркальный консольный открытый		Зеркальный подвесной перекрытый		Венчающий, шаровой, стеклянный, с кольцевой решеткой РТУ04-125/Л53-02-У1
		РКУ03-250-002-У1	РКУ03-400-004-У1	РСУ08-250-001-У1	ЖСУ08-150-001-УХЛ1	
Эскизный чертеж						
Размеры, мм	870 × 420 × 209	915 × 365 × 205		560 × 327 × 351		—
Масса, кг	12,4	9,6	12,1	9,5	10,0	5,0
Тип лампы	ДНаТ	ДРЛ		ДРЛ	ДНаТ	ДРЛ
Мощность лампы, Вт	400	250	400	250	150	125
Класс СВ, тип КСС	Прямого света, Ш/Д*	Прямого света, Л—Ш/Д*		Прямого света Л—Ш/Д*		Преимущественно отраженного света, С
КПД	0,58	0,7		0,55		0,65
Коэффициент использования по освещенности при $B/H^{**} = 3$	0,34	0,3		0,28		0,15
Степень защиты	IP23	IP23		IP53(23)		IP53
Категория улиц	А, Б	В	А, Б	В	Б	Декоративное освещение скверов и парков
Высота установки, м (не менее)	11,5	9,0	10,5	8,0	8,5	3,0—4,0

Окончание табл 61 17

Наименование, условное обозначение	Парковый с рассеивателсм РТУ01-125/Д53-02-У1	Консольный с зеркальной лампой «Рефлакс» ЖКУ33-250-001-У1, ХЛ1	Консольный закрытый с поворотным устройством PHILIPS, SGS306/406
Эскизный чертсж			
Размеры, мм	∅ 434 × 470	460 × 120 × 110	690 × 380 × 320
Масса, кг	6	1,5	7,0
Тип лампы	ДРЛ	Reflux (DHA3), зеркальная несимметричная	ДРИ, ДНаТ
Мощность лампы, Вт	125	250	150—400
Класс СВ, тип КСС	Расссянного света, С	Прямого света, Ш/Д3	Прямого света, Ш/кососвет
КПД	0,6	0,95	0,82
Коэффициент использования по освещенности при $B/H^{**} = 3$	0,14	0,4	0,4
Степень защиты	IP53	IP23	IP66
Категория улиц	Декоративное освещение скверов и парков	А, Б	А, Б
Высота установки, м (не менее)	3,0—4,0	9	9—12

* КСС в поперечной плоскости / в продольной плоскости

** B — расстояние между светильниками, H — высота подвеса светильников

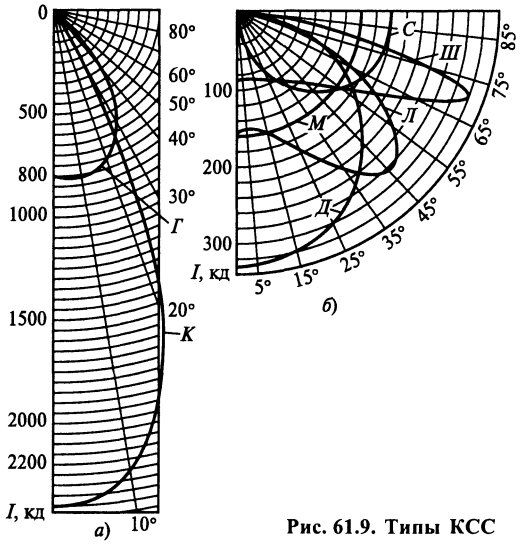


Рис. 61.9. Типы КСС

ским — ТВ, с сухим тропическим — ТС, с влажным и сухим — Т, любым на суше (общеклиматическое исполнение) — О.

Кроме того, изделия делятся на категории в зависимости от места их размещения. Категории обозначаются арабскими цифрами: для работы на открытом воздухе — 1; для работы в помещениях, где колебания влажности и температуры мало отличаются от колебаний открытого воздуха — 2; для работы в закрытых помещениях с вентиляцией — 3; для работы в помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями — 4, в том числе в помещениях с кондиционированным воздухом — 4.1, в лабораторных, капитальных жилых и других подобных помещениях — 4.2; для работы в помещении с повышенной влажностью — 5.

В табл. 61.18 дана классификация основных конструктивно-светотехнических схем СВ [61.6] по их эксплуатационным характеристикам. В зависимости от конструктивной схемы, степени защиты от пыли, твердости материалов и светотехнических покрытий все СВ разделены на семь эксплуатационных групп. Увеличение номера соответствует большей стойкости СВ к воздействию среды и целесообразности их использования в более тяжелых условиях среды. В процессе эксплуатации в результате загрязнения и многократных чисток происходит необратимое снижение КПД светильников из-за старения светотехнических материалов. Старение тем меньше, чем тверже материал, который делится на три группы: твердый — Т (по шкале Мооса более 6), средней твердости — СТ и мягкий — М (менее 2,5).

Наряду с традиционными ОП в настоящее время применяются осветительные устройства с зеркальными полыми световодами цилиндрической формы. Оболочка световода может быть жесткой (полый металлический цилиндр с зеркальным покрытием) и мягкой — из металлизированной полиэтилентерефталатной (ПТЭФ) пленки. И в том и в другом случае световод имеет выходную светорассеивающую щель, через которую выходит световой поток, испытавший многократные отражения от зеркальных стенок световода. Световой поток от источника вводится в световод через его торец. Световод и ИС входят в комплектное осветительное устройство (КОУ), предназначенное для освещения производственных помещений с большим содержанием пыли и влаги, а также пожароопасными и взрывоопасными зонами. Применение КОУ в указанных помещениях возможно при обязательной установке ИС вне этих помещений либо в строительных галереях и коммуникационных помещениях. Возможно применение световодов (КОУ) для освещения помещений общественного назначения (например, станция метро Чкаловская).

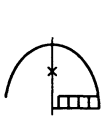
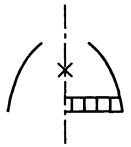
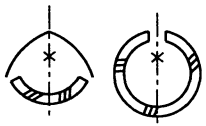
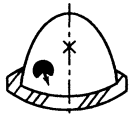
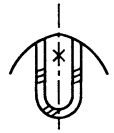
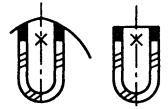
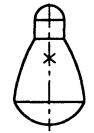
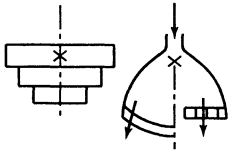
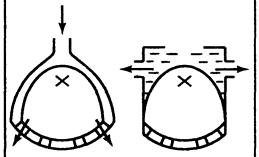
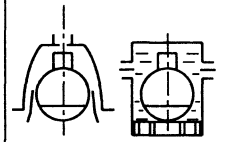
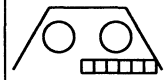
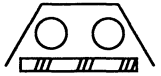
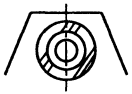
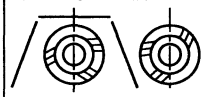
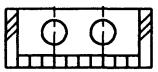
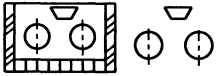
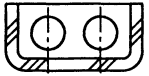
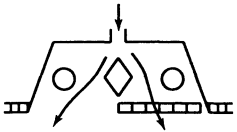
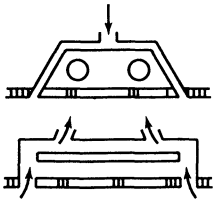
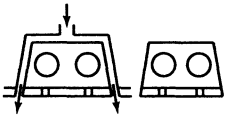
КОУ состоит из следующих основных частей (рис. 61.10): камеры *1*, ИС *2*, входного торцевого элемента *3*, канала щелевого световода *4*, выходной продольной щели *5* и оконечного торцевого элемента *6*, переходного элемента *7* и строительной галереи *8*.

КОУ рассчитаны на работу в сети переменного тока с номинальным напряжением 380/220 В. Степень защиты оболочек устройства соответствует IP54. В качестве ИС них применяются зеркальные металлогалогенные лампы-светильники типа ДРИЗ и ЛФМГ, а также зеркальные ЛН типа ЗК. Параметры некоторых КОУ приведены в табл. 61.19.

Кроме КОУ с цилиндрическими щелевыми световодами имеются осветительные устройства с плоскими клиновидными световодами серии УПС (рис. 61.11). Эти устройства предназначены перераспределять огромные потоки мощных (700 Вт) металлогалогенных зеркальных ламп *9* типа ДРИ37001 по большим площадям с помощью зеркальной наклонной *6* и светопропускающей *5* плоских поверхностей, образующих клиновидный канал *4* световода. В результате многократных отражений световой поток распределяется примерно равномерно по светопропускающей поверхности *5* площадью 14,4 м^2 (при других вариантах 10,8; 7,2 и 3,6 м^2, см. рис. 61.11). При стыковке УПС боковыми сторонами светящая поверхность может быть любой площади.

Устройство имеет приспособление для ввода *3* светового потока в канал, кассету с лампами *2*, в камере блок ПРА *7* и ИЗУ *8* зажигания ламп. УПС применяется для освещения различных помещений общественных зданий со светящими потолка-

Таблица 61.18 **Классификация основных конструктивно-светотехнических схем ОП по эксплуатационным характеристикам**

Группа		Класс ОП						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
А	А1							
	А2	—		—		—	—	
Б	Б1							—
	Б2					—	—	
	Б3	—				—		—
Конструктивное исполнение по степени защиты от пыли		2, 5′, 6′	2, 5′, 6′	2′	5, 6	5, 6	5, 6	5′, 6′
Твердость светотехнических материалов		Т, СТ, М	Т, СТ, М	Т, СТ, М	Т, СТ	Т, СТ	Т, СТ	Т
Эксплуатационная группа		5, 4, 3	6, 5, 4	2, 2, 1	7, 6	5, 4	6, 5	7

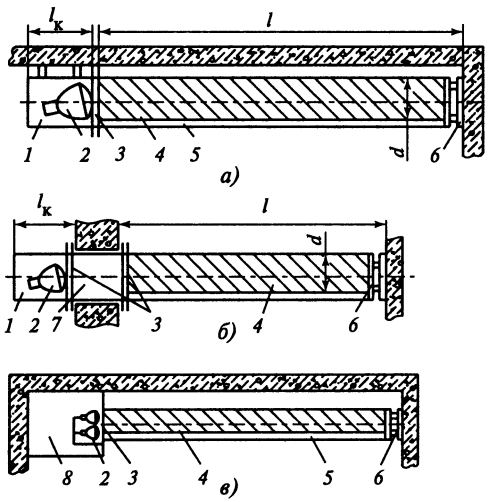


Рис. 61.10. Устройство КОУ с цилиндрическим световодом:

а — КОУ1, *б* — КОУ1А, *в*-КОУ1С

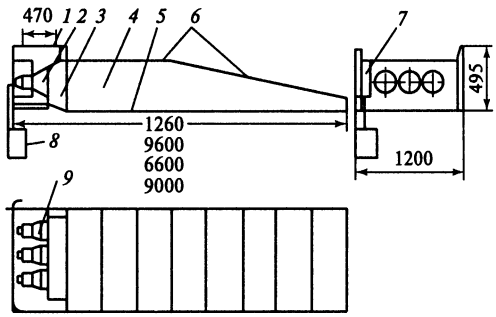


Рис. 61.11. Устройства с плоскими световодами серии УПС

ми, а также для облучения растений в теплицах УПС имеет КПД не менее 0,55, степень защиты IP54, климатическое исполнение УХЛ, категорию размещения 4

Для широкой группы СВ разработана система обозначений, структура которой следующая 1234-5 × × 6-7-8 В ней 1 — тип ИС (лампа накаливания Н, лампа люминесцентная Л, лампа-светильник С, ртутная ДРЛ-Р, металлогалогенная Г, натриевая Ж, галогенная ЛН-И, ксеноновая трубчатая — К), 2 — способы установки (подвесные С, потолочные П, консольные К, встраиваемые В, настенные Б), 3 — основное назначение (промышленные П, рудничные Р, общественные здания О, наружного освещения У, бытовые помещения Б), 4 — номер серии (две цифры), 5 — число ламп (цифра 1 не указывается), 6 — мощность лампы, Вт (от одной до пятизначной цифры), 7 — номер модификации (трехзначное число), 8 — климатическое исполнение и категория размещения (одна или две буквы и одна-две цифры) В соответствии с этой системой можно привести примеры обозначений некоторых СВ

СВ с лампой накаливания, мощностью 500 Вт, общего назначения, подвесной, для промышленных предприятий, серии 05, модификации 016, климатического исполнения У, категории размещения 3—НСП05 × 500-016-У3,

СВ с лампой ДРЛ, мощностью 400 Вт, консольный, уличный, серии 08, модификации 014, климатического исполнения ХЛ, категории размещения 1—РКУ 08 × 400-014-ХЛ1,

СВ с двумя ЛЛ мощностью по 40 Вт, подвесной, для общественных зданий, серии 02, модификации 005, климатического исполнения У, категории размещения 4—ЛСО02-2 × 40-005-У4

За последнее время значительное развитие получили светильники с новыми люминесцентными лампами, из которых следует отметить энергоэко-

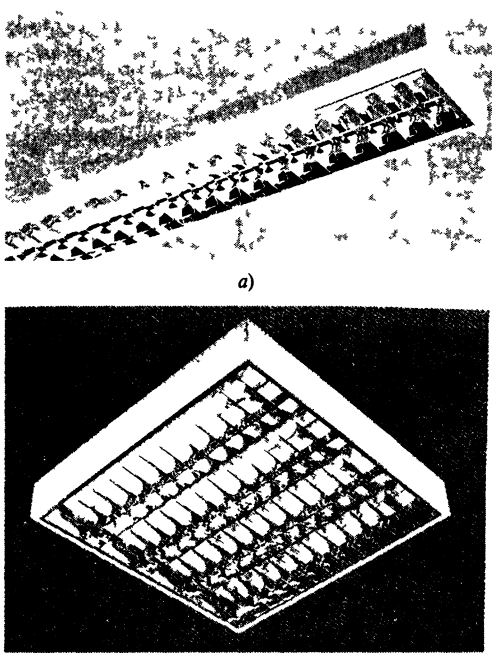
Таблица 61 19 **Номенклатура и технические данные КОУ**

Исполнение	Размеры канала, м		Источник света				Количество ИС, шт	Суммарная мощность ΣP с учетом потерь ПРА, кВт	$U_{ном}$, В	КПД, %	Высота установки КОУ H, м	$E_{ср}$ (H), лк, (м)	Масса с блоком ПРА, кг
	d	l	Тип	P, Вт	Ф, клм	Срок службы, тыс ч							
КОУ 1А-М600-3 × × 700УХЛ2	0,64	12	ДРИЗ-700-1	700	45	5	3	2,3	380	38	4—8	250 (6)	120,4
КОУ 1-М600-3 × × 700 УХЛ3	0,64	12	ДРИЗ-700-1	700	45	5	3	2,3	380	43	4— 8	250 (6)	110,0
КОУ 1-М600-3× × 700/С УХЛ3	0,64	12	ДРИЗ-700-1	700	45	5	3	2,3	380	43	4—8	250 (6)	110,3
КОУ 1-М275-1× × 700 УХЛ3	0,275	6	ДРИЗ-700-1	700	45	5	1	0,74	380	40	3—5	300 (3,5)	22,0
КОУ 1А-М275-1 × × 700 УХЛ2	0,275	6	ДРИЗ-700-1	700	45	5	1	0,74	380	30	3—5	300 (3,5)	37,0

номичные — ЭЛЛ (диаметр $d = 26$ мм), компактные — КЛЛ и тонкие — ТЛЛ (диаметр $d = 16$ мм) (TL5HO, фирма «Philips» и др) Лампы ЭЛЛ (уменьшенной мощности 18, 36, 58 Вт) уже сейчас заменяют в СВ стандартные ЛЛ, что отмечено скобками (см табл 61 16) Кроме этих энергосберегающих ЛЛ большое будущее принадлежит ТЛЛ Они выпускаются разных мощностей, например 24, 39, 48 и 54 Вт с увеличенной световой отдачей — от 89 до 102 лм/Вт, что при малом их диаметре, но при тех же длинах повышает яркость поверхности ЭЛЛ в 1,5 раза Благодаря этому зеркальные светильники с лампами ТЛЛ имеют поперечные размеры в 3—4 раза меньшие, чем у СВ с лампами ЭЛЛ при одном и том же их количестве Это значительно снижает материалоемкость СВ и делает их более удобными в эксплуатации КЛЛ мощностью от 9 до 26 Вт, имеющие полупроводниковые ПРА, вмонтированные в обычный цоколь Е 27, легко заменяют лампы накаливания в люстрах и светильниках, что снижает мощность бытовых и общественных осветительных установок почти в 4 раза при сроке службы КЛЛ в 10 раз большем, чем у ЛН

В настоящее время люминесцентные СВ, особенно за границей, имеют зеркальную и преломляющую оптику Зеркальное оптическое устройство представляет собой экранирующую решетку, поперечные планки которой профилированы (клиновидные тела с параболоидными боковыми поверхностями) Решетки обеспечивают достаточные значения защитных углов в обеих плоскостях $\gamma = 15$—$30°$ и рациональные КСС На рис 61 12 показаны потолочные люминесцентные СВ с зеркальными отражателями и экранирующими решетками Такие СВ с двумя лампами ЭЛЛ мощностью по 58 Вт, имеющие КСС типа Д-3, и с четырьмя лампами по 18 Вт, имеющие КСС типов Д-2 и Л (в двух плоскостях), изображены на рис 61 12, *а*, *б* Эти СВ применяются для общего освещения офисов с персональными компьютерами

Дальнейшее совершенствование СВ всех типов заключается в повышении их КПД и увеличении стабильности светотехнических параметров Особенно большое развитие в XXI в должны получить зеркальные и призматические СВ с высокоинтенсивными лампами типа ГЛН, ТЛЛ, ДРИ и ДНаТ малой и большой мощности Целью разработки таких СВ должно быть улучшение их показателей, хорошее воспроизведение образцовых КСС и уменьшение допусков на разброс значений силы света и КПД



а

б

Рис 61 12 Потолочные светильники с зеркальными отражателями и экранирующими решетками

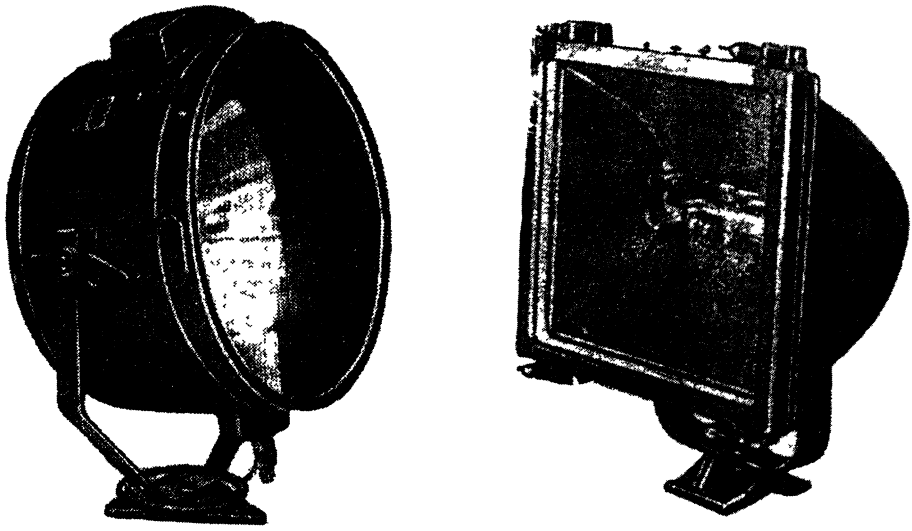
а — двухламповый лампы типа ЭЛЛ, $P = 58$ Вт, *б* — четырехламповый лампы типа ЭЛЛ, $P = 18$ Вт

ПРОЖЕКТОРЫ

Осветительные приборы дальнего действия с зеркальными отражателями и линзами, отличающиеся большой концентрацией светового потока, называются прожекторами (ПР) Наиболее широко распространены ПР заливающего света (ПЗ) На рис 61 13, *а*, показан ПР типа ПЗС 45 со стеклянным отражателем, имеющий диаметр $D = 45$ см Кроме того, широко распространен ПР типа ПЗС-35 ($D = 35$ см) ПР с галогенной ЛН (КГ) образуют приборы типа ПКН , например ПКН-1000 (с лампой КГ1000), рис 61 13, *б* ПР могут концентрировать световой поток в конусе (с параболоидными отражателями, рис 61 13, *а*) и в веере (с параболоцилиндрическими отражателями, рис 61 13, *б*) Основными светотехническими параметрами ПР являются осевая сила света I_0, полезный угол рассеяния, в пределах которого световой поток $\Phi_п$ ПР еще полезен, т е создает необходимую освещенность, КПД $\eta = \Phi_п/\Phi_л$

Сила света I_0 ПР дальнего действия на несколько порядков больше, чем сила света ПР заливающего света, в то время как углы рассеяния в продольной плоскости у ПР заливающего света много больше, чем у ПР дальнего действия

ПР делятся (табл 61 20) на ПР заливающего света со стеклянными отражателями (ПЗС), зали-



а) *б)*

Рис. 61.13. Прожекторы с лампами накаливания:
а — типа ПЗС-45, *б* — типа ПКН-1000

Таблица 61 20 **Технические данные ПР с лампами ЛН, ГЛН, КГ, ДРЛ, ДРИ, ДНаТ**

Тип прибора	Тип источника света	Максимальная сила света I_{max}, ккд	Угол $2\alpha_{10}$, град, при положении		КПД, %	Габаритные размеры, мм			Угол поворота в вертикальной плоскости, град		Масса ПР, кг
			горизонтальном	вертикальном		Длина	Ширина	Высота	вверх	вниз	
ПЗС-35А	Г 220-230-500	46	17	15	20	310	455	550	80	45	20,0
ПЗС-45А	Г 1220-230-1000	120	24	22	20	370	575	100	80	45	13,5
ПЗМ-35-1	Г 220-230-500	52	17	15	20	285	420	485	80	45	5,5
ПЗМ-35-2	ДРИ 250/380	120	12	10	20	285	420	480	80	45	5,5
ПЗМ-45-1	Г 220-230-1000	180	20	17	20	390	540	640	80	45	8,0
ПСМ-40А-1	Г 220-230-500	65	19	19	40	530	435	630	90	45	8,0
ПСМ-50А	Г 220-230-1000	100	21	21	40	640	545	650	90	45	10,0
ПКН-1000А	КГ 220-1000-5	80	80	12	45	340	200	390	90	50	8,5
ПКН-1500А	КГ 220-1500	110	90	12	45	400	200	390	90	45	9,5
ПКН-1000Б	КГ 220-1000-5	31	90	50	50	340	200	370	90	50	7,0
ПКН-1500Б	КГ 220-1500	45	100	50	50	340	200	370	90	50	9,0
ПЗР-250	ДРЛ 250	9	60	60	45	475	430	630	80	45	16,0
ПЗР-400	ДРЛ 400	16	60	60	45	575	535	660	80	45	18,0
ПЗИ-700	ДРИ 700/380	800	14	14	32	550	580	680	80	30	10,5
ПЗН-400	ДНаТ 400	60	80	40	50	455	290	460	90	45	19,5
ИСУ01-2000-02	КГ 220-2000-4	76	106	76	65	415	210	412	360	360	8,0
ИСУ02-5000-01	КГ 220-5000-1	170	100	76	65	816	267	582	360	360	20,0

Примечания 1 ПР имеют защиту IP44 (типа ПЗМ), IP54 (типа ПСМ), IP64 (типа ИСУ01-2000) и IP23 (ИСУ02-5000)

2 Климатическое исполнение ПЗС-35—У1, ПЗС-45—ХЛ1, Т1, ПЗН-400—УХЛ1

3 Лампы ДРИ 250 имеют массу ПРА 7,5 кг, ДРИ-700 массу ПРА 10,5 кг

4 Угол поворота в горизонтальной плоскости для всех ПР составляет 360°

5 I_{max} указана для $U_{ном} = 220$ В

6 Масса и высота указаны для ПР с основанием

Таблица 61.21. **Технические данные ПР типа ПГЦ и ПГП отечественного производства**

Тип прибора	Тип источника света	Максимальная сила света I_{max}, ккд	Угол $2\alpha_{10}$, град, при положении		КПД, %	Габаритные размеры, мм			Масса, кг	
			горизонтальном	вертикальном		Длина	Ширина	Высота	ПР	ПРА
ПГП-М-400-К3	ДРИ 400-6	600	12	12	30	710	695	925	28	40
ПГЦ-М-400-1К3		50	70	20	45	630	415	690	20	40
ПГЦ-М-400-2К3		20	90	80	60	630	415	590	20	40
ПГП-М-1000-К3	ДРИ 1000-6	1100	18	18	30	710	695	925	30	45
ПГЦ-М-1000-1К3		150	70	20	45	670	415	690	20	45
ПГЦ-М-1000-2К3		52	90	80	60	670	415	690	20	45
ПГП-М-2000-К3	ДРИ 2000-6	2200	18	18	30	955	840	1075	40	49
ПГЦ-М-2000-1К3		400	80	20	40	800	505	845	32	49
ПГЦ-М-2000-2К3		142	100	90	60	800	505	845	32	49
ПГП-М-3500-К3	ДРИ 3500-6	3200	22	22	30	955	840	1075	40	55
ПГЦ-М-3500-1К3		700	80	20	40	800	505	845	32	55
ПГЦ-М-3500-2К3		222	100	90	60	800	505	845	32	55

Примечания: 1. Все ПР имеют защиту IP54.

2. Климатическое исполнение У1.

3. Углы поворота в вертикальной плоскости вверх все ПР имеют 90°, вниз ПГП — 60°, ПГЦ-90°.

4. $\cos\varphi = 0{,}85$, так как ПРА компенсированные (обозначены буквой К).

5. ПР типа ПГЦ имеют зеркальные отражатели гладкие (обозначены перед буквой К цифрой 1) и ячеистые (цифрой 2).

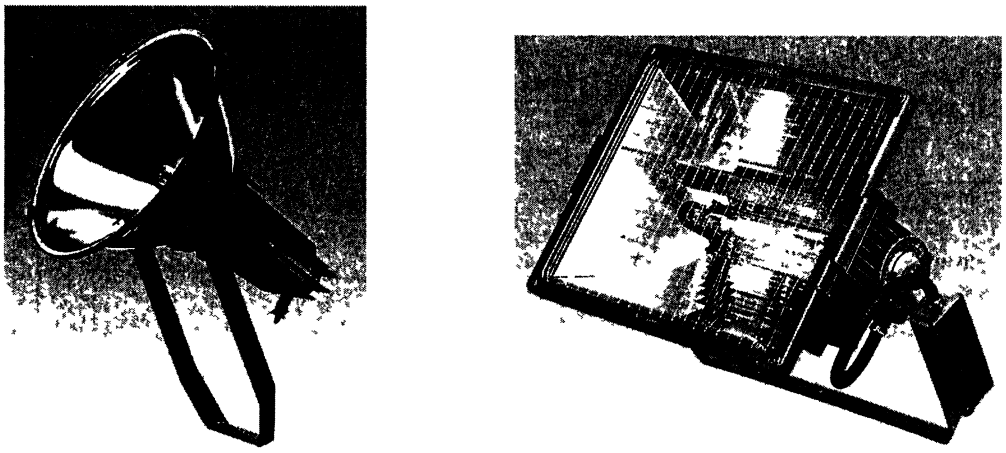
6. Буквы К с последующей цифрой обозначают исполнение: К3 — с жалюзи и основанием, К2 — с жалюзи, без основания, К1 — без жалюзи, с основанием, К — без жалюзи, без основания.

вающего света с металлическими отражателями (ПЗМ, ПСМ, ПГП, ПГЦ). Диаметр (в сантиметрах) отражателя ПР указывается при маркировке прибора, например ПЗС-35. Угол излучения этих прожекторов характеризуется 10 %-ными полезными углами рассеяния $2\alpha_{10}$ (в пределах которых сила света снижается до $0{,}1I_0$) в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Дальнейшее развитие прожекторных приборов предполагает увеличение их осевых сил света при сокращении диаметров отражателей и габаритных размеров. Должна быть также увеличена номенклатура ПР с РЛ высокой интенсивности и разнообразными формами световых пучков. Представителями прожекторов с такими лампами типа ДРИ являются отечественные приборы ПГП и ПГЦ, (табл. 61.21)

Зарубежные фирмы («Philips», «Ivasaky» и др.) в настоящее время полностью перешли на применение в ПР натриевых (типа SON), металлогалоидных (типа HPL, HPI) и галогенных ламп накаливания (типа «Halogen») самой разной мощности — от 35 Вт до 1 кВт и выше. Они применяются для освещения высоких цехов, стадионов, архитектурных подсветов зданий и других объектов. ПР зарубежных фирм, так же как и отечественные, имеют в качестве оптических деталей параболоидные и параболоцилиндрические зеркальные отражатели (рис. 61.14 *а*, *б*). В табл. 61.22 даны основные параметры некоторых ПР фирмы «Philips». В маркировке приборов иногда встречаются обозначения типов ИС (М, Н — металлогалогенные, S — натриевые, Q — галогенные ЛН), а также номера разработок, кроме того, у некоторых ПР (Floodlighting) обозначена ширина пучка (N — узкий, М — средний, W — широкий).

Из сравнения отечественных и зарубежных ПР следует сделать вывод о большем разнообразии типов ПР иностранных фирм, об отсутствии ПР с обычными лампами накаливания, о большем разветвлении номенклатуры ПР как по типам РЛВД, так и по их мощностям (см. табл. 61.22). Стоит отметить, что зарубежные приборы имеют меньшую массу и габаритные размеры. При бо́льших значениях I_{max} ПР имеют одинаковую мощность. В табл. 61.22 значения I_{max} даны для условной лампы 1000 лм. Углы рассеяния α_{50} даны для углов, при которых значения силы света составляют 50 % I_{max}. Углы рассеяния α_{50} даются обычно в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, одна из которых проходит через ось *LM* лампы ПР, другая — поперек оси *KJ* (табл. 61.22).



а) *б)*

Рис. 61.14. Прожекторы фирмы «Philips» («Филипс») с лампами ДРИ:
а — типа HNF 206-N2KW с параболоидным отражателем, *б* — типа MVF024-N1KW с параболоцилиндрическим отражателем

Таблица 61 22 **Технические данные некоторых ПР фирмы «Philips» («Филипс»)**

Тип прибора — обозначение, номер разработки, тип светового пучка, мощность, Вт, кВт	Тип ИС — обозначение, мощность, Вт, световой поток, клм	Максимальная сила света I_{max}, ккд, на 1000 лм	α_{50}, град				Размеры светового отверстия, мм	Габаритные размеры, мм			Масса без ПРА, кг	Исполнение IP	Углы поворота, град	
			KJ в поперечной плоскости		*ML* в продольной плоскости			Высота	Ширина	Глубина			вверх	вниз
			J	*K*	*M*	*L*								
SVF606M35	SDW-T-35W, 1,3 klm	22,9	+3	−3	+3	−3	Диаметр 162	332	317	273	7,3	6,5	90	90
SVF606N50	SDW-T-50W, 2,3 klm	30,1	+2	−2	+2	−2	Диаметр 162	332	317	273	7,3	6,5	90	90
SVF606N100	SDW-T-100W, 4,8 klm	7,7	+6	−6	+6	−6	Диаметр 162	532	317	273	7,3	6,5	90	90
SVF607N400	SON-T-PLUS-400W, 5,5 klm	12,1	+1	−2	+2	−2	Диаметр 280	535	400	352	13,2	5,5	100	90
HNF206N2kW	HPI-T-2000W/230V, 189 klm	9,8	+3	−3	+3	−3	Диаметр 590	903	650	650	14,2	5,5	150	60
MVF024N1kW	HPI-T-1000W/230V, 81 klm	1,7	+4	−6	+42	−42	600 × × 450	549	670	340	14,5	5,5	175	180
QVF417N1,5kW	Halogen-1500W, 36,3 klm	1,4	+23	−21	+39	−42	390 × × 232	390	370	176	4,0	5,5	80	80

Примечания 1 *JK* обозначение плоскости, перпендикулярной оси лампы, углы от вертикали вправо имеют положительное значение (+) (полуплоскость *J*), углы влево — отрицательное (полуплоскость *K*)

2 *ML* — обозначение плоскости, проходящей через ось лампы, углы от вертикали вправо положительные (полуплоскость *M*), углы влево отрицательные (полуплоскость *L*)

61.4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ИСКУССТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Осветительная установка (ОУ) производственного помещения должна обеспечить достаточную освещённость рабочей поверхности и создать благоприятное распределение яркости стен и потолка в поле зрения. Эти требования положены в основу действующих норм и правил.

Электрическое освещение подразделяется на рабочее, охранное, аварийное. Последнее делится на освещение безопасности и эвакуационное. При необходимости часть СВ того или иного вида освещения может использоваться для дежурного освещения (освещения в нерабочее время). Искусственное освещение проектируется двух систем: общее и комбинированное, когда к общему освещению добавляется местное — освещение рабочих мест.

Рабочее освещение следует устраивать во всех помещениях зданий, а также на участках территорий, где производятся работы, движется транспорт.

Проектирование ОУ производится в следующей последовательности: выбор нормируемой освещенности, качественных показателей освещения — показателя ослепленности (или дискомфорта), коэффициента пульсации, коэффициента запаса; выбор системы освещения; выбор типов источников света и СВ (с учетом технико-экономических показателей и необходимого спектрального состава), а также мест их размещения; расчет мощности ОУ, мощности применяемых ламп и количества СВ; поверочный расчет установки на минимальную освещенность.

ВЫБОР НОРМИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ

Выбор освещенности для разрядных источников света производится на основе СНиП 23-05—95 (табл. 61.23) [61.7]. Нормируемое значение освещенности в люксах иногда следует повышать или понижать по сравнению со значениями, указанными в табл. 61.23. Это следует делать с помощью ступеней изменения освещенности, регламентируемых следующей шкалой: 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 10; 15; 20; 30; 50; 75; 100; 150; 200; 300; 400; 500; 600; 750; 1000; 1250; 2000; 2500; 3000; 3500; 4000; 4500; 5000 лк.

Нормы освещенности, приведенные в табл. 61.23, следует повышать на одну ступень шкалы освещенности в следующих случаях:

а) при работах I—IV разрядов, если напряженная зрительная работа выполняется более половины рабочего времени;

б) при повышенной опасности травматизма при освещенности от общего освещения 150 лк и менее (дисковые пилы, гильотинные ножницы и т.д.);

в) при специальных повышенных санитарных требованиях (пищевая и химико-фармацевтическая промышленность), если освещенность от общего освещения составляет 500 лк и менее;

г) при работе или производственном обучении подростков, если освещенность от системы общего освещения составляет 300 лк и менее;

д) при отсутствии в помещении естественного света при постоянном пребывании работающих, если освещенность от системы общего освещения составляет 750 лк и менее;

е) при наблюдении деталей, вращающихся с частотой, равной или более 500 об/мин, или объектов, движущихся со скоростью равной 1,5 м/мин или более;

ж) при постоянном поиске объектов различения на поверхности размером 0,1 $м^2$ и более;

з) в помещениях, где более половины работающих старше 40 лет.

При наличии одновременно нескольких признаков нормы освещенности следует повышать не более чем на одну ступень.

В помещениях, где выполняются работы IV—VI разрядов, нормы освещенности следует снижать на одну ступень при кратковременном пребывании людей или при наличии оборудования, не требующего постоянного обслуживания.

Наименьшие размеры объекта различения и соответствующие разряды зрительной работы установлены при расположении объектов различения на расстоянии не более 0,5 м от глаз работающего. При увеличении этого расстояния разряд зрительной работы следует устанавливать с учетом углового размера объекта различения, рад (отношения минимального линейного размера объекта к расстоянию от объекта до глаз работающего): I — менее $0{,}3 \cdot 10^{-3}$; II — от $0{,}3 \cdot 10^{-3}$ до $0{,}6 \cdot 10^{-3}$; III — от $0{,}7 \cdot 10^{-3}$ до $1{,}0 \cdot 10^{-3}$; IV — от $1{,}1 \cdot 10^{-3}$ до $2{,}0 \cdot 10^{-3}$; V — от $2{,}1 \cdot 10^{-3}$ до $10{,}0 \cdot 10^{-3}$; VI — более $10{,}1 \cdot 10^{-3}$.

Подразряды зрительной работы определяются по значениям яркостного контраста K, который рассчитывается в зависимости от яркостей объекта L_o и фона $L_ф$ [$K = (L_o - L_ф)/L_ф$]: а) малый контраст на темном фоне; б) малый контраст на среднем фоне или средний контраст на темном фоне; в) малый контраст на светлом фоне, средний контраст на среднем фоне или большой контраст на темном фоне; г) средний контраст на светлом фоне, большой контраст на светлом фоне или большой контраст на среднем фоне.

Значения контраста K делятся на большое (б) ($K \geq 0{,}5$), среднее (с) ($0{,}2 \leq K < 0{,}5$), малое (м)

Таблица 61.23. **Нормы освещенности рабочих поверхностей в производственных помещениях для разрядных ИС по СНиП 23-05—95**

Характеристика зрительной работы	Наименьший размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта различения с фоном	Характеристика фона	Освещенность, лк			Качественные показатели	
						Система комбинированного освещения		Система общего освещения	Показатель ослепленности P	Коэффициент пульсации $K_п$, %
						Всего	В том числе от общего			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Наивысшей точности	Менее 0,15	I	а	Малый	Темный	5000 4500	500 500	— —	20 10	10 10
			б	Малый Средний	Средний Темный	4000 3500	400 400	1250 1000	20 10	10 10
			в	Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный	2500 — 2000	300 — 200	750 — 600	20 — 10	10 — 10
			г	Средний Большой »	Светлый » Средний	1500 — 1250	200 — 200	400 — 300	20 — 10	10 — 10
Очень высокой точности	От 0,15 до 0,3	II	а	Малый	Темный	4000 3500	400 400	— —	20 10	10 10
			б	Малый Средний	Средний Темный	3000 2500	300 300	750 600	20 10	20 10
			в	Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный	2000 — 1500	200 — 200	500 — 400	20 — 10	10 — 10
			г	Средний Большой »	Светлый » Средний	1000 — 750	200 — 200	300 — 200	20 — 10	10 — 10
Высокой точности	От 0,3 до 0,5	III	а	Малый	Темный	2000 1500	200 200	500 400	40 20	15 15
			б	Малый Средний	Средний Темный	1000 750	200 200	300 200	40 20	15 15
			в	Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный	750 — 600	200 — 200	300 — 200	40 — 20	15 — 15
			г	Средний Большой »	Светлый » Средний	400 — —	200 — —	200 — —	40 — —	15 — —
Средней точности	Свыше 0,5 до 1	IV	а	Малый	Темный	750	200	300	40	20
			б	Малый Средний	Средний Темный	500 —	200 —	200 —	40 —	20 —
			в	Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный	400 — —	200 — —	200 — —	40 — —	20 — —
			г	Средний Большой »	Светлый » Средний	— — —	— — —	200 — —	40 — —	20 — —

Окончание табл. 61.23

Характеристика зрительной работы	Наименьший размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта различения с фоном	Характеристика фона	Освещенность, лк			Качественные показатели	
						Система комбинированного освещения		Система общего освещения	Показатель ослепленности P	Коэффициент пульсации $K_п$, %
						Всего	В том числе от общего			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Малой точности	Свыше 1 до 5	V	а	Малый	Темный	400	200	300	40	20
			б	Малый Средний	Средний Темный	— —	— —	200 —	40 —	20 —
			в	Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный	— — —	— — —	200 — —	40 — —	20 — —
			г	Средний Большой »	Светлый » Средний	— — —	— — —	200 — —	40 — —	20 — —
Грубая (очень малой точности)	Более 5	VI	—	Независимо от характеристики фона и контраста объекта с фоном		—	—	200	40	20
Работа со светящимися материалами и изделиями в горячих цехах	Более 0,5	VII	—	То же		—	—	200	40	20
Общее наблюдение за ходом производственного процесса:	—	VIII		То же						
постоянное			а			—	—	200	40	20
периодическое при постоянном пребывании людей в помещении			б			—	—	75	—	—
периодическое при периодическом пребывании людей в помещении			в			—	—	50	—	—
Общее наблюдение за инженерными коммуникациями			г			—	—	20	—	—

Примечания: 1. Для подразряда норм от Iа до IIIв может приниматься один из нормируемых показателей, приведенных для данного подразряда в графах 7—11.

2. При расстоянии более 0,5 м от глаз работающего разряд зрительной работы следует устанавливать по угловому размеру объекта (см. ниже).

3. При использовании ЛН освещенность следует снижать по шкале: а) на одну ступень при системе комбинированного освещения, если нормируемое значение составляет 750 лк и более; б) на одну ступень при системе общего освещения для разрядов I—VI; в) на две ступени при системе общего освещения для разрядов VI и VIII.

4. При работах со светящими объектами, максимальный размер которых 0,5 мм и менее, освещенность следует выбирать в соответствии с их размером и относить к подразряду «в».

5. Показатель ослепленности P регламентируется только для общего освещения.

6. Коэффициент $K_п$ указан для системы общего освещения или для светильников местного освещения при системе комбинированного освещения, $K_п$ от общего освещения в последней системе должен быть не выше 20 %.

7. Система общего освещения для разрядов I—III, IVа, IVб, IVв, Va допускается только при технической невозможности или экономической нецелесообразности применения комбинированного освещения, что конкретизируется в соответствующих инстанциях.

($K \leq 0{,}2$). Фон в зависимости от коэффициента отражения материала считается светлым (св) ($\rho \geq 0{,}4$), средним (ср) ($0{,}2 \leq \rho < 0{,}4$) и темным (т) ($\rho < 0{,}2$).

Кроме общих норм освещенности СНиП 23-05—95 предусматривает нормы для ряда зданий различного назначения.

К показателям качества освещения относятся показатели, ограничивающие блеское действие световых приборов, — показатель дискомфорта для общественно-административных зданий и показатель ослепленности для производственных помещений и открытых пространств. Показатель ослепленности $P = (S - 1)1000$, где S – коэффициент ослепленности, равный отношению пороговых разностей яркости при наличии и отсутствии слепящих источников в поле зрения.

При отражении светового потока от рабочей поверхности в направлении глаз работающего эта поверхность начинает слепить, что проявляется в снижении видимости. Чрезмерная яркость рабочей поверхности в отраженном свете вызывает отраженную блескость. Поэтому яркость рабочей поверхности при площади менее $1 \cdot 10^{-4}$ м^2 должна быть не выше 2000 кд/м^2, от $1 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ — 1500 кд/м^2, от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ — 1000 кд/м^2, от $1 \cdot 10^{-2}$ до $1 \cdot 10^{-1}$ — 750 кд/м^2, более $1 \cdot 10^{-1}$ — 500 кд/м^2.

Так как пульсация светового потока во времени утомляет глаза, то качество освещения оценивается по коэффициенту пульсации освещенности $K_п = (E_{max} - E_{min})100/2E_{ср}$, где E_{max} и E_{min} — максимальное и минимальное значения освещенности за период ее колебания, лк; $E_{ср}$ — среднее значение освещенности за тот же период, лк.

В процессе эксплуатации осветительной установки освещенность рабочих мест снижается вследствие запыления и загрязнения светильников, а также из-за снижения светового потока ламп. Для учета снижения освещенности в процессе эксплуатации вводится коэффициент запаса $K_з$, повышающий расчетную освещенность по сравнению с нормируемой (табл. 61.24).

Примеры норм освещенности и качественных показателей для электротехнического производства и общественных зданий даны в табл. 61.25 и 61.26.

Приведенный в табл. 61.26 показатель дискомфорта M — критерий оценки дискомфортной блескости, вызывающей неприятные ощущения при неравномерном распределении яркостей в поле зрения: $M = L_c \omega^{0,5} / (\varphi_\theta L_{ад}^{0,5})$, где L_c — яркость блеского источника кд/м^2; ω — телесный угол, опирающийся на блеский источник, ср; φ_θ — индекс позиции блеского источника относительно линии зрения; $L_{ад}$ — яркость адаптации. При проектировании показатель M рассчитывается.

ВЫБОР СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ, ТИПОВ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА И СВЕТИЛЬНИКОВ И МЕСТ ИХ РАЗМЕЩЕНИЯ

Осветительные установки выполняются по системе либо общего, при котором СВ размещаются в верхней зоне помещения равномерно, либо комбинированного освещения, когда к общему еще добавляется местное освещение, дополнительное, создаваемое СВ непосредственно на рабочих местах. Система общего освещения применяется в производственных помещениях с невысоким уровнем освещенности (до 200 лк). В помещениях с I—III, IVа, IVб, IVв, Va разрядами работ следует применять систему комбинированного освещения. Предусматривать для них систему общего освещения допускается при технической невозможности или нецелесообразности устройства местного освещения.

Освещенность, создаваемая СВ, при системе общего освещения, указана в табл. 61.23 (графа 8). Освещенность рабочих мест (местное освещение) при системе комбинированного освещения должна составлять $E_м = E_к - E_{об}$ (данные граф 7, 8 табл. 61.23). Освещенность рабочих поверхностей, создаваемая светильниками общего освещения в системе комбинированного, должна составлять не менее 10 % от нормируемой для этой системы при тех источниках света, которые применяются для местного освещения. При этом освещенность должна быть не менее 200 лк при РЛ и не менее 75 лк при ЛН. В помещениях без естественного света освещенность рабочей поверхности, создаваемую светильниками общего освещения в системе комбинированного, следует повышать на одну ступень.

Неравномерность освещенности E_{max}/E_{min} в зоне размещения рабочих мест для работ I—III разрядов при люминесцентных лампах должна быть не более 1,3, при других источниках света — 1,5; для работ разрядов IV—VII — 1,5 и 2,0 соответственно.

Неравномерность освещенности допускается повышать до трех в тех случаях, когда по условиям технологии светильники общего освещения могут устанавливаться только на площадках, колоннах или стенах помещения.

В производственных помещениях освещенность проходов и участков, где работа не производится, должна составлять не менее 25 % освещенности, создаваемой СВ общего освещения, но не менее 75 лк при РЛ и не менее 30 лк при ЛН.

Таблица 61.24. **Значения коэффициентов запаса $K_з$ и количество чисток СВ в год по СНиП 23-05—95**

№ п/п	Помещения и территории	Примеры помещений	$K_з$/количество чисток		
			Эксплуатационная группа СВ по табл. 61.18		
			1—4	5—6	7
1	Производственные помещения с воздушной средой, содержащей в рабочей зоне:				
	а) свыше 5 мг/м^3 пыли, дыма, копоти	Агломерационные фабрики, цементные заводы и обрубные отделения литейных цехов	2/18	1,7/6	1,6/2
	б) от 1 до 5 мг/м^3 пыли, дыма, копоти	Цехи кузнечные, мартеновские, литейные, сварочные, сборного железобетона	1,8/6	1,6/4	1,6/2
	в) менее 1 мг/м^3 пыли, дыма, копоти	Цехи инструментальные, сборочные, механосборочные, пошивочные, ткацкие, прядильные, деревообрабатывающие	1,5/4	1,4/1	1,4/1
	г) значительные концентрации паров, кислот, щелочей газов, способные при соприкосновении с влагой образовывать слабые растворы кислот, щелочей, обладающих большой коррозирующей способностью	Цехи химических заводов по выработке кислот, щелочей, едких химических реактивов, ядохимикатов, удобрений. Цехи гальванических покрытий и гальванопластики различных отраслей промышленности с применением электролиза	1,8/6	1,6/4	1,6/2
2	Производственные помещения с особым режимом по чистоте воздуха при обслуживании СВ:				
	а) сверху	—	1,3/4	—	—
	б) снизу	—	1,4/2	—	—
3	Помещения общественных и жилых зданий:				
	а) пыльные, жаркие и сырые	Горячие цехи предприятий общественного питания, охлаждаемые камеры, помещения для приготовления растворов в прачечных, душевые и т.д.	1,7/2	1,6/2	1,6/2
	б) с нормальными условиями среды	Кабинеты и рабочие помещения общественных зданий, жилые комнаты, учебные помещения, лаборатории, читальные залы, залы совещаний, торговые залы и т.д.	1,4/2	1,4/1	1,4/1
4	Территории с воздушной средой, содержащей:				
	а) большое количество пыли (более 1 мг/м^3)	Территории металлургических, химических, горно-обрабатывающих предприятий, шахт, рудников, железнодорожных станций и прилегающих к ним улиц и дорог	1,5/4	1,5/4	1,5/4
	б) малое количество пыли (менее 1 мг/м^3)	Территории промышленных предприятий (кроме указанных в п. 4а) и общественных зданий	1,5/2	1,5/2	1,5/2
5	Населенные пункты	Улицы, площади, дороги, территории жилых районов, парки, бульвары, пешеходные тоннели, фасады зданий, памятники	1,6/2	1,5/2	1,6/1
		Транспортные тоннели	—	1,7/2	—

Примечание. Значения $K_з$ приведены для разрядных ИС. При использовании ЛН их следует умножить на 0,85.

Таблица 61.25. **Примеры норм освещенности и качественных показателей освещения ряда электротехнических производств (освещение РЛ)**

Цех, участок	Плоскость, в которой нормируется освещенность (Г — горизонтальная, В — вертикальная); высота над полом, м	Разряд и подразряд зрительной работы	Минимальная освещенность, лк			Показатель ослепленности P, отн. ед., не более	Коэффициент пульсации $K_п$*, %, не более
			Комбинированное освещение		Общее освещение		
			Всего	От общего			
Общеотраслевые цехи, участки, оборудование							
Заготовительно-штамповочный цех металла (резка листа, рубка прутка, гибка колец, штамповка, вытяжка, вырубка деталей, навивка, разрезание и шихтовка магнитопроводов)	Г, О	Va	300	150	200	40	20
Цех изготовления изоляции	Г, О	Vб	200	150	150	40	20
Цех пластмасс — отделение подготовки сырья, таблетирование, перемол отходов	Г, О	Va	300	150	200	40	20
Прессовое отделение, отделение механической обработки	Г, О	IVa	750	150	300	40	20
Сушильно-пропиточное отделение, участок лакировки, участок отжига	Г; 0,8	VI	—	—	150	40	20
Разделка провода, вязка жгутов	Г, О	IVб	500	150	200	40	20
Пайка оконцевателей	Г, О	IIIв	750	150	300	40	20/15
Намотка катушек на автомате	Г, О	IIIб	1000	150	—	40	20/15
Контроль электрических параметров	Любая	IVг	300	150	150	40	20
Обработка сырьевых материалов (мельницы, смесители, вальцы, элеваторы, сушилки, реакторы и т.д.)							
Для ремонта и наладки оборудования	Г, В	IVб	500	150	200	40	20
Электромашиностроение							
Литейный цех, участок заливки алюминия в пазы ротора	Г, О	IIIв	—	—	300	40	15
Обмоточный цех:							
заготовительный участок	Г, О	Vб	200	150	200	40	20
обмоточный участок	Г; 0,8	—	—	—	300	40	20
Укладка обмоток, межфазовой изоляции:							
для малых машин	Г, О	IIв	2000	200	500	20	20/10
для средних и крупных машин	Г, О	IIIв	750	150	300	40	20/15
Цех изготовления коллекторов	Г, О	IIIб	1000	150	300	40	20/15
Сборка малых машин	Г, О	IIв	2000	200	500	20	20/10
Сборка крупных и средних машин	Г, О	IIIв	750	150	300	40	20/15
Производство трансформаторов и высоковольтной аппаратуры							
Сборка пакета и магнитопровода:							
для трансформаторов I—III габаритов	Г, О	IIIб	1000	150	300	40	20/15
для трансформаторов IV—VI габаритов	Г, О	IVб	500	150	200	40	20
Визуальный контроль магнитопровода	В	IIIб	1250	150	—	20	20/10
Отделение изготовления обмоток:							
для трансформаторов I—III габаритов	Г	IIIб	1000	150	300	40	20/15
для трансформаторов IV—VI габаритов и реакторов	Г	IVб	500	150	200	40	20
Визуальный контроль обмоток	Г	IIIб	1250	150	—	40	20/10
Сборка трансформаторов I—III габаритов и малогабаритной высоковольтной аппаратуры	В	IIIб	1000	150	300	40	20/15
Сборка трансформаторов IV—VI габаритов и крупногабаритной высоковольтной аппаратуры	В	IVб	500	150	200	40	20
Цех малых трансформаторов	Г	IIб	3000	300	—	20	20/10

* В числителе — максимально допустимое значение $K_п$ для общего освещения в системе комбинированного освещения, в знаменателе — для местного освещения и для системы общего освещения.

Таблица 61.26. **Нормы освещенности и качественные показатели, рекомендуемые для характерных помещений административных зданий и проектно-конструкторских бюро**

Помещение	Плоскость нормирования освещенности (Г — горизонтальная, В — вертикальная); высота над полом, м	Освещенность рабочей поверхности, лк	Показатель дискомфорта M, не более	Коэффициент пульсации, %, не более	Рекомендуемая группа СВ*[1]	Условия среды
Кабинеты*[2] и рабочие комнаты, проектные кабинеты	Г, 0,8	300*[3]	40	15	1, 2, 5	Нормальная
Проектные залы и комнаты, конструкторские, чертежные бюро	Г, 0,8	500*[5]	40	10	1, 2, 5	То же
Машинописные бюро	Г, 0,8	400*[3]	40	10	1, 2, 5	»
Канцелярии	Г, 0,8	200*[3]	60	15	1, 2, 5	»
Помещения для посетителей	Г, 0,8	150	60	20	1, 2, 5	»
Помещения светокопирования	Г, 0,8	200*[4]	60	20	6	Класс II—IIа
Помещения для микрофотографирования	Г, 0,8	200	60	20	1, 2, 5	Нормальная
Помещения для электрографирования	Г, 0,8	200*[4], *[6]	60	20	6	Пыльная
Фотокомнаты	Г, 0,8	200	60	20	1, 2, 5	Влажная
Помещения офсетной печати:						
редакционно-оформительское отделение	Г, 0,8	300*[3]	40	10	1, 2, 5	Нормальная
отделение подготовки и изготовления печатных форм	Г, 0,8	200	60	20	1, 2, 5	То же
печатное отделение	Г, 0,8	300*[4]	40	15	1, 2, 5	Класс II—IIа
Переплетно-брошюровочные помещения	Г, 0,8	200*[3]	60	20	1, 2, 5	То же
Залы ЭВМ*[4], помещения внешних запоминающих устройств, подготовки данных, сервисной аппаратуры, графопостроителей, графоповторителей, ремонта типовых элементов замены и электромеханических устройств *[4], электронно-клавишных вычислительных машин приема и выпуска информации	Г, 0,8	400	40	10	1, 2, 5	Нормальная
Архивы магнитных и бумажных носителей						
на рабочих столах	Г; 0,8	400	40	10	1, 2, 5	Класс II—IIа
на стеллажах	В; 1,0	200	—	10	1, 2, 5	То же
Бюро алгоритмизации, программирования, справочной информации	Г; 0,8	300*[7]	40	15	1, 2, 5	Нормальная
Конференц-залы, залы заседаний*[2]	Г; 0	200	60	15	2, 3, 5	То же
Выставочные залы*[2]	Г; 0,8	200	60	—	1, 2, 3, 5	»
Фойе, кулуары*[2]	Г; 0	150	90	—	2, 4, 5	»
Градостроительные, архитектурные советы*[2]	Г; 0	200	60	15	2, 3, 5	»

Окончание табл. 61.26

Помещение	Плоскость нормирования освещенности (Г — горизонтальная, В — вертикальная); высота над полом, м	Освещенность рабочей поверхности, лк	Показатель дискомфорта M, не более	Коэффициент пульсации, %, не более	Рекомендуемая группа СВ*[1]	Условия среды
Отделы оформления проектов	Г; 0,8	300*[3]	40	15	1, 2, 5	Нормальная
Макетные мастерские	Г; 0,8	300*[6]	40	15	1, 2, 5	Класс II—IIа
Кладовые канцпринадлежностей, бумаги, химикатов для копировально-множительных служб, пункты сбора и упаковки макулатуры	Г, 0	30*[8]	—	—	7	То же

*[1] Группы СВ: 1 — ЛСО04, ЛСО05, ЛСО06, ЛСО02, ШОД; 2 — Л2О10М, ЛПО02, ЛПО30 (с рассеивателями), ЛПО33, ЛПО34, ЛПО28; 3 — ЛПО03, ЛПО16, ЛПО30 (одноламповые с рассеивателями); 4 — ЛПО03, ЛПО16, ЛПО30 (одноламповые без рассеивателей); 5 — ЛВО01, ЛВО05; 6 — ПВЛП, ЛПО25; 7 — НПО18, НПО20.

*[2] Возможно использование приемов архитектурного освещения.

*[3] Для местного освещения необходимо предусматривать электрические розетки на напряжение 220 В.

*[4] Для переносных ОП необходимо предусматривать электрические розетки на напряжение 42 В.

*[5] При оборудовании помещения кульманами следует вводить коэффициент 1,25, учитывая наклонное положение рабочей поверхности и ее затенение работающим.

*[6] Следует вводить коэффициент запаса 1,8.

*[7] В зоне установки чертежных и разметочных столов 500 лк.

*[8] Нормируемая освещенность приведена для ЛЛ, за исключением кладовых и пункта сбора макулатуры, где рекомендуются ЛН.

Выбор типа источника производится исходя из его экономичности (бо́льшая световая отдача при большем или том же сроке службы), правильной передачи цветов освещаемых объектов (там, где это важно) и удобства эксплуатации. Правильная передача цветов обеспечивается цветопередачей, характеризующей влияние спектрального состава ИС на зрительное восприятие цветных объектов, сознательно или бессознательно сравниваемое с восприятием тех же объектов, освещенных стандартным ИС. При этом имеет значение цветовая температура ИС $T_ц$ — температура в градусах Кельвина излучателя Планка, имеющего ту же цветность, что и излучение рассматриваемого ИС. Цветопередача оценивается общим индексом цветопередачи R_a, который дает усредненную характеристику цветовых сдвигов восьми стандартных образцов средней насыщенности при переходе от испытуемого ИС к опорному: $R_a = 1/8\Sigma R_i$, где $R_i = 4{,}6 - \Delta E_i$; ΔE_i — цветовой сдвиг. Индекс 100 имеет ИС с такой же цветопередачей, как и опорный ИС, а индекс 50 — стандартная ЛЛ с $T_ц = 3000$ К. Высокий класс цветопередачи $R_a \geq 85$, средний $85 < R_a \geq 70$ и низкий $R_a < 70$. При выборе типа источника рекомендуется пользоваться табл. 61.27.

Для освещения помещений, как правило, предусматриваются разрядные лампы (люминесцентные, ДРЛ, ДРИ, ДНаТ). В случае невозможности или технико-экономической нецелесообразности применения разрядных ламп допускается использование ламп накаливания. Применение ксеноновых ламп типа ДКсТ внутри помещения допускается в виде исключения, только по согласованию с органами здравоохранения.

Выбор типа СВ производится с учетом требований к его светораспределению (рис. 61.9; табл. 61.28); степени защиты по условиям среды ограничению ослепленности; экономичности установки в целом.

Выбор светильников в зависимости от конструктивной схемы, степени защиты и твердости све-

Таблица 61.27. **Рекомендуемые цветовые параметры и примерные типы источников света для различных зрительных работ**

Характеристика зрительной работы	Освещенность при общем освещении, лк	Индекс цветопередачи R_a, не менее, для зданий		Цветовая температура $T_ц$, К, для зданий		Тип источника света для зданий	
		производственных	общественных	производственных	общественных	производственных	общественных
Контроль цвета с очень высокими требованиями к цветоразличению (контроль готовой продукции на швейных фабриках, тканей на текстильных фабриках, сортировка кож, изготовление красок, подбор красок для цветной печати и др.)	Не менее 300	90	90	5000—6000	5000—6500	ЛДЦ, ЛДЦУФ (ЛХЕ)	(ЛХЕ), ЛДЦ, ЛДЦУФ
Сопоставление цветов с высокими требованиями к цветоразличению (раскрой верха обуви, контроль сырья на консервных заводах и ткацких фабриках, окраска машин, работы в выставочных залах и специализированных магазинах и др.)	Не менее 300	85	85	3500—6000	3500—5000	ЛДЦ, ЛДЦУФ, (ЛХЕ, ЛЕ), ЛБЦТ	ЛБ*, (ЛЕЦ), КЛБЦТ*, (ЛХЕ)
Различение цветных объектов для контроля и сопоставления (при сборке радиоаппаратуры, прядении, намотке проводов, переплетных работах и др.)	300 и более	50	55	3500—6500	3500—5000	ЛБ, МГЛ, (ЛХБ)	МГЛ**, ЛБ, ЛБЦТ, (ЛХБ, ЛЕ)
	150—300	50	55	3000—4500	3000—4500	ЛБ, (ЛХБ), МГЛ, НЛВД + МГЛ	ЛБ, (ЛХБ), (ЛЕ)
	Менее 150	45	55	2700—3500	2700—3500	ЛБ, (ЛН, КГ), ЛБ, ДРЛ**, НЛВД, (КГ)	ЛБ, (ЛН), МГЛ + НЛВД
Общее восприятие интерьера (фойе, вестибюли, залы театров и кинотеатров)	Не менее 150	—	85	—	2700—4000	—	ЛБ*, (ЛЕЦ), КЛТБЦ, (ЛН), ДРЛ**
Требования к цветоразличению отсутствуют (механическая обработка металлов, пластмасс, сборка машин, инструментов, лестничные клетки, лифтовые холлы, вестибюли)	Не менее 500	50		3500—6000		ЛБ, МГЛ	—
	300—480	40		3500—5000		ЛБ, МГЛ, (ДРЛ), НЛВД + МГЛ	—
	150—200	29		2600—4500		ЛБ, МГЛ, (ДРЛ)**, НЛВД + МГЛ, ДРЛ	—
	Менее 150	25	45	2400—3500	3000—3500	ЛБ, НЛВД, (ДРЛ), (ЛН)	ЛБ

* Рекомендуются трубчатые маломощные, фигурные (U-образные и кольцевые), компактные, энергоэкономичные и тонкие люминесцентные лампы.

** Лампы ДРЛ, МГЛ с высоким красным отношением ($r_к$ > 10 %).

Примечание. В скобках указаны менее эффективные источники света.

Таблица 61.28. **Выбор типа светильника по его светораспределению**

Класс светильника и тип КСС	Область применения
Прямого света (П):	
глубокоизлучатели концентрированного светораспределения (К) и среднего светораспределения (Г)	Высокие производственные помещения с темными стенами и потолком, локализованное освещение рабочих поверхностей, требующих большой горизонтальной освещенности
косинусного светораспределения (Д)	Производственные помещения с высотой не более 10 м с темным потолком и пылевыделением
широкого светораспределения и косинусного светораспределения (Л, Ш)	Открытые пространства, цехи небольшой высоты и с негромоздким оборудованием, локализованное освещение при требовании двусторонней вертикальной освещенности
Преимущественно прямого света (Н)	Производственные и подсобные помещения со светлой окраской потолка и стен, школьные, конторские и прочие помещения
Преимущественно отраженного света (В)	Помещения с гладкими белыми потолками и стенами, где основным требованием является отсутствие резких теней (клубы, фойе, чертежные)
Отраженного света (О)	Помещения общественного и коммунального назначения (театры, кинотеатры, клубы)

тотехнических материалов (твердые алюминированные) делается исходя из данных табл. 61.18.

При системе общего освещения применяется равномерное и локализованное размещение СВ. При равномерном размещении обеспечивается достаточная равномерность освещенности по всей площади помещения в целом. В этом случае расстояние между СВ в каждом ряду неизменно, расстояние между рядами берется также постоянным.

При локализованном размещении положение каждого СВ зависит от расположения оборудования. Оно применяется при локализованном размещении станков; в специальных случаях, обусловленных требованием технологии, и, наконец, в том случае, если по условиям работы невозможно устройство местного освещения.

Таблица 61.29. **Рекомендуемые и допустимые значения $l/H_р$ для светильников при разных КСС**

Тип КСС светильника (см. рис. 61.9)	$l/H_р$	
	Рекомендуемые значения	Наибольшие допустимые значения
К	0,4—0,7	0,9
Г	8—1,2	1,4
Д	1,2—1,6	2,1
М	1,8—2,6	3,4
Л	1,4—2,0	2,3

Наилучшими вариантами равномерного размещения являются шахматное размещение СВ и по сторонам квадрата (расстояния между светильниками в ряду и между рядами СВ равны). Размещение СВ по сторонам квадрата следует производить с учетом оптимальных значений относительного расстояния $l/H_р$, где l — расстояние между СВ; $H_р$ — высота подвеса СВ над рабочей поверхностью (удаленной от пола на высоту 0,8 м) для различных типовых КСС СВ (табл. 61.29).

Оптимальное расстояние от крайнего ряда СВ до стен при условии размещения возле нее рабочих поверхностей определяется как $l_к = (0{,}24—0{,}3)l$. При отсутствии рабочих поверхностей у стен это расстояние может быть увеличено до $l_к = (0{,}4—0{,}5)l$.

При равномерном размещении люминесцентных СВ последние располагают обычно рядами — параллельно рядам оборудования. Учитывая, что распределение силы света люминесцентных СВ типа ЛС06 близко к косинусному, относительное расстояние между СВ в ряду и между СВ соседних рядов рекомендуется принимать не более 1,4. Для светильников с диффузной экранирующей решеткой (типа ЛДОР), имеющих более концентрированное светораспределение, относительное расстояние должно быть не более 1,2. При высоких уровнях нормированной освещенности люминесцентные СВ обычно располагают непрерывными рядами, для чего светильники соединяют торцами.

Для электротехнических производств в зависимости от строительных параметров, характера технологических процессов и условий среды в табл. 61.30 даны рекомендации по выбору значений $K_з$, типов ИС и СВ общего освещения.

Таблица 61 30 **Строительные параметры, условия среды, рекомендуемые значения $K_з$, типы ИС и СВ общего освещения**

Цех, участок	Строительные параметры, м		Среда	$K_з$ (по табл 61 24)	Тип источника света	Светильники общего освещения				Тип светильника
	Модуль	Высота				Светораспределение (по табл 61 14)	Конструктивно-светотехническая схема	Эксплуатационная группа	Степень защиты	
							(по табл 61 18)			
Изготовление магнитопроводов	6 × 6—6 × 18	3,6—6,0	Пыльная	1,8, 1,6	ЛЛ	Д-2	IБ	6	5′0	ПВЛМ (с лампами типа ЛБР)
	6 × 6—6 × 18	3,6– 6,0		1,6, 1,8	ЛЛ	Д-1, Д-2	IБ, IIВ	6, 2, 3	5′0, IP20	ПВЛМ, ЛД
	6 × 6—6 × 24	6,0—9,0		1,6	ДРЛ	Д-1, Г-1	IIА, IVА	5, 7	IP60	РСП11, РСП12
				1,6	МГЛ	Г-1	IА	5	5′0	УПДДРЛ
				1,8, 1,6	ДРЛ, ДРИ	Г-1	IА	4, 7	5′0	РСП14, ГСП14
				1,6	ДРЛ	Г-1	IVА	7	IP54	РСП16
	6 × 6—6 × 24	6,0—9,0		1,8	ДРЛ	Г-3, Г-4	IА	3	IP23	РСП05
	6 × 6—6 × 24	9,0—14,4		1,6, 1,8	ДРЛ	Г-2, Г-3	IА	5, 3	5′4, IP20	РСП15, РСП18
	6 × 6—6 × 24	9,0—14,4		1,8	ДРЛ	Г-1	IА	3	IP23, IP20	РСП05, РСП18
	6 × 6—6 × 24	9,0—14,4		1,6	ДРИ	НТ, Г-2	IА	3, 4	5′3, 5′0, IP20	ГСП10, ГСП14, ГСП18
Изготовление изоляционного материала и деталей	36 × 6—6 × 24	4,2—12,6	См рекомендации для участков изготовления магнитопроводов							
Изготовление обмоток	6 × 6—6 × 18	4,2—6,0	Нормальная	1,5	ЛЛ	Д-2	IIВ, IБ	3, 2	IP20	ЛД, ЛСП02
				1,5	ЛЛ	Г-1, Л	IВ	2	IP20	ОДР, ЛСП13
				1,5	ЛЛ	Л	IВ	2	IP20	ЛСП13
	6 × 12—6 × 24	6,0—12,6		1,5	ЛЛ	Г-2	IВ	2	IP20	ЛСП13
Участок укладки	6 × 6—6 × 18	4,2—6,0	То же	1,5	ЛЛ	Д-2	IВ	6	5′0	ПВЛМ (с лампами типа ЛБР)
		6,0– -10,8		1,5	ДРЛ	Г-1	IА	3, 2	IP23	РСП05, РСП18
				1,5	ДРЛ	Г-3	IА	3	IP20	РСП18

Продолжение табл. 61.30

Цех, участок	Строительные параметры, м		Среда	$K_з$ (по табл. 61.24)	Тип источника света	Светильники общего освещения				Тип светильника
	Модуль	Высота				Светораспределение (по табл. 61.14)	Конструктивно-светотехническая схема (по табл. 61.18)	Эксплуатационная группа (по табл. 61.18)	Степень защиты (по табл. 61.18)	
Изготовление магнитопроводов	6 × 12—6 × 36	6,0—9,0	Нормальная	1,5	ДРЛ	Г-1	IA	3	IP23	РСП05
		6,0—9,0		1,5	ДРИ	Г-2, НТ	IA	3; 4	IP20, 5′0	ГСП18, ГСП14
		9,0—15,0		1,5	ДРЛ	Г-3	IA	3; 5	IP20, 5′4	РСП18, РСП13
		15,0—20,0		1,5	ДНаТ	К-1	IA	3	IP23, IP20	РСП05, С35ДРЛ, РСП 18
		15,0—20,0		1,5	ДРЛ	К-2	IA	3	IP20, IP23	ГСП18, ЖСП01
		Свыше 20,0		1,5	ДРИ	К-1, К-2	IA	3	5′3, IP20	ГСП10, ГСП18
		Свыше 20,0		1,5	ДНаТ	К-2	IA	3	IP23, IP20	ЖСП01
Изготовление обмоток, изоляционных деталей (все участки, кроме пропитки и сушки)	6 × 6—6 × 18 6 × 6—6 × 24	4,2—6,0	Нормальная	1,5	ЛЛ	Л	IB	2	IP20	ЛСП13
		4,2—6,0		1,5	ЛЛ	Д-2	IIB, IБ	3; 2	IP20	ЛД, ЛСП02
		6,0—9,0		1,5	ДРЛ	Л, Г-1	IA	3	IP20, IP23	РСП08, РСП05
		6,0—9,0		1,5	ДРИ	Г-1, Г-2	IA	3; 2	IP20	РСП18, ГСП18
		9,0—14,4		1,5	ДРЛ	Г-3	IA	3	IP23, IP20	РСП05, РСП18
		9,0—14,4		1,5	ДРИ	Г-2, НТ	IA	3; 4	IP20, 5′0	ГСП18, ГСП14
Участок пропитки и компаундирования	6 × 6—6 × 18	3,4—6,0	Класс В-1а, В-1б и химически агрессивная	1,6	ЛЛ	М, Г-1	VIБ, VБ	6; 4	Повышенной надежности проти взрыва	НОГЛ, НОДЛ
		6,0—10,0		1,6	ДРЛ	Д-1	IA	6		Н4Т4Л, Н4Т5Л, Н4АДРЛ250
Участок заливки алюминием	6 × 6—6 × 18	4,2—6,0	Пыльная	1,6	ЛЛ	Д-2	IБ	6	5′0	ПВЛМ (с лампами типа ЛБР)
		6,0—10,0		1,6	ДРЛ	Г-1, Д-1	IA, IIA	5	5′0, IP60	УПДДРЛ, РСП11
				1,6	ДРЛ	Г-1	IVA	7	1P60	РСП12

Окончание табл. 61.30

Цех, участок	Строительные параметры, м		Среда	$K_з$ (по табл. 61.24)	Тип источника света	Светильники общего освещения				Тип светильника
	Модуль	Высота				Светораспределение (по табл. 61.14)	Конструктивно-светотехническая схема (по табл. 61.18)	Эксплуатационная группа (по табл. 61.18)	Степень защиты (по табл. 61.18)	
Штамповочно-сварочные участки	6 × 6—6 × 30	4,8—15,0	Пыльная	См. рекомендации для участков изготовления магнитопроводов						
	6 × 6—6 × 30	15,0—18,0		1,6; 1,8	ДРЛ	К-1	IA	5; 3	5′4, IP20	РСП13, РСП18
		15,0—18,0		1,8	ДРЛ	К-1	IA	3	IP20, IP23	РСП18, РСП05
		15,0—18,0		1,8	ДРИ	К-1	IA	3; 4	5′3, 5′0, IP20	ГСП17, ГСП14, ГСП18
		15,0—18,0		1,8	ДНаТ	К-2	IA	3	IP23	ЖСП01
Участки намотки	6 × 6 × 24	4,0—6,0	Нормальная	1,5	ЛЛ	См. рекомендации для участков изготовления обмоток				
		6,0—10,0		1,5	ЛЛ					
Участки:										
пропитки, заливки и сушки	6 × 6	3,0—4,0	Класс В-1а, В-1б	1,6	ЛЛ	См. рекомендации для участков пропитки и компаундирования				
заготовки, намотки	6 × 6—6 × 18	3,6—7,2	Нормальная	1,5	ЛЛ	См. рекомендации для участков изготовления обмоток				
пропитки и сушки	6 × 6—6 × 18	3,6—7,2	Класс В-1а, В-1б и химически агрессивная	1,6	ЛЛ	См. рекомендации для участков пропитки и компаундирования				
Слесарно-сборочный	6 × 6—6 × 24	4,2—6,0	Нормальная	15	ЛЛ	См. рекомендации для участков изготовления обмоток				
		6,0—9,0		1,5	ДРЛ	Г-1	IA	3; 2	IP23, IP20	РСП05, РСП18
		6,0—9,0		1,5	ДРИ	Г-2, Л	IA	3; 4	IP20, 5′0	РСП08, ГСП14 в сочетании с РСП08/Л
		9,0—12,5		1,5	ДРЛ	Г-3	IA	3	IP23, IP20	РСП05, РСП18
		9,0—12,5		1,5	ДРИ	Г-3, Г-2	IA	3	IP20	ГСП17, ГСП18 в сочетании с РСП08/Л
Сборочный	6 × 6—6 × 24	4,8—6,0	Нормальная	1,5	ЛЛ	См. рекомендации для участков изготовления обмоток				
		6,0—9,6		1,5	ДРЛ, ДРИ	См. рекомендации для слесарно-сборочного цеха				

РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ МЕТОДОМ КОЭФФИЦИЕНТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Коэффициент использования $U_{о.у}$ осветительной установки (ОУ) показывает, какая часть светового потока ламп с учетом многократных отражений в помещении попадает на рабочую поверхность:

$$U_{о.у} = \Phi_р / n\Phi_л,$$

где $\Phi_р$ — световой поток, падающий на рабочую поверхность.

На основании этого определения световой поток лампы, необходимый для обеспечения заданной минимальной освещенности,

$$\Phi_л = EAK_з Z / nU,$$

где E — нормированное значение освещенности, лк; n — количество установленных СВ; $K_з$ — коэффициент запаса (см. табл. 61.24); A — площадь рабочей поверхности помещения, м^2; Z — коэффициент неравномерности освещенности.

Значение Z для ОУ, в которых можно не учитывать затемнения оборудованием рабочих мест, зависит от отношения $l/H_р$. Для ЛН и ДРЛ рекомендуется $Z = 1{,}15$, для ЛЛ при равномерном расположении ОП $Z = 1{,}1$. Значения коэффициента Z даны в табл. 61.31. При отраженном освещении $Z = 1$.

Коэффициент использования $U_{о.у}$ (табл. 61.32) зависит от типа СВ (его КПД и КСС), коэффициентов отражения стен $\rho_с$, потолка $\rho_п$, рабочей поверхности $\rho_р$ помещения (табл. 61.33) и, наконец, от индекса помещения φ, учитывающего соотношение его размеров:

$$\varphi = ab/[H_р(a + b)],$$

где a и b — ширина и длина освещаемого помещения; $H_р$ — высота от СВ до рабочей поверхности.

В табл. 61.32 даны значения $U_{о.у}$ для типовых КСС СВ (см. табл. 61.14), при условии, что световой поток всех ламп в СВ равен 1000 лм. Ввиду того что число типов СВ очень большое и нужно иметь огромное количество таблиц $U_{о\,у}$, в настоящее время используются таблицы $U_{о.у}$ лишь для типовых КСС. Зная КПД конкретного СВ и определив его типовую КСС, можно по табл. 61.32 найти для соответствующих КСС, $\rho_п$, $\rho_с$, $\rho_р$ и индекса помещения φ значение $U_{о.у}$. Коэффициент использования для конкретного СВ находится как произведение $U\eta_\cup$, где $\eta_\cup$ — КПД СВ в нижнюю полусферу; $\eta_\cup = \Phi_\cup / \Phi_л$. Для большинства промышленных СВ $\eta_\cup = \eta_{св}$, так как небольшим потоком в верхнюю полусферу $\Phi_\cap$ можно пренебречь. Этого нельзя делать для СВ с КСС типа М, если учитывать поток в обеих полусферах. В табл. 61.32 для СВ с КСС типа М дан поток только в нижнюю полусферу.

Коэффициент отражения рабочей поверхности $\rho_р$ обычно принимается равным 0,1 либо 0,3.

Рассчитав световой поток лампы, зная ее тип, выбираем мощность лампы (см. табл. 61.3—61.10) так, чтобы световой поток выбранной лампы был равен расчетному или незначительно отличался (± 10 %) от него. Это дает возможность определить общую установленную мощность ОУ. При заданном потоке лампы $\Phi_л$ и известных U, E, A, $K_з$ можно найти n — количество необходимых СВ.

Таблица 61.31. **Значения коэффициента Z для различных типов светильников**

Тип	Z при отношении $l/H_р$			
	0,8	1,2	1,6	2,0
НСП22	1,2	1,15	1,25	1,5
УПМ15	1,15	1,1	1,2	1,4
ПСХ	1,0	1,0	1,2	1,2

РАСЧЕТ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ МЕТОДОМ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ

Приближенный метод определения мощности ламп в СВ общего освещения, расположенных равномерно, по удельной мощности W более прост, чем метод расчета по коэффициентам использования. Значения удельной мощности W, Вт/м^2, для некоторых СВ приведены в табл. 61.34 и 61.35 в зависимости от их типа, коэффициентов отражения потолка и стен, площади освещаемого помещения и, наконец, высоты подвеса СВ.

Последовательность расчета: 1. Намечаем число ОП n в помещении, исходя из оптимального их расположения. 2. По табл. 61.34 и 61.35 находим значения W. 3. Определяем расчетную мощность одной лампы: $P_л = AW/n$, где A — площадь помещения, м^2. 4. Выбираем ближайшую по мощности лампу. Если ее мощность оказывается больше расчетной, то снова по установленной мощности AW пересчитываем n.

Таблица 61.32. **Значения коэффициентов использования $U_{o.y}$, %**

КСС	$\rho_п = 0{,}7$; $\rho_с = 0{,}5$; $\rho_р = 0{,}3$						$\rho_п = 0{,}7$; $\rho_с = 0{,}5$; $\rho_р = 0{,}1$					
	Индекс помещения φ											
	0,6	0,8	1,25	2,0	3,0	5,0	0,6	0,8	1,25	2,0	3,0	5,0
М	35	50	61	73	83	95	34	47	56	66	75	86
Д-1	36	50	58	72	81	90	36	47	56	63	73	79
Д-2	44	52	68	84	93	100	42	51	64	76	84	92
Г-1	49	60	75	90	100	100	48	57	71	82	89	94
Г-2	58	68	82	96	100	100	55	64	78	86	92	96
Г-3	64	74	85	95	100	100	62	70	79	86	90	93
Г-4	70	77	84	90	100	100	65	71	78	83	86	87
К-1	74	83	90	96	100	100	69	76	83	88	91	92
К-2	75	84	95	100	100	100	71	78	87	95	97	100
К-3	76	85	96	100	100	100	73	80	90	94	99	100
Л	32	49	59	71	83	91	31	46	55	65	74	83
КСС	$\rho_п = 0{,}5$; $\rho_с = 0{,}5$; $\rho_р = 0{,}1$						$\rho_п = 0{,}5$; $\rho_с = 0{,}3$; $\rho_р = 0{,}1$					
	Индекс помещения φ											
	0,6	0,8	1,25	2,0	3,0	5,0	0,6	0,8	1,25	2,0	3,0	5,0
М	31	43	53	63	72	80	23	36	45	56	65	75
Д-1	34	47	54	63	70	77	27	40	48	55	65	73
Д-2	40	48	61	74	82	84	33	42	52	69	75	86
Г-1	44	53	69	77	83	80	41	48	64	76	70	88
Г-2	53	63	76	85	90	94	48	58	72	83	86	93
Г-3	61	68	78	84	88	91	57	65	75	83	86	90
Г-4	65	71	78	88	81	85	62	62	74	81	83	85
К-1	68	77	83	86	89	90	64	73	80	86	88	90
К-2	71	78	87	93	98	99	68	74	84	92	93	99
К-3	72	79	88	94	97	99	68	76	85	93	95	99
Л	30	45	55	65	70	78	24	40	49	60	70	76
КСС	$\rho_п = 0{,}7$; $\rho_с = 0{,}3$; $\rho_р = 0{,}1$						$\rho_п = 0{,}5$; $\rho_с = 0{,}5$; $\rho_р = 0{,}3$					
	Индекс помещения φ											
	0,6	0,8	1,25	2,0	3,0	5,0	0,6	0,8	1,25	2,0	3,0	5,0
М	26	36	46	56	67	80	32	45	55	67	74	84
Д-1	28	40	49	59	68	74	36	48	57	66	76	85
Д-2	33	43	56	74	80	76	42	51	65	71	80	85
Д-2	42	52	69	78	73	76	45	56	65	78	76	84
Г-1	48	60	73	84	90	94	55	66	80	92	98	100
Г-2	57	66	76	84	83	91	63	72	83	91	96	100
Г-3	62	69	76	81	84	85	68	73	81	87	91	94
Г-4	65	73	81	86	89	90	70	78	86	92	86	100
К-1	67	75	84	93	97	100	72	80	91	99	100	100
К-2	68	77	86	95	98	100	74	83	93	100	100	100
К-3	24	40	50	62	71	77	32	47	57	69	79	90
КСС	$\rho_п = 0{,}3$; $\rho_с = 0{,}1$; $\rho_р = 0{,}1$						$\rho_п = 0$; $\rho_с = 0$; $\rho_р = 0$					
	Индекс помещения φ											
	0,6	0,8	1,25	2,0	3,0	5,0	0,6	0,8	1,25	2,0	3,0	5,0
М	17	29	38	46	58	67	16	28	38	45	55	65
Д-1	27	35	42	52	61	68	21	33	40	49	58	66
Д-2	28	36	48	63	75	81	25	33	47	61	70	78
Д-2	35	45	60	73	68	77	34	44	56	61	68	74
Г-1	43	54	68	79	85	90	43	53	66	77	82	86
Г-2	53	62	73	80	84	86	53	61	71	78	82	85
Г-3	61	66	72	78	81	83	59	65	71	78	80	81
Г-4	62	71	77	83	86	88	60	69	77	84	85	86
К-1	68	72	80	89	93	97	65	71	79	88	92	95
К-2	64	73	83	90	94	97	64	72	81	88	91	94
К-3	20	35	44	48	65	69	17	33	42	53	63	70

Таблица 61 33. **Приблизительные значения коэффициента отражения стен и потолка**

Характер отражающей поверхности	ρ
Побеленный потолок, побеленные стены с окнами, закрытыми белыми шторами	0,70
Чистый бетонный и светлый деревянный потолки, побеленный потолок в сырых помещениях, побеленные стены при незавешенных окнах	0,50
Бетонный потолок в грязных помещениях, деревянный потолок	0,30
Сплошное остекление без штор, красный кирпич, бетонные и деревянные потолки и стены в пыльных помещениях	0,10

ТОЧЕЧНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

При расчете осветительной установки методами коэффициента использования и удельной мощности получают среднюю горизонтальную освещенность. Расчет освещенности, создаваемой на рабочей поверхности непосредственно СВ, без учета светового потока, отраженного от стен и потолка, производится точечным методом. Суть последнего заключается в том, что освещенность в данной точке рабочей поверхности рассчитывается по силе света СВ. Вследствие этого точечный метод может быть применен при расстояниях от СВ до рабочей поверхности, в 5 и более раз превышающих наибольший размер СВ.

Таблица 61.34. **Значения удельной мощности, Вт/м^2, общего равномерного освещения для СВ с ЛН**

$H_р$, м	A, м^2	Тип СВ УПМ-15 при $\rho_п$ = 0,5; $\rho_с$ = 0,3; $\rho_р$ = 0,1							$H_р$, м	A, м^2	Тип СВ НБН-150 без отражателя при $\rho_п$ = 0,5; $\rho_с$ = 0,3; $\rho_р$ = 0,1				
		E, лк									E, лк				
		20	30	50	75	100	150	200			5	10	20	30	50
2—3	10—15	10,5	15,2	24,0	39,0	43,0	57,0	73	1,5—2	10—15	4,3	7,1	12,0	16,2	27,0
	15—25	8,8	12,8	20,0	28,0	36,0	49,0	62		15—25	3,6	6,3	10,4	14,3	22,5
	25—50	7,8	11,2	17,3	24,0	31,0	43,0	53		25—50	3,0	5,3	8,8	12,2	19,5
	50—150	6,7	9,6	14,8	20,5	26,5	37,0	45		50—150	2,6	4,4	7,5	10,2	16,0
	150—300	6,2	8,4	13,2	18,5	23,5	33,0	40		150—300	2,2	4,0	6,6	8,8	14,5
	Более 300	5,7	7,8	12,0	17,3	22,0	30,0	37		Более 300	2,0	3,7	6,2	8,1	13,2
3—4	10—15	13	18,3	29,5	48,0	48,0	72,0	94	2—3	10—15	4,7	7,7	14,6	20,5	31,0
	15—20	11	15,8	23,5	34,0	41,0	63,0	82		15—25	3,8	6,5	11,3	16,7	25,0
	20—30	9,6	13,8	20,5	29,0	36,0	54,0	72		25—50	3,2	5,4	9,5	13,2	20,5
	30—50	8,4	11,7	17,7	25,0	31,0	45,0	61		50—150	2,6	4,3	7,7	10,9	16,5
	50—120	7,1	9,8	15,3	21,0	25,5	38,0	51		150—300	2,1	3,7	6,5	9,0	13,7
	120—300	6,0	8,3	12,8	17,4	22,0	33,0	44		Более 300	1,9	3,4	5,9	8,0	13,2
	Более 300	5,3	7,4	11,3	15,5	19,5	29,0	39							
4—6	10—17	15,0	20,5	31,0	46,0	62,0	92,0	124	3—4	10—15	6,5	11,7	21,0	28,0	46,0
	17—25	12,5	17,3	25,5	39,0	51,0	79,0	104		15—20	5,0	9,3	16,5	22,0	37,0
	25—35	10,7	15,2	22,0	34,0	44,0	69,0	93		20—30	4,0	7,5	13,0	18,0	29,5
	35—50	9,5	13,2	19,3	29,0	39,0	60,0	82		30—50	3,3	6,1	10,8	15,0	23,5
	50—80	8,2	11,3	16,3	25,0	33,0	50,0	69		50—120	2,6	4,8	8,5	11,8	18,7
	80—150	6,8	9,6	14,0	21,0	28,0	43,0	58		120—300	2,1	3,8	6,8	9,3	15,0
	150—300	5,7	9,1	12,0	17,5	24,0	36,0	50		Более 300	1,8	3,3	5,7	8,1	13,0
	Более 300	5,0	6,8	10,5	15,5	21,0	31,0	43							

Примечания: 1. Таблица рассчитана для $K_з$ = 1,3, при $K_з$ = 1,5 коэффициент пересчета 1,15; при $K_з$ = 1,7 коэффициент пересчета 1,3.

2. Для $\rho_р$ = 0,3 коэффициент пересчета 0,93.

3. Данные таблицы приведены для ламп при напряжении сети 220 В, при напряжении 127 В коэффициент пересчета 0,85.

Таблица 61.35. **Значения удельной мощности общего равномерного освещения, Вт/м^2, при люминесцентных светильниках с лампами ЛБ-30, ЛБ-40 при $\rho_п = 0{,}5$; $\rho_с = 0{,}3$; $\rho_р = 0{,}1$**

$H_р$, м	A, м^2	Тип СВ													
		ЛСО04							ШОД						
		E, лк													
		75	100	150	200	300	400	500	75	100	150	200	300	400	500
2—3	10—15	7,6	10,2	15,2	20,5	30,0	41	51	7,5	10,0	15,0	20,0	30,0	40	50
	15—25	6,4	8,5	12,8	17,0	25,5	34	43	6,4	8,6	12,9	17,2	26,0	34	43
	25—50	5,4	7,2	10,8	14,4	21,5	29	36	5,6	7,5	11,2	15,0	22,5	30	37
	50—150	4,4	5,9	8,8	11,8	17,6	33,5	30	4,8	6,6	9,6	12,6	19,2	25	31
	150—300	3,9	5,2	7,6	10,4	15,5	21	26	4,1	5,6	8,2	11,0	16,4	22	27
	Более 300	3,7	4,9	7,4	9,8	14,8	19,6	25	3,9	5,2	7,8	10,4	15,6	21	26
3—4	10—15	10,4	13,8	21,0	27,5	42,0	55	96	10,5	14,0	21,0	28,0	42,0	56	70
	15—20	8,8	11,8	17,6	23,5	35,0	47	59	8,8	11,8	17,7	23,5	35,0	47	59
	20—30	7,5	10,0	15,0	20,0	30,0	40	50	7,3	9,8	14,6	19,6	29,0	39	49
	30—50	6,4	8,5	12,8	17,0	25,5	34	43	6,4	8,5	12,8	17,0	25,5	34	42
	50—120	5,3	7,0	10,6	14,0	21,0	28	25	5,5	7,4	11,0	14,8	22,0	29	37
	120—300	4,8	5,8	8,7	11,6	17,4	23	28	4,6	6,1	9,2	12,2	18,4	24	30
	Более 300	3,9	5,2	7,8	10,4	15,6	21	26	4,1	5,8	8,2	11,0	16,4	22	27
4—6	10—17	13,9	18,5	28,0	37,0	55,0	74	92	14,6	19,5	29,0	39,0	58,0	78	107
	17—25	11,3	15,0	22,5	30,0	45,0	60	75	11,6	15,5	23,0	31,0	46,0	62	77
	25—35	9,7	13,0	19,4	26,0	39,0	52	65	9,6	12,8	19,2	22,5	38,0	51	64
	35—50	8,2	11,0	16,5	22,0	33,0	44	55	8,0	10,6	16,0	21,0	32,0	42	53
	50—80	7,0	9,3	14,0	18,6	28,0	37	47	6,7	9,0	13,5	18,0	27,0	36	45
	80—150	5,8	7,8	11,6	15,6	23,0	31	39	5,8	7,8	11,7	15,9	23,5	33	39
	150—400	4,7	6,3	9,4	12,6	18,8	25	32	5,0	6,7	10,0	13,4	20,0	27	33
	Более 300	4,1	5,5	8,3	11,0	16,6	22	27	4,3	5,8	8,7	11,6	17,4	23	29

Примечания: 1. При расчете удельной мощности для СВ с люминесцентными лампами другого типа следует пользоваться следующими значениями коэффициента пересчета: 1,13 для ЛХБ, ЛТБ-30, ЛТБ-40, ЛБ-80; 1,29 для ЛД-30, ЛД-40, ЛД-80, ЛД-В-80; 1,68 для ЛДЦ-30, ЛДЦ-40, ЛДЦ-80.

2. При расчете установок, имеющих другие значения коэффициентов отражения, следует пользоваться следующими коэффициентами пересчета: 1,08 для $\rho_п = 0{,}3$, $\rho_с = 0{,}3$, $\rho_р = 0{,}1$; 0,92 для $\rho_п = 0{,}7$, $\rho_с = 0{,}5$, $\rho_р = 0{,}1$, 0,84 для $\rho_п = 0{,}7$, $\rho_с = 0{,}5$, $\rho_р = 0{,}3$.

3. Значения удельной мощности даны для коэффициента запаса $K_з = 1{,}5$. При $K_з = 1{,}8$ коэффициент пересчета 1,15, при $K_з = 2{,}0$ коэффициент пересчета 1,35.

Для расчета освещенности в точечном методе используются следующие зависимости:

$$E_г = I_\alpha \cos^3\alpha / H_р^2 K_з; \quad E_в = E_г P / H_р,$$

где $E_г$ — освещенность в точке горизонтальной плоскости, лк (рис. 61.15, *а*); $E_в$ — освещенность в той же точке для вертикальной плоскости, лк (рис. 61.15, *б*); α — угол между осью СВ (вертикалью) и направлением силы света в расчетную точку; $H_р$ и P показаны на рис. 61.15; $K_з$ — коэффициент запаса.

Расчет значений горизонтальной освещенности может производиться инженерным методом с помощью вспомогательных таблиц. Например, расчет суммарной освещенности от СВ, действующих в контрольной точке M (см. рис. 61.15, *а*), делают так: 1) определяют расстояния $H_р$ и P от i-го СВ до контрольной точки; 2) для определенных значений

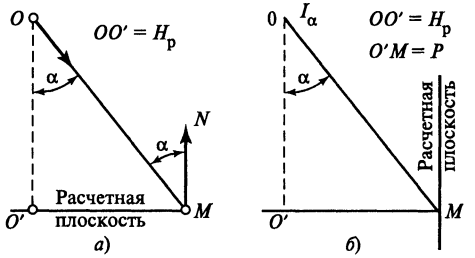


Рис. 61.15. Схема расчета освещенности:
а — горизонтальной плоскости; *б* — вертикальной плоскости

$H_р$ и P находят угол α и $e_{\alpha 100}$ — освещенность, создаваемую силой света $I_\alpha = 100$ кд, действующей по направлению α (табл. 61.36); 3) для угла α находят значение силы света I'_α СВ по его типовой кривой (см. табл. 61.14) либо из каталогов; 4) по силе света I'_α и световому потоку СВ $\Phi_{св}$ рассчитывают его фактическую силу света $I_{св\alpha} = I'_\alpha \Phi_{св}/1000$; 5) определяют освещенность от СВ в контрольной точке M:

$$E_i = e_{\alpha 100} I'_\alpha \Phi_{св}/(10^5 K_з).$$

Пункты 1—5 повторяются для n однотипных СВ, дающих заметные значения освещенности (определяемые точностью расчета). Значение освещенности в точке M:

$$E_м = \sum_{i=1}^{i=n} E_i = \Phi_{св} \sum_{i=1}^{i=n} (e_{\alpha 100} I'_\alpha)_i/(10^5 K_з).$$

Расчет освещенности точечным методом может быть использован как проверочный расчет при проектировании ОУ методами коэффициента использования и удельной мощности.

АВАРИЙНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ (БЕЗОПАСНОСТИ И ЭВАКУАЦИОННОЕ), ОХРАННОЕ И ДЕЖУРНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ

Аварийное освещение разделяется на освещение безопасности и эвакуационное. Освещение безопасности предусматривают в следующих случаях: если отключение рабочего освещения и связанное с этим нарушение обслуживания оборудования и механизмов может вызвать взрыв, пожар, отравление людей, а также длительное нарушение технологического процесса; если отключение вызывает нарушение работы таких объектов, как электрические станции, узлы радио- и телевизионных передач и связи, диспетчерские пункты, насосные установки водоснабжения, канализации и теплофикации, установки вентиляции и кондиционирования воздуха для производственных помещений, в которых недопустимо прекращение работ и т.п., а также нарушение режима детских учреждений независимо от числа находящихся в них детей.

Эвакуационное освещение в помещениях или местах производства работ вне зданий следует предусматривать:

в местах, опасных для прохода людей;

в проходах и на лестницах, служащих для эвакуации людей, при числе эвакуирующихся более 50 человек;

в лестничных клетках домов высотой шесть этажей и более;

в производственных помещениях с постоянно работающими в них людьми, если выход людей из помещения при аварийном отключении рабочего освещения связан с опасностью травматизма из-за продолжения работы производственного оборудования;

в помещениях общественных зданий и вспомогательных зданий промышленных предприятий, если в помещении могут одновременно находиться более 100 человек;

в производственных помещениях без естественного света.

Для аварийного освещения следует применять:

лампы накаливания;

люминесцентные лампы в помещениях с температурой не ниже 5 °С при условии питания ламп напряжением не ниже 90 % от номинального;

разрядные лампы высокого давления (ДРЛ, ДРИ, ДНаТ) при условии их мгновенного зажигания как в горячем состоянии после кратковременного отключения питающего напряжения, так и в холодном состоянии.

В общественных и вспомогательных зданиях предприятий выходы из помещений, в которых могут находиться одновременно более 100 человек, а также выходы из производственных помещений без естественного света, в которых могут находиться одновременно более 50 человек, или помещений площадью более 150 м^2 должны быть отмечены указателями.

Указатели выходов могут быть световыми со встроенными в них источниками света, присоединяемыми к сети аварийного освещения, и не световыми при условии, что обозначение выхода (надпись, знак и т.п.) освещаются ОП аварийного освещения.

Дополнительно должны быть отмечены указателями выход из коридоров и рекреаций, примыкающим к помещениям, перечисленным выше. При этом световые указатели устанавливаются на расстоянии не более 25 м один от другого.

ОП аварийного освещения допускается предусматривать горящими в составе основных освети-

Таблица 61.36. **Углы α, град, (верхняя цифра), значения горизонтальной освещенности**

$H_р$, м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	0	27°	45°	56°	63°	68°	71°	74°	76°	78°
	25,000	17,850	8,850	4,275	2,245	1,275	0,802	0,528	0,365	0,255
3	0	18	34	45	53	59	63	67	69	72
	11,110	9,500	6,400	3,933	2,400	1,522	1,000	0,680	0,477	0,356
4	0	14°	27	37	45	51	56	60	63	66
	6,250	5,707	4,472	3,200	2,210	1,524	1,066	0,764	0,559	0,419
5	0	11°	22	31	39	45	50	54	58	61
	4,000	3,771	3,202	2,522	1,904	1,414	1,050	0,785	0,595	0,458
6	0	9°	18	27	34	40	45	49	53	56
	2,778	2,673	2,372	1,987	1,600	1,260	0,982	0,766	0,600	0,474
7	0	8°	16	23	30	36	41	45	49	52
	2,041	1,980	1,814	1,585	1,336	1,100	0,893	0,722	0,583	0,473
8	0	7°	14	21	27	32	37	41	45	48
	1,563	1,527	1,427	1,283	1,118	0,958	0,800	0,672	0,552	0,453
9	0	6°	13	18	24	29	34	38	42	45
	1,235	1,212	1,148	1,054	0,943	0,825	0,711	0,697	0,515	0,437
10	0	5°43′	11	17	22	27	31	35	39	42
	1,000	0,985	0,943	0,879	0,801	0,716	0,631	0,550	0,476	0,411
11	0	5°12′	10°	15	20	24	29	32	36	39
	0,826	0,816	0,787	0,742	0,686	0,623	0,559	0,496	0,437	0,383
12	0	4°46′	9°	14	18	23	27	30	34	37
	0,694	0,687	0,668	0,634	0,593	0,546	0,497	0,448	0,400	0,356
13	0	4°24′	9	13	17	21	25	28	32	35
	0,592	0,587	0,571	0,547	0,517	0,481	0,447	0,404	0,366	0,329
14	0	4°5′	8°	12	16	20	23	27	30	33
	0,510	0,506	0,495	0,477	0,454	0,426	0,396	0,365	0,334	0,304
15	0	3°49′	8	11	15	18	22	25	28	31
	0,444	0,442	0,433	0,419	0,401	0,380	0,356	0,331	0,305	0,280
16	0	3°35′	7	11	14	17	21	24	27	29
	0,391	0,388	0,382	0,371	0,357	0,339	0,321	0,300	0,280	0,259
17	0	3°22′	7	10	13	16	19	22	25	28
	0,346	0,344	0,339	0,331	0,319	0,306	0,290	0,274	0,256	0,239
18	0	3°11′	6	9	13	16	18	21	24	27
	0,309	0,307	0,303	0,297	0,287	0,276	0,264	0,250	0,236	0,221
19	0	3°1′	6	9	12	15	18	20	23	25
	0,277	0,276	0,273	0,267	0,260	0,251	0,240	0,229	0,217	0,205
20	0	2°51′	5°43′	9	11	14	17	18	22	24
	0,250	0,249	0,246	0,242	0,236	0,228	0,219	0,210	0,200	0,190
21	0	2°44′	5°26′	8	11	13	16	18	21	23
	0,227	0,226	0,224	0,220	0,215	0,210	0,201	0,194	0,185	0,176
22	0	2°36′	5°10′	8	10	13	15	18	20	22
	0,207	0,206	0,205	0,201	0,196	0,192	0,185	0,179	0,171	0,164
23	0	2°29′	4°58′	7	10	12	15	17	19	21
	0,189	0,189	0,187	0,184	0,181	0,176	0,171	0,165	0,159	0,153

$e_{\alpha 100}$, лк, (нижняя цифра) для равномерного источника с силой света 100 кд

p, м									
10	11	12	13	14	15	16	18	20	22
79°	80°	81°	81°	82°	82°	83°	84°	84°	85°
0,190	0,142	0,113	0,090	0,070	0,058	0,048	0,038	0,025	0,020
73	75	76	77	78	79	80	81	81	82
0,264	0,205	0,161	0,126	0,100	0,084	0,070	0,050	0,036	0,027
68	70	72	73	74	75	76	78	79	80
0,320	0,249	0,198	0,159	0,130	0,107	0,090	0,064	0,047	0,037
63	66	67	69	70	72	73	74	76	77
0,358	0,283	0,228	0,185	0,152	0,126	0,106	0,077	0,057	0,044
59	61	63	66	67	68	69	71	73	75
0,378	0,305	0,249	0,205	0,170	0,142	0,120	0,088	0,066	0,051
55	58	60	62	63	65	66	69	71	72
0,385	0,316	0,261	0,218	0,183	0,154	0,131	0,097	0,074	0,057
51	54	56	58	60	62	63	66	68	70
0,381	0,318	0,267	0,225	0,191	0,163	0,140	0,105	0,080	0,063
48	51	53	55	57	59	61	63	66	68
0,370	0,314	0,267	0,228	0,196	0,168	0,146	0,110	0,085	0,067
45	48	50	52	54	56	58	61	63	66
0,354	0,305	0,263	0,227	0,196	0,171	0,149	0,115	0,089	0,071
42	45	48	50	52	54	56	59	61	63
0,335	0,292	0,255	0,223	0,195	0,171	0,150	0,117	0,092	0,074
40	43	45	47	49	51	53	56	59	61
0,315	0,278	0,246	0,217	0,191	0,169	0,150	0,119	0,094	0,076
38	40	43	45	47	49	51	54	57	59
0,295	0,263	0,235	0,209	0,187	0,166	0,148	0,119	0,096	0,078
36	38	41	43	45	47	49	52	55	58
0,275	0,248	0,223	0,201	0,180	0,162	0,146	0,118	0,096	0,079
34	36	39	41	43	45	47	50	53	56
0,256	0,233	0,212	0,192	0,174	0,157	0,142	0,117	0,096	0,079
32	35	37	39	41	43	45	48	51	54
0,238	0,219	0,200	0,183	0,167	0,152	0,138	0,115	0,095	0,080
30	33	35	37	39	41	43	47	50	52
0,222	0,205	0,189	0,174	0,159	0,146	0,134	0,112	0,094	0,079
29	31	34	36	38	40	42	45	48	51
0,206	0,192	0,178	0,165	0,152	0,140	0,129	0,109	0,092	0,079
28	30	32	34	36	38	40	43	46	49
0,192	0,180	0,167	0,156	0,146	0,134	0,124	0,126	0,090	0,077
27	29	31	33	35	37	39	42	45	48
0,179	0,168	0,158	0,147	0,137	0,128	0,119	0,103	0,088	0,076
25	28	30	32	34	36	37	41	44	46
0,167	0,158	0,144	0,139	0,131	0,122	0,114	0,099	0,086	0,075
25	27	29	31	32	34	36	39	42	45
0,155	0,148	0,140	0,132	0,124	0,114	0,109	0,096	0,084	0,073
24	26	28	29	31	33	35	38	41	44
0,146	0,139	0,132	0,125	0,118	0,111	0,105	0,092	0,081	0,071

тельных приборов рабочего освещения, не горящие должны автоматически включаться при прекращении питания рабочего освещения.

Освещение безопасности должно создавать на рабочих поверхностях в производственных помещениях и на территории предприятий, требующих обслуживания при отключении рабочего освещения, наименьшую освещенность в размере 5 % нормы рабочего освещения, но не менее 2 лк внутри зданий и не менее 1 лк для территорий предприятий. При этом создавать освещенность внутри зданий более 30 лк при РЛ и более 10 лк при ЛН допускается только при наличии соответствующих обоснований.

Эвакуационное освещение обеспечивает на полу основных проходов (или на земле) и на ступенях лестниц наименьшую освещенность в помещениях 0,5 лк, на открытых территориях 0,2 лк. Неравномерность эвакуационного освещения (E_{max}/E_{min}) по оси проходов должна быть не более 40:1. Светильники безопасности в помещениях могут использоваться для эвакуационного освещения.

Охранное освещение (при отсутствии специальных технических средств охраны) должно предусматриваться вдоль границ территорий, охраняемых в ночное время. Освещенность должна быть 0,5 лк на уровне земли в горизонтальной плоскости или на уровне 0,5 м от земли на одной стороне вертикальной плоскости, перпендикулярной к линии границы.

При использовании для охраны специальных технических средств освещенность принимается по заданию на проектирование охранного освещения. Для последнего могут использоваться любые ИС, за исключением случаев, когда охранное освещение не горит и автоматически включается под действием охранной сигнализации. В таких случаях применяются ЛН.

Область применения, значения освещенности, равномерность и требования к качеству для дежурного освещения не нормируются.

61.5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

К установкам наружного освещения относятся устройства по освещению мест работы на открытых пространствах, заводских территорий (дворов, проездов, проходов), городских улиц и площадей.

В установках наружного освещения применяются как светильники, так и прожекторы (в основном заливающего света, см. табл. 61.20, рис. 61.14).

Последовательность проектирования установок наружного освещения следующая: выбор нормируемого значения освещенности, выбор типов источников света и светильников (или прожекторов), установление схемы их размещения и, наконец, расчет мощности осветительной установки.

ВЫБОР НОРМИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ

Освещенность рабочих поверхностей мест, расположенных на открытых территориях под навесом, должна быть не ниже норм, указанных в табл. 61.37.

Освещенность площадок предприятий на уровне земли или дорожных покрытий нормируется значениями, указанными в табл. 61.38.

Наружное освещение должно иметь управление независимое от управления освещением внутри зданий.

Допускается не ограничивать высоту подвеса СВ с защитным углом $\gamma = 15°$ и более (с рассеивателями из молочного стекла без отражателей) на площадках для прохода людей или обслуживания технологического (или инженерного) оборудования, а также у входа в здание.

Для ограничения слепящего действия установок наружного освещения рабочих мест и территорий промышленных предприятий высота установки (табл. 61.39) над уровнем земли регламентируется СНиП. Для СВ с защитным углом $\gamma < 15°$ высота должна быть не менее указанной в табл. 61.39. Для СВ с защитным углом $\gamma \geq 15°$ высота их установки должна быть не менее 3,5 м при любых источниках света.

Неравномерность освещенности (E_{max}/E_{min}) для дорог, проездов, площадок и железнодорожных путей на заводских территориях должна быть не выше 15/1, а для пешеходных площадок 25/1.

Венчающие СВ рассеянного света (для освещения скверов, площадок перед фасадами зданий и т.п.) устанавливаются на высоте не менее 3 м при

Таблица 61.37. **Освещенность рабочих мест, расположенных вне зданий**

Разряд зрительной работы	Угловой размер объекта различения, рад	Минимальная освещенность в горизонтальной плоскости, лк
IX	Менее $0{,}5 \cdot 10^{-2}$	50
X	От $0{,}5 \cdot 10^{-2}$ до $1 \cdot 10^{-2}$	30
XI	От $1 \cdot 10^{-2}$ до $2 \cdot 10^{-2}$	20
XIII	От $2 \cdot 10^{-2}$ до $5 \cdot 10^{-2}$	10
XIII	От $5 \cdot 10^{-2}$ до $10 \cdot 10^{-2}$	5
XIV	Свыше $10 \cdot 10^{-2}$	2

Примечание. При опасности травматизма для работ XI—XIV разрядов освещенность принимается по смежному более высокому разряду.

Таблица 61.38. **Освещенность площадок предприятий или дорожных покрытий на уровне земли**

Освещаемые объекты	Освещенность, лк
Проезды с интенсивностью движения автомобилей в обоих направлениях (в сутки):	
от 5 до 150	3
от 10 до 50	2
менее 10	1
Пожарные проезды, дороги для хозяйственных нужд, подъезды к зданиям	0,5
Пешеходные и велосипедные дорожки с движением:	
интенсивным, свыше 100	2
обычным, от 20 до 100	1
незначительным, менее 20	0,5
Лестницы и мостики для переходов (на площадках и ступенях)	3
Пешеходные дорожки на площадках для отдыха и в скверах	0,5
Предзаводские участки (площадки, проезды, проходы, стоянки автотранспорта), не относящиеся к территории города	2
Железнодорожные пути:	
стрелочные горловины	2
отдельные стрелочные переводы	1
железнодорожные пути, переезды	0,5

Примечание: Для автомобильных дорог, являющихся продолжением городских улиц и имеющих аналогичное покрытие проезжей части и интенсивность движения транспорта, необходимо соблюдать нормы средней яркости покрытий проезжей части, приведенные в табл. 61.41.

Таблица 61.39. **Высота установки СВ**

Светораспределение	Наибольший световой поток ламп в СВ, установленных на одной опоре, лм	Наименьшая высота установки СВ, м, при	
		ЛН	РЛ
Полуширокое (Л)	Менее 5000	6,5	7
	5000—10 000	7	7,5
	10 000—20 000	7,5	8
	20 000—30 000	—	9
	30 000—40 000	—	10
	Свыше 40 000	—	11,5
Широкое (Ш)	Менее 5000	7	7,5
	5000—10 000	8	8,5
	10 000—20 000	9	9,5
	20 000—30 000	—	10,5
	30 000—40 000	—	11,5
	Свыше 40 000	—	13

Таблица 61.40. **Значения I_{max}/H^2 в зависимости от освещенности**

Нормируемая E, лк	0,5	1	2	3	5	10	20	30	50
I_{max}/H^2	100	150	250	300	400	700	1400	2100	3500

Примечание При совпадении направлений I_{max} нескольких световых приборов допустимые значения I_{max}/H^2 каждого прибора определяются путем деления табличного значения на число этих приборов.

лампе со световым потоком до 6000 лм и на высоте не менее 4 м при лампе с потоком свыше 6000 лм.

Ограничение высоты установки приборов прожекторного типа в зависимости от нормируемой освещенности и максимальной силы света прибора регламентируется значениями, данными в табл. 61.41.

Отношение осевой силы света I_{max}, кд, одного прибора к квадрату высоты этих приборов H, м, в зависимости от нормируемой освещенности должно быть не выше значений, указанных в табл. 61.40.

НАРУЖНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ ГОРОДСКИХ И СЕЛЬСКИХ ПОСЕЛЕНИЙ

Освещение улиц, дорог и площадей с регулярным транспортным движением в городских поселениях следует проектировать исходя из нормы средней яркости (освещенности), приведенной в табл. 61.41.

Для городов и поселков, расположенных в северной строительно-климатической зоне азиатской части РФ и севернее 66° северной широты в европейской части РФ следует освещение проектировать исходя из средней яркости покрытия $E_{ср}$, указанной в табл. 61.41.

Средняя яркость покрытий тротуаров, примыкающих к проезжей части улиц, дорог и площадей должна быть не менее половины средней яркости проезжей части, указанной в табл. 61.41. Неравномерность яркости (L_{min}/L_{max}) по полосе движения должна быть не менее 0,35 при $L_{ср} > 0{,}6$ кд/м^2 и не менее 0,25 при норме $L_{ср} \le 0{,}6$ кд/м^2. Неравномерность яркости покрытия по полосе движения (L_{min}/L_{max}) должна быть не менее 0,6 при норме $L_{ср} > 0{,}6$ кд/м^2 и не менее 0,4 при норме $L_{ср} \le 0{,}6$ кд/м^2.

Освещенность участков автомобильных дорог общей сети в пределах сельских поселений следует принимать как для улиц категории Б по табл. 61.41. При освещении улиц и дорог категорий А и Б следует предусматривать освещение участков неосве-

Таблица 61.41. **Средние значения яркости и освещенности для улиц, дорог и площадей**

Категория улиц, дорог и площадей	Улицы, дороги и площади	Наибольшая интенсивность движения транспорта в обоих направлениях, единицы/ч	Средняя яркость покрытия кд/м^2	Средняя горизонтальная освещенность покрытия, лк
А	Скоростные дороги, магистральные улицы общегородского назначения; площади главные, вокзальные, транспортные, предмостные и многофункциональных транспортных узлов	Свыше 3000 1000—3000 500—1000	1,6 1,2 0,8	20 20 15
Б	Магистральные улицы районного значения, дороги грузового движения общегородского назначения, площади перед крупными общественными зданиями и сооружениями (стадионами, театрами, выставками, торговыми центрами, колхозными рынками и другими местами массового посещения)	Свыше 2000 1000—2000 500—1000 Менее 500	1,0 0,8 0,6 0,4	15 15 10 10
В	Улицы и дороги местного значения: улицы жилых районов, дороги промышленных, коммунальных и складских районов, поселковые улицы и дороги	500 и более Менее 500	0,4 0,3	6 4

Примечания: 1 Средняя яркость покрытия скоростных дорог принимается 1,6 кд/м^2 независимо от интенсивности движения транспорта в черте города и 0,86 кд/м^2 вне города на подъездах к аэропортам, речным и морским портам крупнейших городов;

2. Норму средней яркости или средней освещенности покрытия проезжей части в границах транспортного пересечения в двух или более уровнях следует принимать как для освещения основной магистрали, на которой оно расположено, а на съездах и ответвлениях в черте города — не менее 0,8 кд/м^2 или 10 лк.

Таблица 61.42. **Зависимость горизонтальной освещенности от начала въездного портала тоннеля**

Длина тоннеля, м	Наличие уклона спуска к порталу	Ориентация въездного портала	Средняя горизонтальная освещенность, лк на расстоянии, м от начала въездного портала						
			5	25	50	75	100	125	150 и более
От 1 до 100	Не учитывается	Любая	750	750	400	150	60	—	—
Более 100	Без уклона	Северная	750	750	400	150	75	60	50
		Южная	1000	1000	550	250	100	60	50
	С уклоном	Любая	1250	1000	650	350	125	60	50

Примечание. Ход снижения уровней освещенности последовательных участков въездной зоны соответствует требованиям необходимых условий адаптации въезжающего в тоннель водителя.

щенных примыкающих улиц и дорог длиной 100 м (по нормам освещения этих улиц и дорог).

Среднюю освещенность $E_{ср}$ дорожного покрытия проезжей части городских транспортных тоннелей длиной более 60 м следует принимать в дневном режиме по табл. 61.42, а в вечернем и ночном режимах 50 лк. При длине тоннеля до 60 м освещенность $E_{ср}$ дорожного покрытия должна быть 50 лк во всех режимах. Средняя освещенность $E_{ср}$ покрытия проездов под путепроводами и мостами в темное время суток должна быть не менее 30 лк при длине проезда до 40 м, а при большей длине принимается по нормам освещения тоннелей (см. табл. 61.42). Неравномерность $E_{max}/E_{ср}$ должна быть при норме $E_{ср} > 6$ лк не более 3:1; при $E_{ср} = 4$—6 лк не более 5:1; при $E_{ср} < 4$ лк не более 10:1.

В ночное время допускается снижение уровня наружного освещения при нормируемых $E_{ср} = 4$ лк или $L_{ср} = 0{,}4$ кд/м^2 путем выключения не более половины СВ (исключая два подряд расположенных) или с помощью регулятора светового потока РЛ не ниже 50 % от номинального уровня. Частичное или полное отключение освещения в ночное время не допускается на всех объектах при нормируемой $L_{ср} = 0{,}2$ кд/м^2 или $E_{ср} = 2$ лк.

В установках наружного освещения следует использовать СВ с лампами РЛВД, ДРЛ, ДНаТ, в том числе для освещения улиц и дорог с транспортным движением преимущественно натриевые НЛВД типа ДНаТ (табл. 61.43).

В транспортных тоннелях должны применяться СВ с углами $\gamma \geq 10°$ при $H \geq 4$ м. В пешеходных тон-

Таблица 61.43. **Источники света, рекомендуемые для освещения улиц различных категорий**

Категория	Проезжая часть улиц и площадей	Зона массового нахождения людей
А	ДНаТ, ДРЛ, L = 1,2—1,6 кд/м^2; ДРЛ, L = 0,8—1,2 кд/м^2	ДРИ, ГЛН
Б	ДНаТ, ДРЛ, L = 1,0 кд/м^2; ДРЛ, L = 0,6—0,8 кд/м^2	ДРИ, ЛН, ГЛН, ДРЛ совместно с ДНаТ
В	ДНаТ ДРЛ; ЛН, L = 0,2—0,4 кд/м^2;	ЛН, ДРИ

нелях СВ имеют $\gamma \geq 15°$ с ЛЛ до 80 Вт, с лампами ДНаТ до 110 Вт, ДРЛ до 125 Вт. Наименьшая высота расположения СВ по условиям ограничения ослепленности должна приниматься по табл. 61.39.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТАНОВОК, ВЫПОЛНЕННЫХ СВЕТИЛЬНИКАМИ

Расположение СВ определяется условиями ограничения ослепленности, а также заданными уровнями яркости или освещенности. Отношение расстояния l между СВ с защитным углом $\gamma > 15°$ к высоте их подвеса H (см. табл. 61.39) должно быть не менее 6. Размещение СВ в установках наружного освещения в большинстве случаев делается равномерным. Выбор схемы размещения СВ обусловлен требуемой степенью равномерности освещения при минимальной удельной установленной их мощности. Однородное одностороннее расположение СВ применяется на улицах при ширине проезжей части 10—12 м, осевое расположение — при ширине, не превышающей 18 м. Двухрядное (шахматное и по сторонам прямоугольника) расположение СВ применяется при ширине проезжей части более 24 м.

Кроме ламп накаливания для наружного освещения стали широко применяться разрядные лампы. Последние требуется применять в установках при средней яркости дорожного покрытия 0,4 кд/м^2 и более, а также при средней освещенности равной или больше 4 лк. Большой экономический эффект дает применение натриевых ламп типа ДНаТ мощностью 250 и 400 Вт. В табл. 61.43 даны рекомендации по выбору ИС.

Выбор типа СВ производится в зависимости от ширины проезда, принятой схемы размещения СВ и высоты их подвеса. В установках наружного освещения, выполненных СВ, расчет освещенности при известном их размещении производится по КСС (см. табл. 61.14) точечным методом. Для этого используются формулы и методы, приведенные выше (расчет осветительных установок закрытых помещений).

При принятом расположении СВ требуемое значение светового потока лампы

$$\Phi_л = EK_з \cdot 1000 / \Sigma E_{1000},$$

где E — нормируемое значение освещенности; ΣE_{1000} — суммарная освещенность в точке минимального ее значения, создаваемая всеми ближайшими СВ с условной лампой, имеющей световой поток 1000 лм; $K_з$ — коэффициент запаса.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТАНОВОК, ВЫПОЛНЕННЫХ ПРОЖЕКТОРАМИ ЗАЛИВАЮЩЕГО СВЕТА

Когда освещение открытых пространств СВ невозможно или неэкономично, применяется целесообразное для больших территорий прожекторное освещение, которое в этом случае в 1,5—2 раза снижает эксплуатационные расходы по сравнению с освещением СВ. Наряду с этим уменьшается загруженность территории опорами и приспособлениями для подвески СВ. Недостатками прожекторного освещения являются большая ослепленность и наличие резких теней.

Выбор типа ПР (см. табл. 61.20 и 61.21) определяется размерами территории и ее формой, нормированной освещенностью и допустимым расстоянием от места установки ПР до освещаемого объекта. ПР с параболоидными отражателями, имеющие почти круглоконический световой пучок, ПСМ, ПЗС (с лампами накаливания) и ДРЛ, ПГП (с лампами ДРИ) применяются для освещения примерно квадратных по форме территорий. В случае вытянутых в одном направлении территорий выгодно применять ПР с параболоцилиндрическими отражателями (типов ПГЦ, ОУКсН, ПКН с лампами ДНаТ, ДРИ, ДКсТ, КГ). Для территорий площадью 4000—5000 м^2 при низких уровнях освещенности (менее 5 лк) применяются ПР типа ПЗС-25 или ПЗС-35 с ЛН мощностью 200 и 500 Вт, с лампами ДРЛ мощностью 250 Вт, ПЗР — 250 Вт.

Прожекторные мачты могут быть стационарными и передвижными (для освещения отдельных участков площадок и карьеров). Мачты высотой до 15 м выполняются из металла, дерева, более высокие — из железобетона. Данные металлических мачт приведены в табл. 61.44 и на рис. 61.16.

Общее равномерное освещение осуществляется ПР, устанавливаемыми по периметру площадок на мачтах высотой 10—50 м в зависимости от ширины освещаемой площадки.

Таблица 61.44. **Металлические прожекторные мачты**

Высота мачты, м	Число прожекторов, устанавливаемых на мачте	Масса металлоконструкции, т	Объем железобетонного фундамента, $м^3$
15	16	1,2—2,3	4,2—5,4
21	27	2,7—3,7	6,4—8,5
28	27	3,5—6,2	6,4—8,5
35	28	3,6—9,9	7,9—8,5
45	38	7—15	7,2—13

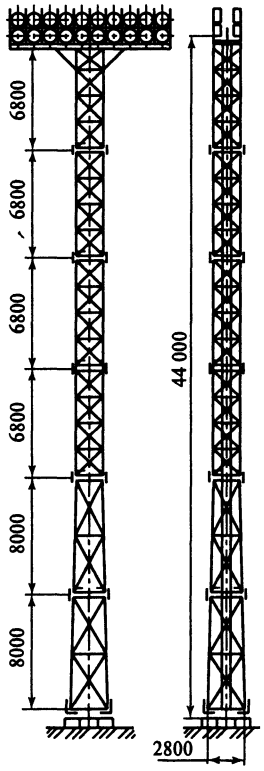


Рис. 61.16. Прожекторная мачта высотой 45 м с площадкой типа П-4

При освещении больших заводских территорий и необходимости создания высоких уровней освещенности применяются ПР типа ПЗС-45 с ЛН мощностью 1 кВт, ДРЛ мощностью 400, 700 Вт, а также типов ПГП и ПГЦ с лампами ДРИ-400 — ДРИ-1000 (см. табл. 61.21), ПКН-1000, ПКН-1500 (см. табл. 61.20).

Для освещения больших карьеров с высотой бортов более 100 м и со взрывным способом добычи руды (осветительные приборы удалены от объектов освещения на расстояние более 300 м) рекомендуется применять ПР типов ПГП и ПГЦ с лампами ДРИ мощностью 1,2 и 3,5 кВт, а также приборы ОУКсН и СПКс с ксеноновыми лампами мощностью 10, 20, 50 кВт.

При освещении строительных площадок шириной до 150 м следует применять ПР типов ПЗР, ПСМ или ПЗС с лампами ДРЛ, ПР, ПКН и ИСУ с ГЛН, для площадок шириной 150—300 м — ПР ПКН и ИСУ с ГЛН, а также ДНаТ. Для более широких площадок необходимо использовать МГЛ, мощные ГЛН 10—15 кВт и лампы ДКсТ-20000 (10—20 кВт).

ПР могут располагаться группами до 40 шт. на мачтах высотой до 45 м (см. рис. 61.16). Групповое размещение прожекторов применяется при освещении территорий, площадь которых превышает 10 000 $м^2$, при больших уровнях освещенности и необходимости сведения числа опор к минимальному.

При площади территории, не превышающей 5000 $м^2$, прибегают к индивидуальному расположению ПР при расстояниях между опорами 150—200 м. Наименьшая высота установки может быть определена исходя из данных табл. 61.45.

Оптическая ось прожектора устанавливается под некоторым углом θ к горизонтальному направлению (рис. 61.17). Расчет оптимального угла производится по формуле

$$\theta_{опт} = \arcsin 0{,}01\sqrt{m + n(E_0 H_р^2)^{2/3}},$$

где $E_0 = E_{пор} K_з$, если перекрывается световым пятном одного ПР; $E_0 = E_{пор} K_з / 2$, если световые пятна ПР перекрывают друг друга; $K_з$ — коэффициент запаса, равный 1,3—1,5; коэффициенты m и n постоянны для данного типа ПР: для ПЗС-35 $m = 300$, $n = 14$; для ПЗС-45 $m = 240$, $n = 6{,}5$.

Ориентировочный расчет прожекторной установки (количество ПР, выбор мест их установки, выбор мачт и угла наклона $\theta_{опт}$ оптических осей ПР) может производиться по удельной мощности (первые два параметра) с помощью данных табл. 61.46, более точный расчет выполняется методом компоновки кривых равных значений освещенности.

Расчет освещенности в точке M (см. рис. 61.17) от ПР заливающего света производится при помощи кривых равных значений относительной освещенности (рис. 61.18).

Кривые равных значений относительной освещенности строятся для условной плоскости (см. рис. 61.17), удаленной от фокуса отражателя ПР на расстояние 1 м и перпендикулярной оптической оси ПР.

Определяя значение относительной освещенности точки m, являющейся следом прямой OM на условной плоскости и имеющей координаты ξ и η,

Таблица 61.45. **Минимально допустимая высота установки прожекторов и светильников прожекторного типа, м**

Тип прибора	Минимально допустимая высота установки, м, при нормируемой минимальной освещенности, лк							
	0,5	1	2	3	5	10	30	50
ПЗС-35А	21	18	14	12	11	8	5	4
ПЗС-45А	35	29	22	20	18	13	7	6
ПЗМ-35-1	23	19	14	13	11	9	5	4
ПЗМ-35-2	35	29	22	20	18	13	7	6
ПЗМ-45-1	42	35	27	25	21	18	9	7
ПСМ-40А-1	25	21	16	15	13	10	6	4
ПСМ-50А	32	26	20	18	16	12	7	5
ПКН-1000А	28	23	18	16	14	11	6	5
ПКН-1500А	33	27	21	19	17	13	7	6
ПКН-1000Б	18	14	11	10	9	7	4	3
ПКН-1500Б	21	17	13	12	11	8	5	4
ПЗР-250	10	8	6	6	5	4	2	2
ПЗР-400	13	10	8	8	6	5	3	2
ПЗИ-700	89	73	56	51	45	34	20	15
ПЗН-400	24	20	15	14	12	9	5	4
ИСУ01-2000-002	28	23	17	16	14	10	6	5
ИСУ02-5000/К23-01	41	34	26	24	20	16	9	7
ПГП-М-400-К3	78	64	49	45	39	30	17	13
ПГЦ-М-400-1К3	22	18	14	13	11	9	5	4
ПГЦ-М-400-2К3	14	12	9	8	7	5	3	2
ПГП-М-1000-К3	10	86	66	61	52	40	23	18
ПГЦ-М-1000-1К3	39	32	25	23	20	15	9	7
ПГЦ-М-1000-2К3	23	19	14	13	11	9	5	4
ПГП-М-2000-К3	—	—	94	86	74	56	33	25
ПГЦ-М-2000-1К3	63	52	40	37	32	24	14	11
ПГЦ-М-2000-2К3	38	31	24	22	19	14	8	6
ПГП-М-3500-К3	—	—	—	—	90	68	39	30
ПГЦ-М-3500-1К3	84	68	52	49	42	32	18	14
ПГЦ-М-3500-2К3	47	38	30	27	84	18	10	8

по кривым на рис. 61.18, можно рассчитать освещенность в точке M.

Этот расчет при известных $H_р$ и $\theta_{опт}$ рекомендуется делать в следующей последовательности:

1. Расчет относительного расстояния $\rho = OS/H_р$ от фокуса прожектора O до плоскости, проходящей через расчетную точку M и перпендикулярной оси прожектора (см. рис. 61.17):

$$\rho = OS/H_р = \sin(\theta) + \frac{x}{H_р}\cos(\theta).$$

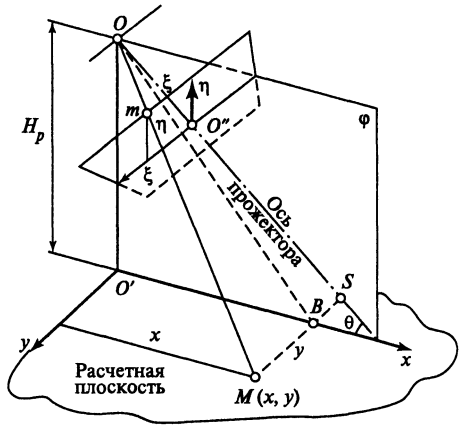


Рис. 61.17. К расчету освещенности от прожектора заливающего света

Таблица 61.46. **Ориентировочное значение удельной мощности общего прожекторного освещения**

Источник света (тип)	Ширина освещаемой площадки, м	Удельная мощность общего освещения, Вт/м^2, при нормируемой минимальной освещенности, лк				
		0,5	1	2	5	10
ЛН	75—150	0,65	0,75	0,85	2,10	4,00
	151—300	0,40	0,55	0,70	1,70	3,20
КГ	77—125	0,18	0,45	0,55	1,40	2,70
	126—300	0,15	0,25	0,40	1,00	2,00
ДРЛ	75—250	0,20	0,35	0,45	1,20	1,80
	251—300	0,18	0,30	0,50	1,00	2,00
ДРИ	75—150	0,18	0,25	0,30	0,70	1,30
	151—350	0,13	0,15	0,20	0,45	0,80
ДКсТ-50000	200—275	0,40	0,75	1,00	2,50	4,50
(H = 50 м)	276—400	0,30	0,45	0,60	1,30	2,50
ДКсТ-20000	150—200	0,45	0,80	1,50	3,50	6,50
(H = 30 м)	201—400	0,25	0,60	1,30	3,00	5,50
ДКсТ-20000	200—250	0,35	0,70	1,20	2,50	4,50
(H = 50 м)	251—400	0,25	0,50	0,80	1,90	4,20

2. Определение координат ξ и η:

$$\xi = \frac{\frac{x}{H_р}\sin(\theta) - \cos(\theta)}{\rho}; \quad \eta = y/\rho H_р,$$

где x и y — координаты точки M.

3. Определение по одному из графиков рис. 61.18 значений относительной освещенности e для данных ξ и η.

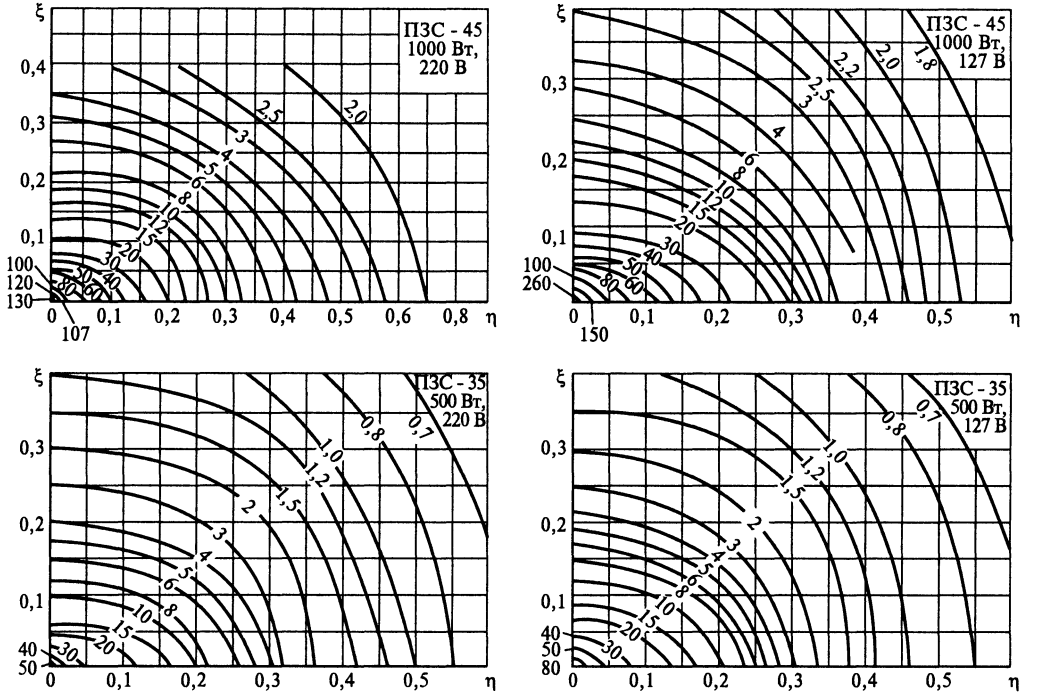


Рис. 61.18. Кривые равных значений относительной освещенности для прожекторов ПЗС-35 и ПЗС-45

4. Расчет фактического значения освещенности в точке M:

$$E_{M_г} = e/\rho^3 H_р^2 K_з; \quad E_{M_в} = ex/\rho^3 H_р^2 K_з,$$

где $K_з$ — коэффициент запаса; $E_{M_г}$ — горизонтальная освещенность; $E_{M_в}$ — вертикальная освещенность.

Изложенный выше метод позволяет решить и обратную задачу, т.е. по заданной освещенности $E_{M_г}$ или $E_{M_в}$ и известным θ и $x/H_р$ определить координаты x, y точки M.

Такие расчеты необходимы для построения кривых равных значений освещенности, создаваемой прожектором. Для определения координат x, y следует произвести такие операции:

1) задаться значением x и определить отношение $x/H_р$;

2) по табл. 61.47 найти ξ, ρ и ρ^3 для полученного отношения $x/H_р$ и рассчитанного $\theta_{опт}$;

3) задаться некоторым значением $E_{M_г}$ или $E_{M_в}$ и определить значение относительной освещенности e;

4) по рассчитанным значениям e и ξ, по кривым относительной освещенности найти координату η (см. рис. 61.17);

5) по известным η, ρ и $H_р$ найти y.

Общая последовательность расчета прожекторного освещения рекомендуется следующая:

1) выбирается вариант размещения ПР (групповое или индивидуальное), а также тип применяемых ПР;

2) определяется высота установки прожекторов $H_р$;

3) рассчитывается значение оптимального угла наклона $\theta_{опт}$ прожекторов;

4) рассчитываются кривые равных значений освещенности от прожекторов и методом наложения этих кривых на план освещаемой территории определяется суммарная освещенность в расчетных точках;

5) проверяется значение удельной мощности по табл. 61.46.

Пути совершенствования ОУ наружного освещения определяются следующими факторами: улучшением качественных показателей — увеличением яркости освещаемых объектов и снижением ослепления рабочих, пешеходов и водителей; снижением энергоемкости ОУ с помощью применения СВ и ПР, имеющих бóльшие коэффициенты использования и рациональные КСС.

Таблица 61.47. **Значения ξ, ρ и ρ^3 для расчета прожекторного освещения**

$\theta_{опт}$		$x/H_р$																									
		1,5	2	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	13	14	15
8	ξ	0,49	0,34	0,25	0,19	0,14	0,11	0,08	0,06	0,04	0,03	0,02	0	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,08
	ρ	1,6	2,1	2,6	3,1	3,6	4,1	4,6	5,1	5,6	6,1	6,6	7,1	7,6	8,1	8,6	9,0	9,5	10	10,5	11	11,5	12	13	14	15
	ρ^3	4,2	9,5	18	30	46	68	97	132	173	225	284	350	430	520	625	729	860	1000	1160	1331	1521	1728	2197	2744	3375
10	ξ	0,44	0,30	0,21	0,15	0,11	0,07	0,05	0,03	0,01	0,01	0,02	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11	0,11
	ρ	1,6	2,1	2,6	3,1	3,6	4,1	4,6	5,1	5,6	6,1	6,6	7,1	7,6	8,1	8,5	9,0	9,5	10	10,5	11	11,5	12	13	14	15
	ρ^3	4,5	9,8	18	30	48	69	98	132	174	225	284	353	432	520	625	729	860	1000	1160	1331	1520	1728	2197	2744	3375
12	ξ	0,40	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,01	0,01	0,03	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,10	0,11	0,11	0,12	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	
	ρ	1,7	2,2	2,6	3,1	3,6	4,1	4,6	5,1	5,6	6,1	6,6	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10	10,5	11	11,5	11,9	12,9	13,9	
	ρ^3	4,7	10	19	31	48	70	98	132	174	225	283	343	425	512	620	729	850	1000	1150	1331	1500	1700	2150	2700	
14	ξ	0,36	0,23	0,14	0,08	0,04	0	0,03	0,05	0,07	0,08	0,09	0,11	0,12	0,23	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17			
	ρ	1,7	2,2	2,7	3,2	3,6	4,1	4,6	5,1	5,6	6,1	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	9,9	10,4	10,9	11,4	11,9			
	ρ^3	4,9	10	19	31	48	70	98	132	173	222	280	343	425	512	610	729	845	980	1140	1300	1480	1670			
16	ξ	0,32	0,19	0,10	0,4	0	0,04	0,06	0,09	0,10	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19	0,20				
	ρ	1,7	2,2	2,7	3,2	3,6	4,1	4,6	5,0	5,6	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,4	8,9	9,4	9,9	10,4	10,8	11,3				
	ρ^3	5,1	11	19	32	48	70	97	125	172	216	277	343	415	512	600	729	830	960	1110	1280	1450				
18	ξ	0,28	0,15	0,07	0,01	0,04	0,07	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,18	0,19	0,19	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23					
	ρ	1,7	2,2	2,7	3,2	3,6	4,1	4,6	5,1	5,5	6,0	6,5	7,0	7,4	7,9	8,4	8,9	9,3	9,8	10,3	10,8					
	ρ^3	5,2	11	19	32	48	69	97	130	170	216	272	343	410	495	590	700	810	940	1080	1240					
20	ξ	0,25	0,12	0,04	0,03	0,07	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,24	0,25	0,26	0,26						
	ρ	1,8	2,2	2,7	3,2	3,6	4,1	4,6	5,0	5,5	6,0	6,4	6,9	7,7	7,9	8,3	8,8	9,3	9,7	10,2						
	ρ^3	5,3	11	19	32	48	68	95	125	167	216	267	330	400	485	580	680	800	920	1060						
22	ξ	0,21	0,08	0,01	0,06	0,11	0,14	0,17	0,19	0,21	0,22	0,24	0,25	0,26	0,27	0,27	0,28	0,29	0,29							
	ρ	1,8	2,2	2,7	3,2	3,6	4,1	4,5	5,0	5,9	6,4	6,9	7,3	7,8	8,3	8,7	9,2	9,2	9,6							
	ρ^3	5,6	11	19	31	48	68	91	125	163	210	260	320	390	470	660	779	779	890							
24	ξ	0,17	0,05	0,04	0,10	0,15	0,18	0,21	0,23	0,25	0,26	0,28	0,29	0,30	0,31	0,31	0,32	0,33								
	ρ	1,8	2,2	2,7	3,1	3,6	4,1	4,5	5,0	5,4	5,9	6,3	6,8	7,3	7,7	8,2	8,6	9,1								
	ρ^3	5,6	11	19	31	47	67	92	125	160	205	255	315	380	460	545	640	750								
26	ξ	0,14	0,01	0,08	0,14	0,18	0,21	0,24	0,26	0,28	0,30	0,31	0,33	0,34	0,34	0,35	0,36									
	ρ	1,8	2,2	2,7	3,1	3,6	4,0	4,5	4,9	5,4	5,8	6,3	6,7	7,2	7,6	8,1	8,5									
	ρ^3	5,7	11	19	31	46	64	90	120	126	198	247	305	370	445	525	620									
28	ξ	0,10	0,03	0,11	0,17	0,22	0,25	0,28	0,30	0,32	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39										
	ρ	1,8	2,2	2,7	3,1	3,6	4,0	4,4	4,9	5,3	5,8	6,2	6,6	7,1	7,5	8,0										
	ρ^3	5,7	11	19	30	45	64	97	116	151	192	240	295	355	425	512										
30°	ξ	0,07	0,06	0,15	0,20	0,25	0,29	0,32	0,34	0,36	0,38	0,39	0,40	0,41	0,42											
	ρ	1,8	2,2	2,7	3,1	3,5	4,0	4,4	4,8	5,3	5,7	6,1	6,6	7,0	7,4											
	ρ^3	5,8	11	19	30	44	64	85	112	145	184	230	273	343	410											

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

61.1. **Мешков В. В.** Основы светотехники. Ч. I. —2-е изд. М.: Энергия, 1979.

61.2. **Мешков В. В., Матвеев А. Б.** Основы светотехники. Ч. 2. —2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1989.

61.3. **Литвинов В. С., Рохлин Г. Н.** Тепловые источники оптического излучения. М.: Энергия, 1976.

61.4. **Рохлин Г. Н.** Разрядные источники света. М.: Энергоатомиздат, 1991.

61.5. **Трембач В. В.** Световые приборы. М.: Высшая школа, 1990.

61.6. **Справочная** книга по светотехнике. —2-е изд. / Под ред. проф. Ю.Б. Айзенберга. М.: Энергоатомиздат, 1995.

61.7. **Естественное** и искусственное освещение. Нормы проектирования: СНиП 23-05—95 // Светотехника. 1995. № 11/12. С. 2—20.

61.8. **ГОСТ 15597—82.** Светильники для производственных помещений.

61.9. **ГОСТ 8045—82.** Светильники для освещения дорог и улиц.

61.10. **ГОСТ 8607—82.** Светильники для освещения жилых и общественных помещений.

61.11. **ГОСТ 26092—84.** Приборы световые. Установочные и присоединительные размеры.

61.12. **Правила** устройства электроустановок (ПУЭ-99). Раздел VI. Электрическое освещение, 1999.

Раздел 62

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ

СОДЕРЖАНИЕ

62.1. Основные характеристики электрического подвижного состава 518
Электровозы (519). Электропоезда, трамваи и троллейбусы (521). Нетрадиционные электрические транспортные средства (525). Основные характеристики теплоэлектрического подвижного состава (526).

62.2. Тяговые расчеты 526
Задачи (526). Уравнение движения и характеристики его коэффициентов (526). Построение кривых движения (528). Расход энергии на движение поезда (529). Предварительный выбор мощности тягового двигателя (530). Выбор состава (массы) поезда (530).

62.3. Электроснабжение электрифицированного транспорта 530
Методы расчета систем электроснабжения трамваев и троллейбусов (530). Методы расчета электроснабжения железнодорожного транспорта (533). Трансформаторы, выпрямители, компенсирующие устройства (536). Параметры тяговых сетей постоянного и переменного тока (538). Технико-экономические параметры и нормативы (539).

62.4. Контактная сеть 542
Контактные подвески (542). Контактные провода (544). Опоры контактной сети железнодорожного транспорта (544). Опоры городского электрического транспорта (548). Расчетные нагрузки (549). Расчетные уравнения и методы расчета (550). Изоляция контактной сети (553).

62.5. Тяговые подстанции 555
Общие сведения (555). Тяговые подстанции электрифицированного железнодорожного транспорта переменного тока (557). Компенсация реактивной мощности (564). Тяговые подстанции электрифицированного железнодорожного транспорта постоянного тока (564). Тяговые подстанции метрополитена (569). Тяговые подстанции городского электротранспорта (571). Общие положения по проектированию тяговых подстанций (575). Потребители собственных нужд тяговых подстанций (577).

62.6. Электропривод автономных транспортных средств 577
Тяговые генераторы постоянного тока (580). Тяговые и вспомогательные синхронные генераторы (581). Тяговые агрегаты (581). Тяговые электродвигатели (584). Аккумуляторные батареи (589).

62.7. Регулирование сил тяги и торможения электроподвижного состава 589
Ограничения тяговой и тормозной областей (589). Регулирование силы тяги ЭПС (591). Регулирование напряжения питания ТМ (592). Регуляторы напряжения ЭПС постоянного тока с коллекторными ТМ (592). Регуляторы напряжения ЭПС переменного тока с коллекторами ТМ (595). Регуляторы напряжения ЭПС с бесколлекторными ТМ (606). Регулирование потока возбуждения тяговых машин (609). Построение пусковых диаграмм (613). Построение пусковых диаграмм ЭПС с реостатным пуском (614). Построение пусковой диаграммы ЭПС переменного тока со ступенчатым регулированием напряжения (617). Регулирование тормозной силы ЭПС с электрическим торможением (619).

Список литературы 631

62.1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Система наземного транспорта, к которой относится электрический транспорт, в Российской Федерации включает в себя железные дороги (86 тыс. км) и автомобильные дороги (453 тыс. км). Расход энергоресурсов на транспорте представлен в табл. 62.1.

Электрический подвижной (электроподвижной) состав — состав, в котором тяга на движущих колесах создается тяговыми электродвигателями, а энергия для их питания поступает от стационарных электрических станций. Для электрической тяги в России применяются постоянный ток и однофазный переменный ток промышленной частоты. Напряжения и токи, используемые в электрической тяге России, приведены в табл. 62.2.

Таблица 62.1. **Расход энергоресурсов на транспорте России**

Вид транспорта	Нефть, млн т	Электроэнергия, млрд кВт · ч	Газ, млрд $м^3$
Весь транспорт	91,3	82,85	1,72
Железнодорожный	4,3	37,45	—
Городской электрический транспорт, в том числе метро	—	45,4	—

Таблица 62.2. **Номинальные напряжения и токи, используемые в электрической тяге**

Область применения	Ток	Напряжение, В		
		на шинах тяговой подстанции	на токоприемнике подвижного состава	
		номинальное $U_{ном}$*	номинальное $U_{ном}$**	максимальное U_{max}***
Магистральные и пригородные железные дороги	Однофазный, 50 Гц	27 500	25 000	29 000
	Постоянный	3300	3000	3850 (4000 при рекуперации)
Промышленный транспорт:	Однофазный, 50 Гц	11 000 (6000)	10 000 (6000)	—
подземный	Постоянный	275	250	325
наземный		3300	3000	3850
		1650	1500	1925
		600	550	700
Городской транспорт:				
метрополитен	Постоянный	825	750	975
трамвай, троллейбус		600	650	700 (720 при рекуперации)
Речной транспорт:				
буксиры	Постоянный	—	—	До 1000
электроходы		—	—	До 1000
Автономный транспорт:				
тепловозы	Постоянный	—	—	До 1000
электромобили		—	24—200	До 1000
электротележки		—	24—200	До 1000

* Номинальное напряжение на тяговых подстанциях постоянного тока при нагрузке $I_{ном}$; на тяговых подстанциях однофазного тока — на выводах обмотки трансформатора при холостом ходе и номинальном напряжении первичной обмотки трансформатора.

** Минимальное напряжение на токоприемнике электроподвижного состава переменного тока должно быть не ниже 19 кВ.

*** Максимальное напряжение при отсутствии рекуперативного торможения, при $I = 0$ и переключении выводов первичной обмотки трансформатора в положение 5 %.

ЭЛЕКТРОВОЗЫ

В табл. 62.3 приведены основные технические данные электровозов, предназначенных для обслуживания электрифицированных магистральных железных дорог.

Электровоз ВЛ10 постоянного тока оборудован системой управления с реостатным пуском и рекуперативным торможением. При реостатном пуске двигатели соединяются: все восемь последовательно, в две параллельные группы (4 + 4) и в четыре параллельные группы (2 + 2 + 2 + 2). Каждому соединению соответствует характеристика при полном и три характеристики при ослабленном возбуждении, т.е. всего на электровозе 15 ходовых позиций. Кроме пневматического торможения электровоз имеет рекуперативное торможение при тех же группировках двигателей. Тележки не сочленены, поэтому сила тяги передается через кузов электровоза.

Электровоз ВЛ60К шестиосный, переменно-постоянного тока, каждая ось имеет привод от своего тягового двигателя. Переменное напряжение питания 25 кВ на электровозе понижается при помощи трансформатора и выпрямляется полупроводниковыми выпрямителями, от которых питаются тяговые двигатели постоянного тока последовательного возбуждения. Напряжение на двигателях за время пуска изменяется 33 ступенями от наименьшего (начального) до наибольшего путем переключения выводов вторичной обмотки транс-

Таблица 62.3. **Основные данные магистральных электровозов**

Тип	ЭП200	ЭП1	ВЛ10	ЭП10	ВЛ60К	ВЛ80Т	ЧС4
Формула ходовых частей	$2(4_0\text{-}4_0)$	$2_0\text{-}2_0\text{-}2_0$	$2(2_0\text{-}2_0)$	$2_0\text{-}2_0\text{-}2_0$	$3_0\text{-}3_0$	$2(2_0\text{-}2_0)$	$3_0\text{-}3_0$
Ток и номинальное напряжение на токоприемнике	Однофазный, 25 кВ, 50 Гц		Постоянный, 3000 В	Постоянный, 3000 В. Однофазный, 25 кВ, 50 Гц	Однофазный, 25 кВ, 50 Гц		
Мощность часовая, кВт	7200	4700	5200	7200	4590	6520	5100
Сила тяги часовая, кН	215	230	390	315	318,6	451	171
Скорость часовая, км/ч	120	70	47	80	52	51,6	106
Скорость конструктивная (максимальная), км/ч	200	120	100	160	100	110	180
Сцепной вес, кН	1840	1350	1840	1350	1380	1840	1206
Габаритные размеры, мм:							
расстояние между осями сцепных приборов	32 000	20 600	30 440	20 600	20 800	32 440	9980
ширина кузова	3160	3160	3139	3160	3160	3160	3200
высота при опущенном токоприемнике	5100	5100	5100	5100	5100	5100	5240
Жесткая колесная база, мм	5200	3000	3000	3000	4600	3000	4600
Диаметр движущего колеса, мм	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250
Тип тяговых двигателей	НБ-514	НБ-520Б	ТЛ-2К	Асинхронный	НБ-412К	НБ-418К6	AL-4442nP
Количество тяговых двигателей	8	6	8	6	6	8	6

Примечание. Мощность указана на валах тяговых двигателей.

форматора и других схемных решений. Для увеличения скорости движения предусмотрено ослабление возбуждения тяговых двигателей. Торможение электровоза — механическое.

Электровоз ВЛ80К переменно-постоянного тока по механической части унифицирован с электровозами ВЛ10, по принципиальному построению электрооборудования — с электровозами ВЛ60К. На электровозе установлены тяговые двигатели, имеющие часовую мощность на 30 % большую, чем на электровозах ВЛ60К. Электровоз восьмиосный, с четырьмя несочлененными тележками и кузовом, состоящим из двух одинаковых секций.

Электровоз ВЛ80Т принципиально подобен электровозу ВЛ60К, но отличается от него наличием реостатного торможения с независимым возбуждением тяговых машин, для чего на электровозе дополнительно установлены мощные тормозные резисторы, управляемый тиристорный возбудитель тяговых двигателей и система автоматического управления тормозным режимом. Мощность двигателей увеличена до 6520 кВт, что несколько больше, чем у электровоза ВЛ60К. В настоящее время это основной тип магистральных электровозов переменно-постоянного тока. Электровоз ВЛ80С отличается от электровоза ВЛ80Т только возможностью управления по системе многих единиц. Электровоз ВЛ80Р имеет рекуперативное торможение, электровоз ВЛ80В оборудован вентильными электродвигателями.

Помимо перечисленных электровозов переменного тока для грузовых перевозок при наибольшей скорости 100—110 км/ч на железных дорогах страны работают электровозы серии ЧС2 и ЧС4 для пассажирского движения при скорости до 160 км/ч.

Электровоз ЭП200 предназначен для вождения скоростных пассажирских поездов со скоростью до 200 км/ч на линиях железных дорог, электрифицированных на однофазном переменном токе с номинальным напряжением контактной сети 25 кВ частотой 50 Гц. Электровоз имеет две четырехосные тележки с параллелограммной связью попарно сбалансированных колесных пар. Часовая мощность на валах тяговых двигателей составляет 8000 кВт, сила тяги электровоза 235 кН, конструктивная скорость 160 км/ч.

На электровозе применен тяговый электропривод с вентильными тяговыми двигателями с системой регулирования выпрямленного напряжения и компенсатором реактивной мощности. Каждый тяговый двигатель питается от своего инвертора тока. Два таких инвертора питаются от выпрямительно-инверторного преобразователя. Коэффициент мощности электровоза в продолжительном режиме 0,9.

Электровоз ВЛ65 — пассажирский локомотив переменного тока 25 кВ, 50 Гц. В часовом режиме мощность на валах тяговых двигателей 5000 кВт, сила тяги 245 кН, конструктивная скорость 160 км/ч. Шесть тяговых электродвигателей НБ-514 питаются от тиристорных выпрямительно-инверторных преобразователей. Каждый преобразователь работает на три двигателя и имеет пять параллельных ветвей тиристоров. Коэффициент мощности электровоза 0,84. Электровоз ВЛ65 имеет рекуперативное торможение, обеспечивающее тормозные силы в продолжительном режиме до скорости 85 км/ч — 230 кН, до скорости 110 км/ч — 200 кН.

Электровоз ЭП1 является модификацией электровоза ВЛ65. На нем установлены тяговые электродвигатели НБ-520 В. Мощность на валах тяговых двигателей в часовом режиме 4700 кВт, в продолжительном 4400 кВт, коэффициент мощности 0,83. Сила тяги в часовом режиме 240 кН, в продолжительном 220 кН. Электровоз ЭП1, как и электровоз ВЛ65, имеет рекуперативное торможение, реализуемая тормозная сила в продолжительном режиме до скорости 70 км/ч равна 270 кН, до скорости 120 км/ч — 100 кН.

Магистральный электровоз ЭП10 двойного питания предназначен для вождения пассажирских поездов на железных дорогах, электрифицированных как на однофазном переменном токе промышленной частоты 50 Гц с номинальным напряжением 25 кВ, так и на постоянном токе с номинальным напряжением 3000 В. Электровоз ЭП10 может водить состав из 24 пассажирских вагонов по участкам с подъемом 12 ‰ или из 20 вагонов с подъемом 16 ‰. Кузов электровоза опирается на три двухосные тележки. Электровоз имеет опорно-рамную подвеску тяговых электродвигателей, электрооборудование обеспечивает рекуперативное и реостатное электрическое торможение. Тяговые асинхронные электродвигатели питаются от преобразователей на запираемых GTO-тиристорах (три преобразователя, каждый обеспечивает питание двух двигателей одной тележки). Максимальная сила тяги при трогании составляет 375 кН. Электровоз ЭП10 оборудован микропроцессорной системой управления со встроенной диагностикой. Коэффициент мощности при питании от тяговой сети однофазного тока составляет 0,95 при нагрузках не менее 25 % часовой. Коэффициент полезного действия при работе на постоянном токе 0,88, при работе на переменном токе 0,86 [62.1].

ЭЛЕКТРОПОЕЗДА, ТРАМВАИ И ТРОЛЛЕЙБУСЫ

Городской общественный транспорт есть в 1854 городских населенных пунктах Российской Федерации. Городской электрический транспорт используется в 101 городе: в 85 городах — троллейбусы, в 70 — трамваи. Метрополитены имеют 5 городов. В ряде городов для перевозки пассажиров интенсивно используются пригородные поезда, особенно в Москве и С.-Петербурге.

В табл. 62.4—62.7 приведены основные технические данные вагонов метрополитена, пригородных электропоездов, трамваев и троллейбусов.

Краткие технические характеристики электропоездов, приведены в табл. 62.5:

ЭД4 — одиннадцативагонный электропоезд постоянного тока с рекуперативно-реостатным торможением и контакторно-реостатным регулированием напряжения на зажимах коллекторных тяговых двигателей; длина кузова вагона 21,5 м, часовая мощность двигателя 235 кВт, номинальное напряжение на его коллекторе 750 В;

ЭД4Мсп — то же, что и ЭД4, но с тяговыми двигателями, у которых напряжение на коллекторе составляет 1500 В;

ЭД-И — одиннадцативагонный электропоезд постоянного тока с плавным тиристорным регулированием напряжения на зажимах коллекторных тяговых двигателей в режимах тяги и рекуперативно-реостатного торможения; длина кузова вагона 21,5 м, часовая мощность двигателя 280 кВт, номинальное напряжение на его коллекторе 750 В;

ЭД-АД — одиннадцативагонный электропоезд постоянного тока с рекуперативно-реостатным торможением, асинхронными тяговыми двигателями; часовая мощность двигателя 300 кВт, длина кузова вагона 21,5 м;

ЭР9Т — десятивагонный электропоезд переменного тока со ступенчатым контакторным регулированием напряжения на зажимах коллекторных тяговых двигателей, реостатным торможением; длина кузова вагона 19,6 м, часовая мощность двигателя 180 кВт;

ЭД9М — девятивагонный электропоезд переменного тока с плавным тиристорным регулированием напряжения на зажимах тяговых двигателей в режимах тяги и рекуперативного торможения; дли-

Таблица 62.4. **Основные данные вагонов метрополитена**

Параметр	Тип вагона			
	Д	Е	81-717 (81-714)	«Яуза»
Масса вагона без пассажиров, т	36,2	31,7	34 (33)	52,5 (38,3; 37)
Количество мест для сидения	44	40	40 (44)	110 (88; 110)
Количество пассажиров	120 при 3 чел/м^2	120 при 3 чел/м^2	260 (277) при 8 чел/м^2	185 (155; 185)
Ток	Постоянный			
Напряжение сети, В	750	750	750	3000
Конструктивная (максимальная) скорость, км/ч	75	90	90	130
Среднее ускорение, м/с^2	1,0	1,3	1,3	0,6
Среднее замедление, м/с^2	1,0	1,3	1,3	0,9
Тип тяговых двигателей	ДК-104Г	ДК-108Г-1	ДК-117А	УРТ-110А
Передаточное число	5,73	5,33	5,33	3,17
Диаметр ведущего колеса по кругу катания у моторного вагона, мм	900	780	780	1050

Примечание. В скобках указаны варианты массы вагона и количество пассажиров в них.

Таблица 62.5. **Основные данные электропоездов**

Параметр	Тип посзда						
	ЭД4	ЭД4Мсп	ЭД-И	ЭД-АД	ЭР9Т	ЭД9М	ЭД-АД
Напряжение на токоприемнике, род тока	3 кВ, постоянный				25 кВ, однофазный, 50 Гц		
Число вагонов	11				10	9	
Число мест для сидения	1204	1204	1204	1204	977	956	956
Масса посзда, т	541,6	541,6	550,8	560,8	488	457	465
Масса брутто посзда, т	625,9	625,9	635,1	645,1	556,4	523,9	531,9
Часовая мощность двигателя, кВт	235	235	280	300	180	260	300
Тип двигателя	1ДТ 003.7	1ДТ 003.7	1ДТ13	ЭТА-300	РТ51 М.1	1ТД 12М	ЭТА-300
Конструктивная скорость, км/ч	130	130	130	150	130	130	150
Среднее ускорение, м/с^2	0,47	0,47	0,49	0,71	0,54	0,58	0,7
Средний КПД тягового привода в режимах:							
тяги	0,9	0,9	0,86	0,79	0,86	0,84	0,79
торможения	0,9	0,9	0,85	0,76	—	0,76	0,73
Средняя мощность цепей собственных нужд, кВт	95	95	95	95	42,5	42,5	42,5

на кузова вагона 21,5 м, часовая мощность двигателя 260 кВт;

ЭД-АД — девятивагонный электропоезд переменного тока с рекуперативным торможением и асинхронными тяговыми двигателями; часовая мощность двигателя 300 кВт, длина кузова вагона 21,5 м.

Электропоезд ЭР200 предназначен для обслуживания скоростной пассажирской линии Москва—С.-Петербург со скоростью движения до 200 км/ч. Поезд оборудован устройствами плавного реостатного пуска и торможения, осуществляемыми при помощи тиристорно-импульсной системы управления. Реостатный служебный тормоз может быть дополнен рельсовыми тормозами, установленными на каждом вагоне. Управление поездом осуществляется автоматически.

Таблица 62.6. **Основные данные трамвайных вагонов**

Параметры	Тип вагона						
	Т3	Т-3М	Т7В5	71-608КМ	71-616	71-619	71-619К
Длина вагона по наружной обшивке, мм	14 000	15 300	15 300	15 300	15 300	15 330	15 330
Ширина вагона по наружной обшивке, мм	2500	2480	2500	2500	2500	2500	2500
Высота вагона по гребню крыши, мм	3030	3145	3160	3090	3090	3160	3160
Диаметр колеса, мм	700	700	700	710	710	710	710
База вагона, мм	6400	7500	7500	7350	7350	7350	7350
База тележки, мм	1900	1900	1900	1940	1940	1940	1940
Мощность тяговых электродвигателей, (ТЭД), кВт	4×40 = 160	4×45 = 180	4×50 = 200	4×50 = 200	4×78 = 304	4×50 = 200	4×50 = 200
Конструктивная скорость, км/ч	72	63	79	75	75	75	75
Количество мест для сидения	26	40	39	37	32	31	32
Количество пассажиров	118/122	118	124	127	137	126	126
Максимальное количество пассажиров	122	122	124	202	202	176	176
Масса порожнего вагона, т	17	18,4	20	19,9	19,6	—	
Система управления ТЭД	РКСУ	ТИСУ (UB26P)	ТИСУ	РКСУ	ТИСУ (SIBAS16 на базе микропроцессорной техники)	РКСУ	РКСУ

Примечание. РКСУ — реостатно-контакторное управление; ТИСУ — тиристорно-импульсное управление.

Тяговые двигатели трамвайных вагонов и троллейбусов полностью подрессорены. Они имеют опорно-рамную подвеску и передают вращающий момент на ведущие колеса через карданную муфту (или карданный вал) и редуктор.

Вспомогательные механизмы, тормозное пневматическое оборудование, силовая регулирующая, защитная и вспомогательная электроаппаратура размещаются под кузовом. Электрическая аппаратура монтируется в специальных закрытых камерах, которые подвешиваются через изоляторы к раме кузова. Часть электроаппаратуры, требующей воздействия или оперативного обслуживания водителем, располагают в кабине водителя.

Современные вагоны электропоездов и трамваев, а иногда и троллейбусы, рассчитаны на управление по системе многих единиц, когда управление поездом осуществляется от одного поста (обычно головного) при помощи поездных проводов, идущих вдоль всех вагонов (или троллейбуса).

Поезда метрополитена должны развивать высокие ускорения и замедления, поэтому вагоны поезда моторные с реостатным пуском и реостатным служебным торможением, осуществляемыми тяговыми электродвигателями последовательного возбуждения. При реостатном торможении в зоне малых скоростей (8—10 км/ч), когда эффективность торможения снижается, автоматически действует замещающее механическое торможение с пневмоприводом. Замещающее механическое торможение также автоматически действует в том вагоне, где по каким-либо причинам нарушен алгоритм сборки электрической схемы реостатного торможения. Экстренное торможение обеспечивается тем же механическим тормозом, но с большим усилием.

В последних модификациях вагонов плавное регулирование возбуждения электродвигателей обеспечивается тиристорно-импульсным регулятором и асинхронными электродвигателями.

Наиболее распространены трамвайные вагоны типов Т3, Т3-М «Татра». Вагоны оборудованы многопозиционной автоматической системой управления, которая обеспечивает плавный реостатный пуск и служебное реостатное торможение практи-

Таблица 62.7. **Основные данные троллейбусов**

Параметры	Модель троллейбуса							
	отечественная						зарубежная	
	ЗИУ-682В	ЗИУ-682Г-012	ЗИУ-682Г-016	ЗИУ-52642	ЗИУ-683В	ЗИУ-6205	ЮМЗ Т-2 (Украина)	АКСМ 101 (Белоруссия)
Масса снаряженного троллейбуса, кг	10 111	10 100	11 590	11 740	14 660	15 335	11 861	10 900
Полная конструктивная масса, кг	18 900	18 900	19 500	19 630	27 460	27 560	18 900	18 720
Длина троллейбуса,мм	11 962	11 962	11 700	11 810	17 443	17 443	11 640	12 360
Ширина, мм	2512	2512	2514	2514	2514	2514	2500	2500
Высота (с токоприемником), мм	3252	3252	3300	3350	3310	3310	3575	3300
Мест для сидения	30	30	30	30	48	46	28	30
Количество пассажиров	93	84	84	84	125	125	74	83
Максимальное количество пассажиров	114	116	116	116	164	166	103	114
Конструктивная скорость, км/ч	65	70	70	70	55	50	60	60
Время разгона с места до 50 км/ч, с	26	26	20	21	26	23	28	26
Тип тягового электродвигателя	ДК-210А3	ДК-213	ДК-213	ДК-211БМ	ДК-211БМ	ДК-211БМ	ЭД-138АУ2	ДК-213
Мощность ТЭД, кВт	110	115	115	170	170	170	130	115
Система управления ТЭД	РКСУ	РКСУ	РКСУ	ТИСУ Регулятор 300/700 БМ2	РКСУ	ТИСУ Регулятор 300/700 БМ2	РКСУ	РКСУ

чески до полной остановки. Вагоны оборудованы тяговыми двигателями последовательного возбуждения. Для ускорения самовозбуждения двигателей при торможении, а также сокращения времени повторного пуска используется следящий выбег. Вагоны имеют автоматическое замещение реостатного тормоза механическим колодочным с соленоидным приводом. При экстренном торможении совместно с механическим или реостатным действует рельсовый тормоз.

Усть-Катавский вагоностроительный завод освоил в 2000 г. шесть модификаций трамвайных вагонов повышенной комфортности серии 71-619. На трамваях могут быть установлены тележки с одноступенчатым или двухступенчатым подрессориванием и реостатно-контакторная или тиристорно-импульсная система управления. Первая ступень подрессоривания имеет резинометаллические рессоры «Меги», вторая ступень обеспечивается цилиндрическими пружинами с гидравлическими амортизаторами. При этом существенно снижаются динамические нагрузки на путь, уменьшаются колебания кузова, ресурс тележки до капитального ремонта возрастает от 300 до 1000 тыс. км.

Конструкционная скорость трамваев 71-619 составляет 75 км/ч. Они имеют две двухосные тележки, четыре тяговых двигателя постоянного тока мощностью по 50 кВт, устройства рекуперативного и реостатного электрического торможения, оборудованы электромагнитным рельсовым и механическим тормозами.

Троллейбусы производства завода «Тролза» (г. Энгельс), имеющие в названии аббревиатуру ЗИУ, оснащены групповой автоматической системой управления. В качестве остановочного на всех троллейбусах используется реостатное торможение, действующее самостоятельно или в комбинации с механическим, имеющим пневматический привод. Управление режимом торможения осуществляется от одного органа (педали), глубина нажатия которого определяет интенсивность как электрического, так и механического тормоза. Причем при малых углах поворота тормозной педали вступает в действие только реостатный тормоз. Увеличивая угол поворота педали, водитель на реостат-

ный тормоз накладывает механический, интенсивность которого также пропорциональна глубине нажатия педали. Экстренное торможение осуществляется нажатием тормозной педали до упора. Режим пуска и его интенсивность зависят от угла поворота второй педали (правой).

Краткая техническая характеристика троллейбусов (см. табл. 62.7):

ЗИУ-682Г, Г1 — двухосные с контакторно-реостатной системой управления тяговым двигателем, мощностью 125—170 кВт;

ЗИУ-682ГН — двухосный с контакторно-реостатной схемой управления тяговым двигателем, учебный;

ЗИУ-52642 — двухосный с тиристорно-импульсной системой управления тяговым двигателем;

ЗИУ-52642-20 — двухосный с тиристорно-импульсной системой управления тяговым двигателем, разработанный по технической спецификации Международного банка реконструкции и развития;

ЗИУ-6205 — трехосный шарнирно-сочлененный троллейбус с тиристорно-импульсной системой управления;

ЗИУ-62052 — трехосный шарнирно-сочлененный троллейбус с контакторно-реостатной схемой управления тяговым двигателем;

ЗИУ-682-Г-016 — модернизированная по заказу правительства г. Москвы модификация троллейбуса ЗИУ-682Г — двухосный троллейбус с контакторно-реостатной схемой управления, отличительными особенностями которого являются:

повышенная коррозионная стойкость кузова;

усовершенствованный и надежный пневмопривод дверей;

статический преобразователь вместо вспомогательного двигателя и генератора, что делает троллейбус бесшумным и более надежным;

наличие индикатора тока утечки, который практически исключает возможность поражения электрическим током;

электроизоляционное стеклопластиковое покрытие поверхности штанг токоприемников.

«Тролза 5264-01 Столица» — новая модель троллейбуса, выполненная полностью по техническим требованиям Мосгортранса.

Основными отличительными особенностями этого троллейбуса являются:

новый дизайн за счет применения стеклопластиковой обшивки передней и задней секций;

высоковольтное оборудование вынесено из-под пола троллейбуса на крышу, что значительно увеличивает его электробезопасность и улучшает условия его обслуживания в эксплуатации;

обшивка бортов выполнена цельнотянутым оцинкованным листом, что значительно улучшает внешний вид и увеличивает коррозионную стойкость кузова;

вместо вспомогательного двигателя и генератора применен статический преобразователь, обеспечивающий бесшумную работу троллейбуса и надежность питания вспомогательных цепей и цепей управления;

на троллейбусе установлены грозоразрядник и электронное маршрутное табло;

средняя и задняя двери — двустворчатые, передняя — одностворчатая;

имеется система противопожарной сигнализации.

Троллейбус «Тролза-5275» — новая концепция в российском троллейбусостроении:

он имеет новый дизайн и новую технологию изготовления;

основание троллейбуса (рама) выполнено из открытого профиля, изготовленного из низколегированной высокопрочной стали, что значительно увеличивает ее коррозионную стойкость и срок службы;

обшивка троллейбуса полностью выполнена из оцинкованного стального листа на клеесварных соединениях;

все три двери — широкие, двустворчатые;

пониженный уровень пола в районе передней и средней дверей — до 620 мм;

вклеенные тонированные стекла;

новая схема рулевого управления, унифицированная с автобусом;

в кузове троллейбуса можно установить по желанию заказчика дизель-генератор автономного хода и любой тяговый привод (реостатный, тиристорный или асинхронный);

антикоррозионная защита и окраска троллейбуса выполнена по современной технологии с применением низкотемпературных красок, что продлевает срок службы кузова до 15 лет;

все высоковольтное оборудование и статический преобразователь расположены на крыше;

штанги токоприемников имеют электроизоляционное покрытие;

подвеска — чисто пневматическая, портальные мосты;

тормозная АБС-система и дисковые колеса.

НЕТРАДИЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА

В крупных российских городах из-за высоких темпов роста числа автомобилей с двигателями внутреннего сгорания проблему уменьшения загрязнения воздуха можно разрешить использованием автономных электрических транспортных средств — электробусов, электромобилей, электромотоциклов и т.п. Однако современные электромо-

били пока не могут составить серьезной конкуренции автомобилям с бензиновыми и дизельными двигателями, поскольку уступают им в скорости и пробеге между зарядками бортовых источников питания. По этой причине они выпускаются малыми опытными партиями.

Электробус «Лужок» (тягач электропоезда) предназначен для перевозки 30 пассажиров с максимальной скоростью 25 км/ч в парковых и выставочных зонах городов. В качестве бортового источника питания на нем применяются аккумуляторные или конденсаторные батареи. Тяговый электродвигатель постоянного тока ДПТ-45 мощностью 45 кВт при торможении рекуперирует энергию для заряда бортовой батареи. Запас хода на одной зарядке 15 км. Может эксплуатироваться с прицепом, вмещающим 25 пассажиров.

Электромобиль ГАЗ 330 21Е «Газель-Электро» предназначен для перевозки грузов в городе. Он имеет грузоподъемность 1000 кг и может обеспечить пробег при одной зарядке бортового источника (аккумуляторной или конденсаторной батареи) 20 км при максимальной скорости 75 км/ч. В качестве тягового электродвигателя используется двигатель постоянного тока ДПТ-45 или асинхронный АЧТ 160 М4.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В теплоэлектрическом подвижном составе силу тяги на движущих колесах создают тяговые электродвигатели, питающиеся от теплоэлектрической установки, расположенной на подвижном составе. Оборудование современного теплоэлектрического подвижного состава состоит из теплового двигателя (обычно дизеля); генератора, вал которого механически соединен с валом теплового двигателя; тяговых электродвигателей, соединенных через редуктор с движущимися осями; тормозных устройств вспомогательного оборудования (вентиляторов, компрессоров, насоса, генератора управления, аккумуляторов и т.д.); аппаратов и приборов для управления и защиты оборудования.

Одним из главных требований, предъявляемых к электрической передаче, является использование полной мощности дизеля, т.е. генератор должен отдавать постоянную мощность при движении поезда по меняющемуся профилю дороги. В современном теплоэлектрическом подвижном составе поддержание постоянной мощности дизель-генераторной установки производится автоматически. Для обеспечения саморегулирования мощности необходимо, чтобы при повышении тока в тяговых двигателях происходило снижение, а при снижении тока двигателей — увеличение напряжения генератора.

При малой мощности дизель-генераторной установки автоматическое регулирование осуществляется подбором параметров обмоток возбуждения генератора. В этом случае генератор выполняют с тремя обмотками возбуждения (независимой, параллельной и последовательной). Последовательная обмотка является размагничивающей по отношению к независимой и параллельной обмоткам.

При большой мощности генераторы выполняются с обмоткой независимого возбуждения, питаемой от специального возбудителя, и регулирование осуществляется воздействием на возбудитель [62.1].

62.2. ТЯГОВЫЕ РАСЧЕТЫ

ЗАДАЧИ

Тяговые расчеты проводятся для проверки работы поезда на заданном участке дороги и включают: расчет времени и скоростей движения, определение зависимости потребляемого тока и мощности от длины пути и времени, расчет расхода электроэнергии на движение поездов, расчет нагревания тяговых двигателей и другого тягового электрооборудования, определение требуемой мощности тяговых двигателей.

На основании тяговых расчетов выбираются основные параметры электроподвижного состава и электроснабжения, необходимые при проектировании транспорта.

УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕГО КОЭФФИЦИЕНТОВ

Уравнение движения поезда в удельных величинах:

$$f_д = \sigma(1 + \gamma)\, \mathrm{d}v/\mathrm{d}t$$

или

$$f_д = \sigma'(1 + \gamma)v\, \mathrm{d}v/\mathrm{d}l,$$

где $f_д$ — сила, действующая на единицу веса поезда, Н/кН; $(1 + \gamma)$ — коэффициент инерции вращающихся частей, зависящий от типа подвижного состава (табл. 62.8); σ, σ' — числовые коэффициенты, значения которых зависят от единиц измерения величин, входящих в уравнение движения поезда [62.2].

Если скорость v в километрах в час, время движения t в секундах, длина пути l в метрах, то $\sigma = 28{,}3$; $\sigma' = 7{,}87$.

Для тягового режима

$$f_д = f - w_o - w_i - w_{кр},$$

Таблица 62.8. **Значение коэффициентов инерции вращающихся частей**

Тип подвижного состава	$1+\gamma$
Грузовые вагоны двухосные:	
порожние	1,1—1,12
груженые	1,04—1,05
Грузовые вагоны четырехосные и шестиосные:	
порожние	1,08—1,09
груженые	1,03—1,04
Пассажирские вагоны и прицепные электровагоны	1,04—1,05
Моторные вагоны	1,08—1,12
Электровозы	1,2—1,4
Трамваи:	
моторные вагоны	1,1—1,15
прицепные вагоны	1,05—1,08
Троллейбусы	1,15—1,2

где f — удельная сила тяги; w_0 — удельное основное сопротивление движению; $w_i = \pm i$ — удельное сопротивление уклона; $w_{кр}$ — удельное сопротивление, для магистральных дорог $w_{кр} = 700/R_{кр}$, Н/кН; для трамвайных линий $w_{кр} = 450/R_{кр}$, Н/кН; $R_{кр}$ — радиус кривизны.

Для тормозного режима

$$f_д = -(b + w_0 + w_i + w_{кр}),$$

где b — удельная тормозная сила.

Для режима выбега

$$f_д = -(w_0 + w_i + w_{кр}).$$

В общем случае удельное сопротивление движению, Н/кН,

$$w = w_0 + w_i + w_{кр}.$$

Эмпирические формулы основного удельного сопротивления движению приведены в табл. 62.9.

Наибольшая суммарная сила тяги поезда, не вызывающая боксования движущих колес, $F_{max} = 1000\psi G_{сц}$. Аналогично максимальная тормозная сила $B_{max} = 1000\psi G_т$, где $G_{сц}$ — сцепной вес, т.е. суммарное нажатие всех движущих и тормозных колес на путь; ψ — коэффициент сцепления.

Значения коэффициентов сцепления ψ приведены в табл. 62.10.

Таблица 62.9. **Эмпирические формулы основного удельного сопротивления движению**

Тип подвижного состава	w_0, Н/кН
Магистральные электровозы:	
при движении под током	$1{,}2 + 0{,}025v + 0{,}00016v^2$
при трогании с места	5,5
при движении без тока	$2{,}3 + 0{,}035v + 0{,}0002v^2$
Магистральные пассажирские вагоны:	
двухосные и трехосные	$1{,}4 + 0{,}017v + 0{,}0003v^2$
четырехосные и шестиосные тележечные	$1{,}4 + 0{,}012v + 0{,}0003v^2$
цельнометаллические	$1{,}4 + 0{,}013v + 0{,}0002v^2 + 15/v$
цельнометаллические на роликовых подшипниках	$1{,}2 + 0{,}012v + 0{,}0002v^2 + 15/v$
Магистральные грузовые вагоны:	
двухосные	$1{,}4 + 0{,}002v^2 + 0{,}5v/G_в$
четырехосные тележечные	$(v + 65)/(12 + 0{,}55G_в)$
Электропоезда пригородных дорог:	
при движении под током	$2{,}35 - 0{,}01v + 0{,}00043v^2$
при движении без тока	$2{,}7 - 0{,}017v + 0{,}00053v^2$
Подвижной состав промышленного транспорта:	
на подъездных путях, сходных с магистральными железными дорогами	По аналогии с магистральными железными дорогами
на внутризаводских путях:	
электровозы	7—8
вагоны	3—5
на подземных шахтных путях	6—15
Вагоны метрополитена:	
при движении под током	$1{,}1 + (0{,}09 + 0{,}022n_в)v^2/m$
при движении без тока	$1{,}0 + 52/m_c + 0{,}025v + (0{,}09 + 0{,}022n_в)v^2/m$
Трамвайные вагоны:	
при движении под током	$2{,}5 + (30 + 0{,}04v^2)/m$
при движении без тока	$3{,}0 + (40 + 0{,}05v^2)/m$
Троллейбусы:	
при движении под током	$12 + 0{,}004v^2$
при движении без тока	$16 + 0{,}004v^2$
на дорогах со снежным покровом	удельное сопротивление увеличивается на 10—15 Н/кН

Примечание. $G_в$ — масса вагона, т; $n_в$ — количество вагонов в поезде; m — масса подвижного состава.

Таблица 62.10. **Значения коэффициентов сцепления**

Тип подвижного состава	ψ
Электровозы постоянного тока и тепловозы	$0{,}25 + 8/(100 + 20v)$
Электровозы переменного тока	$0{,}28 + 8/(100 + 15v)$
Электропоезда пригородных железных дорог	0,21—0,22
Промышленный транспорт на подъездных путях с полотном по типу магистральных дорог	По аналогии с магистральными железными дорогами
Подземный рудничный и внутризаводской рельсовый транспорт	0,12—0,15
Вагоны метрополитена	0,2—0,22
Трамваи:	
все виды	0,1—0,19
в среднем для расчета в городе	0,15
для обособленного полотна и загородных линий	0,18
Троллейбусы:	
все виды	0,15—0,85
в среднем для расчета	0,35

ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ ДВИЖЕНИЯ

Построение кривых движения $v(t)$, $v(l)$, $t(l)$ сводится к интегрированию уравнений движения

$$t_2 - t_1 = \sigma \int_{v_1}^{v_2} dv/f_д \quad \text{и} \quad l_2 - l_1 = \sigma' \int_{v_1}^{v_2} v\, dv/f_д$$

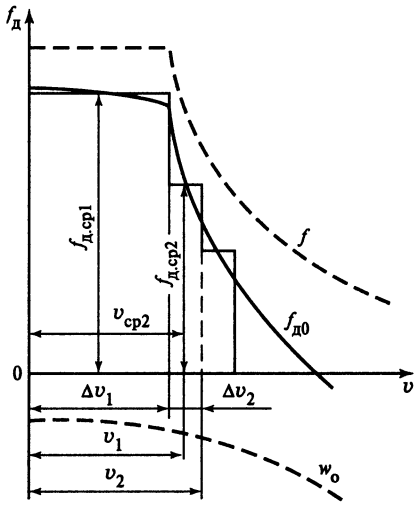


Рис. 62.1. Зависимости удельных сил, приложенных к поезду, от скорости

методом конечных приращений, т.е. бесконечно малые приращения заменяют конечными и $f_{д0} = f - w_o$ представляют постоянным средним значением $f_{д.ср}$ в каждом интервале Δv (рис. 62.1, табл. 62.11). Тогда

$$t_2 - t_1 = \Delta t = \sigma \Delta v / f_{д.ср};$$

$$l_2 - l_1 = \Delta l = \sigma' v_{ср} \Delta v / f_{д.ср};$$

$$\Delta v = v_2 - v_1; \quad v_{ср} = 0{,}5(v_1 + v_2).$$

Кривые движения показаны на рис. 62.2. Более подробно см. [62.2].

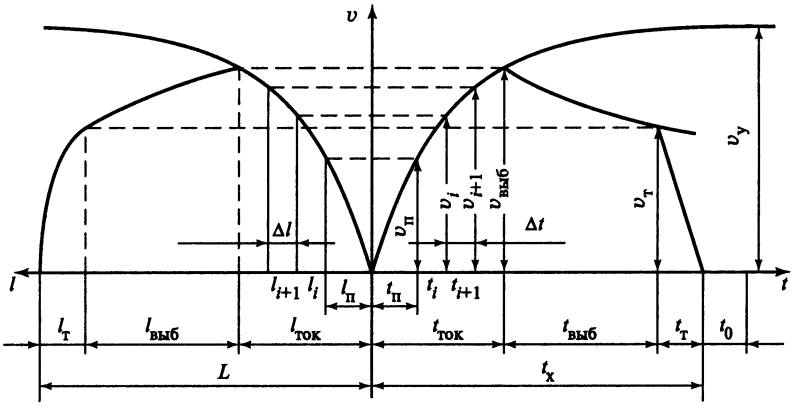


Рис. 62.2. Типичные кривые движения:

$v_п$ — скорость выхода на автоматическую характеристику при окончании реостатного пуска; $v_{выб}$ — скорость при переходе на выбег; $v_т$ — скорость в начале торможения; $v_у$ — скорость установившегося движения; $t_п$ — время реостатного пуска; $t_{ток}$ — время движения под током; $t_{выб}$ — время движения при выбеге; $t_т$ — время торможения; $t_х$ — время хода; t_0 — время промежуточной стоянки; $l_п$, $l_{ток}$, $l_{выб}$, $l_т$ — пройденный путь соответственно при пуске, под током, при выбеге и торможении; L — длина перегона

Таблица 62.11. **Пример расчета**

№ п/п	Δv	v	$v_{ср}$	$f_{д.ср}$	Δt	$t = \Sigma\Delta t$	Δl	$l = \Sigma\Delta l$
1	Δv_1	$v_1 = \Delta v_1$	$v_{ср1} = \Delta v_1/2$	$f_{д.ср1}$	Δt_1	$t_1 = \Delta t_1$	Δl_1	$l_1 = \Delta l_1$
2	Δv_2	$v_2 = v_1 + \Delta v_2$	$v_{ср2} = v_1 + \Delta v_2/2$	$f_{д.ср2}$	Δt_2	$t_2 = t_1 + \Delta t_2$	Δl_2	$l_2 = l_1 + \Delta l_2$
i	Δv_i	$v_i = v_{i-1} + \Delta v_i$	$v_{срi} = v_{i-1} + \Delta v_i/2$	$f_{д.срi}$	Δt_i	$t_i = t_{i-1} + \Delta t_i$	Δl_i	$l_i = l_{i-1} + \Delta l_i$

РАСХОД ЭНЕРГИИ НА ДВИЖЕНИЕ ПОЕЗДА

При определении расхода энергии по кривым движения кривая тока поезда в режиме тяги и рекуперации разбивается на отдельные участки времени Δt, в пределах которых ток колеблется незначительно, и для каждого такого участка определяются среднее значение тока $I_{ср}$ и интервал времени Δt. Тогда удельный расход энергии, Вт · ч/(т · км),

$$A_{уд} = \{U_{ср}[(\Sigma I_{ср}\Delta t)_{тяг}] - [(\Sigma I_{ср}\Delta t)_{рек}]\}/3600mL,$$

где $U_{ср}$ — среднее напряжение контактной сети, В; m — масса подвижного состава, т; L — длина перегона, м.

Аналитически удельный расход энергии можно определить так:

$$A_{уд} = 2{,}725(w_{ср} + i_{экв})\,(1/\eta_{ср} - l_т/(L\eta_{ср}) + k_п\,l_п/L) +$$

$$+ [(10{,}7(1 + \gamma)/1000L)](\,v_т^2/\eta_{ср} + k_п v_п^2\,),$$

где $i_{экв}$ — эквивалентный подъем, ‰; $w_{ср}$ — среднее значение удельного сопротивления движению, Н/кН; $\eta_{ср}$ — среднее значение КПД; $k_п$ — коэффициент пуска.

Для магистральных железных дорог, где пути торможения $l_т$ и пуска $l_п$ малы по сравнению с общей длиной перегона L, можно пользоваться упрощенной формулой:

$$A_{уд} = 2{,}725(w_{ср} + i_{экв})/\eta_{ср} + [(10{,}7(1 +$$

$$+ \gamma)/1000L)](\,v_т^2/\eta_{ср} + k_п v_п^2\,).$$

Средние значения КПД тягового двигателя и передачи принимают на 1—1,5 % меньше максимального значения по характеристике. Значение коэффициента пуска $k_п$ зависит от схемы. Без переключения двигателей $k_п = 1$; при одной перегруппировке $k_п = 1/2$; при двух перегруппировках $k_п = 1/3$ для шестиосного и $k_п = 3/8$ для восьмиосного электровоза. В случае применения рекуперативного торможения, которое заканчивается при скорости $v_к$, в выражении для определения $A_{уд}$ вместо $v_т^2$ нужно подставить $(v_т^2 - v_к^2)$.

При подсчете энергии, переработанной тяговыми двигателями, для проверки их нагревания нужно в случае рекуперации вместо $v_т^2$ подставить

$$(v_т^2 - v_к^2)(1 + \eta_{ср}\eta_{рек}) + v_к^2,$$

а при реостатном торможении

$$(v_т^2 - v_к^2)(1 + \eta_{ср}\eta_{реост}) + v_к^2,$$

где $\eta_{рек}$ и $\eta_{реост}$ — средние значения КПД двигателя при рекуперативном и реостатном торможении.

Эквивалентный подъем определяется по формулам:

при отсутствии рекуперативного торможения

$$i_{экв} = [1000(h_к - h_н) + \Sigma(i_в - w_{ср})l_в + \Sigma w_{кр}l_{кр}]/L;$$

при наличии рекуперативного торможения

$$i_{экв} = [1000(h_к - h_н) + (1 - \eta_{ср}\eta_{рек})\,\Sigma(i_в - w_{ср})l_в +$$

$$+ \Sigma w_{кр}l_{кр}]/L,$$

где $h_н$ и $h_к$ — высота начального и конечного пунктов участка, м.

При подсчете энергии, переработанной тяговыми двигателями, нужно в выражении для определения $i_{экв}$ вместо $(1 - \eta_{ср}\eta_{рек})$ подставить $(1 + \eta_{ср}\eta_{рек})$ или $(1 + \eta_{ср}\eta_{реост})$.

Удельный расход энергии на собственные нужды поезда, Вт · ч/(т · км),

$$A_{уд.с.н} = P_{с.н}/(mv_э),$$

где $P_{с.н}$ — средняя мощность, расходуемая на собственные нужды поезда, Вт; $v_э$ — эксплуатационная скорость, км/ч.

Для приближенных (прикидочных) расчетов электровозной тяги см. значения $\Sigma A_{уд}$, приведенные в табл. 62.12.

Приближенно значения $\Sigma A_{уд}$ можно также определить:

$$\Sigma A_{уд} = A_{уд} + A_{уд.с.н} = [2{,}725(1{,}1 + 1{,}15)(i_э + w_{ср})]/\eta_э,$$

где $\eta_э = 0{,}89$—$0{,}9$ — КПД электровоза постоянного тока в часовом режиме; $\eta_э = 0{,}82$—$0{,}84$ — то же для электровоза переменного тока; $w_{ср}$ следует принять для скорости, на 10—15 % превышающей среднюю.

Таблица 62.12. **Значения удельного расхода энергии для различных видов подвижного состава**

Тип подвижного состава	$\Sigma A_{уд}$, Вт · ч/(т · км)
Грузовые посзда на равнинных участках при невысоких скоростях	10—15
То же на участках с более тяжелым профилем при более высоких скоростях	До 20
Пассажирские посзда	20—30
Электропосзда пригородных железных дорог	25—40
То же при быстроходных секциях (до 130 км/ч)	40—50
Вагоны метрополитена	40—60
Трамваи	35—80
Трамваи при очень коротких перегонах и высоких скоростях	До 120
Троллейбусы	120—210

Удельный расход энергии, отнесенный к шинам первичного распределительного устройства тяговых подстанций, составляет:

$$A_{уд.пст} = (A_{уд} + A_{уд.с.н})/(\eta_с \eta_{пст}),$$

где $\eta_с$ — средний КПД тяговой сети, равный 0,9—0,92 при постоянном токе и 0,97 при переменном токе; $\eta_{пст}$ — средний КПД тяговой подстанции, равный 0,92—0,94 при постоянном и 0,97 при переменном токе.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ВЫБОР МОЩНОСТИ ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Мощность двигателя или его длительный ток I_∞ при заданной массе поезда $m_с$ либо при максимально допустимой массе поезда по заданной мощности двигателя можно приближенно определить:

$$I_\infty \approx [A'_{уд} v_{ср} k_э k_{зап}) m_с]/(pU_с),$$

где $A'_{уд}$ — удельный расход энергии, переработанной двигателями при $k_п = 1$; $v_{ср}$ — средняя скорость на участке; p — число двигателей, включенных параллельно; $k_э = I_э/I$ — коэффициент эффективности; $k_э = 1{,}5$—2 для моторных вагонов; $k_э = 1{,}2$—1,5 для моторной тяги; $k_{зап}$ — коэффициент запаса, учитывающий влияние температуры окружающей среды и неравномерность распределения нагрузок между двигателями, а также дополнительные пуски и торможения, не предусмотренные графиком движения; $U_с$ — напряжение сети. Можно принять $k_{зап} = 1{,}05$—1,15 при электровозной тяге и $k_{зап} = 1{,}1$—1,2 на городском электрическом транспорте.

ВЫБОР СОСТАВА (МАССЫ) ПОЕЗДА

Выбор состава поезда $m_с$, т, производится:

по условию сцепления или максимальному току тягового двигателя

$$m_с \le [F_{расч} - 9{,}8 m_э (w_{о.э} + i_р)]/[9{,}8(w_{о.в} + i_р)],$$

где расчетная сила тяги локомотива $F_{расч}$, Н, ограничивается либо сцеплением, либо максимальным током двигателя; $i_р$ — расчетный подъем, ‰; $w_{о.э}$, $w_{о.в}$ — удельное основное сопротивление движению электровоза и вагонов, Н/кН;

по условию трогания с места (пуска) на остановочных пунктах

$$m_с \le [F_{тр} - 9{,}8 m_э (w_{о.э} + i_{тр} + w_{тр})]/[9{,}8(w_{о.в} + + i_{тр} + w_{тр})],$$

где $i_{тр}$ — уклон трассы, на котором расположен остановочный пункт; $w_{тр}$ — удельное сопротивление движению в момент трогания; $F_{тр}$ — максимальная сила тяги локомотива в момент трогания;

по условию нагревания тяговых двигателей

$$m_с \le I_\infty U_с p / A'_{уд} v_{ср} k_э k_{зап}.$$

62.3. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО ТРАНСПОРТА

МЕТОДЫ РАСЧЕТА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТРАМВАЕВ И ТРОЛЛЕЙБУСОВ

Расчеты выполняют на базе графиков или по заданным размерам движения, если для рассматриваемого вида транспорта характерны существенные отклонения от запланированного графика. Для наземных видов городского транспорта — трамваев и троллейбусов рекомендуется проводить расчеты электроснабжения на основе заданных размеров движения [62.3, 62.4].

Расчетные формулы для участка сети трамвая или троллейбуса с двумя короткими питающими линиями (рис. 62.3) при неизменной плотности токовых нагрузок, А/км:

$$i = In_1/l_1 = In_2/l_2 = In_3/l_3 = \text{const},$$

где I — средний ток подвижной единицы (трамвая, троллейбуса); n — число подвижных единиц на участке; l — длина участков, км.

Пренебрегая сопротивлением коротких питающих линий $R_1 = R_2 = 0$ при условии равенства напряжений на шинах питающих эти линии подстанций, находят средние значения токов проводов контактной сети $I_к$ у пунктов присоединения

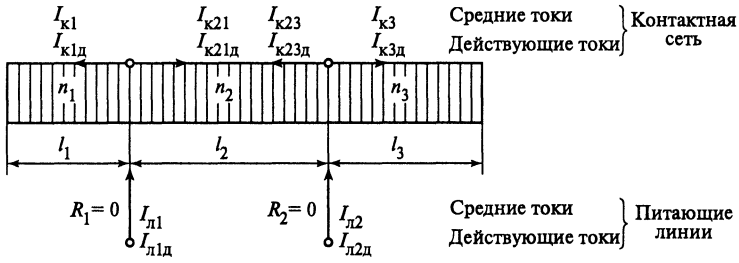


Рис. 62.3. Распределение токов в сети с двумя питающими линиями

питающих линий (питающих пунктов) на участках l_1, l_2, l_3:

$$I_{к1} = In_1; \quad I_{к21} = I_{к23} = In_2/2; \quad I_{к3} = In_3.$$

Коэффициент эффективности тока подвижной единицы

$$k_э = I_д/I,$$

где $I_д$ — действующий ток подвижной единицы.

Действующее значение тока проводов контактной сети, определяющее их нагрев у питающих пунктов:

$$I^2_{к1д} = I^2 n_1^2 (1 + \beta/n_1);$$

$$I^2_{к21д} = I^2_{к23д} = (I^2 n_2^2 / 4)[1 + (4\beta + 1)/3n_2];$$

$$I^2_{к3д} = I^2 n_3^2 (1 + \beta/n_3),$$

где $\beta = k_э^2 - 1$.

Значение эквивалентного тока используется для проверки соответствия принятого сечения проводов экономической плотности тока на участках l_1, l_2, l_3:

$$I^2_{экв1} = (I^2 n_1^2 /3)[1 + (3\beta + 1)/2n_1];$$

$$I^2_{экв2} = (I^2 n_2^2 /12)[1 + (2\beta + 1)/n_2];$$

$$I^2_{экв3} = (I^2 n_3^2 /3)[1 + (3\beta + 1)/2n_3].$$

Средние потери мощности на участках контактной сети:

$$\Delta P_{к1} = I^2_{экв1} rl_1; \Delta P_{к2} = I^2_{экв2} rl_2; \Delta P_{к3} = I^2_{экв3} rl_3,$$

где r — сопротивление тяговой сети, Ом/км.

Средние и действующие значения токов питающих линий:

$$I_{л1} = I_{к1} + I_{к21}; I_{л2} = I_{к3} + I_{к23};$$

$$I^2_{л1д} = I^2_{к1д} + I^2_{к21д} + 2I_{к1}I_{к21};$$

$$I^2_{л2д} = I^2_{к3д} + I^2_{к23д} + 2I_{к3}I_{к23}.$$

Среднее и действующее значения токов нагрузки подстанции I_A, $I_{Ад}$:

$$I_A = I_{л1} + I_{л2}; I^2_{Ад} = I^2_{л1д} + I^2_{л2д} + 2I_{л1}I_{л2}.$$

Средние значения падения напряжения на участках контактной сети определяют за время потребления энергии подвижным составом:

$$\Delta U_1 = (rn_1 Il_1/3)[1 + (1{,}5\alpha - 1)/n_1];$$

$$\Delta U_2 = (rn_2 Il_2/12)[1 + (2\alpha - 1)/n_2];$$

$$\Delta U_3 = (rn_3 Il_3/3)[1 + (1{,}5\alpha - 1)/n_3],$$

где α — отношение полного времени нахождения на участке ко времени потребления энергии из сети на этом участке одной машиной.

Среднее значение падения напряжения в контактной сети до наиболее удаленного перегона или до точки токораздела на среднем участке, т.е. максимальные средние значения падения напряжения:

$$\Delta U_{1m} = (rIn_1 l_1/2)[1 + (2\alpha - 1)/n_1];$$

$$\Delta U_{2m} = (rIn_2 l_2/8)[1 + (2\alpha - 1)/n_2];$$

$$\Delta U_{3m} = (rIn_3 l_3/2)[1 + (2\alpha - 1)/n_3].$$

В общем случае плотность нагрузки i на участках различна и сопротивления питающих линий имеют значения $R_1 \neq R_2 \neq 0$. При расчетах токораспределения определяют координату $x_т$ условной точки токораздела на участке l_2 (рис. 62.4):

$$x_т = l_2[I_3 n_3 R_2 + I_2 n_2 (R_2 + rl_2/2) - I_1 n_1 R_1]/[I_2 n_2 (R_1 + R_2 + rl_2)],$$

где I_1, I_2, I_3 — средние токи подвижных единиц на участках l_1, l_2, l_3.

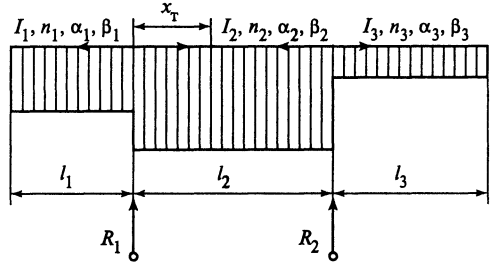


Рис. 62.4. Расчетная схема при переменной плотности нагрузок по участкам

Средние значения токов в контактных проводах у питающих пунктов:

$$I_{к1} = I_1 n_1;\ I_{к3} = I_3 n_3;\ I_{к21} = i_2 x_т;\ I_{к23} = i_2(l_2 - x_т),$$

где $i_2 = I_2 n_2 / l_2$.

Действующие значения токов на участках l_1, l_3:

$$I^2_{к1д} = I^2_1 n^2_1 (1 + \beta_1/n_1);$$

$$I^2_{к3д} = I^2_3 n^2_3 (1 + \beta_3/n_3).$$

Для участка l_2 в зависимости от расположения точки токораздела рекомендуются следующие *формулы:*

при $0{,}35\, l_2 \le x_т \le 0{,}65 l_2$

$$I^2_{к21д} = I^2_{к21}\,[1 + (4\beta_2 + 1)/3n_2];$$

$$I^2_{к23д} = I^2_{к23}\,[1 + (4\beta_2 + 1)/3n_2];$$

при $0 \le x_т \le 0{,}35 l_2$

$$I^2_{к21д} = I^2_{к21}\,[1 + (4\beta_2 + 1)/3n_2];$$

$$I^2_{к23д} = I^2_{к23}\,\{1 + \{\beta_2 l_2 / [n_2(l_2 - x_т)]\}\};$$

при $0{,}65 l_2 \le x_т \le l_2$

$$I^2_{к21д} = I^2_{к21}\,[1 + (\beta_2 l_2 / n_2 x_т)];$$

$$I^2_{к23д} = I^2_{к23}\,[1 + (4\beta_2 + 1)/3n_2].$$

Эквивалентные токи на участках l_1, l_3:

$$I^2_{экв1} = (I^2_1 n^2_1/3)[1 + (3\beta_1 + 1)/2n_1];$$

$$I^2_{экв3} = (I^2_3 n^2_3/3)[1 + (3\beta_3 + 1)/2n_3].$$

Средние потери мощности в контактной сети на участках l_1, l_3:

$$\Delta P_{к1} = I^2_{экв1}\, r l_1;\ \Delta P_{к3} = I^2_{экв3}\, r l_3.$$

Для участка l_2

$$I^2_{экв2} = \Delta P_{к2}/(r l_2).$$

Средние значения потерь мощности в контактной сети участка l_2 определяют:

$$\Delta P_{к2} = n_2[\Delta Q_2 + (n_2 - 1)\Delta U_{02} I_2],$$

где $\Delta Q_2 = [I^2_2\, r l_2(\beta_2 + 1)/12R^2][2r^2 l_2^2 + 4 r l_2(R_1 + R_2) + 6(R_1^2 + R_2^2)]$;

$$R = R_1 + R_2 + r l_2;$$

$$\Delta U_{02} = [I_2 r l_2/12R(R_1 + R_2)][r l_2(R_1 + R_2) + 2R_1 R_2 + 4(R_1^2 + R_2^2)].$$

Формулы для определения средних и действующих токов питающих линий и тяговых подстанций остаются такими же, как в предыдущем случае. Средние значения падения напряжения на участках контактной сети за время потребления энергии подвижным составом:

на участках l_1 и l_3

$$\Delta U_1 = (r n_1 I_1 l_1/3)[1 + (1{,}5\alpha_1 - 1)/n_1];$$

$$\Delta U_3 = (r n_3 I_3 l_3/3)[1 + (1{,}5\alpha_3 - 1)/n_3];$$

то же до наиболее удаленных перегонов, т.е. до концов этих же участков

$$\Delta U_{1m} = (r n_1 I_1 l_1/2)[1 + (2\alpha_1 - 1)/n_1];$$

$$\Delta U_{3m} = (r n_3 I_3 l_3/2)[1 + (2\alpha_3 - 1)/n_3];$$

для участка l_2, получающего питание с двух сторон,

$$\Delta U_2 = (r n_2 I_2 l_2/12)[1 + (2\alpha_2 - 1)/n_2 + 6K],$$

где $K = (I_{л2} R_2 - I_{л1} R_1)/(I_2 n_2 r l_2)$.

Среднее значение падения напряжения до точки токораздела с координатой $x_т$:

$$\Delta U_{2mт} = [r n_2 I_2 x_т (l_2 - x_т)/2l_2][1 + (2\alpha_2 - 1)/n_2 + 2K(l_2/x_т)].$$

Среднее значение тока I подвижной единицы может быть найдено интегрированием функции потребляемого тока от времени или по формуле

$$I = A_{уд} m \upsilon_э / U,$$

где $A_{уд}$ — удельный расход энергии на движение с учетом собственных нужд подвижной единицы, Вт · ч/(т · км); m — масса, т; U — среднее напряжение на токоприемнике, В; $\upsilon_э$ — эксплуатационная скорость, км/ч.

Значение тока для трамваев и троллейбусов может быть определено по базовому среднему току I_0 путем его корректировки с учетом реальных условий эксплуатации [62.5]. Базовый средний ток принимается для эксплуатационной скорости трамвая $\upsilon_э$ = 16 км/ч, троллейбуса — 17 км/ч при средней длине перегона 350—400 м для эквивалентного уклона $i_{экв} \le 0{,}005$ с учетом потребления тока на собственные нужды единицы подвижного состава (табл. 62.13).

Расчетный средний ток $I = I_0 k_i k_п k_\upsilon k_у + I_{с.п}$, где корректировочными коэффициентами учитывают: k_i — эквивалентные уклоны при $i_{экв} > 5$ ‰; $k_i = 1 + 0{,}02 i_{экв}$; $k_п$ — длину перегона при $l > 350$ м, $k_п = 22/\sqrt{l} - 0{,}175$; k_υ — эксплуатационную скорость при $\upsilon_э > 16$ км/ч для трамвая и $\upsilon_э > 17$ км/ч для троллейбуса, $k_\upsilon = 0{,}062\upsilon_э$ для трамвая, $k_\upsilon = 0{,}058\upsilon_э$ для троллейбуса; $k_у$ — многопусковые режимы при усложненных условиях движения, $k_у$ = 1,15 для трамвая и $k_у$ = 1,1 для троллейбуса.

Таблица 62.13. **Средний базовый ток и расчетные коэффициенты**

Параметр	Тип подвижного состава городского электротранспорта							
	Т-3 КТ4-СУ	КТМ-5М3	РВЗ-6М	РВЗ-7	ЗИУ-5	ЗИУ-9Б	ЗИУ-9В	ТР-9
Базовый ток I_0, А:								
зимой	78	71	80	80	74	74	92	70
летом	72	65	74	74	64	64	80	60
Базовые коэффициенты:								
α_0	2,4	2	2,5	2,5	1,8	2	2	1,8
β_0	3,5	3,6	3,2	3,2	3	3	3,2	2,5
Средний ток собственных нужд $I_{с.н}$, А:								
зимой	27	29	15	25	11	18	18	15
летом	9	11	6	7,5	4,5	7,5	7,5	6

Расчетные коэффициенты α и β определяют через базовые значения α_0 и β_0 (см. табл. 62.13):

$$\alpha = \alpha_0(21{,}5/\upsilon_э - 0{,}35);$$

$$\beta = \beta_0(33{,}3/\upsilon_э - 1{,}08).$$

При многопусковых режимах значения α и β следует уменьшать в 2 раза по сравнению с полученными по формулам.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Расчеты выполняют по графику движения или заданным размерам движения [62.5, 62.6]. Первым методом рассчитывают определенное количество мгновенных схем нагрузок, значения и местоположение которых известны. По результатам расчета мгновенных схем с учетом их реализации во времени строят зависимости искомых величин. Вторым методом рассчитывают числовые значения величин с учетом вероятностного характера их изменения.

Расчет токораспределения на участках постоянного тока при заданном расположении нагрузок. Рассчитывают токи фидеров (питающих линий) $I_ф$ и токи плеч питания $I_п$ подстанций. Под токами плеч понимают суммы токов фидеров, обеспечивающих электроснабжение контактных подвесок, расположенных справа или слева от подстанции (правое или левое плечо).

Ток фидера при одностороннем питании

$$I_ф = \sum_{j=1}^{m} I_j,$$

где I_j — ток нагрузки с порядковым номером j; m — общее количество нагрузок.

Расчетная схема двустороннего питания участка от подстанций А и В приведена на рис. 62.5. Упрощенные расчеты токов фидеров без учета внутреннего сопротивления питающих подстанций ведут по формуле

$$I_{фqA} = \sum_{j=1}^{m_q} (l_{qэ} - l_{jqэ})I_{jq}/l_{qэ} + (U_{0A} - U_{0B}) \times \times F_q/FR_{AB},$$

где U_{0A} и U_{0B} — напряжения холостого хода подстанций А и В; R_{AB} — сопротивление тяговой сети между подстанциями; F_q — сечение проводов контактной сети пути q в медном эквиваленте; F — то же всех путей; $l_{qэ}$ — эквивалентное расстояние между подстанциями А и В по пути q, учитывает сопротивления фидеров q подстанций А и В путем приведения их сопротивлений к сопротивлению тяговой сети; $l_{jqэ}$ — эквивалентное расстояние от подстанции А до нагрузки I_{jq} пути q, учитывает сопротивление питающей линии q подстанции А;

$$l_{qэ} = l + (R_{фqA} + R_{фqB})/r_q,$$

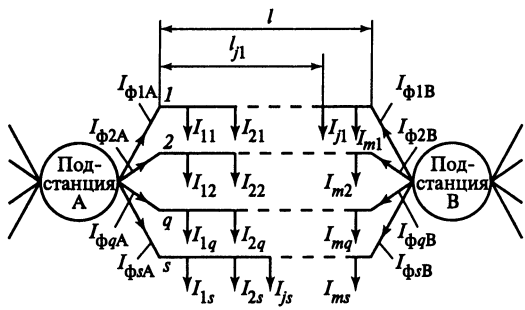


Рис. 62.5. Расчетная схема при двустороннем питании

здесь $R_{\phi q\text{A}}$ и $R_{\phi q\text{B}}$ — сопротивления фидеров q подстанций А и В; r_q — сопротивление тяговой сети по пути q.

Сопротивление тяговой сети между подстанциями

$$R_{\text{AB}} = \left[1 / \sum_{q=1}^{s} (l_{q\text{э}} r_q)^{-1}\right] + r_{\text{р}} l,$$

где $r_{\text{р}}$ — сопротивление 1 км рельсовой сети, Ом/км.

Ток фидера qВ подстанции В находят аналогично

$$I_{\phi q\text{B}} = \sum_{j=1}^{m_q} l_{jq\text{э}} I_{jq} / l_{q\text{э}} - (U_{0\text{A}} - U_{0\text{B}}) \times \\ \times F_q / (F R_{\text{AB}}).$$

Токи плеч подстанций определяют так:

$$I_{\text{п}} = \sum_{q=1}^{s} I_{\phi q},$$

где s — количество путей или питающих их отходящих линий.

При уточненных расчетах при двустороннем питании необходим учет сопротивлений тяговых подстанций [62.5].

Расчет токораспределения на участках переменного тока при заданном расположении нагрузок [62.5, 62.6]. Сопротивления фидеров из-за их относительной малости не учитывают.

При одностороннем питании активная составляющая тока плеча

$$I_{\text{п.а}} = \sum_{q=1}^{s} \sum_{j=1}^{m_q} I_{jq\text{a}};$$

реактивная составляющая

$$I_{\text{п.р}} = \sum_{q=1}^{s} \sum_{j=1}^{m_q} I_{jq\text{р}},$$

где m_q — количество нагрузок на пути q; s — количество путей.

Полный ток плеча в комплексной форме

$$I_{\text{п}} = I_{\text{п.а}} - jI_{\text{п.р}}.$$

При двустороннем питании (см. рис. 62.5) находят доли активных и реактивных токов каждой нагрузки, получаемые от подстанций А и В. Например, доля тока активной составляющей нагрузки $I_{jq\text{a}}$, расположенной на расстоянии l_{jq} от подстанции А на пути q,

$$I_{\text{aA}} = I_{jq\text{a}}(l - l_{jq})/l + \gamma_1 U_{0\text{A}} - \gamma_2 U_{0\text{B}};$$

то же для реактивной составляющей:

$$I_{\text{pA}} = I_{jq\text{p}}(l - l_{jq})/l + \nu_1 U_{0\text{A}} - \nu_2 U_{0\text{B}};$$

доли токов этих же составляющих нагрузки I_{jq}, получаемые от подстанции В:

$$I_{\text{aB}} = I_{jq\text{a}} l_{jq}/l - \gamma_1 U_{0\text{A}} + \gamma_2 U_{0\text{B}};$$

$$I_{\text{pB}} = I_{jq\text{p}} l_{jq}/l - \nu_1 U_{0\text{A}} + \nu_2 U_{0\text{B}},$$

где γ и ν — коэффициенты:

$$\gamma_1 = R_{\text{AB}}/Z_{\text{AB}}^2;\ \gamma_2 = (R_{\text{AB}} \cos\delta + X_{\text{AB}} \sin\delta)/Z_{\text{AB}}^2;$$

$$\nu_1 = X_{\text{AB}}/Z_{\text{AB}}^2;\ \nu_2 = (X_{\text{AB}} \cos\delta - R_{\text{AB}} \sin\delta)/Z_{\text{AB}}^2,$$

R_{AB}, X_{AB}, Z_{AB} — активное, реактивное, полное сопротивление тяговой сети между подстанциями А и В; δ — угол между векторами напряжений холостого хода этих подстанций.

Активные и реактивные составляющие токов плеч подстанций получают суммированием соответствующих составляющих нагрузок по всем путям.

Более точные расчеты токораспределения требуют учета внутреннего сопротивления тяговых подстанций [62.5, 62.6].

По результатам расчета мгновенных схем строится зависимость изменения искомой величины во времени, по которой за расчетный интервал определяют среднее и действующее ее значения.

Расчет токораспределения на участках постоянного тока по заданным размерам движения. Средний ток фидера q подстанции А, питающий путь q при раздельном питании контактных подвесок путей многопутного участка (рис. 62.6) без учета внутреннего сопротивления подстанций,

$$I_{\phi q\text{A}} = \sum_{k=1}^{M_q} \Delta_{kq} I_{kq} + (U_{0\text{A}} - U_{0\text{B}}) F_q / (F R_{\text{AB}}),$$

где I_{kq} — средний ток, реализуемый на перегоне k пути q; Δ_{kq} — доля тока перегона k, отнесенная к расчетному фидеру q; $\Delta_{kq} = 1$ при одностороннем питании, $\Delta_{kq} = 1 - l_{kq}/l$ при двустороннем питании; l_{kq} — расстояние от подстанции А до середины перегона k пути q; $U_{0\text{A}}$ и $U_{0\text{B}}$ — средние за расчетный

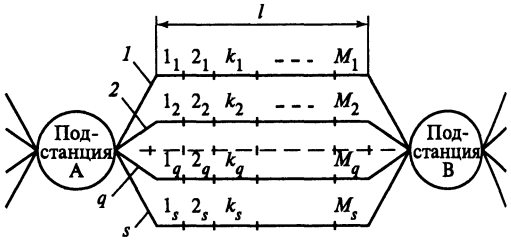


Рис. 62.6. Расчетная схема перегонов при заданных размерах движения:
1, 2, q, s — номера путей

период напряжения холостого хода подстанций А и В; M_q — число перегонов в зоне отходящей линии. Для того же фидера пути q действующее значение тока в общем случае определяют по формуле

$$I^2_{\text{ф}q\text{Ад}} = I^2_{\text{ф}q\text{А}} + \text{D}[I]_{\text{ф}q\text{А}},$$

где дисперсия тока

$$\text{D}[I]_{\text{ф}q\text{А}} = \sum_{k=1}^{M_q} \Delta^2_{kq} \text{D}[I]_{kq} + (\text{D}[U]_\text{А} + \text{D}[U]_\text{В}) \times$$

$$\times F^2_q / (F^2 R^2_{\text{АВ}});$$

$\text{D}[U]_\text{А}$ и $\text{D}[U]_\text{В}$ — дисперсии напряжений холостого хода подстанций А и В; если эти напряжения принимают при расчете неизменными, то их дисперсии будут равны нулю.

Токи плеч питания смежных подстанций А и В при двустороннем питании участка.

Средний ток правого плеча подстанции А

$$I_{\text{пА}} = \sum_{q=1}^{s} \sum_{k=1}^{M_q} \Delta_{kq} I_{kq} + (U_{0\text{А}} - U_{0\text{В}}) / R_{\text{АВ}}.$$

Средний ток левого плеча подстанции В

$$I_{\text{пВ}} = \sum_{q=1}^{s} \sum_{k=1}^{M_q} (1 - \Delta_{kq}) I_{kq} - (U_{0\text{А}} - U_{0\text{В}}) / R_{\text{АВ}}.$$

Действующие токи этих же плеч:

$$I^2_{\text{пАд}} = I^2_{\text{пА}} + \text{D}[I]_{\text{пА}}; \quad I^2_{\text{пВд}} = I^2_{\text{пВ}} + \text{D}[I]_{\text{пВ}},$$

где

$$\text{D}[I]_{\text{пА}} = \sum_{q=1}^{s} \sum_{k=1}^{M_q} \Delta^2_{kq} \text{D}[I]_{kq} +$$

$$+ (\text{D}[U]_\text{А} + \text{D}[U]_\text{В}) / R^2_{\text{АВ}};$$

$$\text{D}[I]_{\text{пВ}} = \sum_{q=1}^{s} \sum_{k=1}^{M_q} (1 - \Delta_{kq})^2 \text{D}[I]_{kq} +$$

$$+ (\text{D}[U]_\text{А} + \text{D}[U]_\text{В}) / R^2_{\text{АВ}}.$$

Средний ток $I_\text{А}$ подстанции равен сумме средних токов правого $I_{\text{п.пА}}$ и левого $I_{\text{п.лА}}$ плеч: $I_\text{А} = I_{\text{п.пА}} + I_{\text{п.лА}}$. Действующий ток подстанции А

$$I^2_{\text{Ад}} = I^2_\text{А} + \text{D}[I]_{\text{п.пА}} + \text{D}[I]_{\text{п.лА}}.$$

В общем случае средний ток фидера

$$I_\text{ф} = \sum_{k=1}^{M} I_k,$$

где M — число перегонов в фидерной зоне.

Действующий ток фидера $I_{\text{ф.д}}$

$$I^2_{\text{ф.д}} = \left(\sum_{k=1}^{M} I_k\right)^2 + \sum_{k=1}^{M} I^2_{k\text{д}} - \sum_{k=1}^{M} I^2_k,$$

где I_k, $I_{k\text{д}}$ — средний и действующий токи k-го перегона.

Если известно энергопотребление на перегонах, то

$$I_\text{ф} = (10^3 / TU) \sum_{k=1}^{M} W_{kT} = (10^3 / TU) W_T,$$

где W_{kT}, W_T — энергия, потребляемая всеми поездами на перегоне k и по всей зоне за расчетный интервал времени T; U — среднее напряжение в тяговой сети, при котором потребляется энергия.

Квадрат действующего тока фидера

$$I^2_{\text{ф.д}} = \left[10^6 / (T^2 U^2)\right] \left(1{,}08 T \sum_{k=1}^{M} \sum_{g=1}^{N} W^2_{kg} / t_{kg} + \right.$$

$$\left. + W^2_T - \sum_{k=1}^{M} W^2_{kT}\right),$$

где W_{kg} — энергия, потребляемая на k-м перегоне поездом с номером g за время t_{kg}; N — общее число поездов.

При двустороннем питании действующий ток фидера подстанции А

$$I^2_{\text{ф.дА}} = \left[10^6 / T^2 U^2\right] \left[\left(1{,}08 T \sum_{k=1}^{M} \sum_{g=1}^{N} W_{kg} / t_{kg} l^2\right) \times \right.$$

$$\left. \times (l^2_{k\text{В}} + l^2_k / 12) + \left(\sum_{k=1}^{M} W_{kT} l_{k\text{В}} / l\right)^2 - \sum_{k=1}^{M} (W_{kT} l_{k\text{В}} / l)^2\right],$$

где l, l_k, $l_{k\text{В}}$ — расстояние между подстанциями, длина перегона k, расстояние от середины перегона k до подстанции В (рис. 62.7).

Расчет токораспределения на участках переменного тока по заданным размерам движения. Рассчитывают активную и реактивную составляющие средних значений токов плеч питания.

Для правого плеча подстанции А:

$$I_{\text{п.пАа}} = \sum_{q=1}^{s} \sum_{k=1}^{M_q} \Delta_{kq} I_{kq\text{а}} + \gamma_1 U_\text{А} - \gamma_2 U_\text{В};$$

$$I_{\text{п.пАр}} = \sum_{q=1}^{s} \sum_{k=1}^{M_q} \Delta_{kq} I_{kq\text{р}} + \nu_1 U_\text{А} - \nu_2 U_\text{В}.$$

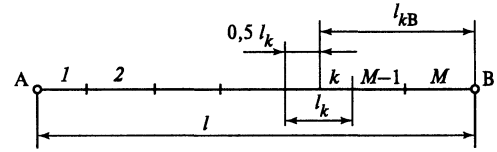


Рис. 62.7. Расчетная схема при двустороннем питании

Для левого плеча подстанции В:

$$I_{\text{п.лВа}} = \sum_{q=1}^{s}\sum_{k=1}^{Mq}(1-\Delta_{kq})I_{kq\text{а}} - \gamma_1 U_{\text{А}} + \gamma_2 U_{\text{В}};$$

$$I_{\text{п.лВр}} = \sum_{q=1}^{s}\sum_{k=1}^{Mq}(1-\Delta_{kq})I_{kq\text{р}} - \nu_1 U_{\text{А}} + \nu_2 U_{\text{В}}.$$

Здесь $U_{\text{А}}$ и $U_{\text{В}}$ — средние значения напряжений подстанций за рассматриваемый интервал времени.

Действующий ток правого плеча

$$I^2_{\text{п.пАд}} = I^2_{\text{п.пАа}} + I^2_{\text{п.пАр}} + \text{D}[I]_{\text{п.пАа}} + \text{D}[I]_{\text{п.пАр}}.$$

Для левого плеча расчет аналогичен. Здесь $\text{D}[I]_{\text{п.пАа}}$, $\text{D}[I]_{\text{п.пАр}}$ — дисперсии активной и реактивной составляющих тока плеча [62.6].

Расчеты уровня напряжения на токоприемнике поезда. Среднее значение напряжения у i-го поезда U_i за время его хода по перегону или блок-участку при постоянном токе

$$U_i = U_{0\text{А}} - (\Delta U_{\text{А}} + \Delta U_{\text{р}} + \Delta U_{\text{к}}),$$

где $\Delta U_{\text{А}}$, $\Delta U_{\text{р}}$, $\Delta U_{\text{к}}$ — средняя потеря напряжения на подстанции, в рельсовой и контактной сетях.

При двустороннем питании потеря напряжения от подстанции А до нагрузки I_s при заданном расположении нагрузок

$$\Delta U_s = r\left(\sum_{j=1}^{s} I_j l_j + l_s \sum_{j=s+1}^{m} I_j - l_s I_{\text{В}}\right),$$

где $I_{\text{В}}$ — ток подстанции В

$$I_{\text{В}} = (1/l)\sum_{j=1}^{m} I_j l_j - (U_{\text{А}} - U_{\text{В}})/rl.$$

При одностороннем питании расчет проводят по той же формуле, но принимают $I_{\text{В}} = 0$.

При однофазном токе, допуская равенство углов сдвига фаз различных нагрузок для расчета по этим же формулам, сопротивление тяговой сети r следует заменить на полное:

$$Z = r_{\text{а}}\cos\varphi + x\sin\varphi.$$

Для расчетов потерь напряжения рекомендуется использовать составное сопротивление Z_u тяговой сети:

$$Z_u = 0{,}8r + 0{,}6x.$$

Методику расчета потери напряжения при заданных размерах движения см. в [62.39].

Расчет потерь мощности в тяговых сетях постоянного и переменного тока при заданном расположении нагрузок, кВт,

$$\Delta P = \left[\sum_{j=1}^{m} \Delta U_j I_j + (U_{\text{А}} - U_{\text{В}})^2/lr\right]10^{-3},$$

где ΔU_j — потеря напряжения от подстанции до потребителя j с током I_j; второе слагаемое в квадратных скобках — составляющая потерь мощности от уравнительного тока. Формула записана для случая двустороннего питания. При $U_{\text{А}} = U_{\text{В}}$ получим формулу, пригодную для схемы одностороннего питания. Потери мощности в линиях переменного тока при заданном расположении нагрузок определяют по аналогичным формулам, заменяя сопротивление постоянному току активным сопротивлением тяговой сети. Уравнительный ток при двустороннем питании в этом случае определяют путем деления геометрической разности напряжений смежных подстанций на полное сопротивление тяговой сети между ними.

Расчет потерь мощности в тяговой сети при заданных размерах движения. При двустороннем питании потери энергии в тяговой сети за время T, кВт · ч

$$\Delta W_T = r\cdot 10^3 \sum_{k=1}^{M} l_{k\text{А}}\Big(1{,}08T(1 - l_{k\text{А}}/l)\times$$

$$\times \sum_{g=1}^{N} W_{kg}^2/t_{kg} + 2W_{kT}\sum_{j=k+1}^{M} W_{jT}(1 - l_{j\text{А}}/l)\Big)/TU^2,$$

где $l_{k\text{А}}$, $l_{j\text{А}}$ — расстояния от середин перегонов k и j до подстанции А; W_{jT} — расход энергии на перегоне j за время T, кВт · ч.

При одностороннем питании

$$\Delta W_T = r\cdot 10^3 \sum_{k=1}^{M} l_{k\text{А}}\Big(1{,}08T\sum_{g=1}^{N} W_{kg}^2/t_{kg} +$$

$$+ 2W_{kT}\sum_{j=k+1}^{M} W_{jT}\Big)/TU^2.$$

Расчеты для более сложных схем, а также при рекуперации энергии приведены в [62.6].

ТРАНСФОРМАТОРЫ, ВЫПРЯМИТЕЛИ, КОМПЕНСИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Активные потери мощности в трансформаторах, кВт,

$$\Delta P_{\text{тр}} = n_{\text{тр}}\Delta p_{\text{х}} + (k^2_{\text{э.п}}/n_{\text{тр}})\Delta p_{\text{а}} k^2_{\text{з.т}},$$

где $n_{\text{тр}}$ — число трансформаторов на тяговой подстанции; $\Delta p_{\text{а}}$, $\Delta p_{\text{х}}$ — нагрузочные и холостого хода потери электроэнергии в трансформаторах; $k_{\text{э.п}}$ — коэффициент эффективности нагрузки подстанции; $k_{\text{з.т}}$ — коэффициент загрузки, определяемый по формулам для трансформаторов:

однофазных двухобмоточных

$$k^2_{з.т} = S^2_{ср}/S^2_{н};$$

трехобмоточных трехфазных понижающих

$$k^2_{з.т} = S^2_{ср1}/S^2_{ном} + S^2_{ср2}/S^2_{ном} + S^2_{ср3}/S_{ном}S_{ном3};$$

трехфазных трехобмоточных тяговых

$$k^2_{з.т} = S^2_{ср.п}/S^2_{ном}(9\mu^2 + 2\nu^2 + 3\mu\nu + 3\mu + \nu + 2);$$

$\mu = I_{р.п}/3I_{п}$; $I_{р.п}$ — районная нагрузка; $I_{п}$ — тяговая нагрузка наиболее загруженного плеча питания; ν — отношение нагрузок плеч питания фаз a и b, $\nu = I_a/I_b$; $S_{ср}$ — среднегодовая нагрузка трансформатора; $S_{ср1}$, $S_{ср2}$, $S_{ср3}$ — то же по обмоткам; $S_{ср.п}$ — то же плеча питания; $S_{ном}$ — номинальная мощность трансформатора; $S_{ном3}$ — то же обмотки меньшей мощности.

Для трехфазных тяговых трансформаторов действующие токи фаз при равенстве углов сдвига нагрузок плеч $\varphi_a = \varphi_b$:

$$I^2_{дbc} = 1/9(I^2_{да} + 4I^2_{дb} + 2I_aI_b);$$

$$I^2_{дac} = 1/9(I^2_{дb} + 4I^2_{да} + 2I_aI_b);$$

$$I^2_{дab} = 1/9(I^2_{да} + I^2_{дb} - I_aI_b),$$

где I_a, I_b, $I_{да}$, $I_{дb}$ — средние и действующие токи плеч питания в фазах a и b.

Потребная мощность на тягу трансформаторов тяговых подстанций переменного тока, кВ · А,

$$S_т \approx (2S_{та}k_{эа}k_{max\,a} + 0{,}65S_{тb}k_{эb}k_{max\,b})0{,}8,$$

где $S_{та}$, $S_{тb}$ — расчетные мощности тяги по плечам a и b, кВ · А; $k_{эа}$ и $k_{эb}$ — коэффициенты эффективности нагрузок плеч питания; $k_{max\,a}$, $k_{max\,b}$ — коэффициенты, учитывающие допустимую перегрузку трансформаторов по нагрузке плеч a и b.

Полная расчетная мощность трехфазных трехобмоточных трансформаторов, кВ · А,

$$S_{расч} = S_т + S_р,$$

где $S_р$ — районная нагрузка нетяговых потребителей,

$$S_р = \sum_{n=1}^{\tau_р} (S_{р\,max\,n})k_{н.р}k_{max\,р}k_{сп},$$

где $S_{р\,max\,n}$ — максимальная районная нагрузка n-го потребителя; $k_{н.р}$ — коэффициент неравномерности районной нагрузки; $k_{max\,р}$ — перегрузочная способность районных трансформаторов; $k_{сп}$ — коэффициент спроса; $\tau_р$ — число районных потребителей.

Число рабочих выпрямительных агрегатов $N_{ар}$ для подстанций постоянного тока выбирается из условий:

$$N_{ар} \geq I_{Ад}/I_{ном};\ N_{ар} \geq I_{Amax}/(k_{пер}I_{ном}),$$

где $I_{Ад}$, I_{Amax} — действующий и максимальный токи подстанции; $I_{ном}$ — номинальный ток агрегата подстанции; $k_{пер}$ — перегрузочная способность агрегата.

Потребная реактивная мощность устройств параллельной емкостной компенсации, квар,

$$Q_р = [A_{г.т}(tg\varphi_1 - tg\varphi_2)1{,}13 \cdot 10^6]/8000,$$

где $A_{г.т}$ — годовое потребление на тягу, млн кВт · ч; 1,13 — коэффициент, учитывающий потери в реакторе и искажение формы кривой приложенного напряжения. Принимают $tg\varphi_1 = 0{,}62$, $tg\varphi_2 = 0{,}394$. Основные технические данные установок поперечной и продольной емкостной компенсации приведены в табл. 62.14.

Таблица 62.14. **Технические данные компенсирующих установок**

Тип конденсатора	Количество конденсаторов, шт.	Мощность конденсаторов, квар	Номинальный ток, А	Назначение установки
КПМ-0,6-50	112	5600	155	Поперечная компенсация
КМН-1,05-25	224	5600	155	
КСА-1,05-25	160	4000	110	
КСА-1,05-37,5	128	4800	133	
КС-1,05-37,5	64	2400	67	
КСП-0,66-40	144	5760	480	Продольная компенсация
КПМ-0,6-50	80	4000	667	
КСША-0,66-40	60	2400	1212	
КС-1,05-25	72	1800	858	

ПАРАМЕТРЫ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Сопротивление тяговой сети постоянного тока состоит из суммы сопротивлений проводов контактной сети и рельсовой цепи. Сопротивление 1 км проводов контактной сети

$$r_к = 1/\Sigma g,$$

где Σg — сумма проводимостей 1 км проводов, составляющих контактную сеть.

Проводимость проводов приведена в табл. 62.15.

Шунтирующий эффект грунта снижает сопротивление рельсовой сети и учитывается умножением значений $r_р$, приведенных в табл. 62.16, на коэффициент $\beta_р$, определяемый по формулам, приведенным в [62.5].

Для консольного питания одной нагрузки от одной подстанции при практически неограниченной длине рельсов по обе стороны от рассматриваемой зоны коэффициент

$$\beta_{р1} = (1 - e^{-kl})/kl,$$

где $k = \sqrt{r_р / r_п}$; $r_р$ — сопротивление 1 км рельсовой цепи (всех путей), Ом/км; $r_п$ — переходное сопротивление рельс—земля, Ом · км; l — расстояние от подстанции до нагрузки.

Таблица 62.15. **Проводимость 1 км проводов**

Марка провода	Проводимость g, См · км
С-70	0,52
ПБСМ1-70	1,37
ПБСМ1-95	1,77
ПБСМ2-70	1,08
ПБСМ2-95	1,42
М-95	5
М-120	6,32
МФ-85	4,75
МФ-100	5,65
МФ-150	8,5
БрФ-100	5,07
А-150	4,75
А-185	5,9

Примечание. Проводимость контактных проводов, имеющих износ, уменьшается пропорционально долс их износа.

Таблица 62.16. **Сопротивление рельсовой цепи $r_р$ однопутного участка, Ом/км, без учета износа рельсов и шунтирующего действия грунта**

Тип рельса	Длина рельса между стыками, м		Рельсы, сваренные в стыках
	12,5	25,0	
Р75	0,0131	0,0120	0,0109
Р65	0,0153	0,0140	0,0127
Р50	0,0191	0,0175	0,0159
Р43	0,0221	0,0203	0,0184

Примечание. Для двухпутного участка приведенные в таблице значения следует уменьшить в 2 раза.

Таблица 62.17. **Активное сопротивление одиночного рельса при частоте тока 50 Гц**

Тип рельса	Сопротивление рельса, Ом/км, при токе, А		
	100	200	300
Р43	0,21	0,28	0,33
Р50	0,18	0,24	0,29
Р65	0,16	0,20	0,25
Р75	0,15	0,19	0,23

Для двустороннего питания с одной нагрузкой в середине участка длиной l коэффициент

$$\beta_{р2} = [4\ \mathrm{ch}(kl/2) - 1]/[kl\ \mathrm{sh}(kl/2)].$$

Для среднего значения сопротивления рельсов при перемещении нагрузки вдоль участка питания коэффициент

$$\beta_{р3} = \{2 + 7\ \mathrm{ch}(kl) - 21\ \mathrm{sh}(kl)/kl + 24[\mathrm{ch}(kl) - 1]/$$

$$/k^2l^2\}/[kl\ \mathrm{sh}(kl)].$$

Активное сопротивление рельсов переменному току в 5—10 раз больше их сопротивления постоянному току (табл. 62.17) и зависит от значения протекающего по рельсам тока. Определение индуктивного сопротивления осложняется из-за несимметричности тяговой сети, протекания токов в грунте и изменений контуров тягового тока, связанных с перемещением тяговых нагрузок. Полное сопротивление 1 км тяговой сети однопутного участка при частоте 50 Гц можно рассчитывать как $z = r_а + jx$, двухпутных участков при раздельной работе контактных подвесок путей $z_1 = r_{а1} + jx_1$, двухпутных участков при параллельном соединении контактных подвесок путей $z_2 = r_{а2} + jx_2$. Составляющие полных сопротивлений приведены в табл. 62.18 и 62.19.

Таблица 62.18. **Суммарное активное сопротивление 1 км тяговой сети однопутного участка r_a, одного пути двухпутного участка r_{a1}, двухпутного участка при параллельном соединении контактных подвесок r_{a2}, Ом/км**

Марка троса	Марка контактного провода	Тип рельса	r_a	r_{a1}	r_{a2}
С-70	БрФ-100 МФ-85	Р43	0,328	0,282	0,173
		Р50	0,314	0,273	0,164
		Р65, Р75	0,296	0,264	0,155
	МФ-100	Р43	0,311	0,263	0,163
		Р50	0,295	0,254	0,154
		Р65, Р75	0,278	0,245	0,145
ПБСМ1-70 ПСБМ2-95	БрФ-100 МФ-85	Р43	0,294	0,248	0,158
		Р50	0,282	0,239	0,148
		Р65, Р75	0,266	0,23	0,139
	МФ-100	Р43	0,284	0,236	0,149
		Р50	0,269	0,227	0,14
		Р65, Р75	0,253	0,218	0,131
ПБСМ1-95	БрФ-100 МФ-85	Р43	0,279	0,232	0,148
		Р50	0,264	0,223	0,139
		Р65, Р75	0,248	0,214	0,13
	МФ-100	Р43	0,27	0,222	0,142
		Р50	0,25	0,213	0,133
		Р65, Р75	0,238	0,204	0,124
ПБСМ2-70	БрФ-100 МФ-85	Р43	0,316	0,263	0,163
		Р50	0,3	0,254	0,154
		Р65, Р75	0,281	0,245	0,145
	МФ-100	Р43	0,293	0,249	0,156
		Р50	0,282	0,24	0,147
		Р65, Р75	0,265	0,231	0,138
М-95	БрФ-100 МФ-85	Р43	0,212	0,164	0,114
		Р50	0,197	0,155	0,105
		Р65, Р75	0,181	0,146	0,096
	МФ-100	Р43	0,205	0,157	0,11
		Р50	0,29	0,148	0,101
		Р65, Р75	0,173	0,139	0,092
МФ-120	БрФ-100 МФ-85	Р43	0,203	0,154	0,108
		Р50	0,187	0,145	0,099
		Р65, Р75	0,171	0,136	0,09
	МФ-100	Р43	0,195	0,148	0,106
		Р50	0,181	0,139	0,097
		Р65, Р75	0,164	0,13	0,088

Примечание. Приведенные данные соответствуют средним значениям переходного сопротивления $r_п$ между рельсами и грунтом.

Таблица 62.19. **Суммарное реактивное сопротивление 1 км тяговой сети однопутного участка x, одного пути двухпутного участка x_1, тяговой сети двухпутного участка при параллельном соединении контактных подвесок x_2, Ом/км**

Марка троса	Тип рельса	x	x_1	x_2
С-70	Р43	0,621	0,536	0,358
	Р50	0,605	0,528	0,35
	Р65, Р75	0,593	0,52	0,342
ПБСМ1-70 ПБСМ2-95	Р43	0,554	0,469	0,327
	Р50	0,543	0,461	0,317
	Р65, Р75	0,521	0,453	0,309
ПБСМ1-95	Р43	0,543	0,453	0,316
	Р50	0,522	0,445	0,308
	Р65, Р75	0,505	0,437	0,3
ПБСМ2-70	Р43	0,57	0,485	0,333
	Р50	0,554	0,476	0,325
	Р65, Р75	0,537	0,469	0,317
М-95, М-120	Р43	0,515	0,43	0,305
	Р50	0,499	0,422	0,297
	Р65, Р75	0,48	0,414	0,289

Примечание. Приведенные данные соответствуют средним значениям переходного сопротивления $r_п$ между рельсами и грунтом.

Значения полных сопротивлений $|Z|$ по модулю и составных Z_u тяговых сетей по данным института Трансэлектропроект приведены в табл. 62.20.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И НОРМАТИВЫ

Расчетная плотность тока медного контактного провода трамвайных и троллейбусных линий в нормальном режиме работы летом должна быть не более 5 А/мм^2, в вынужденном режиме — 6,8 А/мм^2. При расчете плотности тока учитывают износ провода по сечению на 20 % для трамвая и 10 % для троллейбуса [62.15].

Температура нагрева проводов при максимальной температуре воздуха и токовых нагрузках должна быть не выше значений, приведенных в табл. 62.21.

Длительно допустимые токовые нагрузки контактных подвесок на постоянном токе указаны в табл. 62.22, на переменном токе — в табл. 62.23.

Экономическая плотность тока в элементах системы электроснабжения городского электротранспорта

$$J_{эк.п(эк.к)} = 0{,}9\sqrt{P_{п(к)} b_{п(к)} \gamma_{п(к)} / c\tau},$$

Таблица 62.20. **Полные и составные значения сопротивлений тяговой сети переменного тока**

Тип провода контактной сети	Экранирующий провод	Сопротивление тяговой сети, Ом/км			
		Однопутный участок		Один путь двухпутного участка	
		$\|Z\|$	Z_u	$\|Z\|$	Z_u
ПБСМ-70 + МФ-100	—	0,5	0,437	0,462	0,405
ПБСМ-95 + МФ-100	—	0,482	0,417	0,443	0,384
М-95 + МФ-100	—	0,445	0,362	0,408	0,331
ПБСМ-70 + НлОлФ-100	—	0,498	0,437	0,461	0,406
ПБСМ-95 + НлОлФ-100	—	0,483	0,419	0,442	0,386
ПБСА-50/70 + НлОлФ-100	—	0,487	0,426	0,448	0,394
ПБСМ-70 + МФ-100 + А-185	—	0,361	0,303	0,327	0,275
ПБСМ-95 + МФ-100 + А-185	—	0,355	0,296	0,321	0,268
ПБСМ-95 + МФ-100 + 2А-120	—	0,334	0,277	0,299	0,249
ПБСМ-95 + МФ-100 + 2А-95	—	0,338	0,283	0,303	0,254
ПБСА-50/70 + НлОлФ-100+А-185	—	0,358	0,3	0,325	0,272
ПБСМ-70 + МФ-100 + А-185	А-150	0,284	0,25	0,272	0,239
ПБСМ-95 + МФ-100 + А-185	А-185	0,273	0,241	0,261	0,23
ПБСМ-95 + МФ-100 + А-120	А-120	0,304	0,276	0,282	0,257
ПБСМ-95 + МФ-100 + 2А-95	2А-95	0,239	0,228	0,22	0,209

Таблица 62.21. **Допустимая температура нагрева проводов**

Тип проводов	Допустимая температура нагрева проводов, °С, при длительности протекания тока, мин		
	20 и более	3	1
Медные контактные	95	120	140
Низколегированные контактные	110	130	150
Бронзовые, сталемедные биметаллические контактные	120 (130)	140	160
Медные многопроволочные	100	120	140
Сталемедные биметаллические многопроволочные	120	140	150
Алюминиевые и сталеалюминиевые многопроволочные, в том числе бисталлические	90	100	110

Примечание. Значение в скобках по ГОСТ 2584-86.

где $P_{п(к)} = E_н + a_{п(к)}/100$; индекс «п» относится к величинам при расчете контактных проводов, индекс «к» — к расчету питающих кабелей постоянного тока; $E_н$ — нормативный коэффициент эффективности, год$^{-1}$; a — годовая доля амортизационных отчислений, %; b — стоимость проводникового материала провода или кабеля, руб/дм^3; γ — удельная проводимость проводникового материала, м/(Ом · мм^2); c — стоимость электроэнергии, руб/(кВт · ч); τ — условное время максимальных потерь, в течение которого в линии, передающей потребителю максимальную мощность, выделяются такие же потери энергии, как и при ее работе по реальному графику в течение года, ч/год.

Экономическое сечение кабеля положительных питающих линий трамвайных и троллейбусных тяговых сетей и отрицательных питающих линий троллейбусной сети

$$F_{эк.к} = I_{л.д}/J_{эк.к},$$

где $I_{л.д}$ — действующий ток кабельной линии.

Сечение контактного провода

$$F_{эк.п} = I_{экв}/J_{эк.п},$$

где $I_{экв}$ — эквивалентный ток участка контактной сети.

Сечение, мм^2, кабелей отрицательных питающих линий трамвая

$$F_{0i} = (I_{0i}l_{0i}/J_{эк.к})\left[\left(\sum_{i=1}^{m} I_{0i}\right)/\left(\sum_{i=1}^{m} I_{0i}l_{0i}^2\right)\right]^{1/2},$$

где I_{0i} — средний ток в i-й линии, А; l_{0i} — длина i-й линии, км; m — общее число линий.

Суммарное экономическое сечение в медном эквиваленте проводов контактной сети железнодорожного транспорта [62.6]

$$F_{эк.м} = 3{,}38\sqrt{cB_0},$$

Таблица 62.22. **Длительно допустимые токовые нагрузки на постоянном токе**

Марка провода и сечение подвески (постоянный ток)	Допустимый длительный ток, А, при износе контактного провода, %		
	0	15	30
МФ-85	540	470	390
МФ-100	600	540	460
МФО-100	660	570	470
НлОлФ-100	640	580	490
БрФ-100	700	630	530
МФ-150	750	680	620
А-120, АС-120	420	—	—
А-150, АС-150	500	—	—
А-185, АС-185	590	—	—
М-95	600	—	—
М-120	650	—	—
ПБСМ-70	350	—	—
ПБСМ-95	410	—	—
ПБСА-50/70	350	—	—
МГ-70	520	—	—
МГ-95	600	—	—
ПБСМ-70 + МФ-85	720	650	570
ПБСА-50/70 + МФ-85	740	680	600
ПБСМ-70 + МФ-100	770	720	640
ПБСМ-95 + МФ-100	820	770	700
ПБСА-50/70 + МФ-100	790	740	670
М-95 + МФ-100	1140	1110	1010
М-120 + МФ-100	1230	1140	1050
ПБСМ-95 + 2МФ-100	1420	1310	1160
ПБСМ-95 + 2МФ-100 + А-185	1870	1710	1540
ПБСМ-95 + 2МФ-100 + 2А-185	2460	2290	2130
ПБСМ-95 + 2МФ-100 + 3А-185	3050	2890	2720
М-95 + 2МФ-100	1740	1650	1450
М-95 + 2МФ-100 + А-185	2160	2000	1840
М-95 + 2МФ-100 + 2А-185	2750	2590	2430
М-95 + 2МФ-100 + 3А-185	3340	3170	3020
М-120 + 2МФ-100	1800	1630	1460
М-120 + 2МФ-100 + А-185	2280	2120	1960
М-120 + 2МФ-100 + 2А-185	2870	2710	2550
М-120 + 2МФ-100 + 3А-185	3460	3290	3140
М-120 + 2НлОлФ-100	1780	1610	1440
М-120 + 2НлОлФ-100 + А-185	2260	2100	1940
М-120 + 2НлОлФ-100 + 2А-185	2850	2690	2530
М-120 + 2НлОлФ-100 + 3А-185	3440	3280	3120

Таблица 62.23. **Длительно допустимые токовые нагрузки на переменном токе**

Марка провода и сечение подвески (переменный ток)	Допустимый длительный ток, А, при износе контактного провода, %		
	0	15	30
МФ-85	540	470	390
МФ-100	600	540	460
МФО-100	660	570	470
НлОлФ-100	640	580	490
БрФ-100	700	630	530
МФ-150	750	680	620
ПБСМ-70	310	—	—
ПБСМ-95	330	—	—
ПБСА-50/70	310	—	—
М-95	600	—	—
М-120	650	—	—
А-25	130	—	—
А-35	180	—	—
А-50	230	—	—
А-70	320	—	—
АС-35	200	—	—
АС-50	260	—	—
АС-70	330	—	—
А-95, АС-95	370	—	—
А-120, АС-120	420	—	—
А-150, АС-150	500	—	—
А-185, АС-185	590	—	—
ПСО-5	50	—	—
ПС-25	50	—	—
ПС-35	70	—	—
ПБСМ-70 + МФ-85	760	670	580
ПБСМ-70 + МФ-100	820	750	660
ПБСМ-70 + НлОлФ-100	880	800	700
ПБСМ-70 + МФ-100 + А-185	1290	1270	1160
ПБСА-50/70 + МФ-100	850	780	685
ПБСА-50/70 + НлОлФ-100	910	830	730
ПБСА-50/70 + МФ-100 + А-185	1300	1290	1190
ПБСМ-95 + МФ-100	880	810	710
ПБСМ-95 + НлОлФ-100	940	860	760
ПБСМ-95 + МФ-100 + А-185	1310	1300	1220
М-95 + МФ-100	1160	1060	930
М-95 + НлОлФ-100	1230	1130	990
М-95 + МФ-100 + А-185	1450	1440	1420

где $B_0 = \Delta A_г/(r_к l)$ — годовые потери электроэнергии в проводах фидерной зоны при их сопротивлении 1 Ом, кВт · ч/(Ом · год); $\Delta A_г$ — годовые потери электроэнергии в контактной сети фидерной зоны l, кВт · ч/год; $r_к$ — сопротивление контактных проводов, Ом/км.

На городском электротранспорте максимальное падение напряжения в рельсах до ближайшего пункта присоединения к рельсам отрицательной питающей линии, вычисленное по среднесуточной нагрузке за месяцы со среднемесячной температурой выше –5 °С, должно быть не выше значений, указанных в табл. 62.24.

Тяговые нагрузки определяют для зимнего времени и максимального графика движения. Рассчитанные по этим нагрузкам допустимые потери напряжения в рельсовой сети $\Delta U_{р.расч}$, определяются

$$\Delta U_{р.расч} = \Delta U_{pmax} k_{з.л} k_{max} 24/t_г,$$

где $t_г$ — среднесуточная продолжительность работы трамвая на линии за год, ч; $k_{з.л}$ — отношение удельного расхода электроэнергии на движение в зимнее время к удельному расходу летом ($k_{з.л}$ = = 1,1—1,15); k_{max} — отношение удельного расхода электроэнергии в часы пик к среднесуточному (k_{max} = 1,1—1,2).

Таблица 62.24. **Максимально допустимое падение напряжения ΔU_{pmax}, В**

Тип основания рельсового пути трамвая	Число месяцев в году со среднемесячной температурой выше –5 °С				
	3—4	5—6	7—8	9—10	11—12
Бетонное с рельсами, утопленными в бетон	1,2	0,8	0,6	0,5	0,4
Песчаное с замощением	6	4	3	2,5	2
Щебеночное с замощением или песчаное со слоем битуминизированного песка под штучным покрытием	9,6	6,4	4,8	4	3,2
Бетонное с электроизоляцией корыта битуминизированным песком слоем 10—12 см	12	8	6	5	4
Шпально-песчаное и шпально-щебеночное без замощения	12	8	6	5	4

62.4. КОНТАКТНАЯ СЕТЬ

КОНТАКТНЫЕ ПОДВЕСКИ

Высота подвешивания проводов над уровнем головок рельсов (для трамвая) и над уровнем дорожного покрытия (для троллейбуса) на вводимых вновь или реконструируемых линиях принята 5,8 м; на территориях депо и ремонтных мастерских: на открытых участках — 5,8 м, внутри производственных зданий — 5,2 м, в проемах ворот — 4,7 м. Высота контактной сети под инженерными сооружениями составляет не менее 4,2 м, в туннелях линий скоростного трамвая — не менее 3,9 м.

На железнодорожном транспорте расчетная высота контактного провода в беспровесном режиме над уровнем головок рельсов принята не менее 6250, при электрификации — 6500, на станциях — 6600 мм. Наименьшая высота подвешивания провода в любой точке пролета на перегонах и станциях — не менее 5750, на переездах — 6000 мм. Наибольшая высота контактного провода в любых условиях эксплуатации 6800 мм. Длина пролета контактных подвесок на прямых участках приведена в табл. 62.25.

Горизонтальные расстояния (в свету) от фундаментов опор контактной сети городского электротранспорта до подземных сооружений (инженерных сетей) следует принимать в соответствии с табл. 62.26. Расстояния от элементов контактной сети трамвая и троллейбуса, находящихся под напряжением, до различных объектов должны быть не менее указанных в табл. 62.27, для железнодорожного транспорта — в табл. 62.28.

Таблица 62.25. **Наибольшая длина пролета контактной подвески на городском электротранспорте**

Тип контактной подвески	Длина пролета, м, на прямой для линий	
	трамвайных	троллейбусных
Цепная	50	50
Простая петлевая	45	40
Простая на наклонных струнах	40	40
Простая на гибких тросовых поперечинах	35	30
Цепная малогабаритная в туннеле	25	25
Простая на эластичных поддерживающих устройствах в туннеле	15	15
Простая жесткая на потолочных подвесах	8	4

Таблица 62.26. **Расстояния от фундаментов опор до подземных сооружений**

Сооружения	Расстояние, м, не менее
Водопровод, напорная канализация, общие коллекторы и тепловые сети	1,5
Самотечная канализация (бытовая и дождевая)	3
Дренажи и газопроводы любого давления	1
Силовые кабели и кабели связи	0,5

Таблица 62.27. **Расстояния от элементов контактной сети до различных объектов**

Объект	Расстояние, м, не менее
Опорные конструкции	1,5
Балконы зданий и оконные проемы	2
Изолированные кронштейны	0,25
Стволы деревьев	1,5
Ветви деревьев	1
Металлические части инженерных сооружений при свободном подвешивании (в пролете)	0,2
Металлические части инженерных сооружений при жестком закреплении	0,1

Таблица 62.28. **Наименьшие расстояния от проводов железнодорожного транспорта до объектов**

Объект пересечения или сближения	Наименьшее расстояние от проводов, м		
	отсасывающих линий, линий обратного тока, ВЛ до 1 кВ, волновода, группового заземления	питающих, усиливающих линий напряжением 3 кВ; ВЛ 3; 6 и 10 кВ	питающих, усиливающих линий напряжением 25 кВ; ВЛ 25 и 35 кВ; ДПР
Поверхность земли:			
в населенной местности	6	7	7
в ненаселенной местности в пределах искусственных сооружений	5	6	6
в труднодоступных местах	4	5	5
на недоступных склонах гор, скал, утесов	1	2,5	3
Головки рельсов неэлектрифицированного пути	7,5	7,5	7,5
Полотно автомобильной дороги, в том числе на переездах	7	7	7
Несущий трос или верхний провод ВЛ, подвешенный на опорах контактной сети	2	2	2
Верхний провод троллейбусных и трамвайных линий	1,5	3	3
Провод ВЛ при напряжении:			
менее 1 кВ	1	2	3
6—10 кВ	2	2	3
20—110 кВ	3	3	3
150—220 кВ	4	4	4
330—500 кВ	5	5	5
Настил пешеходных мостов (при устройстве над мостом предохранительного щита)	4	4,5	5
Поверхность пассажирских платформ (при двойном креплении проводов)	4,5	7	7
Крыша несгораемых производственных зданий и сооружений (при заземлении металлической крыши)	3	3	3
Ближайшая часть здания (по горизонтали)	1,5	2	4
Провод или подвесной кабель линий связи и радио (по горизонтали)	2	2	—
Крона деревьев	1	2	3

Примечания: 1. Населенная местность — это земля в пределах городской черты с учетом перспективного развития на 10 лет.

2. Ненаселенная местность — незастроенные местности или местности с отдельными редко стоящими строениями, доступные для транспорта и других машин, перегоны между железнодорожными станциями, включая остановочные пункты, не находящиеся в пределах местностей, отнесенных к населенной местности.

3. Труднодоступная местность — местность, недоступная для транспорта и других машин, в том числе откосы насыпей и выемок.

4. Расстояние по вертикали от проводов группового заземления до поверхности земли, на переездах до полотна автомобильной дороги допускается 6 м, а у анкеровок этих проводов — 4 м.

Таблица 62.29. **Механические свойства проводов контактной сети трамвая и троллейбуса**

Контактная подвеска	Напряжение в проводах при растяжении, Н/мм^2		Натяжение в проводах ПКСА-80/180, кН
	МФ, МФО	БрФ, БрФО	
Некомпенсированная	45—125	55—150	2—12
Частично компенсированная	40—150	55—150	2—12
Полукомпенсированная и компенсированная	80—95	105—115	7—8

КОНТАКТНЫЕ ПРОВОДА

Применяют следующие типы контактных проводов, изготовленных по ГОСТ 2584—86Е: МФ — медный фасонный; МФО — то же овальный; БрФ — бронзовый фасонный; БрФО — то же овальный; НлФ — низколегированный фасонный; НлФО — то же овальный. Легирование осуществляют присадками циркония, кадмия, магния, олова и др. В расширенных обозначениях низколегированных проводов указывают материал и содержание легирующего элемента в процентах. Например, НлМг0,05Ф — медный провод с 0,05 % магния, БрМгЦр0,15—0,15ФО — бронзовый овальный с 0,15 % магния и 0,15 % циркония. На городском электрифицированном транспорте допускается также составной алюминиевый контактный провод ПКСА. Гарантийный срок службы от момента монтажа составляет не менее 6 лет для медных, 8,5 года для низколегированных и 15 лет для бронзовых проводов.

Максимальные и минимальные значения напряжений от механических нагрузок, а также натяжений в контактных проводах трамвая и троллейбуса приведены в табл. 62.29.

Натяжения проводов, применяемых при электрификации железных дорог, приведены в табл. 62.30.

Таблица 62.30. **Натяжение проводов и тросов в контактной сети железных дорог**

Тип провода	Натяжение, кН	
	допустимое	номинальное
М-120	19,6	17,6
М-95	15,7	14,2
ПБСМ-95	19,6	17,6
ПБСМ-70	15,7	14,2
МФ-150	17,7	14,7
МФ-100	11,8	9,8
МФ-85	10	8,3
БрФ-100	14,7	12,8
А-185	9	—
А-150	7,5	—
АС-70/11	5,5	—
АС-50/8	4	—
АС-35/6,2	2,8	—

ОПОРЫ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Железобетонные опоры используют в качестве стоек для жестких поперечин и для закрепления на них консолей. Характеристики опор приведены в табл. 62.31, ГОСТ 19330—91.

В развернутом обозначении стоек первая буквенно-цифровая группа обозначает тип стойки, вторая — нормативный изгибающий момент, кН; третья — конструктивные особенности и условия эксплуатации. Буквы: С — проволочная напряженная арматура; СО — с дополнительной ненапряженной арматурой в нижней части; В — обратная конусность в нижней части (рис. 62.8); М — для ра-

Таблица 62.31. **Технические данные железобетонных опор железнодорожного транспорта**

Тип опоры	Высота, мм	Верхний диаметр, мм	Нижний диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Масса, т
С156, СО156	15 600	290	524	60 75	2,75 3,1
С136, СО136	13 600		492	60 75	2,1 2,52
СВ136, СВО136			335	60 75	1,98 2,35
С108, СО108	10 800		450	60 75	1,57 1,88

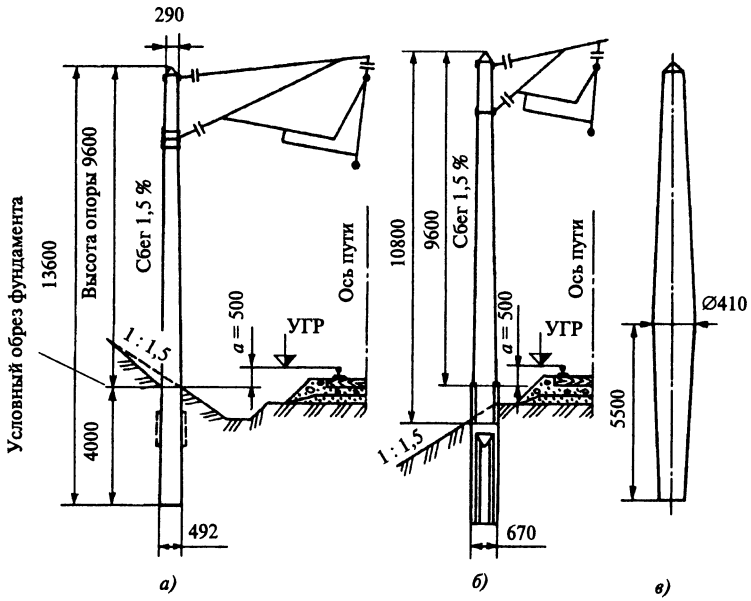


Рис. 62.8. Конические струнобетонные напряженные опоры типа СК:
а — длиной 13,6 м при установкс в выемкс; *б* — длиной 10,8 м при установкс на насыпи; *в* — с обратной конусностью в основании

боты при температурах ниже –55 °С; К — для работы при повышенной агрессивности окружающей среды.

Пример. СО136-98-М — опора с двойной арматурой длиной 13,6 м, нормативный изгибающий момент 98 кН · м, для работы при температурах ниже –55 °С. Опоры типов С108, СО108, С136, СО136, СВ136, СВО136 изготовляют на нормативные изгибающие моменты 44, 59, 79 и 98 кН · м. Опоры типов С156, СО156 — на нормативные изгибающие моменты 49, 66, 88 и 111 кН · м. Опоры длиной 13,6 м устанавливают непосредственно в грунт (рис. 62.8, *а*), а опоры длиной 10,8 м — в стаканные фундаменты (рис. 62.8, *б*). Консоли и кронштейны удерживаются на опорах посредством закладных деталей, которые крепятся к опорам болтами, пропускаемыми через отверстия в стенках опоры. Болты и закладные детали изолируют от бетона прокладками и полиэтиленовыми втулками.

Металлические опоры (рис. 62.9) используют в качестве анкерных, для установки двухпутных консолей и подвески гибких поперечин. Основные размеры типовых металлических опор железнодорожного транспорта приведены в табл. 62.32.

Консоли. В зависимости от числа перекрываемых путей консоли исполняют в виде однопутных, двухпутных и многопутных. Применяют неизолированные и изолированные консоли (табл. 62.33 и 62.34).

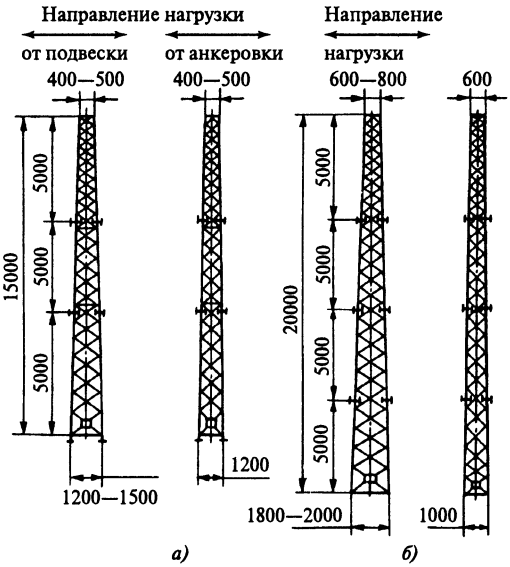


Рис. 62.9. Анкерные опоры гибких поперечин (*а*) и промежуточные (*б*)

Гибкие поперечины. Используют поперечины с изолированным нижним фиксирующим тросом (рис. 62.10, *а*); с неизолированным поперечно-несущим и изолированными фиксирующими тросами (рис. 62.10, *б*); с изолированными поперечно-несущим и фиксирующими тросами (рис. 62.10, *в*).

Таблица 62.32. **Основные размеры металлических опор железнодорожного транспорта**

Тип	База, см		Вершина, см	
	а	*б*	a_1	$б_1$
МН 25/15	100	120	40	40
МН (35—15)/15	100	120	40	40
МН 45/15	100	150	50	50
МН 65/15	100	150	50	50
МН 65/20	100	180	60	60
МН 85/20	100	180	60	60
МН 105/20	100	200	60	80
МН 150/20	100	200	60	80
М 25/15	80	130	50	50
М 35/15	80	130	50	50
М 45/15	110	100	50	50
М 65/15	110	160	50	50
М (35—25)/25	100	120	40	40
М (45—25)/15	100	150	50	50
М (65—25)/15	100	150	50	50
М (65—25)/20	100	150	50	50
М 10/13	60	100	40	50
М 15/13	60	100	40	50
М (10—40)/10	100	150	67	83

Примечания: 1. Буквенное обозначение: М — металлическая, Н — направленная.

2. В числителе приведены расчетные моменты, кН · м/9,81, поперек (первая цифра) и вдоль (вторая цифра) пути; в знаменателе — высота, м.

3. *а*, *б*, a_1, $б_1$ — стороны прямоугольника в сечении опоры у основания и при вершине.

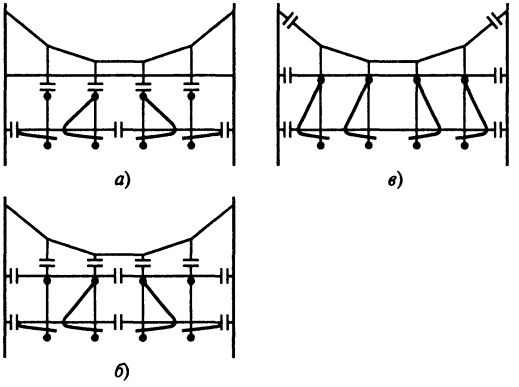


Рис. 62.10. Схемы гибких поперечин:

а — изолированный нижний фиксирующий трос; *б* — изолированные нижний и верхний фиксирующие тросы; *в* — изолированные поперечно-несущий и фиксирующие тросы

Таблица 62.33. **Технические данные неизолированных наклонных однопутных консолей**

Тип консоли	Длина, м		Масса, кг
	кронштейна	тяги	
НР-0-5	3,63	1,9	44
НР-I-5	4,73	2,6	56
НР-II-5	5,23	3,4	62
НР-III-6,5	6,23	4,4	85
НР-IV-6,5	7,13	5,3	97
НС-III-6,5п	6,23	4,3	98
НС-IV-6,5п	7,13	5,2	112
НС-I-5	4,73	2,5	57
НС-II-5	5,23	3,3	63
НС-I-6,5	4,73	2,5	65
НС-II-6,5	5,23	3,3	73
НС-III-6,5	6,23	4,3	88
НС-IV-6,5	7,13	5,2	100

Примечание. Н — наклонная консоль; Р — растянутая тяга; С — сжатая тяга; римская цифра — номер типа по длине кронштейна; п — наличие подкоса.

Таблица 62.34. **Основные данные изолированных консолей**

Тип консоли	Кронштейн		Тяга		
	Длина, м	Масса, кг	Материал	Длина, м	Масса, кг
ЖС-I	1,92	12	Стальной уголок 50 × 50 × 5	1,6	7
ЖР-I	1,92	12	Стальная труба диаметром 12	1,45	2
ЖР-II	2,05	14		1,45	2
ИТС-II	3,5	18	Стальная труба диаметром 25	2,25	6
ИТС-III	4	21		2,75	7
ИТС-V	5	26		3,85	10
ИТС-VI	5,5	28		4,35	11
ИТР-II	3,5	18	Стальная труба диаметром 16	2,2	4
ИТР-V	5	26		3,8	7
ИС-II	3,5	35	Стальная труба диаметром 25	2,25	6
ИС-III	4	40		2,75	7
ИС-V	5	50		3,86	9
ИС-VI	5,5	55		4,35	11
ИР-II	3,5	35	Стальная труба диаметром 12	2,2	5
ИР-V	5	50		3,8	7

Примечание. Ж — изолированная консоль на стойках жестких поперечин; С — сжатая тяга; Р — растянутая тяга; И — изолированная консоль; Т — трубчатая консоль; римская цифра — тип консоли.

Жесткие поперечины. Используют однопролетные и многопролетные конструкции. В зависимости от числа перекрываемых путей они могут иметь длину от 16,1 до 49,2 м. В качестве опор (стоек) для них могут быть использованы железобетонные нераздельные опоры длиной 13,6 м и раздельные, устанавливаемые в стаканные фундаменты. Применяют одиночные или двойные в зависимости от длины жесткой поперечины. Жесткие поперечины применяют для перекрытия семи электрифицированных путей при двух режимах: легком — компенсированная подвеска переменного тока без установки на ригеле осветительных приборов (рис. 62.11, *а*); тяжелом — полукомпенсированная подвеска постоянного тока с установкой на ригеле осветительных приборов (рис. 62.11, *б*).

Размеры поперечин без осветительных устройств: ширина 0,45, высота 0,7 м и для поперечин с осветительными устройствами соответственно 0,74 и 1,2 м. Основные технические данные металлических жестких поперечин (ригелей) приведены в табл. 62.35.

Таблица 62.35. **Технические данные жестких поперечин**

Марка поперечины	Масса, кг
Без осветительных устройств	
П 15-16,1	512
П 13-16,1	485
П 15-17,7	564
П 13-17,7	536
П 15-22,5	725
П 13-22,5	684
П 22-29,1	1145
П 17-29,1	987
П 15-29,1	921
С осветительными устройствами	
П 29-30,3	1320
П 26-30,3	1250
П 33-34	1511
П 29-39,2	1462
П 26-34	1341
П 23-30,3	1185
П 43-39,2	2074
П 33-39,2	1831
П 54-44,2	2659
П 43-44,2	2316
П 39-44,2	2109
П 29-39,2	1680

Примечание. П — поперечина; первая цифра — несущая способность, кН · м/9,81; вторая цифра — длина расчетного пролета, м.

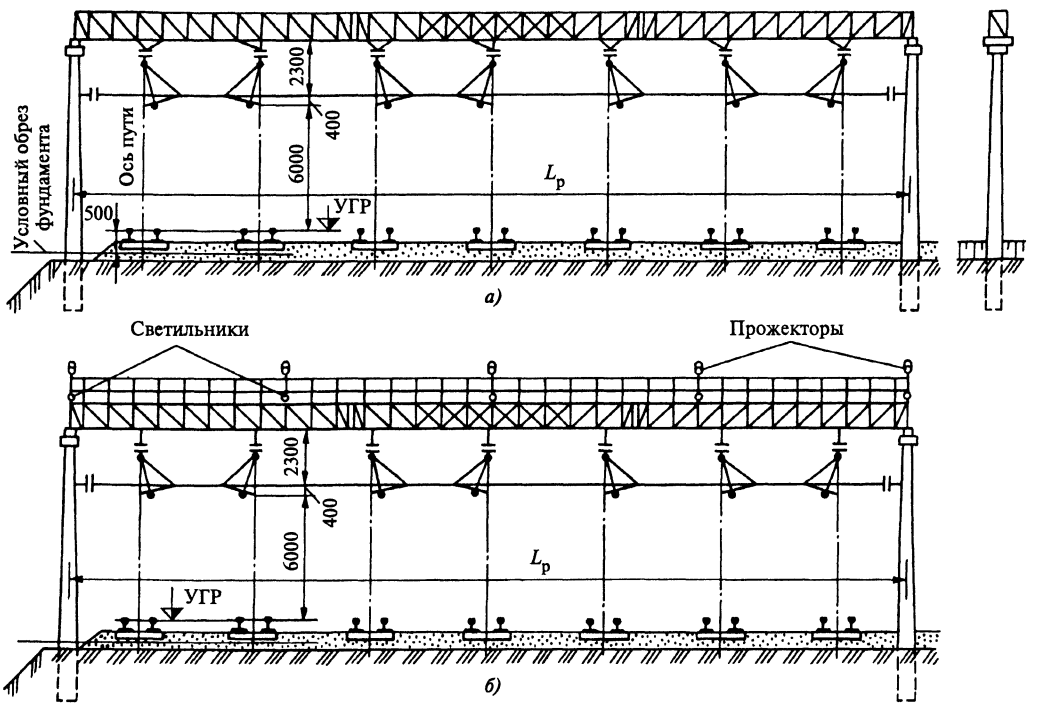


Рис. 62.11. Жесткая поперечина на семь путей без установки осветительных устройств (*а*) и с установкой осветительных устройств (*б*)

Таблица 62.36. **Технические данные железобетонных опор городского электротранспорта**

Тип опоры	Наружный диаметр, мм		Толщина стенки, мм	Расстояние от места приложения нагрузки до уровня заделки, м	Нормативная горизонтальная нагрузка, кН
	верхний	нижний			
СНЦ-3,4-11,5	200	373	65	8,5	4
СНЦ-5,1-11,5	200	373	65	8,5	6
СНЦ-7,7-12	290	470	70	8,5	9
СНЦ-10-12	290	470	70	8,5	12
СНЦ-16-13	По рабочим чертежам			10	16
СНЦ-18-13				10	18
СНЦ-20-15,5				12,5	16
СНЦ-22,5-15,5				12,5	18

Примечание. СНЦ — стойка с напрягаемой арматурой, центрифугированная; первая цифра — нормативный изгибающий момент на уровне заделки в грунт, кН · м/9,81; вторая — длина стойки, м.

ОПОРЫ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Железобетонная опора представляет собой полую коническую стойку с предварительно напряженной арматурой из высокопрочной стали. Подводка питания к контактной сети предусмотрена прокладкой кабелей внутри опоры. Марки опор, основные размеры и допустимые нагрузки на железобетонные опоры приведены в табл. 62.36.

В городском транспорте наибольшее распространение получили стальные двухзвенные опоры, состоящие из двух труб разного диаметра. Размеры трубчатых опор, разработанных для Москвы, приведены в табл. 62.37, внешний вид — на рис. 62.12.

Унифицированные опоры применяют для сооружения контактных сетей и наружного освещения. В обозначениях типов опор буквы: О — опора; С — стальная; Г — для грузовых компенсаторов; 2В — с отверстиями для выводов кабелей. Цифры: 0,3; 1,5; 0,9 и т.п. — нормативная нагрузка в тоннах на вершине опоры; 9; 11; 13 и т.п. — высота опоры от земли.

Опора типа ОС-2В предназначена для внутренней прокладки питающего кабеля. Она имеет два овальных отверстия: верхнее 270×80 мм и нижнее

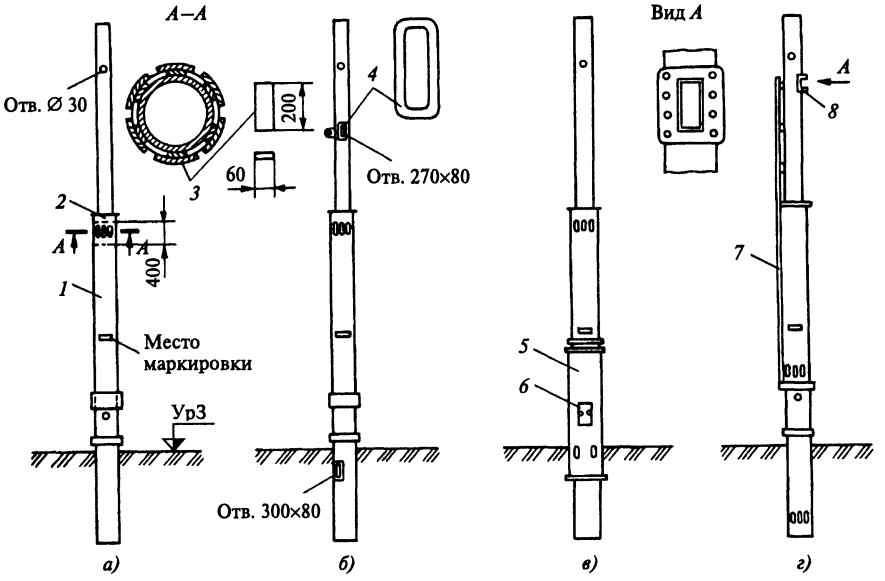


Рис. 62.12. Стальные унифицированные опоры:

а — типа ОС; *б* — типа ОС-2В; *в* — типа ОСЦ; *г* — типа ОСГ: *1* — тело опоры; *2* — фланец; *3* — клин; *4* — накладка; δ = 8; *5* — цоколь; *6* — дверца; *7* — труба диаметром 45×4; *8* — накладка, δ = 10; Ур3 — уровень земли

Таблица 62.37. **Технические данные стальных унифицированных трубчатых опор городского транспорта**

Тип опоры	Длина опоры, м	Диамстр трубы, мм	Масса опоры, кг
ОС-0,3-9	11	168/219	457
ОС-0,7-9	11	219/273	649
ОС-0,7-0,9-2В	11	219/273	663
ОС-0,9-9	11	273/325	800
ОСЦ-1,3-9	11	273/325	1228
ОС-0,4-9	11	168/219	659
ОС-0,8-9	11	219/273	903
ОС-0,8-9-2В	11	219/273	967
ОС-1,5-9	11	273/325	1146
ОСЦ-1,5-9	11	273/325	1580
ОС-1-9	11	219/273	1238
ОС-1,1-9	11	219/273	1315
ОС-2,1-9	11	273/325	1645
ОСЦ-2,4-9	11	273/325	2068
ОС-0,4-11	14	219/273	665
ОСЦ-1,1-11	14	273/325	1481
ОС-1,4-11	14	325/426	1329
ОС-0,6-11	14	219/273	1198
ОС-1-11	14	273/325	1507
ОС-1,8-11	14	325/426	1975
ОСЦ-1,3-11	14	273/325	1999
ОС-1,3-11	14	273/325	2132
ОСЦ-1,9-11	14	273/325	2614
ОС-2,7-11	14	325/426	2650
ОС-1,1-13	16	325/426	1470
ОСЦ-0,8-13	16	273/325	1607
ОСЦ-1,4-13	16	325/426	2053
ОС-1,5-13	16	325/426	2146
ОСЦ-1,5-13	16	325/426	2779
ОС-1-13	16	273/325	2356
ОС-1,9-13	16	325/426	3089
ОСЦ-1,3-13	16	273/325	2833
ОСЦ-2,5-13	16	325/426	3556
ОСЦГ-0,9-9	11	219/273	1235
ОСГ-1,1-9	11	273/325	1192
ОСЦГ-1,2-9	11	273/325	1624

Примсчанис. В числитслс показан диамстр верхнсй трубы, в знамснатслс — нижнсй.

300×80 мм. Края отверстий оформлены накладками, компенсирующими прочность места ослабления сечения. Верхнее отверстие расположено на высоте 6—6,5 м от уровня заделки в грунт, нижнее — на 0,5—0,7 м ниже поверхности грунта. Указанные пределы в размерах позволяют использовать опоры для подвески контактного провода на нужной высоте с учетом отклонений в конкретных случаях по местным условиям.

Опора типа ОСЦ изготовляется вместе с цоколем. Цоколь служит защитой места соединения кабеля и проводов освещения.

Опора типа ОСГ является анкерной и предназначена для размещения внутри нее устройства автоматического регулирования натяжения контактных проводов.

РАСЧЕТНЫЕ НАГРУЗКИ

1. Нагрузка от собственного веса провода, кН/м,

$$g = 9{,}81 \cdot 10^{-9} S\rho,$$

где S — расчетная площадь поперечного сечения провода, мм^2; ρ — плотность материала провода, кг/м^3.

Для многопроволочных проводов

$$g = 10{,}05 \cdot 10^{-9} S\rho.$$

Для комбинированного провода, например сталеалюминиевого

$$g = 10{,}05 \cdot 10^{-9}(S_a\rho_a + S_c\rho_c),$$

где S_a, S_c, ρ_a, ρ_c — площади сечений и плотности алюминиевой и стальной частей провода.

Нагрузка от струн и зажимов принимается как равномерно распределенная, равная 10^{-3} кН/м при одном и $2 \cdot 10^{-3}$ кН/м при двух контактных проводах.

2. Нагрузка от гололедных образований, кН/м,

$$g_г = \rho_г b(d + b)\pi \cdot 9{,}81 \cdot 10^{-9},$$

где $\rho_г$ — плотность гололедных отложений, кг/м^3; b — толщина гололедной корки, мм; d — диаметр провода, мм.

На контактном проводе расчетная толщина стенки гололеда принимается в 2 раза меньше, чем на других проводах. Гололедные образования на струнах и зажимах цепной подвески не учитываются.

3. Ветровая нагрузка, кН/м,

$$p_в = 0{,}615 \cdot 10^{-6} v^2 C_x d,$$

где v — скорость ветра, м/с; C_x — аэродинамический коэффициент.

Ветровая нагрузка на провод, покрытый гололедом, $p_{в.г}$, кН/м,

$$p_{в.г} = 0{,}615 \cdot 10^{-6} v_г^2 \, C_x(d + 2b),$$

где $v_г$ — скорость ветра при гололеде, м/с.

Значения аэродинамического коэффициента лобового сопротивления C_x:

Одинарный провод диаметром:	
20 мм и более	1,1
менее 20 мм	1,2
Одинарный провод:	
покрытый гололедом	1,2
с учетом зажимов и струн	1,25
Контактный провод с учетом зажимов и струн:	
МФ-85, МФ-100	1,25
МФ-150	1,3
Двойной контактный провод 2МФ-100 в выемках, на равнинных участках, на насыпях высотой до 5 м при расстоянии между проводами, мм:	
40	1,55
100	1,85
более 100	2,5
То же на насыпях высотой более 5 м при расстоянии между проводами, мм:	
40	1,85
100	2,15
более 100	2,5
Для плоских элементов конструкций	1,4
Для цилиндрических и конусных элементов конструкций	0,7

Ветровая нагрузка на любой объект, воспринимаемая поверхностью, перпендикулярной направлению ветра, кН:

$$P_в = 0{,}615 \cdot 10^{-3} \upsilon^2 C_x S_{пов},$$

где $S_{пов}$ — площадь поверхности, м^2.

4. Результирующая нагрузка, кН/м,

$$q = \sqrt{(g + g_г)^2 + p_{в.г}^2}.$$

Результирующую нагрузку на несущий трос цепной подвески определяют без учета ветровой нагрузки на контактные провода.

РАСЧЕТНЫЕ УРАВНЕНИЯ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА

Эквивалентная длина пролета анкерного участка с подвижными точками закрепления контактного провода, м:

$$l_{экв} = \left(\sum_{i=1}^{n} l_i^3 / \sum_{i=1}^{n} l_i \right)^{1/2},$$

где l_i — длина i-го пролета, м; n — число пролетов в анкерном участке.

Расчет комбинированных проводов производится по следующим формулам:

эквивалентный модуль упругости

$$E_{экв} = (E_c S_c + E_a S_a)/(S_c + S_a);$$

эквивалентный температурный коэффициент линейного расширения

$$\alpha_{экв} = (\alpha_c E_c S_c + \alpha_a E_a S_a)/(E_c S_c + E_a S_a),$$

где α_c, α_a, E_c, E_a, S_c, S_a — температурные коэффициенты, модули упругости и сечения составляющих комбинированного провода.

Расчет параметров комбинированного провода ведется, как однородного, на основании найденных эквивалентных величин. При этом площадью поперечного сечения является сумма площадей составляющих частей, натяжением — суммарное натяжение составляющих частей.

Упрощенное уравнение провисания гибкого однородного провода с постоянным сечением (рис. 62.13, *а*):

$$y = qx^2/2H,$$

где q — результирующая нагрузка на провод, кН/м; H — горизонтальная составляющая натяжения провода, кН; y, x — координаты искомой точки, м.

Стрела провеса провода, м

$$f = ql^2/8H.$$

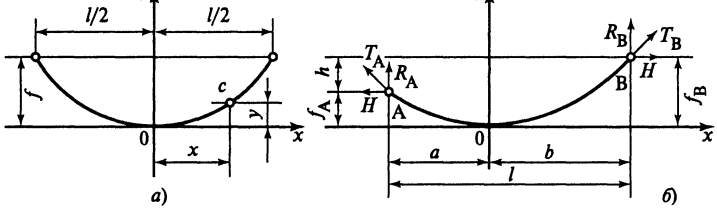


Рис. 62.13. К расчету провисания провода при закреплении точек подвеса:
а — на одной высоте; *б* — на разных уровнях

Уравнения провисания при расположении точек подвеса на разных уровнях (рис. 62.13, *б*):

$$a = l/2 - hH/ql; \quad b = l/2 + hH/ql; \quad f_A = qa^2/2H;$$

$$f_B = qb^2/2H.$$

Вертикальные составляющие опорных реакций:

$$R_A = qa; \quad R_B = qb.$$

Натяжение провода в точках подвеса:

$$T_A = \sqrt{H^2 + R_A^2}; \quad T_B = \sqrt{H^2 + R_B^2}.$$

Уравнение состояния провода при простой подвеске

$$q_x^2 l^2/24H_x^2 - q_1^2 l^2/24H_1^2 = \alpha(t_x - t_1) + (H_x - H_1)/ES,$$

где индекс «*x*» обозначает рассчитываемый режим; индекс «1» соответствует исходному режиму; q_x, q_1 — результирующие нагрузки на провод в соответствующих режимах, кН/м; t_x, t_1 — температуры режимов, °С; H_x, H_1 — натяжения провода в соответствующих режимах, кН; α — температурный коэффициент линейного расширения материала провода, $°C^{-1}$; E — модуль упругости провода, ГПа; S — площадь поперечного сечения провода, $мм^2$.

Стрелу провеса провода f_x в пролете l при температуре t_x определяют:

$$f_x = q_x l^2/8H_x.$$

В пролете критической длины $l_{кр}$ натяжения провода как в режиме минимальной температуры, так и в режиме наибольшей нагрузки при гололеде равны максимальному натяжению H_{max}:

$$l_{кр} = H_{max}\sqrt{24\alpha(t_г - t_{min})/(q_г^2 - g^2)},$$

где $t_г$, t_{min} — температуры гололедного режима и режима минимальной температуры соответственно, °С; $q_г$ — результирующая нагрузка гололедного режима, кН/м; g — нагрузка от собственного веса провода, кН/м.

Критическую нагрузку $q_{кр}$ определяют:

$$q_{кр} = \sqrt{24\alpha H_{max}^2(t_г - t_{min})/l^2 + g^2}.$$

При критической нагрузке в режиме гололеда натяжение провода становится максимальным и равным его натяжению при минимальной температуре.

Таблица 62.38. **Ориентировочные значения T_0**

Материал несущего троса	Число контактных проводов	T_0, % T_{max}, при		
		$t_0 = t_{ср} - 5$ °С	$t_0 = t_{ср} - 10$ °С	$t_0 = t_{ср} - 15$ °С
Медь	1	70	75	80
Медь	2	75	80	85
Сталь и бимсталл	—	80	83	85

Примечание. $t_{ср}$ — среднее значение температуры.

Критическая нагрузка несущего троса цепной подвески определяется:

$$q_{кр} = (Z_г/Z_{tmin}) \times \times \sqrt{24\alpha_п Z_{tmin}^2(t_г - t_{min})/l^2 + W_{tmin}^2} - g_0\varphi_г K_г/T_0,$$

где $Z_г = T_{max} + \varphi_г K_г$; $Z_{tmin} = T_{max} + \varphi_{tmin}K_{tmin}$; $\alpha_п$ — температурный коэффициент линейного расширения материала несущего троса, $°C^{-1}$; $W_{tmin} = g_0(1 + \varphi_{tmin}K_{tmin}/T_0)$. Обычно принимают $\varphi_{tmin} = \varphi_г = \varphi_x = \varphi = const$; g_0 — нагрузка от собственного веса проводов и тросов цепной подвески; T_0 — натяжение несущего троса в беспровесном режиме (при расчете критической нагрузки значением T_0, кН, задаются, табл. 62.38); T и K — натяжения продольного несущего троса и контактного провода; индекс «г» соответствует гололедному режиму, индекс «min» — режиму минимальной температуры.

Для полукомпенсированной подвески

$K_{tmin} = K = K_г = const$, тогда $Z_г = Z_{tmin} = Z_{max}$ и

$$q_{кр} = \sqrt{24\alpha_п Z_{max}^2(t_г - t_{min})/l^2 + W_{tmin}^2} - g_0\varphi K/T_0.$$

Уравнение состояния цепной контактной подвески с простыми струнами:

$$W_x^2 l^2/24Z_x^2 - W_1^2 l^2/24Z_1^2 = \alpha_п(t_x - t_1) + (T_x - T_1)/E_п S_п,$$

где W — приведенная нагрузка, кН/м; Z — приведенное натяжение, кН.

Для режима *x* приведенная нагрузка $W_x = q_x(1 + g_0\varphi_x K_x/g_x T_0)$; $Z_x = T_x + \varphi_x K_x$. Уравнение обычно решают, задаваясь значениями T_x, и получают зависимость $t_x(T_x)$.

Для рессорных контактных подвесок принимают $\varphi = 0$. При этом допущении натяжения троса определяют, пользуясь уравнением состояния провода простой подвески, в котором принимают $H = T$; q — результирующая нагрузка на трос от веса контактных проводов, самого троса, струн и дополнительных нагрузок. Натяжение несущего троса T_0

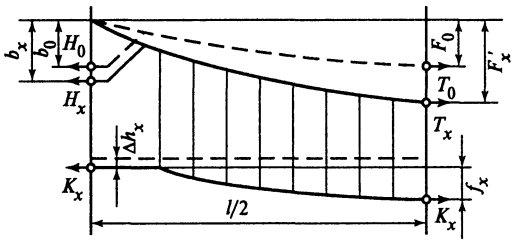


Рис. 62.14. К расчету цепной подвески

при беспровесном расположении контактных проводов находят:

$$t_0 = [t_1 - W_1^2 l^2/(24\alpha_{\text{п}} Z_1^2) + T_1/(\alpha_{\text{п}} E_{\text{п}} S_{\text{п}})] + \\ + g_0^2 l^2/(24\alpha_{\text{п}} T_0^2) - T_0/(\alpha_{\text{п}} E_{\text{п}} S_{\text{п}}).$$

В качестве исходного режима (индекс 1) используют обычно режим минимальной температуры. Задаваясь значениями T_0 (см. табл. 62.38), методом интерполяции определяют значение натяжения, точно соответствующее предварительно принятой температуре t_0. Натяжение разгруженного несущего троса $T_{\text{рх}}$ в зависимости от температуры находят:

$$t_x = [t_0 - g_0^2 l^2/(24\alpha_{\text{п}} T_0^2) + T_0/(\alpha_{\text{п}} E_{\text{п}} S_{\text{п}})] + \\ + g_{\text{п}}^2 l^2/(24\alpha_{\text{п}} T_{\text{рх}}^2) - T_{\text{рх}}/(\alpha_{\text{п}} E_{\text{п}} S_{\text{п}}),$$

где $g_{\text{п}}$ — нагрузка от собственного веса несущего троса.

Конструктивный коэффициент цепной подвески определяют для режима x

$$\varphi_x = [T_x(l - 2c)^2 / l^2]/\{T_x + [1 - (l - 2c)^2/l^2]K_x\},$$

где c — расстояние от опоры до ближайшей струны.

Стрелы провеса продольного несущего троса (рис. 62.14) цепных рессорных подвесок

$$F'_x = g_x l^2/8T_x - K_x f_x/T_x + H_x b_x/T_x.$$

Для цепной подвески с простыми струнами

$$H_x b_x/T_x = 0.$$

В беспровесном режиме для рессорных подвесок

$$F_0 = g_0 l^2/8T_0 + H_0 b_0/T_0.$$

Для подвесок с простыми струнами

$$F_0 = g_0 l^2/8T_0.$$

Стрела провеса несущего троса в плоскости действия результирующей нагрузки q_x

$$F_x = F'_x q_x/g_x,$$

где g_x — вертикальная нагрузка на несущий трос.

Стрела провеса контактного провода в пролете длиной l

$$f_x = [(l - 2c)^2/8(T_x + K_x)](g_x - g_0 T_x/T_0),$$

где c — расстояние от оси опоры до ближайшей простой струны, закрепленной на несущем тросе.

Вертикальное перемещение контактного провода под точкой подвеса без учета перемещения, обусловленного изменением угла наклона изолятора, на котором подвешен несущий трос,

$$\Delta h_x = [c(l - c)/2T_x](g_x - g_0 T_x/T_0).$$

Расчеты компенсированных подвесок сводятся к расчету стрел провеса проводов и вертикальных перемещений у опор контактных проводов при отсутствии или возникновении дополнительных нагрузок.

Стрела провеса контактного провода цепной компенсированной подвески при гололеде

$$f_{\text{г}} = f + [g_{\text{г}}(l - 2c)^2]/[8(T + K)],$$

где $g_{\text{г}}$ — нагрузка от веса гололеда на проводах подвески; f — стрела провеса при отсутствии дополнительных нагрузок.

Изменение высоты контактного провода у опоры без учета поворота подвесного изолятора

$$\Delta h_{\text{г}} = g_{\text{г}} c(l - c)/2T.$$

Вертикальная проекция стрелы провеса несущего троса при гололеде и ветре для рессорной подвески

$$F'_{\text{г}} = (g + g_{\text{г}})l^2/8T - f_{\text{г}} K/T + b_{\text{г}} H/T,$$

где $b_{\text{г}} = b_0 + \Delta h_{\text{г}}$.

Стрела провеса в плоскости действия результирующей нагрузки

$$F_{\text{г}} = q_{\text{г}} l^2/8T - [q_{\text{г}}(K f_{\text{г}} - H b_{\text{г}})]/[T(g + g_{\text{г}})].$$

При простых струнах в этих формулах $H = 0$.

Проверку прочности заранее выбранного сечения $S_{\text{п}}$ производят по максимальному усилию $T_{\text{п max}}$, возникающему в тросе в режиме гололеда:

$$S_{\text{п}} \geq T_{\text{п max}}/[\sigma_{\text{р}}],$$

где $T_{\text{п max}} \leq n_{\text{п}} T_{\text{р}}/k_{\text{з}}$; $[\sigma_{\text{р}}]$ — допустимое напряжение материала троса на растяжение; $n_{\text{п}}$ — число проводов в поперечном несущем тросе; $T_{\text{р}}$ — разрывное усилие для одного провода; $k_{\text{з}}$ — коэффициент запаса прочности;

$$T_{\text{п max}} = \sqrt{(V_{\text{max}}^2 + H_{\text{п}}^2)},$$

где V_{max} — наибольшая вертикальная составляющая опорной реакции; $H_{\text{п}}$ — горизонтальная составляющая натяжения троса (рис. 62.15).

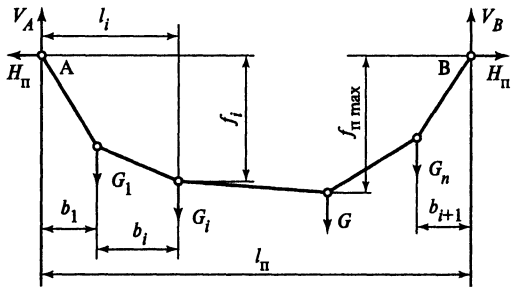


Рис. 62.15. Расчетная схема поперечного несущего троса

Вертикальная составляющая натяжения на опоре В

$$V_B = 1/\left(l_п \sum_{i=1}^{n} G_i l_i\right);$$

на опоре А

$$V_A = \sum_{i=1}^{n} G_i - V_B,$$

где n — полное число нагрузок.

Горизонтальная составляющая натяжения

$$H_п = M_{max}/f_{п\,max},$$

где M_{max} — максимальный момент от вертикальных сил; $f_{п\,max}$ — максимальная стрела провеса троса, принимают $f_{п\,max} = (1/8—1/10)l_п$.

Монтажная стрела провеса троса в ненагруженном состоянии

$$f_п = (0{,}85—0{,}9)\sqrt{3(L_п - l_п)l_п/8},$$

где $L_п$ — полная длина троса.

ИЗОЛЯЦИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

На городском электротранспорте используют натяжные, подвесные, консольные и фиксирующие изоляторы, а так-же изолирующие элементы в специальных частях. Изоляторы должны выдерживать без пробоя и перекрытия сухоразрядное переменное напряжение 5 кВ, 50 Гц в течение 1 мин и мокроразрядное 3 кВ — 3 мин. Назначение и механические нагрузки изоляторов см. в табл. 62.39.

Типы изоляторов, приведенные в таблице, не обеспечивают необходимую работоспособность при загрязненной окружающей среде. В последние годы разработано несколько типов стержневых изоляторов для контактной сети трамваев и троллейбусов, представляющих собой стеклопластиковые стержни с защитным покрытием. Обозначение изоляторов, например НСКр-36/800-300-В-VII. Буквы в обозначении изолятора Н, П, К, Ф — конструктивное назначение (натяжной, подвесной, консольный, фиксирующий); С — стержневой; Кр, Ф, По и т.п. — материал защитного покрытия: кремнийорганическая резина, фторопласт, полиолефин. Класс изолятора: 36/800, 51/800, 70/800 — числитель — разрушающая сила при растяжении, кН; знаменатель — наибольшее рабочее напряжение, В. Цифры — установочный размер, мм. Буквы А, Б, В — модификация изолятора. Римские цифры IV—VII — район применения изолятора по степени загрязненности атмосферы (СЗА). Район VII — наиболее загрязненный.

Таблица 62.39. **Основные данные изоляторов контактной сети городского электротранспорта**

Назначение изолятора, конструкция	Тип	Выдерживаемое механическое усилие, кН
Натяжной, пружинный	ИП-1 ИП-2	7 12
Натяжной планочный ДСП-Б (древесно-слоистый пластик)	И-1,2 И-1,7	12 17
Такелажный (фарфор)	ИТФ-3	30 (на сжатие)
Подвесной, пресс-материал АГ-4с	ИКП	2

На железнодорожном транспорте используют в основном тарельчатые и стержневые изоляторы из фарфора (ГОСТ 12670—88) и стекла (ГОСТ 6490—83). Условные обозначения тарельчатых изоляторов: первая буква — вид изолятора: Ф — фиксаторный, С — подвесной с зацеплением «серьга», П — подвесной со сферическим зацеплением; вторая буква — материал: Ф — фарфор, С — стекло; дополнительные буквы: Г — грязестойкий, К — конический, Д — двукрылый, В — с вытянутым вниз ребром, А — антивандальный, СС — стеклянный сферический; цифры — класс изолятора, соответствующий значению нормированной разрушающей электромеханической силы при растяжении, кН; третья буква после цифр — индекс модернизации. Например: ПСД70Е — подвесной со сферическим зацеплением, стеклянный, двукрылый, разрушающая сила на растяжение 70 кН, модернизация Е.

Важной характеристикой изолятора является длина пути утечки. Выбор изоляции для контактной сети переменного тока 25 кВ производят по нормированной минимальной длине пути утечки в зависимости от расчетной степени загрязнения атмосферы (табл. 62.40. Инструктивно-методические указания Трансэлектропроекта).

Количество тарельчатых изоляторов в гирлянде на металлических и железобетонных опорах контактной сети 25 кВ $n = L/L_и$, где $L_и$ — длина пути утечки одного изолятора. Значение n округляется в большую сторону, если количество десятых после запятой в расчетной цифре превышает 3. Для анкеровок контактной сети, питающих и усиливающих линий значение n увеличивают на единицу.

Таблица 62.40. **Длина пути утечки изоляторов в сети 25 кВ**

Вид изоляции	Минимальная длина пути утечки L, мм, для районов применения с расчетной степенью загрязненности атмосферы				
	III	IV	V	VI	VII
Поддерживающие и врезные (кроме анкерных) изоляторы или гирлянды из тарельчатых изоляторов	800	950	1100	1300	1500
Изолирующие вставки с гладкими фторопластовыми защитными чехлами	650	750	900	1050	1200
Изолирующие скользуны для прохода полозов токоприемников	1000	1200	1300	1400	1600

В контактной сети постоянного тока 3 кВ в поддерживающих и врезных (кроме анкеровок) узлах независимо от расчетной степени загрязненности атмосферы принимают гирлянды из двух тарельчатых изоляторов или стержневой изолятор с длиной пути утечки не менее 450 мм. Изолирующие вставки и скользуны должны иметь геометрическую длину пути утечки не менее 400 и 800 мм соответственно. Технические данные рекомендуемых Трансэлектропроектом тарельчатых изоляторов для контактной сети приведены в табл. 62.41.

Таблица 62.42. **Технические данные штыревых линейных изоляторов**

Класс	Нормированная механическая разрушающая сила при изгибе, кН, не менее	Выдерживаемое импульсное электрическое напряжение, кВ, не менее	Изоляционное расстояние по воздуху от провода до штыря, мм
10	12,5	80	150
20	13	125	250
35	16	195	350

Среднегодовой уровень отказов по электрической прочности — $1 \cdot 10^{-3}$; по механической — $5 \cdot 10^{-6}$ для стеклянных и $1 \cdot 10^{-5}$ для фарфоровых изоляторов.

Для линий напряжением от 1 до 35 кВ используют линейные штыревые изоляторы из фарфора и стекла, ГОСТ 1232—82.

Обозначения: буквы Ш — штыревой; Ф, С — фарфор, стекло; цифры 10, 25, 35 — класс, соответствуют номинальному электрическому напряжению линии электропередачи или электроустановки, кВ; буквы А Б, В — конструктивное исполнение; буквы О, Т, С и т.д. — климатическое исполнение. Основные характеристики изоляторов указаны в табл. 62.42.

Таблица 62.41. **Основные параметры тарельчатых изоляторов**

Параметр	Фарфоровый				Стеклянный					
	ПФ 70А	СФ 70А	ФФ 40А	ПФ 70Д	ПС 70Д	ПС 70Е	ПСД 70Е	ПС 120Б	ПСВ 120Б	ПСА 70
Диаметр тарелки, мм	255	255	255	255	255	255	270	290	290	255
Строительная высота, мм	146	188	214	127 146	127 146	127 146	127	146	146	127
Длина пути утечки, мм	303	303	303	303	303	303	411	320	442	290
Масса, кг	4,6	4,7	4,7	4,5	3,5	3,4	4,6	3,8	5,7	4,8
Срок службы, годы	30	30	30	25	25	25	25	25	25	25
Постоянный ток	Г	Г	Ф	Г	—	—	—	АН	—	—
Переменный ток	—	Г	—	Г	Г	Г	Г	АН	АН	ГВ

Примечание. Г — в гирляндах всех узлов, кроме анкеровок и врезок, с натяжением более 14 кН; АН — гирлянды анкеровок и врезок с натяжением более 14 кН; Ф — фиксаторные узлы; ГВ — в местах, подвергающихся вандализму.

62.5. ТЯГОВЫЕ ПОДСТАНЦИИ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Тяговые подстанции представляют собой комплекс электротехнических установок, предназначенных для приема, преобразования и распределения электрической энергии с целью питания транспортных средств на электрической тяге. В зависимости от системы тяги, т.е. типа используемого подвижного состава, различают тяговые подстанции постоянного (выпрямленного) тока с напряжением на шинах: 3,3 и 16,5 кВ для подвижного состава железных дорог, электрифицированных на постоянном токе; 825 В для электроснабжения вагонов метрополитена; 600 В для подвижного состава городского электрического транспорта — трамваев и троллейбусов. Тяговые подстанции переменного тока обеспечивают электроснабжение однофазным переменным током 27,5 кВ промышленной частоты 50 Гц тяговые сети железных дорог, электрифицированных на переменном токе. Стыковые подстанции постоянно-переменного тока располагают вблизи стыков участков тяговой сети постоянного и переменного тока.

Одновременно тяговые подстанции электрифицированных железных дорог осуществляют электроснабжение районных, промышленных, коммунальных, сельскохозяйственных предприятий, которые условно называют районными, и нетяговых потребителей: локомотивных и вагонных депо, мастерских, сетей освещения, связи, сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ). Устройства СЦБ применяют для организации безопасного движения поездов, повышения пропускной способности и обеспечения автоматического регулирования движения поездов [62.13].

Тяговые подстанции метрополитена, расположенные в туннелях и вблизи пассажирских станций, обеспечивают электропитание сетей освещения, вентиляции и силовых цепей станций, эскалаторов, туннельных установок и устройств СЦБ. Тяговые подстанции, выполненные совместно с подстанциями энергосистем, устройствами электроснабжения районных и нетяговых потребителей, дежурными пунктами дистанций контактной сети и районными диспетчерскими пунктами телемеханического управления называют *совмещенными*.

По другим признакам тяговые подстанции классифицируют: по схеме подключения к питающей энергосистеме (схеме внешнего электроснабжения подстанций) — опорные, промежуточные транзитные, промежуточные на ответвлениях (отпаечные), тупиковые, подстанции с радиальной схемой первичного электроснабжения; по значению питающего (первичного) напряжения — 6; 10; 35; 110; 220 кВ; по количеству установленных преобразовательных агрегатов — многоагрегатные и одноагрегатные; по системе тягового электроснабжения — тяговые подстанции централизованного и децентрализованного питания тяговой сети; по способу управления — телемеханизированные и нетелемеханизированные; по способу обслуживания — с постоянным дежурным персоналом, с дежурством на дому, без дежурного персонала; по конструктивному выполнению — наземные закрытые, открытые, смешанные (часть оборудования располагается в помещении подстанции), подземные глубокого и мелкого заложения, стационарные и передвижные, используемые при капитальных ремонтах оборудования стационарных подстанций или для усиления их мощности.

Схемы внешнего электроснабжения определяются местоположением электрических станций, воздушных или кабельных линий электропередачи (ЛЭП), тяговых подстанций, характером и мощностью потребителей, в том числе и нетяговых, и другими факторами. Выбор схемы диктуется также требуемой степенью надежности, планом транспортных линий и проводится на основе технико-экономических расчетов. Для обеспечения высокой надежности и бесперебойного электроснабжения в типовых схемах питание тяговых подстанций осуществляется от двух независимых источников по продольной двухцепной или одноцепной ЛЭП.

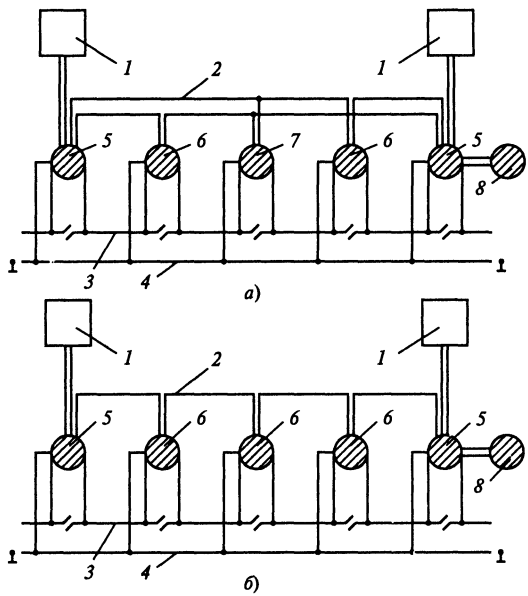


Рис. 62.16. Схема электроснабжения тяговых подстанций железнодорожного транспорта:

а — двухцепная ЛЭП; *б* — одноцепная ЛЭП; *1* — электрическая станция или районная подстанция; *2* — ЛЭП; *3* — контактная сеть; *4* — рельсы; *5* — опорная тяговая подстанция; *6* — промежуточная транзитная тяговая подстанция; *7* — промежуточная тяговая подстанция на ответвлениях; *8* — тупиковая подстанция

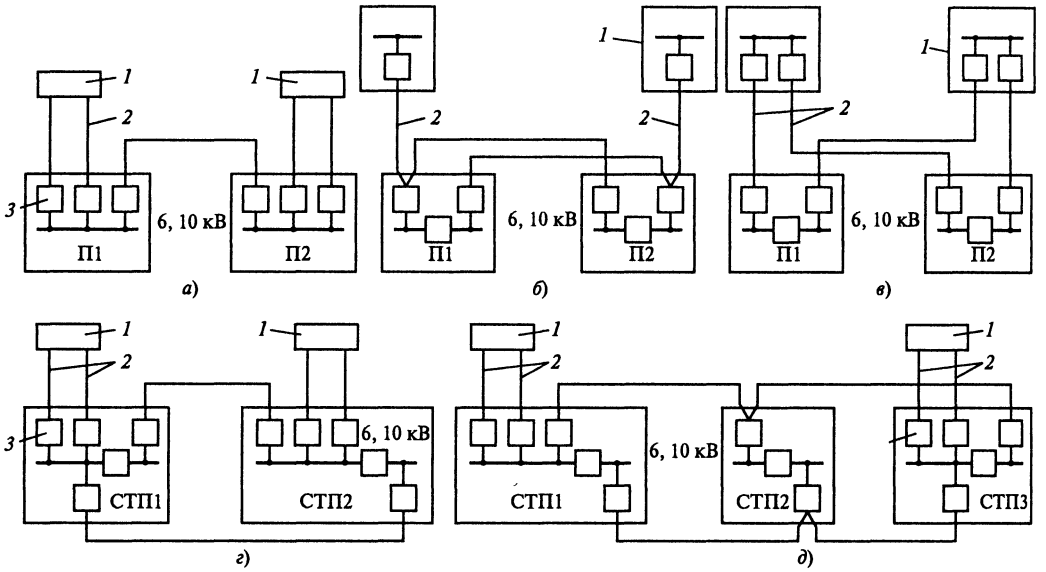


Рис. 62.17. Принципиальная схема электроснабжения тяговых подстанций метрополитена:

а — двух тяговых подстанций П1 и П2 по двум линиям и перемычке; *б* — по двум линиям и двум перемычкам; *в* — двух совмещенных тяговых подстанций СТП1, СТП2, СТП3; *д* — трех совмещенных тяговых подстанций СТП1, СТП2, СТП3; *1* — распределительный пункт; *2* — кабели; *3* — выключатели

Типичными схемами являются кольцевая, магистральная двустороннего и одностороннего питания и радиальная (рис. 62.16). Кольцевая схема (рис. 62.16, *а*) применяется в тех случаях, когда две подстанции одной группы находятся вблизи источников питания *1*, мощность которых определяется мощностью всех присоединенных к ним тяговых подстанций. Магистральные схемы (рис. 62.16, *б*) целесообразно использовать в тех случаях, когда тяговые подстанции располагаются вдоль транспортного пути. Источники питания *1* соединяются с шинами тяговых подстанций, как правило, двухцепными линиями электропередачи. Тяговые подстанции *5*, соединенные с источниками, называются опорными. Прочие тяговые подстанции в цепи называются промежуточными транзитными *6*, включенными в рассечку, промежуточными отпаечными на ответвлениях *7* и тупиковыми *8*. Надежность системы электроснабжения увеличивается из-за двойной межсистемной связи, но при этом ее стоимость возрастает. Для снижения этих затрат применяют схемы с уменьшенным числом вводов.

Приведенные схемы наиболее характерны для электроснабжения тяговых подстанций железнодорожного транспорта. Опорные тяговые подстанции, представляющие центры для промежуточных подстанций, присоединяются к шинам 10, 110 и 220 кВ источников не менее чем по трем воздушным линиям электропередачи. Для обеспечения надежности электроснабжения тяговых подстанций к двухцепной ЛЭП разрешается присоединять: тяговые подстанции постоянного тока — не более пяти, переменного тока — не более пяти при напряжении 220 кВ и трех — при напряжении 110 кВ.

При питании подстанций по одноцепной ЛЭП с двусторонним питанием число транзитных подстанций, как правило, должно быть не более трех, а присоединение отпаечных подстанций не допускается. Тупиковые подстанции питаются по двум, а иногда по трем или четырем радиальным линиям при напряжении источника 6, 10, 35 кВ.

Первичное питание подстанций метрополитена осуществляется от подстанций распределительных пунктов напряжением 10 кВ по кабелям. Принципиальные схемы электроснабжения подстанций метрополитена приведены на рис. 62.17. Особенностью этих схем является включение в цепь при двух источниках питания не более трех подстанций. Каждая тяговая подстанция получает питание по двум ЛЭП и перемычке.

Разветвленную сеть трамвайно-троллейбусных линий, особенно в больших городах, обеспечивают электроэнергией тяговые подстанции городского электротранспорта, внешнее электроснабжение которых зависит от места расположения электростанций или распределительных пунктов, собственно тяговых подстанций, тяговых сетей и др. Варианты схем первичного питания тяговых подстанций подчинены общей тенденции кольцевого, магистрального или радиального электроснабжения (рис. 62.18).

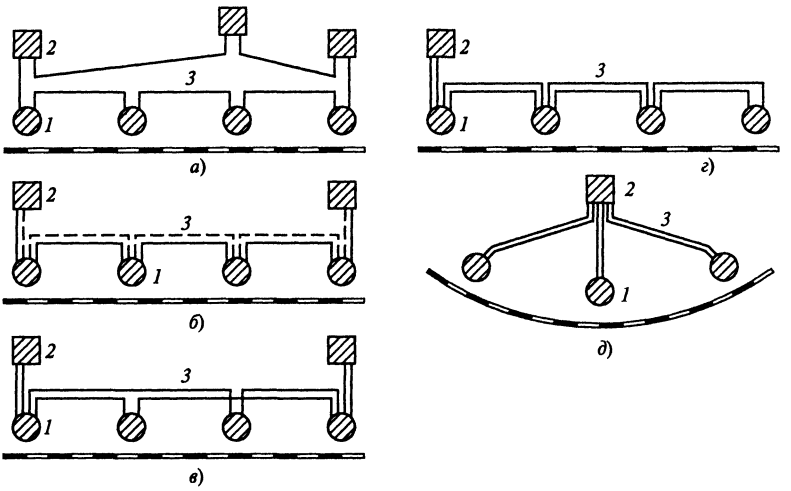


Рис. 62.18. Принципиальные схемы электроснабжения тяговых подстанций городского транспорта:
а — кольцевая; *б*, *в* — магистральные, с двумя вводами и парными соединительными кабелями между подстанциями; *г* — магистральная от одного распределительного пункта питания; *д* — радиальная с параллельной или раздельной работой питающих вводов; *1* — тяговая подстанция; *2* — распределительный пункт питания; *3* — кабель

Радиальные схемы внешнего электроснабжения могут быть однолучевые, с параллельной и раздельной работой линий электропередачи. В радиальной однолучевой схеме тяговая подстанция получает питание по одному кабелю от одной питающей подстанции. Схема применима только для электроснабжения одноагрегатных тяговых подстанций городского электрического транспорта при децентрализованной системе питания тяговой сети.

Дальнейшее рассмотрение классификационных характеристик и особенностей тяговых подстанций, питающих тяговые сети различного подвижного состава, целесообразно провести, используя структурные схемы как самих подстанций, так и совмещенные со схемами внешнего и внутреннего электроснабжения. Под структурными понимают схемы, представляющие собой совокупность основных функциональных узлов электроустановок и отражающие принцип их взаимодействия.

Тяговые подстанции состоят из следующих основных функциональных узлов: распределительных устройств, обеспечивающих присоединение воздушных или кабельных линий (вводов) внешнего электроснабжения и оборудования подстанции к шине первичного питания; тяговых трансформаторов; выпрямителей или выпрямительно-инверторных преобразователей на тяговых подстанциях постоянного тока; распределительных устройств постоянного или переменного тока, обеспечивающих присоединение тяговой сети; трансформаторов собственных нужд и нетяговых потребителей; устройств автоматики, защиты и управления.

ТЯГОВЫЕ ПОДСТАНЦИИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Структурная схема тяговой подстанции показана на рис. 62.19. Питающее трехфазное напряжение 110 (220) кВ подается по вводам *1* в распределительное устройство (РУ) 110 (220) кВ *2* и к трехобмоточным трансформаторам *3*. Выводы обмотки 27,5 кВ понижающего трансформатора используются для питания подвижного состава через РУ 27,5 кВ *4* и фидеры контактной сети *5*, *6* и фидер *7*, наглухо подключаемый к ходовым рельсам, обычно к рельсам подъездного пути подстанции. Обмотка низкого напряжения 10 кВ понижающего трансформатора через РУ 10 кВ *9* и питающие линии *10* используется для питания районных потребителей. Нетяговые потребители, расположенные вдоль железной дороги, и трансформаторы собственных нужд присоединяются к шинам фаз *a* и *b* и контуру заземления (фаза *c*).

При однофазной тяговой нагрузке неизбежна несимметрия нагрузок фаз питающей трехфазной системы внешнего электроснабжения.

Для исключения неравномерности загрузки фаз применяется схема присоединения тяговых подстанций к ЛЭП, при которой первичные обмотки трансформаторов на подстанциях соединены в звезду, а вторичные — в треугольник с поворотом фаз (рис. 62.20). Поворот фаз обеспечивается

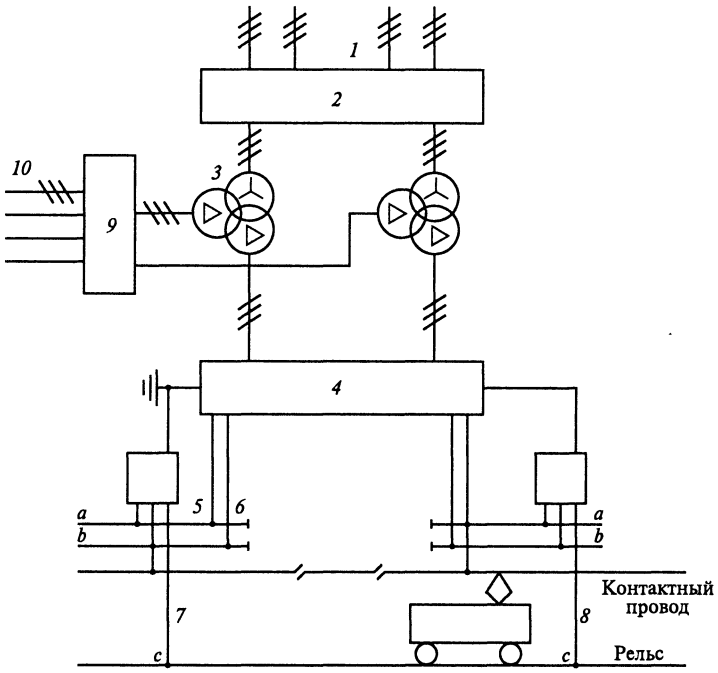


Рис. 62.19. Структурная схема тяговой подстанции переменного тока 27,5 кВ

чередованием подключения трансформаторов к фазам ЛЭП.

Открытые распределительные устройства (ОРУ) 110; 220; 27,5; 10 кВ выполняют для установки на открытой территории. Каждое ОРУ состоит из системы шин; коммутационных аппаратов, предназначенных для включения и отключения цепей высокого напряжения; выключателей и разъединителей; короткозамыкателей и отделителей (на промежуточных подстанциях); измерительных трансформаторов тока и напряжения и других аппаратов.

ОРУ 110/220 кВ опорной тяговой подстанции выполнено с одинарной, секционированной масляным выключателем, и обходной системами шин (рис. 62.21). Вводы подстанции под нечетными номерами подводят напряжение к первой, а под нечетными — ко второй секции шин. Например, от ввода (ячейка 1) к первой секции шин напряжение подводится по цепи: линейный разъединитель *7* — выключатель *6* — шинный разъединитель *9*. На входах вводов включены заградительный реактор *4*, конденсатор связи *2* с заземляющим разъедините-

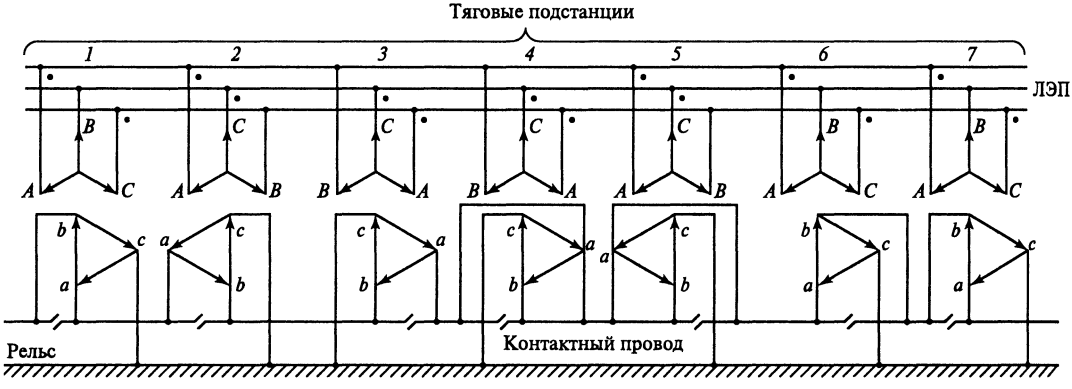
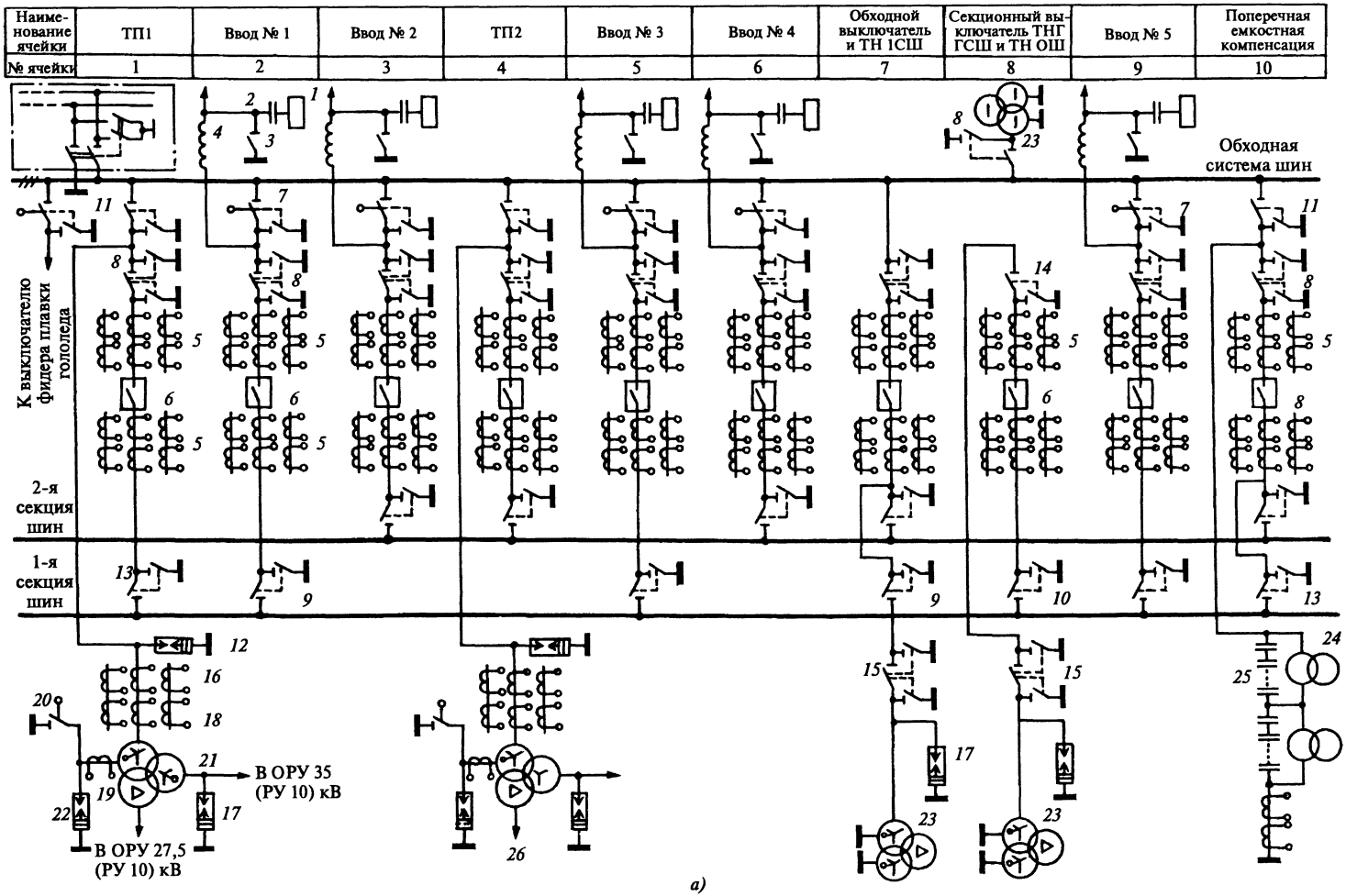


Рис. 62.20. Схемы включения обмоток тяговых трансформаторов в ЛЭП:

A, *B*, *C* — первичные обмотки трансформаторов высокого напряжения; *a*, *б*, *c* — тяговые обмотки трансформаторов низкого напряжения



а)

Рис. 62.21. Начало

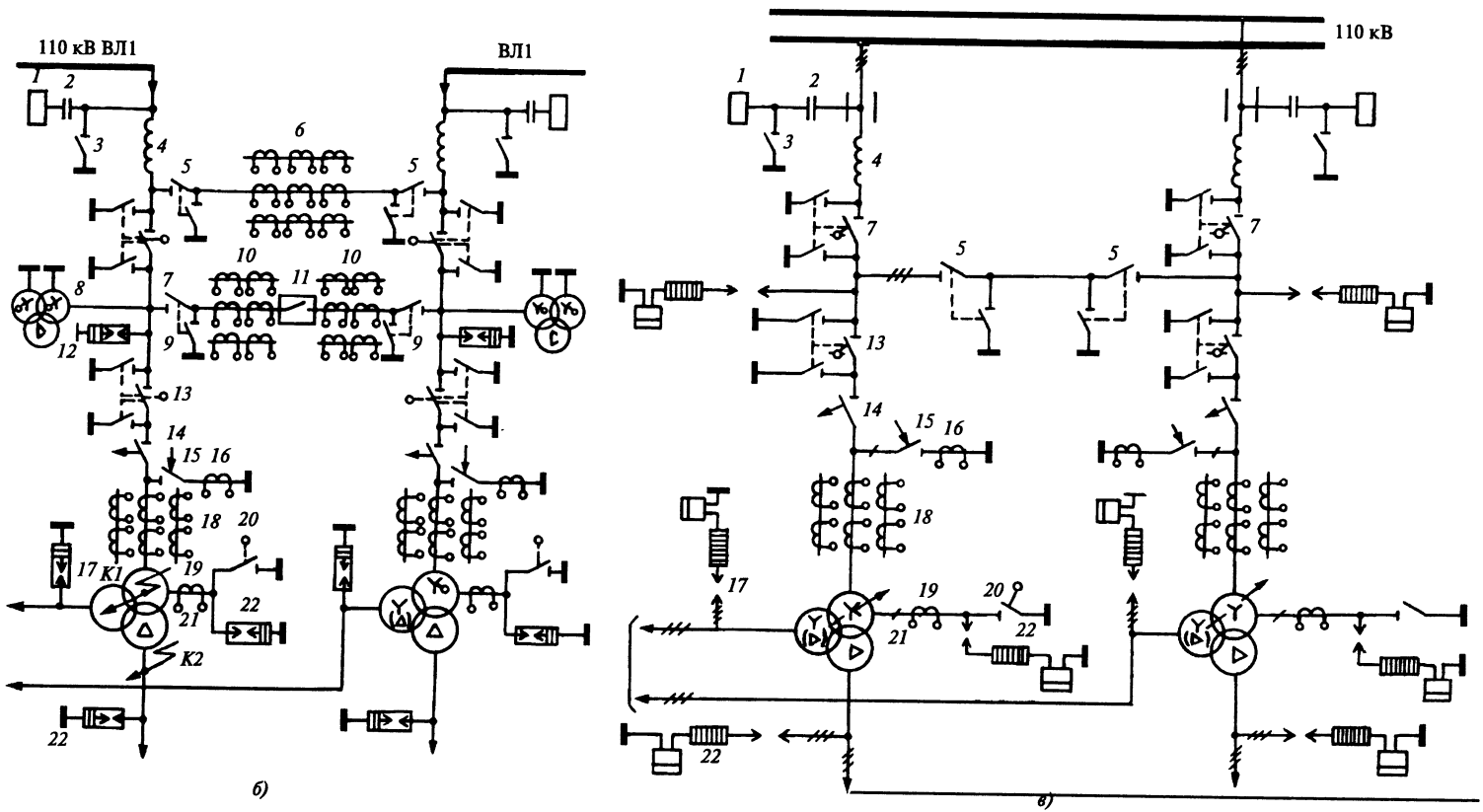


Рис. 62.21. Схемы главных электрических соединений РУ 110 кВ:

а — опорной тяговой подстанции переменного тока; *б* — промежуточных в рассечку; *в* — на отпайках

лем *3* и высокочастотный приемопередатчик *1*. Секции шин могут работать раздельно и совместно. В последнем случае их соединяют секционным выключателем. Понижающие трансформаторы *21* присоединяют к рабочим секциям шин через выключатель *6*, шинные разъединители *13* и линейный разъединитель *8*. Трансформаторы тока *16*, *18* и *19*, встроенные в понижающие трансформаторы *21*, используют для питания релейных защит.

Обходная система сборных шин позволяет обеспечить ремонты и осмотры оборудования ячеек вводов и понижающих трансформаторов.

Контроль напряжения на секциях рабочей системы шин осуществляется при помощи трансформаторов напряжения *23*, присоединяемых к шинам разъединителями *15*. Разрядники *12*, *17* и *22* служат для защиты всех присоединений от атмосферных перенапряжений. Установка батареи статических конденсаторов *25* предусмотрена для улучшения коэффициента мощности. Для контроля напряжения батареи конденсаторов и снятия остаточного напряжения после ее отключения параллельно секциям включены трансформаторы напряжения *24*, а для контроля тока — трансформаторы тока *26*.

Схема ОРУ 110 (220) кВ промежуточной транзитной тяговой подстанции, включенной в рассечку ЛЭП (рис. 62.21, *б*), рассчитана на подключение двух понижающих трансформаторов. Линия электропередачи высокого напряжения проходит через территорию подстанции, где секционируется выключателем *11* с встроенными трансформаторами тока *10*, ограждёнными разъединителями *9*. Выключатель *11* и разъединители *9* нормально включены и образуют рабочую перемычку, по которой

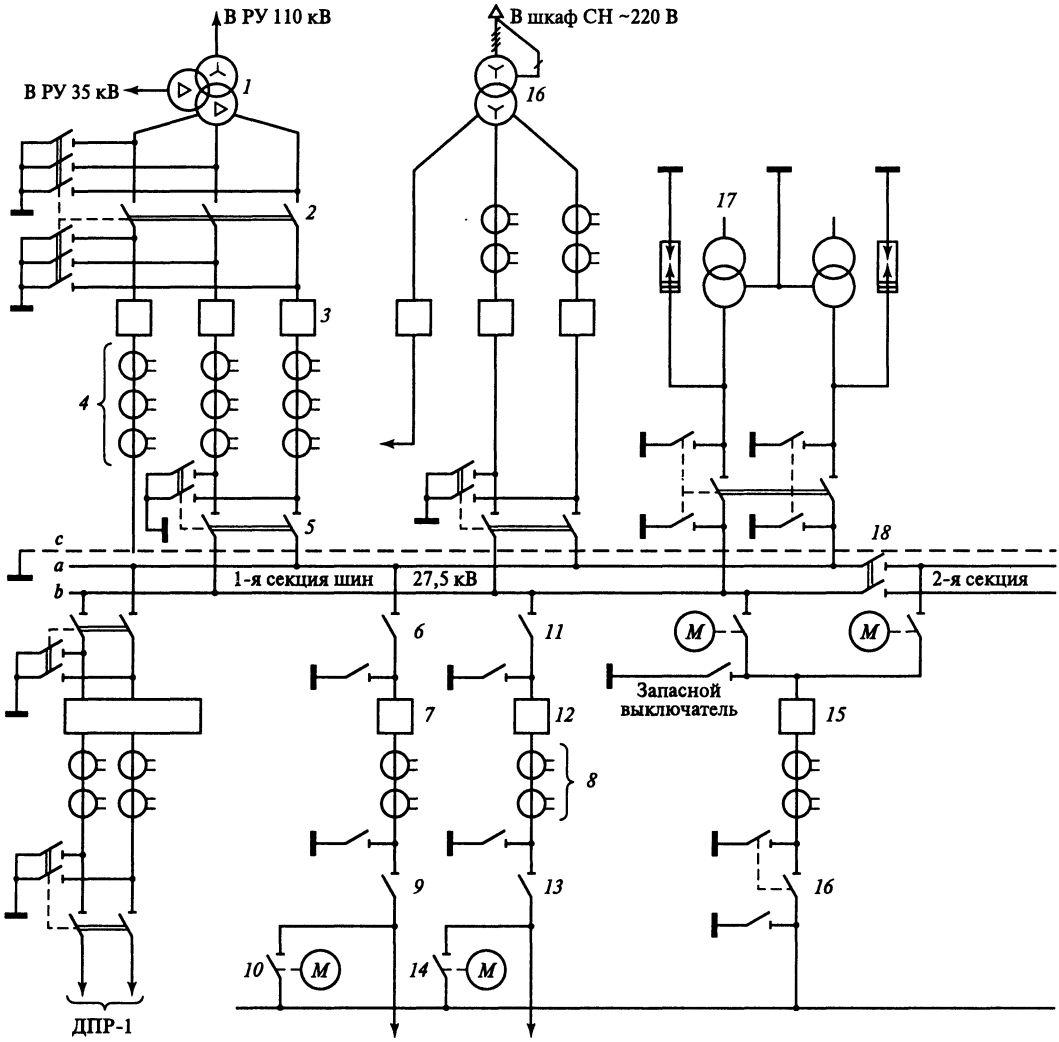


Рис. 62.22. Структурная схема тягового блока 27,5 кВ

осуществляется передача мощности с одного участка ЛЭП на другой. На вводах подстанции выключатели не устанавливают. Короткие замыкания внутри трансформатора (точка *К1*) и на его выводах (точка *К2*) отключают выключателем *20* рабочие перемычки со стороны одного источника питания (если перемычка находится в работе) и ближайшим выключателем с соседней опорной или транзитной подстанции со стороны другого источника. Для обеспечения срабатывания релейных защит, установленных на этих выключателях, их дополняют короткозамыкателями *15*, включенными за разъединителями *13* и определителями *14*.

Схема ОРУ 110 (220) кВ промежуточных на ответвлениях и концевых тяговых подстанций представлена на рис. 62.21, *в*. Она отличается от аналогичной схемы промежуточной транзитной подстанции отсутствием ремонтной перемычки, выключателя в рабочей перемычке и трансформаторов напряжения.

Структурная схема тягового блока 27,5 кВ показана на рис. 62.22. Сборные шины 27,5 кВ состоят из двух секций с секционным разъединителем *18*. На шины подается напряжение фаз *а* и *b*. Фаза *с* подключается наглухо к ходовым рельсам подъездного пути подстанции. Фазы тяговой обмотки трансформаторов *1* подключаются к сборным шинам через разъединители *2* и *5* и масляный выключатель *3*. Линии контактной сети подключаются к сборным шинам 27,5 кВ через разъединители *6*, *11*, масляные выключатели *7*, *12*, линейные *9*, *13* и обходные *10*, *14* разъединители с приводом *М*. Для подключения измерительных приборов и устройств релейной защиты служат трансформаторы тока *4*, *8*. На запасную шину подается напряжение от одной из рабочих фаз *а* и *b* через запасной выключатель *15* и разъединитель *16*, которые служат для замены любого фидерного выключателя в случае аварии или ремонта. Отходящие линии ДПР-1 (два провода—рельс) служат для питания путевых устройств. Трансформаторы напряжения *17* обеспечивают контроль напряжения на шинах 27,5 кВ.

Конструкция тяговой подстанции состоит из открытой части с распределительными устройствами 110/220 кВ и тяговыми трансформаторами, а также из закрытой части. Закрытая часть подстанции — здание, в котором размещаются аккумуляторная батарея, щиты собственных нужд постоянного и переменного тока, щит отопления и вентиляции, устройства автоматики и телемеханики, дизель-генератор (резервное питание) и мастерская.

Технические данные трехфазных и однофазных трансформаторов приведены в табл. 62.43 и 62.44.

Таблица 62.43. **Технические данные трехфазных трехобмоточных трансформаторов**

Тип	Номинальная мощность, МВ · А	Напряжение обмоток, кН			Потери, кВт		Напряжение КЗ, %			Ток XX, %	Схема и группа соединения
		ВН	СН	НН	XX	КЗ	ВН-СН	ВН-НН	СН-НН		
ТДТН-20000/110Б	20	115	27,5 38,5	6,6 11	45	127	10,5	17	6	0,8	Y/Δ/Δ—11-11
ТДТН-25000/110-66	25	115	27,5	6,6 11	45	145	10,5	17	6	1	Y/Δ/Δ—11-11
ТДТНЭ-40000/110	40	115	27,5 38,5	6,6 11 27,5	63	200	10,5 10,5 17	17 17 10,5	6	0,9	Y/Δ/Δ—11-11
ТДТНЭ-25000/150-70	25	158	38,5 27,5	27,5 6,6	34	145	18 10,5	10,5 18	6	0,9	Y/Y/Δ—0-11 Y/Δ/Δ—11-11
ТДТНЭ-10000/220-70У1	40	230	27,5 38,5 27,5	11 27,5 6,6	66	240	12,5 22 12,5	22 12,5 22	9,5 9,5 9,5	1,1	Y/Δ/Δ—11-11 Y/Δ/Δ—0-11 Y/Δ/Δ—11-11

Таблица 62.44. **Технические данные однофазных и трехфазных двухобмоточных трансформаторов**

Тип	Номинальная мощность, кВт	Напряжение обмоток, кВ		Потери, кВт		Ток XX, %	Схема и группа соединений
		ВН	НН	XX	КЗ		
ОМ-10/27,5	10	25,5	0,23	0,16	0,3	15	1/1-0
ТМ-27/27,5	25	27,5	0,23/0,4	0,25	0,65	6	Y/Y-0
ТМ-100/35	100	25	0,23/0,4	0,9	2,4	8	Y/Y-0
ТМ-160/35	180	27	0,23/0,4	1,5	4,1	8	Y/Y-0
ТМ-320/35	320	27	0,23/0,4	2,3	6,2	7,5	Y/Y-0
ТМ-560/35	560	25	6,3	3,35	9,4	6,5	Y/Δ-11
ТМ-1800/35	1800	25	6,3	8,3	24	5	Y/Δ-11
ТСМ-60/25	60	25	0,38	0,55	1,2	9	Y/Y-0

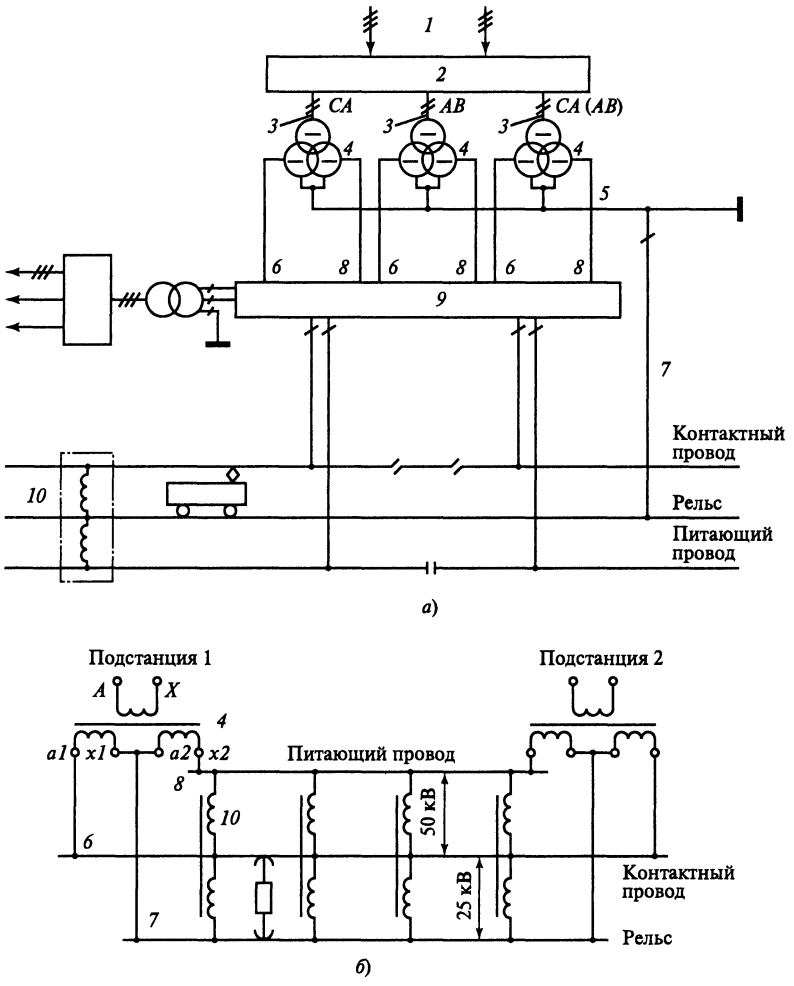


Рис. 62.25. Структурная схема тяговой подстанции переменного тока 2×25 кВ

В обозначениях трансформаторов приняты следующие буквы: Т в начале — трансформатор трехфазный, в середине — трехобмоточный; О — однофазный; Д — принудительная циркуляция воздуха и естественная циркуляция масла; Э — электротяговый железнодорожного транспорта; Н — с устройством регулирования напряжения под нагрузкой; У — с уравнительным реактором; Р — с расщепленной обмоткой низкого напряжения.

Тяговые подстанции переменного тока системы 2×25 кВ с первичным напряжением 110 (220) кВ имеют структурную схему, особенностью которой является применение специальных однофазных трансформаторов и их присоединение к тяговой сети. На схеме рис. 62.25, *а*: *1* — вводы питающего напряжения, *2* — РУ 110 (220) кВ, *4* — однофазные трансформаторы, *9* — РУ 27,5 кВ. Первичные обмотки однофазных трансформаторов *A*, *X* подключены на междуфазные напряжения разных фаз питающей сети (рис. 62.25, *б*). Вторичная обмотка каждого трансформатора состоит из двух секций: *a1—x1* и *a2—x2*, каждая секция рассчитана на напряжение 27,5 кВ, а при их последовательном соединении на 55 кВ. При таком соединении секций три вывода на вторичной стороне трансформатора через РУ 27,5 кВ присоединяют к тяговой сети следующим образом: выводы *x2* к питающему проводу, *a1* — контактному проводу *3*, а средний вывод *x1—a2* — к рельсовой сети. В результате напряжение в тяговой сети между контактным проводов и рельсами, а также между питающим проводом и рельсами составляет 25 кВ, между контактным проводом и питающим — 50 кВ. На схеме рис. 62.25, *а* проводом *5* и рельсовым фидером *7* объединены выводы обмоток *x1—a2*, фидеры *6* и *8* соответственно обеспечивают соединение обмоток *a1* и *x2* с контактной и питающей сетью.

Автотрансформаторы *10*, соединяющие контактную, питающую и рельсовую сети, устанавливают вдоль полотна железной дороги на расстоянии 8—12 км один от другого. Они позволяют преобразовать напряжение 50 кВ, подводимое к питающей сети, в напряжение 25 кВ, снимаемое с полуобмотки автотрансформатора между контактной сетью и рельсами. При этом передача значительной части потребляемой подвижным составом электроэнергии напряжением 50 кВ существенно разгружает тяговую сеть, снижает общие потери электроэнергии и напряжения в ней, мешающее влияние на линии связи. Расстояние между подстанциями может быть увеличено до 80—90 км вместо 45—55 при электрификации на переменном токе 27,5 кВ.

На тяговых подстанциях переменного тока 2×25 кВ устанавливают два рабочих и один резервный трансформатор. Питание тяговых нагрузок от однофазных трансформаторов, собранных по схеме открытого треугольника, вынуждает устанавливать для питания районных нетяговых потребителей дополнительно двух- или трехобмоточные трансформаторы.

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Электроподвижной состав переменного тока является потребителем реактивной мощности. Реактивные токи приводят к увеличению потерь в линиях электропередачи, трансформаторах, контактных сетях и, таким образом, снижают напряжение

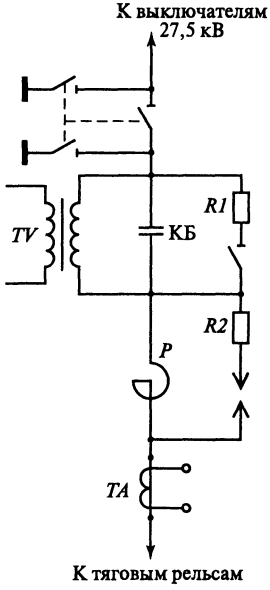


Рис. 62.23. Схема устройства поперечной компенсации реактивной мощности

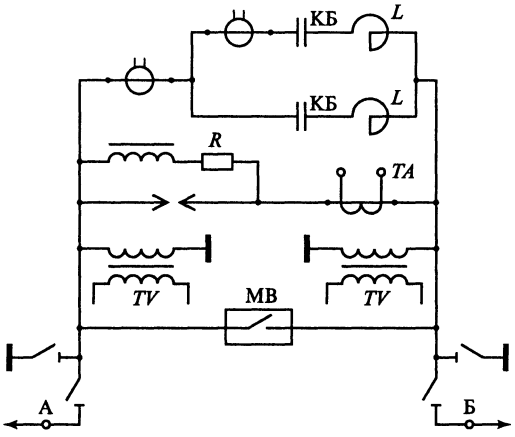


Рис. 62.24. Схема устройства продольной компенсации реактивной мощности

на токоприемниках подвижного состава. Этот недостаток устраняется применением специальных установок компенсации реактивной мощности, устанавливаемых на тяговых подстанциях или на постах секционирования. Устройство поперечной компенсации (рис. 62.23) обеспечивает коэффициент мощности не менее 0,93.

Для устранения резонансных явлений последовательно с конденсаторной батареей (КБ) включается реактор *P*. Цепь настраивается на частоту 150 Гц. Контроль напряжения на КБ осуществляется при помощи трансформатора напряжения *TV*. Для устранения перенапряжения при отключении КБ масляным выключателем перед началом операции КБ шунтируют резистором *R1*. Второй резистор *R2* через разрядники шунтирует реактор.

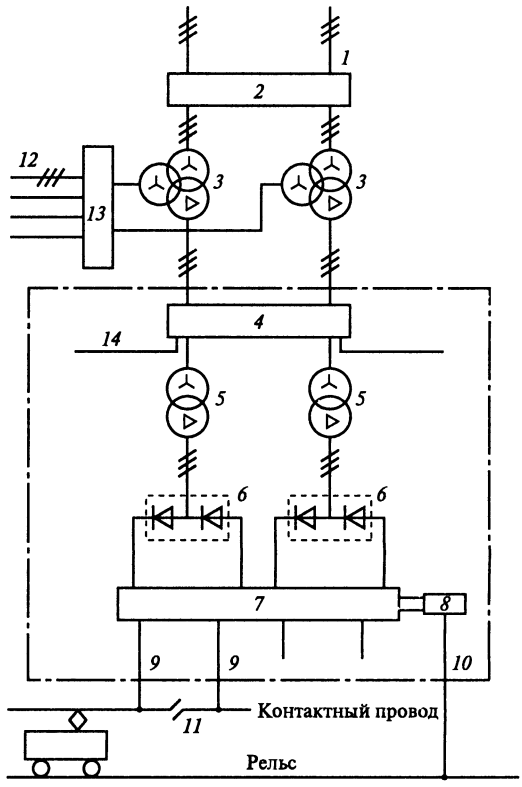
Устройства продольной компенсации (рис. 62.24) не только компенсируют реактивную мощность, но и повышают напряжение в контактной сети и уменьшают несимметрию токов. Устройство включают в разрыв контактного провода между точками А и Б (обычно в месте секционирования контактной сети). Защита от перенапряжения осуществляется разрядником, после срабатывания которого при помощи трансформаторов тока (ТА) включается масляный выключатель (МВ).

ТЯГОВЫЕ ПОДСТАНЦИИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ПОСТОЯННОГО ТОКА

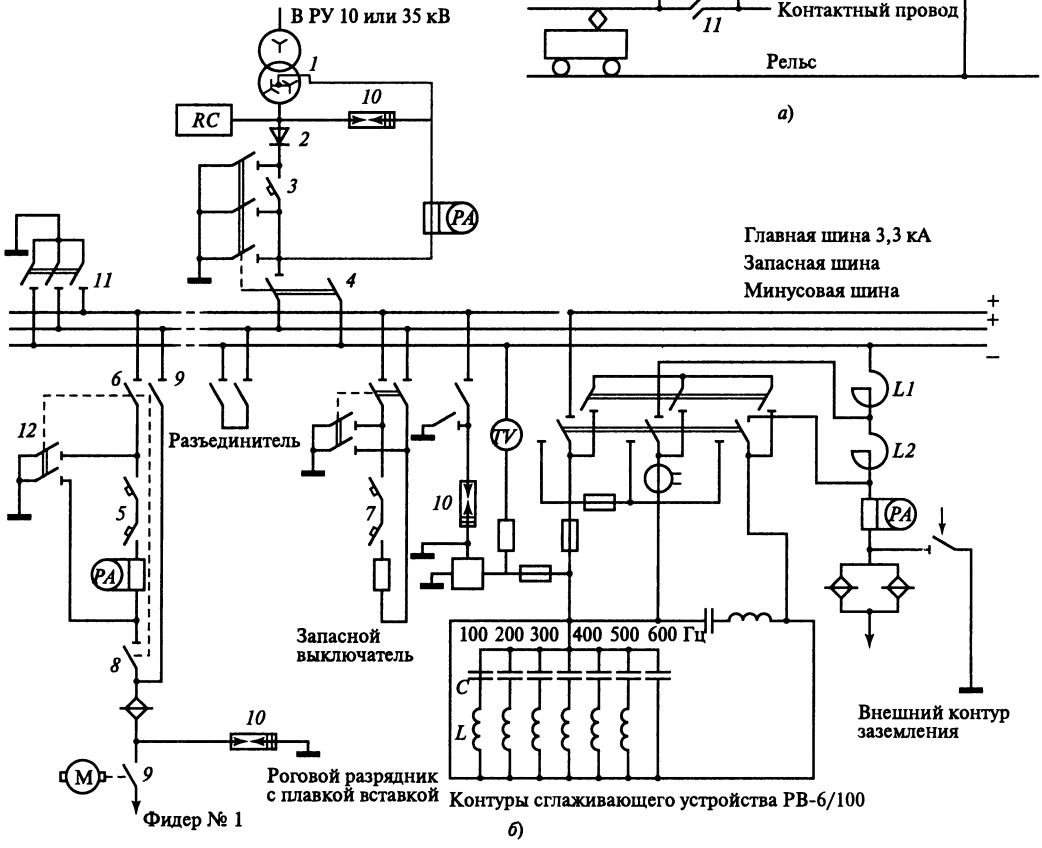
Тяговые подстанции постоянного тока состоят из следующих элементов: распределительных устройств внешнего электроснабжения с понижающи-

ми трансформаторами, преобразовательного агрегата, распределительного устройства постоянного тока, системы собственных нужд, устройств защиты и управления. Каждая тяговая подстанция имеет свой контур заземления. Структурная схема приведена на рис. 62.26, *а*.

Прием электрической энергии от источника осуществляется по вводам *1*, оборудованным распределительными устройствами *2*. Таких вводов на опорных подстанциях четыре и более, на промежуточных — от двух до четырех. Основное оборудование распределительных устройств переменного тока 110—220 кВ в зависимости от типа подстанции состоит из высоковольтных выключателей, разъединителей, короткозамыкателей и отделителей, предназначенных для наружного применения. От РУ 110 (220) кВ питающего напряжения энергия по присоединениям подается к понижающим трехобмоточным трансформаторам *3*, которые первичное напряжение понижают до 10 кВ на обмотке низкого напряжения (НН) и 35 кВ на обмотке среднего напряжения (СН). С обмотки СН напряжение 35 кВ поступает в РУ 35 кВ *13*, а затем по питаю-



а)



б)

Рис. 62.26. Структурная схема тяговой подстанции постоянного тока 3,3 кВ (*а*) и принципиальная схема тягового блока 3,3 кВ (*б*)

щим линиям *12* передается в трансформаторные подстанции района. Трехфазное напряжение 10 кВ через РУ 10 кВ *4* получают преобразовательные трансформаторы *5*, которые понижают напряжение до 2,63 кВ при схеме соединения обмоток звезда — треугольник и 3,02 кВ при схеме соединения звезда — две обратные звезды с уравнительным реактором. От РУ 10 кВ получают питание также нетяговые железнодорожные потребители *14*.

От преобразовательного трансформатора пониженное напряжение подается в выпрямители *6*, которые преобразуют его в напряжение постоянного (выпрямленного) тока 3,3 кВ. Таким образом, на выпрямитель передается дважды трансформированное напряжение. Подстанции, выполненные по такой структурной схеме, называют подстанциями с двухступенчатой трансформацией.

От выпрямителей через РУ 3,3 кВ *7* выпрямленное напряжение подается на положительную шину подстанции, затем через питающие линии *9* (фидеры) в контактную сеть *11*, а через сглаживающее устройство *8* и рельсовый фидер *10* на рельсы. Количество питающих фидеров на подстанции определяется количеством участков контактной сети, разделенных воздушными промежутками и получающих электрическую энергию от данной подстанции.

Если подстанция постоянного тока подсоединена к источнику электроэнергии линиями передачи напряжением 6, 10, 35 кВ, преобразовательные трансформаторы присоединяют непосредственно к РУ питающего напряжения. Структурная схема тяговой подстанции упрощается за счет одноступенчатой трансформации. Собственно схема приобретает вид, изображенный на рис. 62.26, *а*, заключенный штриховыми линиями. В отдельных случаях тяговые подстанции с одноступенчатой трансформацией выполняют на первичном напряжении 110 кВ, для чего используют специальные преобразовательные трансформаторы.

Распределительные устройства 35, 110, 220 кВ тяговых подстанций постоянного тока имеют типовые схемы главных электрических соединений. От РУ 35 кВ с первичным напряжением 35 кВ питаются преобразовательные агрегаты, трансформаторы собственных нужд и трансформаторы подогрева. В отдельных случаях от РУ 35 кВ могут питаться смежные подстанции.

РУ 10 кВ предназначено для питания преобразовательных агрегатов, трансформаторов собственных нужд, трансформаторов подогрева и линий, питающих районные нагрузки и фидеры плавки гололеда на ЛЭП 110—220 кВ.

Принципиальная схема подключения преобразовательного агрегата и фидеров контактной сети тяговой подстанции постоянного тока представлена на рис. 62.26, *б*.

Преобразователь состоит из преобразовательного трансформатора *1*, выпрямителя *2*, катодного быстродействующего выключателя *3* и шинных разъединителей *4*, сблокированных с заземляющими ножами. Для работы на переменном токе агрегат оборудуется разрядником от коммутационных напряжений с *RC*-цепями. Для обеспечения техники безопасности при ремонтах шины 3,3 кВ заземляются при помощи разъединителя *11*.

Для обеспечения тяговых нагрузок на подстанции с одноступенчатой трансформацией тока применяют трехобмоточные трансформаторы. Первичная обмотка такого трансформатора присоединяется к сети 110 кВ, одна вторичная обмотка напряжением 10 кВ питает преобразователи, а вторая напряжением 35 кВ — нетяговых потребителей. При первичном напряжении 35 кВ преобразовательные агрегаты присоединяются к шине напряжением 35 кВ. Трехобмоточный трансформатор на рис. 62.26 не показан.

На подстанции имеются три сборные шины постоянного тока 3,3 кВ — плюсовые (главная и запасная) и минусовая. Реакторы *L1*, *L2*, включенные в цепь отрицательной шины вместе с контурами сглаживающих устройств служат для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения. На схеме показано одно из присоединений, питающее контактную сеть. В цепи фидеров имеются два быстродействующих выключателя *5* и шинные разъединители *6* и *8*, сблокированные с заземляющими ножами. При помощи разъединителей *9* питание любого из присоединений можно переключить на запасную шину через запасной выключатель *7*. Для защиты от перенапряжений контактной сети имеется разрядник РМВУ-3,3. Защита оборудования на напряжении 3,3 кВ от коммутационных перенапряжений осуществляется разрядником РВПК-3,3 *10*.

В здании подстанции устанавливаются аккумуляторная батарея, резервный дизель-генератор, сглаживающие устройства, кремниевые выпрямители и распределительное устройство постоянного тока 3,3 кВ. В отдельном помещении размещаются щиты управления, автоматика и телемеханика.

Преобразовательные трансформаторы. Технические данные преобразовательных трансформаторов приведены в табл. 62.45, инверторных трансформаторов с бесконтактным регулированием напряжения — в табл. 62.46, полупроводниковых выпрямителей — в табл. 62.47.

Номинальное выпрямленное напряжение преобразователей $U_{d\,\text{ном}} = 3{,}3$ кВ, максимально допус-

Таблица 62.45. **Технические данные преобразовательных трансформаторов**

Тип	Номинальное напряжение сетевой обмотки, кВ	Номинальная мощность сетевой обмотки, кВ · А	Номинальный ток преобразователя, А	Номинальное напряжение вентильной обмотки, кВ	Номинальный ток вентильной обмотки, А	Ток XX, А	Потери, кВт		Схема соединения обмотки	
							XX	КЗ	сетевой	вентильной
УТМРУ-6300/35Ж	6,3 10,5 35	3700	1000	3,02	289	— 4	— 23	— 34	Звезда или треугольник	Две обратные звезды с уравнительным реактором
ТМПУ-6300/35ЖУ1	6 10 35	4640	1250	3,02	361	— 1,3	10	— 41	То же	То же
ТДПУ-20000/35Ж	35	11 317 (13 351)	3000	3,08 (3,634)	876	1,5 (2)	22 (34)	109 (115)	То же	То же
ТДП-12500/10ЖУ1	6 10	11 800	3200	1,52	2610	1,1	16	72,5	Треугольник или звезда	Треугольник
ТМРУ-16000/10Ж	6 10	11 100	3200	3,02	924	3,18	33	79	То же	Две обратные звезды с уравнительным реактором
ТМРУ-16000/10-1	6 10	11 840	3000	3,02	867	3,4	48	85	То же	То же
ТМПУ-16000/10ЖУ1	6 10	11 840	3200	3,02	924	1,2	24	73	То же	То же
ТДП-16000/10ЖУ1	10,5	11 600 (13 300)	3200	—	2620	0,47	17,5	74	Звезда или треугольник	Треугольник

Таблица 62.46. **Технические данные инверторных трансформаторов с бесконтактным регулированием напряжения**

Тип	Номинальное напряжение, кВ	Номинальный ток сетевой обмотки, А, в режимах:		Номинальная первичная мощность, кВ · А	Номинальное напряжение преобразователя, А	Номинальный ток преобразователя, А	Ток XX, А	Потери, кВт		Схема соединения обмотки	
		выпрямительном	инверторном					XX	КЗ	сетевой	вентильный
ТДПУ-2000/10Ж	10,5	653 (783)	— (490)	11 900/(14 300)	3,25/(3,76)	3200	1,68/(2,27)	17,7/(28,3)	99/(106)	Треугольник или звезда	Две обратные звезды с уравнительным реактором
ТДРУ-2000/10И	6,3 10,5	1085 651	855 540	11 830/9240	3,3/3,7	3200/2000	2,7/3,5	29	101/53	То же	То же
ТДП-12500/10ИУ1	6,3 10	1086 687	—	11 870/3330	3,31	3200/2000	0,8	15	77	Треугольник	Звезда
ТМП-6300/35ИУ1	6 10	449 268	—	4660/4660	3,3/3,3	1250/1000	1,2	9,3	36/31,6	То же	То же

Примечания: 1. У трансформаторов с инверторным режимом в числителе — параметры выпрямителя, в знаменателе — инвертора.
2. В инверторном режиме напряжение вентильных обмоток повышается на 25 % за счет ответвлений.
3. В скобках приведены цифры для режима с выведенной регулировочной обмоткой.

Таблица 62.47. **Технические данные основных типов полупроводниковых выпрямителей**

Тип	Максимально допустимое выпрямленное напряжение, В	Номинальный выпрямленный ток, А	Тип / количество диодов	Схема выпрямления	Охлаждение	Установка
УВКЭ-1	4000	3000 (4500)	ВК-2-200-8 / 5×24×6-720	Две обратные звезды с уравнительным реактором	Воздушное принудительное	Внутренняя
ПВЭ-3У2	4000	3000 (4500)	ВЛ-200-8Б / 5×18×6-540	То же	То же	То же
ВКМБ-1	4000	3000 (4500)	ВК-2-200-8 / 5×23×6-690	То же	Масляное принудительное	Наружная
ПВКЕ-2	4000	3000 (4500)	ВЛ-200-10 / 5×14×6-420	Две обратные звезды с уравнительным реактором или мостовая	Воздушное естественное	То же
ПВК-6	8000	1500	ВЛ-200-12 / 5×12×6-360	Мостовая	То же	Внутренняя

Примечание. В скобках дан номинальный ток преобразователя с временем срабатывания защиты 0,75 с.

Таблица 62.48. **Технические данные полупроводниковых выпрямительно-инверторных и инверторных преобразователей**

Тип и режим	Номинальное напряжение, кВ	Номинальный ток, А	Допустимые перегрузки, %, в течение			Схема выпрямления
			15 мин	2 мин	10 с	
ВИПЭ-1:						Две обратные звезды с уравнительным реактором
выпрямительный	3,3	2	80	—	—	
инверторный	3,3—3,6	2	80	—	—	
ВИПЭ-2У3:						Мостовая
выпрямительный	3,3	2,5	25	50	100	
инверторный	3,3—3,8	1,6	25	50	100	
ШПИ-3, инверторный	3,3—4	2	75	—	—	Две обратные звезды с уравнительным реактором или мостовая

тимое U_d = 4 кВ, номинальный выпрямленный ток $I_{d\text{ном}}$ = 3 кА. При защите с временем срабатывания t = 0,75 с преобразователь допускает I_d = 4,5 кА. Допустимые перегрузки преобразователя: 25 % — 15 мин; 50 % — 2 мин; 100 % — 10 с. Для защиты вентилей от внутренних перенапряжений применяются *RC*-цепи. Защита от перенапряжения, возникающего на вентильной обмотке, осуществляется разрядниками.

Электрические характеристики полупроводниковых выпрямительно-инверторных и инверторных преобразователей приведены в табл. 62.48 [62.17].

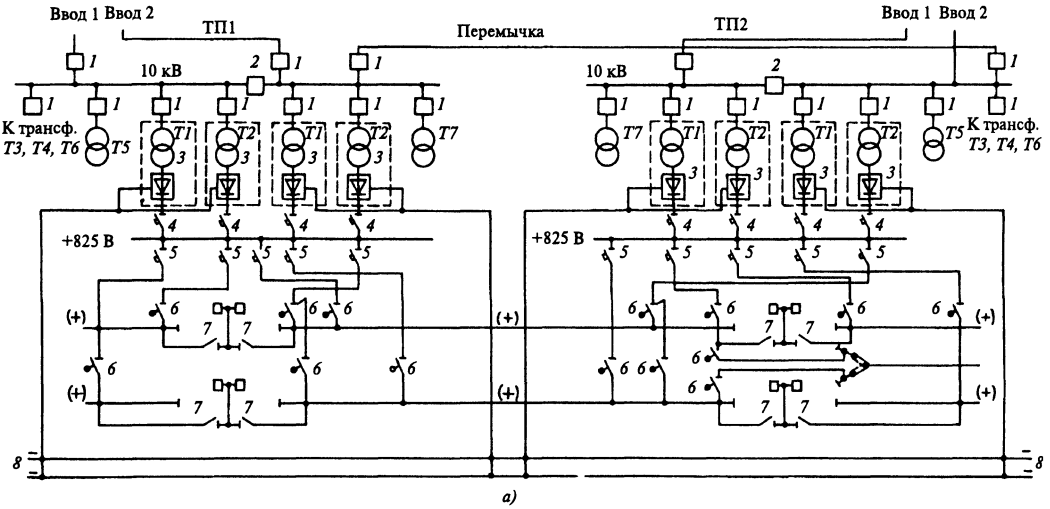
Для тяговых подстанций с одноступенчатой трансформацией тока применяют трансформатор ТРДМП-20000/10Ж (трехфазный) с расщепленной вторичной обмоткой низкого напряжения, дутьевым (вентиляторным) охлаждением, масляный, для полупроводниковых выпрямителей: типовая мощность 20 МВ · А; номинальное сетевое напряжение 110 кВ; номинальная мощность сетевой обмотки 17,9 МВ · А, мощность тяговой обмотки 12,15 МВ · А; мощность вторичной нетяговой обмотки 4800 кВ · А, потери холостого хода 15 кВт; нагрузочные потери 113,5 кВт, напряжение короткого замыкания 17,5 %.

ТЯГОВЫЕ ПОДСТАНЦИИ МЕТРОПОЛИТЕНА

Подстанции метрополитена классифицируются по способу размещения — подземные и наземные, по месту расположения на трассе — основные (у станций), вестибюльные (около машинных залов эскалатора), туннельные (на перегонах) и деповские (при депо). По назначению подстанции бывают тяговыми, тягово-понизительными (совмещенными) и понизительными. На двух последних осуществляется питание силовых сетей и освещение пассажирских станций, питание устройств СЦБ. Номинальное выпрямленное напряжение на шинах постоянного тока 825 В.

Первичное питание подстанций метрополитена осуществляется от подстанций или распределительных пунктов энергосистем напряжением 10 кВ по кабелям. Варианты схем первичного питания приведены на рис. 62.17, структурная схема совмещенной тяговой подстанции — на рис. 62.27.

Внешнее электроснабжение тяговых подстанций ТП1 и ТП2 осуществляется по вводам 1 и 2 от разных пунктов питания к секционированной выключателем распределительного устройства *2* шине через распределительное устройство 10 кВ *1* (рис. 62.27, *а*). Дополнительное резервирование питания осуществляется перемычкой от соседних подстанций. Преобразовательные агрегаты, состоящие из трансформаторов *Т1*, *Т2* и выпрямителей *3*, подключаются к положительной шине +825 В через катодный выключатель *4*. Каждая питающая линия присоединена к контактному рельсу «+» линейным выключателем *5* и продольным разъединителем *6* с электроприводом. При секционировании тяговой сети контактный рельс разделяют неперекрываемыми воздушными промежутками на отдельные зоны. При отключении одного из питающих фидеров каждая зона может быть подключена к смежной подстанции с помощью поперечного разъединителя *7*. Минусовая шина –825 В подстанции подключается к ходовым рельсам *8*. Трансформаторы *Т3*, *Т4*, *Т6*, присоединенные к каждой секции шин (на рис. 62.27, *а* показано подключение их только к одной секции), обеспечивают питание потребителей собственных нужд подстанции, эскалаторов, вентиляторов, насосов, освещения и путевых устройств. Трансформаторы *Т5* и *Т7* обеспечивают питание устройств СЦБ. Подключение приборов контроля напряжения на шинах тяговой подстанции осуществляется через предохранители *9* и измерительные трансформаторы напряжения *TV1* и *TV2*. На схеме рис. 62.27, *б* отходящие от шин 220 В питающие линии обеспечивают электроснабжение нетяговых потребителей.



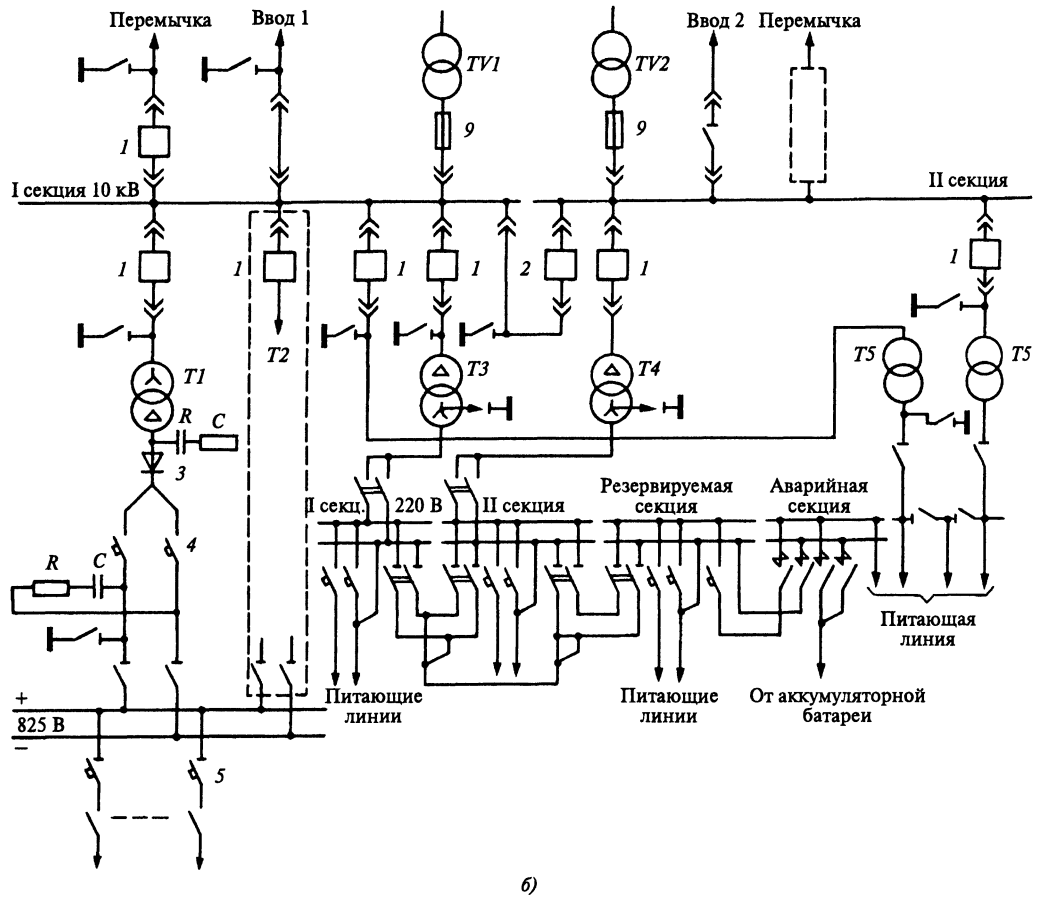


Рис. 62.27. Структурная схема совмещенной тягово-понизительной подстанции (*а*) и принципиальная схема тягового блока 825 В (*б*) метрополитена

Таблица 62.49. **Технические данные преобразовательных агрегатов**

Тип выпрямителя	Трансформатор		Схема
	Тип	Номинальная мощность, кВ · А	
УВКМ-6	ТСЗП-1600/10, ТМП-1600/10	1515	Трехфазная мостовая
В-ТПЕД-2, 0К-825М	ТСЗП-1600/10	1515	То же
УВКМ-5	ТМП-3200/10	3065	То же
УВКМ-2	ТМНПВ-5000/10	2850	12-фазная мостовая

Преобразовательные агрегаты метрополитена комплектуются из преобразовательных трансформаторов и выпрямителей типа УВКМ и В-ТПЕД с воздушным естественным охлаждением и сухих преобразовательных трансформаторов типа ТСЗП.

Технические данные преобразовательных трансформаторов и выпрямителей приведены в табл. 62.49 и 62.50.

Подстанции имеют следующее конструктивное исполнение.

Наземные подстанции выполняются двухэтажными. На первом этаже размещены трансформаторы, РУ 10 кВ и 825 В, на втором этаже — выпрямители, аккумуляторная батарея и др.

Подземные подстанции могут быть мелкого заложения, (они сооружаются открытым способом и имеют прямоугольное сечение) и глубокого заложения (они имеют круглое сечение), на них основной вход на подстанцию осуществляется со стороны пассажирской станции. Запасный выход выполняется в туннель [62.14].

ТЯГОВЫЕ ПОДСТАНЦИИ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Тяговые подстанции классифицируются: по назначению — трамвайные, троллейбусные и смешанные; по системе электроснабжения тяговой сети — централизованного электроснабжения (многоагрегатные подстанции) и децентрализованного электроснабжения (одноагрегатные подстанции). Номинальное выпрямленное напряжение на шинах постоянного тока 600 В.

Упрощенные структурные схемы показаны на рис. 62.28. В структурной схеме многоагрегатной тяговой подстанции (рис. 62.28, *а*) через вводы высокого напряжения электроэнергия поступает в распределительные устройства высокого напряжения на шину 10 кВ. Распределительные устройства оборудуются разъединителями *QS*, высоковольтным выключателем *Q*, трансформаторами тока *TA* и напряжения *TV*, устройствами защиты *F1* и *F3* с автоматическим включением резерва (АВР). Преобразовательные агрегаты, образованные трансформатором и выпрямителями *UZ*, передают постоянный (выпрямленный) ток через катодные выключатели *QF* и линейные выключатели *QF1*—*QF8* в тяговую сеть подвижного состава.

На многоагрегатных тяговых подстанциях резервирование электроснабжения тяговой сети обеспечивается наличием запасной шины +600 В, подключаемой к главной шине при помощи ячейки распределительного устройства запасного выключателя *QF3*. В случае профилактического и ремонтного обслуживания линейного РУ 600 В питание участка тяговой сети обеспечивается от запасной шины. Система электроснабжения собственных нужд подстанции состоит из основного трансформатора собственных нужд $T_{СН1}$, подключаемого к первой секции шины 10 кВ через предохрани-

Таблица 62.50. **Технические данные преобразовательных трансформаторов подстанций метрополитена**

Тип трансформатора	Тип выпрямителя	Номинальная мощность, кВ · А	Напряжение вентильной обмотки, В	Потери при КЗ, кВт	Напряжение КЗ, %	Схема соединений вентильной обмотки
ТМПУ-3500/35	УВКМ-1	2360	770	28,5—33,5	8—9,6	Две обратные звезды с уравнительным реактором
ТМП-3200/10	УВКМ-5	3065	679	25,5—32	9,5—10,5	Мостовая
ТСЗП-1600/10	УВКМ-6, В-ТПЕД-2,0К	1515	670	15,5—16,5	8,5—9,5	То же
ТМНПВ-5000/10	УВКМ-2	2850	668	28,3—30	9,6	12-фазная мостовая

тель. Резервный трансформатор собственных нужд T_{CH2} подключается к резервному вводу до выключателя ввода.

В зависимости от схемы преобразовательного агрегата отрицательная шина –600 В присоединяется через разъединители *QS9* к выводу уравнительного реактора трансформатора при нулевой схеме выпрямления или отрицательному полюсу выпрямителя при мостовой схеме выпрямления.

Структурная схема многоагрегатной подстанции с сухими трансформаторами приведена на рис. 62.28, *б*. Через распределительные устройства *1* и *2* электроэнергия подается на секционированную шину 10 кВ и через распределительные устройства *3*, *4*, *5* — на преобразовательные агрегаты (трансформаторы *T1* и выпрямители *UZ*). Электроснабжение участков тяговой сети обеспечивается от шины +600 В через ячейки линейных выключателей *9*. Через распределительное устройство *10* с запасным выключателем получают питание запасная шина и питающие линии в случае аварийной ситуации или профилактического обслуживания линейного выключателя.

Отличительной особенностью одноагрегатной подстанции децентрализованного электроснабжения (рис. 62.29, *а*, *б*) является отсутствие резервного оборудования. Одноагрегатные подстанции располагаются вдоль трассы движения и осуществляют двустороннее питание контактной сети. При выходе из строя любой из промежуточных подстанций включается секционный выключатель *QF3* и питание контактной сети осуществляется от двух смежных подстанций. Отсутствие резервного оборудования на подстанции упрощает ее конструкцию и снижает стоимость.

Технические данные преобразовательных трансформаторов агрегатов тяговых подстанций городского электрического транспорта представлены в табл. 62.51.

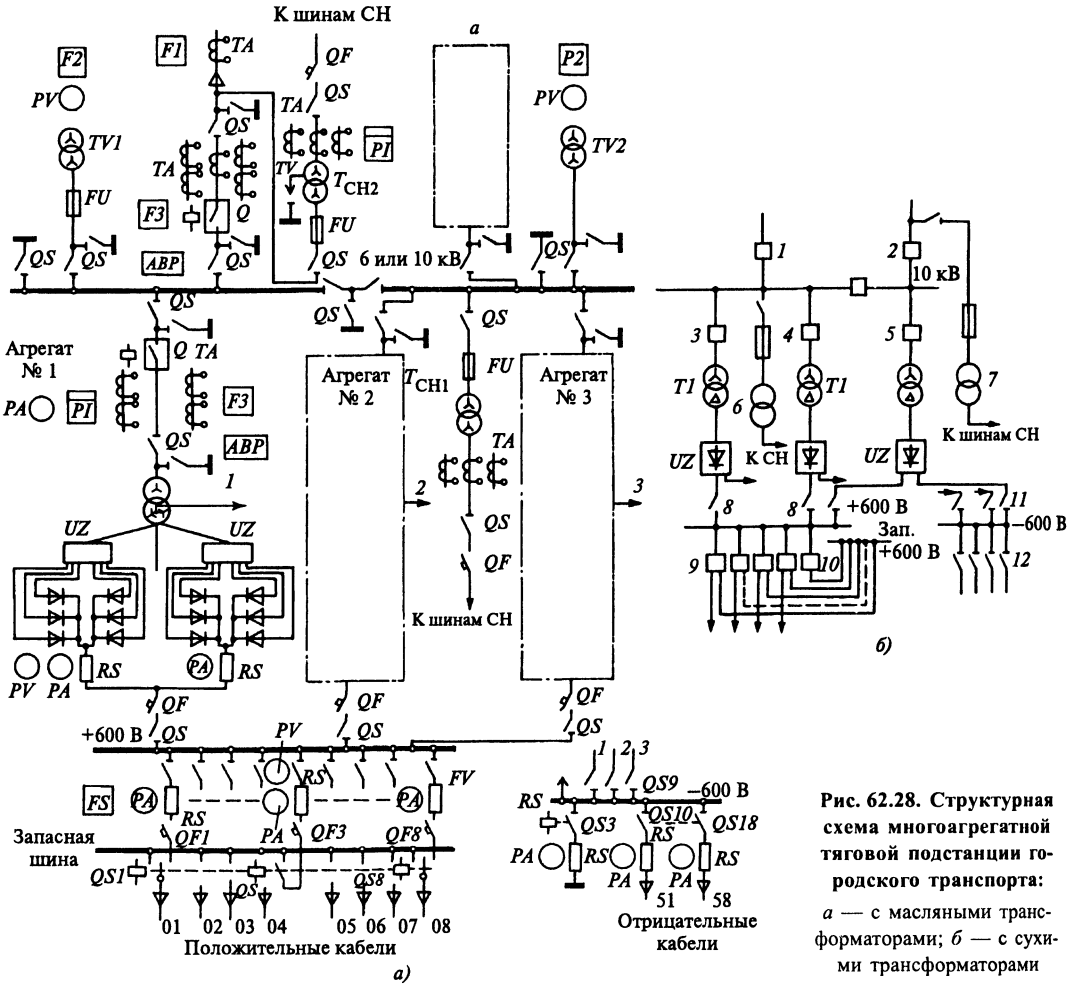


Рис. 62.28. Структурная схема многоагрегатной тяговой подстанции городского транспорта:

а — с масляными трансформаторами; *б* — с сухими трансформаторами

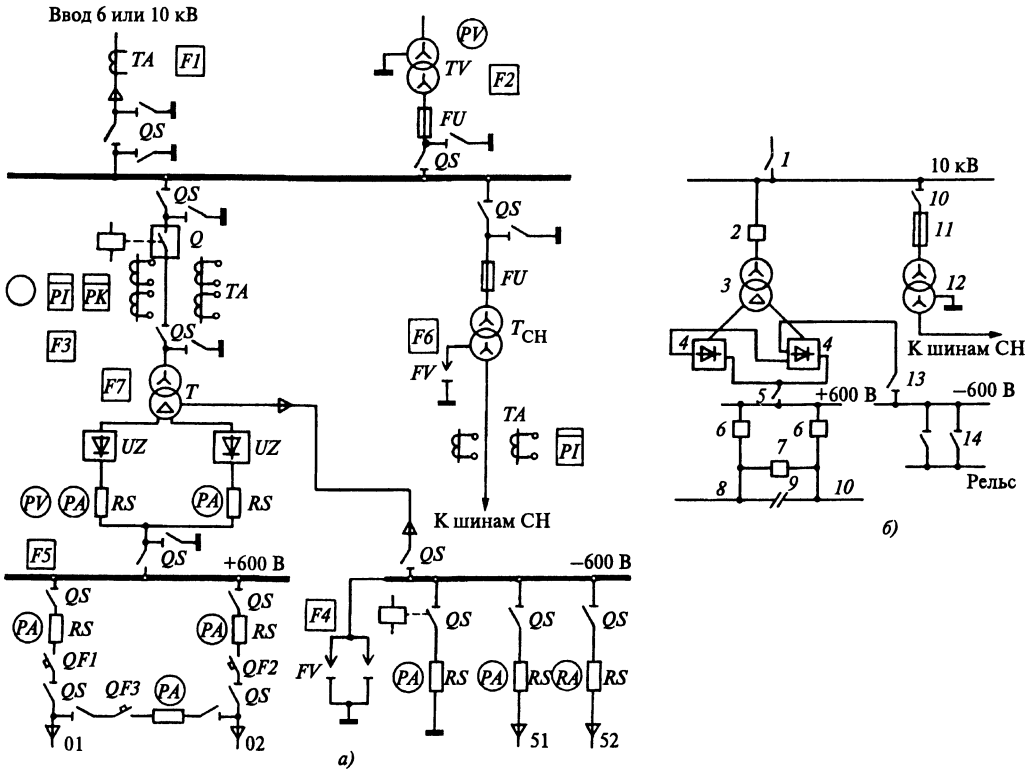


Рис. 62.29. Структурная схема одноагрегатной тяговой подстанции городского транспорта в системе децентрализованного электроснабжения тяговой сети:

а — с масляными трансформаторами; *б* — с сухими трансформаторами

Таблица 62.51. **Электрические характеристики преобразовательных трансформаторов для тяговых подстанций городского электротранспорта**

Тип трансформатора тока	Типовая мощность, кВ · А	Сетевая обмотка		Вентильная обмотка		Напряжение КЗ, %	Потери в трансформаторе, кВт		Преобразователь	
		Номинальное напряжение, кВ	Номинальная мощность, кВ · А	Номинальное напряжение, кВ	Номинальный ток, А		XX	Суммарные нагрузки	Номинальное напряжение, кВ	Номинальный ток, А
ТСЗП-630/10ГТ-УЗ	630	6; 10	533	471	653	6	5,1	6,8	600	800
ТСЗП-1000/10ГТ-УЗ	1000	6; 10	830	471	1020	6,3	6,3	8,6	600	1250
ТСЗП-1600/10	1600	6; 10	1612	471	1635	5,9	14	12,2	600	2000
ТМПУ-1000/10	1000	6; 10	692	565	289	5,6	3,3	10	600	1000
ТМПУ-2000/10	2000	6; 10	1385	565	577	6,6	3,88	16,9	600	2000
ТСЗПУ-1000/10ГТ-УЗ	1000	6; 10	692	565	289	4,8	3,3	11,45	600	1000
ТСЗПУ-2000/10ГТ-УЗ	2000	6; 10	1385	565	577	6	3,9	19,25	600	2000

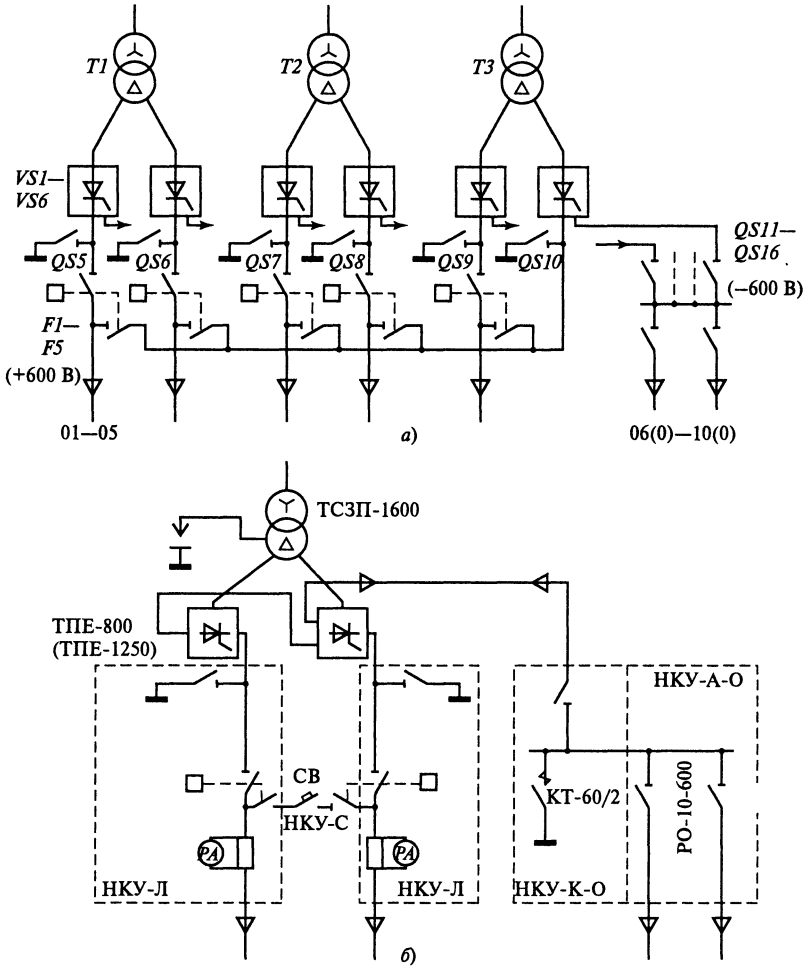


Рис. 62.30. Структурные схемы тяговых подстанций городского транспорта с тиристорными преобазовательными агрегатами:

а — многоагрегатной; *б* — одноагрегатной; СВ — секционный выключатель

Для систем электроснабжения городского транспорта разработан преобразовательный агрегат с сухим трансформатором и управляемой преобразовательной секцией для тяговых подстанций. Внедрение такого преобразовательного агрегата позволяет отказаться от катодных и линейных выключателей, а отключение линейных токов осуществляется тиристорами выпрямителя [62.15, 62.16].

Структурная схема одноагрегатной подстанции при этом незначительно отличается от предыдущего варианта (на трех и более агрегатных подстанциях питание подвижного состава также осуществляется по принципу: агрегат — линия, а резервирование — при помощи резервного агрегата (рис. 62.30, *а*, *б*)).

Число тиристорных выпрямителей, подключаемых к одному преобразовательному трансформатору, зависит от нагрузки на каждой линии, причем каждый из выпрямителей рассчитан на максимально возможный ток КЗ в линии 600 В.

Внедрение в эксплуатацию современных преобразовательных агрегатов позволяет сократить площадь производственных помещений подстанций, упростить компоновку оборудования, ошиновку и трассировку кабельных соединений и сократить эксплуатационные расходы на обслуживание оборудования.

Выпрямители В-ТПЕД выполнены на базе современных силовых полупроводниковых приборов отечественных и зарубежных фирм. Стабильность

Таблица 62.52. **Технические характеристики выпрямителей для тяговых подстанций городского электрического транспорта**

Тип выпрямителя	Схема выпрямления	Выходная мощность, кВт	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
В-ТПЕД-1,0К-600Н	Нулевая	600	(600×600×2200/ 800×800×2400)**	200/420
В-ТПЕД-2,0К-600Н	То же	1200		200/440
В-ТПЕД-800-600М	Мостовая	800	1000×600×2200/ 800×1000×2400	400/-
В-ТПЕД-1,25К-600М	То же	1250	1000×600×2200/ 800×1000×2400	400/430
В-ТПЕД-2,0К-600М	То же	2000	1000×600×2200/ 800×1000×2400	400/660
ТПЕ-1250-600УХ*	То же	1250	1200×1000×2200	700
ВАКЛЕ-1000-600Н	Нулевая	1000	1000×600×2200	350
ВАКЛЕ-2000-600Н	То же	2000	1000×600×2200 (2 шкафа)	700

* Выпрямитель выполнен на тиристорах.

** Габаритные размеры даны для шкафов выпрямителей разных изготовителей: в числителе — НПП «Энергия», в знаменателе — ОАО «Уралэлектротяжмаш».

Кратность допустимых перегрузок по току (по отношению к номинальному): 1,25 в течение 2 ч 2 раза в сутки; 1,5 в течение 5 мин 1 раз за 30 мин; 2 в течение 1 мин 1 раз за 30 мин; 4 в течение 17 с 1 раз за 197 с с однократным АПВ и последующим блокированием режима.

параметров, меньшие потери, повышенная циклическая устойчивость позволяют улучшить тепловой режим работы и обеспечить высокую перегрузочную способность выпрямителей. Система диагностики и управления выпрямителей выполнена на современной элементной базе: дискретных элементах и микропроцессорах. Технические характеристики выпрямителей приведены в табл. 62.52.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Проектирование тяговых подстанций проводят, исходя из следующих показателей: характеристики транспортного участка и типа подвижного состава; тяговых нагрузок, рассчитанных на базе конкретных графиков или по заданным размерам движения (см. § 62.2); характеристики потребителей собственных нужд и нетяговых потребителей с указанием их мощности, категории и коэффициента спроса. Схема внешнего электроснабжения должна содержать сведения об источнике (или источниках) электрической энергии — электрической или районной подстанции: напряжение на шинах источника, мощность короткого замыкания, а также расстояние от источника до проектируемой подстанции. На основании исходных данных определяют мощность и количество преобразовательных понижающих трансформаторов собственных нужд и общую мощность тяговых подстанций.

Выбор аппаратов и расчеты для выбора оборудования на стороне переменного тока производятся по общим правилам и рекомендациям. Все элементы РУ переменного тока рассчитываются на ток и напряжение номинального режима и проверяются на устойчивость при режимах внутреннего и внешнего КЗ.

Выбор аппаратов в устройствах тягового электроснабжения постоянного тока выполняют по номинальным току и напряжению и проверяют по отключающей способности на токи КЗ, динамической и термостойкости.

Расчет токов КЗ проводят, используя именованные единицы. Установившийся максимальный ток КЗ на шинах постоянного тока

$$I_{к\,max} = [(1{,}1 I_{d\,ном} N_а)/(u_к/100 + \Sigma S_{п\,а}/S_к)]k,$$

где $I_{d ном}$ — номинальный ток одного выпрямителя, А; $N_а$ — число параллельно работающих агрегатов; $u_к$ — напряжение КЗ трансформатора, %; $\Sigma S_{п.а}$ — мощность всех преобразовательных агрегатов подстанций, МВ · А; $S_к$ — мощность КЗ на шинах 10, 35 или 110 кВ, МВ · А; $k = 0{,}6$—$0{,}7$ — коэффициент, учитывающий токоограничивающий эффект выключателя.

Замыкание на землю в РУ выпрямленного тока является для рельсового транспорта по существу

КЗ через переходное сопротивление. Минимальный установившийся ток замыкания на землю

$$I_{\text{к min}} = [\,U_{d\,\text{ном}}(1 + k_1 + k_2)(1 - p) - U_{\text{д}} - \Delta U_{\text{а}} - I_{d\,\text{ном}} N_{\text{а min}}(R_{\text{пст}} + R_{\text{о}} + R_{\text{р}})\,]/$$

$$/\left[R_{\text{пст}} + R_{\text{з}} + R_{\text{о}} + R_{\text{р}} + \left(\sqrt{r_{\text{р}}^2 + r_{\text{пр}}^2}\right)/k_{\text{с.о}}\right],$$

где $U_{d\,\text{ном}}$ — номинальное напряжение на шинах подстанции, В; k_1 — коэффициент, учитывающий потерю напряжения в агрегате при номинальной нагрузке; k_2 — коэффициент, учитывающий потерю напряжения в сети ВН питающей подстанции,

$$k_1 = (0{,}5u_{\text{к}} + \Delta p_{\text{м}} + \Delta u_{\text{а}})/100;\ k_2 = S_{\text{ном}}/S_{\text{к}};$$

$u_{\text{к}}$ — напряжение КЗ трансформатора, %; $\Delta p_{\text{м}}$ — нагрузочные потери трансформатора, %, равные $\Delta P_{\text{ном}} \cdot 100/S_{\text{ном}}$; $\Delta u_{\text{а}}$ — падение напряжения в вентильных плечах выпрямителя, %, равное:

для нулевой схемы $\Delta u_{\text{а}} = \Delta U_{\text{а}} \cdot 100/U_{d\,\text{ном}}$;

для трехфазной мостовой схемы $\Delta u_{\text{а}} = 2\Delta U_{\text{а}} \cdot 100/U_{d\,\text{ном}}$,

$S_{\text{ном}}$ — номинальная мощность одного трансформатора, кВ · А; $S_{\text{к}}$ — мощность КЗ питающей сети, кВ · А; $P_{\text{ном}}$ — номинальные потери в меди трансформатора, кВт; p — отклонение напряжения первичной сети в долях номинального (можно принять в среднем $p = 0{,}05$); $U_{\text{д}}$ — потери напряжения в дуге в месте КЗ или в месте замыкания на землю (можно принять $U_{\text{д}} = 200$ В); $\Delta U_{\text{а}}$ — номинальное падение напряжения в вентильных плечах выпрямителя, В; $N_{\text{а min}}$ — минимальное возможное число агрегатов в эксплуатации на подстанции; $R_{\text{пст}}$ — максимальное значение эквивалентного сопротивления подстанции, Ом,

$$R_{\text{пст}} = U_{d\,\text{ном}}/I_{d\,\text{ном}}(k_1/N_{\text{а min}} + k_2 N_{\text{в}}/N_{\text{а.р}} N_{\text{в min}});$$

$N_{\text{а.р}}$ — общее число рабочих агрегатов подстанции; $N_{\text{в}}$ и $N_{\text{в min}}$ — общее минимальное возможное число вводов переменного тока на подстанции; $R_{\text{о}}$ — сопротивление отрицательного кабеля, Ом; $R_{\text{р}}$ — сопротивление главного реактора фильтра, Ом; $R_{\text{з}}$ — общее сопротивление растеканию заземлителей на тяговой подстанции, Ом; $r_{\text{р}}$ — удельное сопротивление ходового рельса, Ом/км (см. табл. 62.17); $r_{\text{пр}}$ — удельное переходное сопротивление рельс—земля, Ом/км; $k_{\text{с.о}}$ — коэффициент, зависящий от схемы отсасывания (при одностороннем отсасывании $k_{\text{с.о}} = 1$, при n лучах отсасывающей сети, например, на городском транспорте, $k_{\text{с.о}} = n$).

Максимальный установившийся ток замыкания на землю

$$I_{\text{з max}} = [\,U_{d\,\text{ном}}(1 + k_1 + k_2)(1 + p) - \Delta U_{\text{а}}\,]/$$

$$/\sqrt{\left(R_{\text{з}} + R_{\text{о}} + R_{\text{р}} + 3r/8 + \sqrt{r_{\text{р}}^2 + r_{\text{пр}}^2}/k_{\text{с.о}}\right)^2 + (3x/8)^2},$$

где r, x — активное и индуктивное сопротивления до точки короткого замыкания, Ом.

Ток КЗ за выпрямителем, или максимально возможный ток КЗ, определяется следующим образом.

Для нулевой схемы соединения

$$I'_{\text{к max}} = (2{,}3U_{d0} - \Delta U_{\text{а max}})/\sqrt{r'^2 + x'^2}.$$

Для трехфазной мостовой схемы

$$I''_{\text{к max}} = (1{,}15U_{d0} - 2\Delta U_{\text{а max}})/\sqrt{r''^2 + x''^2}.$$

Здесь r', x', r'', x'' — активные и индуктивные сопротивления короткозамкнутой цепи соответственно для нулевой и трехфазной мостовой схем соединения.

При пробое вентильного плеча обратный ток в «большом» вентильном плече может быть определен как двухфазный ток КЗ на выводах вторичной обмотки трансформатора.

Номинальная мощность преобразовательного агрегата или мощность, потребляемая из сети переменного тока, кВ · А,

$$P = 1{,}05U_{\text{д0}}I_{d\,\text{ном}} \cdot 10^{-3}.$$

Коэффициент полезного действия преобразовательного агрегата

$$\eta = k_{\text{к}}P_d/(k_{\text{н}}P_d + \Sigma P_{\text{пот}}),$$

где $k_{\text{н}}$ — коэффициент нагрузки; P_d — номинальная мощность агрегата на стороне выпрямленного тока.

Сумма потерь в агрегате

$$\Sigma P_{\text{пот}} = k_{\text{н}}^2(\Delta P_{\text{н.тр}} + \Delta P_{\text{н.ур}} + k_{\text{н}}\Delta P_{\text{в}}) + \Delta P_{\text{х.тр}} + \Delta P_{\text{х.ур}} + P_{\text{х.в}},$$

где $\Delta P_{\text{н.тр}}$, $\Delta P_{\text{н.ур}}$ — нагрузочные потери в трансформаторе и уравнительном реакторе, кВт; $\Delta P_{\text{х.тр}}$, $\Delta P_{\text{х.ур}}$ — потери холостого хода в трансформаторе и уравнительном реакторе, кВт; $\Delta P_{\text{в}}$ — потери в вентилях, кВт.

Средневзвешенный КПД агрегата за определенный интервал времени (сутки, месяц, год)

$$\eta_{\text{ср}} = A/(A + \Delta A),$$

где A — количество потребленной электроэнергии, определяемое по электросчетчику или суточному типовому графику, кВт · ч; ΔA — суммарные потери электроэнергии в агрегате, кВт · ч.

Коэффициент мощности преобразовательного агрегата

$$\chi = P_{\text{общ}}/S_{\text{общ}} = \nu \cos\varphi_1;$$

$$\cos\varphi_1 = P_1/S_1 = P_1/\sqrt{P_1^2 + Q_1^2};$$

$$\gamma = I_1/\sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots},$$

где $P_{\text{общ}}$, $S_{\text{общ}}$ — активная и полная мощности агрегата; P_1, S_1, Q_1 — активная, полная и реактивная мощности первой (основной) гармоники; $\cos\varphi_1$ — коэффициент мощности первой (основной) гармоники; ν — коэффициент искажения; I_1, I_5, I_7 — токи гармоник в цепи первичной обмотки трансформатора;

$$P_1 = P_{\text{х.тр}} + k_{\text{н}}^2(\Delta P_{\text{х.тр}} + \Delta P_{\text{н.ур}}) + k_{\text{н}} U_d I_d;$$

$$Q_1 = Q_{\text{х}} + Q_{\gamma};\quad Q_{\text{х}} = \sqrt{3}\, U_{\text{н}} I_{\text{х.тр}};\quad Q_{\gamma} = S(1 - \sin\gamma)/2;$$

$$\cos\gamma = 1 - \sqrt{3}\, k_{\text{н}} U_{\text{н.тр}}.$$

Приведенные формулы позволяют построить кривую коэффициента мощности первой гармоники в функции коэффициента нагрузки $k_{\text{н}}$ для выпрямителей с диодами и тиристорами без регулирования напряжения ($\alpha = 0$).

Для определения средневзвешенного коэффициента мощности достаточно в формулы ввести средневзвешенный коэффициент нагрузки.

ПОТРЕБИТЕЛИ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Потребителями переменного тока являются вспомогательные устройства преобразовательных агрегатов, насосы, вентиляторы, зарядный и подзарядный агрегаты, электрическое отопление, устройства подогрева выключателей и приводов, система охлаждения трансформаторов, мастерская, преобразователи СЦБ, станционные и другие железнодорожные потребители.

Для питания потребителей на тяговых подстанциях устанавливаются либо один трансформатор собственных нужд с посторонним резервным вводом низкого напряжения (на городском транспорте), либо два трансформатора. Мощность трансформаторов собственных нужд зависит от наличия и мощности потребителей и обычно колеблется от 20—40 (на подстанциях городского транспорта) до 320 кВ · А.

Потребителями оперативного постоянного тока являются приборы управления, защиты и сигнализации, постоянно включенные электромагниты выключателей, приводы выключателей, реле автоматики, аварийное освещение. Длительная мощность потребителей на тяговых подстанциях зависит от количества агрегатов и линий, системы оперативного тока, способа резервирования, освещения и др. Обычно эта мощность не превышает 3 кВт. Максимальная кратковременная мощность зависит от типа привода выключателей.

Для питания потребителей постоянного оперативного тока предусматривается независимый источник в виде аккумуляторной батареи, работающей параллельно с подзарядным агрегатом. В качестве подзарядного и зарядного агрегатов применяются полупроводниковые выпрямители.

Применение переменного оперативного тока или батарей малой емкости для включения аппаратов позволяет использовать приводы переменного тока либо приводы постоянного тока с питанием их от сети переменного тока через полупроводниковые выпрямители.

62.6. ЭЛЕКТРОПРИВОД АВТОНОМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

В табл. 62.53 приведены краткие технические характеристики основных типов тепловозов выпуска последних 20 лет. Отмечены особенности электрооборудования как тепловозов, выпущенных крупными сериями, так и современных тепловозов единичного выпуска. Марки электрических машин и аппаратов указаны такими, какими они были в момент выпуска заводом-изготовителем. Если в период постройки тепловозов заменялись машины, их марки указаны в хронологическом порядке установки на локомотив. Приведены данные электрической передачи, применяемой в серийных тепловозах: постоянно-постоянного и переменно-постоянного тока. Сведения по системам переменно-переменного тока изложены в [4].

Кроме тепловозов, использующих в качестве автономного источника энергии дизель, на железнодорожном транспорте нашли применение газотурбовозы, удельная энергоемкость которых существенно выше. Прогресс в повышении экономичности работы газотурбинных транспортных двигателей, другие их преимущества по сравнению с дизелями делают газотурбинные локомотивы весьма перспективным транспортным средством.

Таблица 62.53. **Особенности систем электропередачи и электрооборудования современных тепловозов**

Показатель	Тип тепловоза															
	3ТЭ10М, 2ТЭ10М	3ТЭ10У, 2ТЭ10У, 2ТЭ10Ут	4ТЭ10С, 2ТЭ10С	М62, 2М62, 2М62У	ТЭП60, 2ТЭП60	ТЭМ2, ТЭМ2У, ТЭМ2УМ	2ТЭ116	2ТЭ116М	2ТЭ121, 2ТЭ116А, 4ТЭ130	ТЭ136	2ТЭ126	ТЭ127	ТЭП70	ТЭП75	ТЭП80	ТЭМ7, ТЭМ7А
Система автоматического управления	ЭА1	ЭА1	ЭА1	ЭА1	ЭА1	ЭМ	Электроаппаратная с использованием полупроводниковых приборов (ЭА2)									
Регулирование дизель-генератора	Объединенное					Несвязанное	Объединенное									
Динамическая жесткость характеристики ТГ	Есть			Нет			Есть									
Уравнительные соединения в цепи ТЭД	Есть			Нет												
Электрический тормоз	Нет		На отдельных тепловозах	Нет	На отдельных тепловозах	Нет	С 1991 г.	Есть				Нет	Есть	Нет	Есть	Нет
Марка тягового агрегата	—	—	—	—	—	—	—	—	А-714	А-716	А-717	А-715	—	А-713	—	—
Привод тормозного компрессора	Механический						Электрический	Механический	Электрический	Механический			Электрический			
Центральное воздухоснабжение	—	—	—	—	—	—	—	—	Есть							
Котел обогрева	—	—	Есть	—	—	—	—	—	Нет		Есть	Нет				
Стартер-генератор	—	—	—	—	—	—	Есть			Воздушный пуск		Стартер автомобильного типа	Есть			

Окончание табл. 62.53

Показатель	Тип тепловоза															
	3ТЭ10М, 2ТЭ10М	3ТЭ10У, 2ТЭ10У, 2ТЭ10Ут	4ТЭ10С, 2ТЭ10С	М62, 2М62, 2М62У	ТЭП60, 2ТЭП60	ТЭМ2, ТЭМ2У, ТЭМ2УМ	2ТЭ116	2ТЭ116М	2ТЭ121, 2ТЭ116А, 4ТЭ130	ТЭ136	2ТЭ126	ТЭ127	ТЭП70	ТЭП75	ТЭП80	ТЭМ7, ТЭМ7А
Вспомогательный синхронный генератор	—	—	—	—	—	—	—	—	Есть				—	Есть	—	—
Вспомогательный синхронный генератор для питания цепей управления и заряда батарей	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Да			—	—	—	—
Тяговый генератор для питания вспомогательных электродвигателей	—	—	—	—	—	—	Да	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Вспомогательный синхронный генератор для питания двигателей АМВ-75	—	—	—	—	—	—	—	—	Да			—	—	—	—	—
То же для двигателей АМВ-37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Да	—	—	—	—
То же для отопления поезда	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Да		—	—	Да	—	—
КУА	—	—	—	—	—	—	—	—	Да				—	Да	—	—

Примечания: 1. Системы автоматического управления электропередачей тепловозов различают: электромашинные (ЭМ), электроаппаратные с использованием магнитных усилителей (ЭА1) и электроаппаратные с использованием полупроводниковых приборов — тиристорного регулятора (ЭА2).

2. О несвязанном (раздельном) и объединенном регулировании дизель-генераторов см. [3]

3. На тепловозах ТЭП60 котлы обогрева устанавливались до 1972 г.

4. На тепловозах 2ТЭ121 до № 055 (исключая № 045) применяется электрический привод к тормозному компрессору. На тепловозах более поздней постройки (включая № 045) — механический.

ТЯГОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Все современные тяговые генераторы имеют восемь или десять главных полюсов, столько же добавочных, простую или двухходовую петлевую обмотку якоря, принудительную вентиляцию или самовентиляцию (табл. 62.54).

Тяговые генераторы ГП-300Б имеют мощность 780 кВт при 750 об/мин, восемь главных и столько же добавочных полюсов, простую петлевую обмотку якоря с уравнительными соединениями, самовентиляцию. Выпускаются для тепловозов ТЭМ2 с 1961 г. как для умеренного, так и для тропического климата.

Тяговые генераторы ГП-312 имеют мощность 1270 кВт при 750 об/мин, 10 главных и столько же добавочных полюсов, двухходовую петлевую ступенчатую обмотку якоря с двумя уравнительными соединениями на паз. Вентиляция независимая — от вентилятора, который приводится во вращение валом дизеля.

К подшипниковому щиту крепятся 10 бракетов щеткодержателей, к каждому из которых прикреплено семь щеткодержателей, обеспечивающих постоянное нажатие на щетку независимо от ее износа. Щетки разрезные марки ЭГ-14 размером 12,5×32×65 мм. Щеткодержатели в зависимости от усилия нажатия подразделяются на две группы: I группа — 16—18 Н, II группа — 18—20 Н. На генератор устанавливают щеткодержатели одной группы. Выпускаются с 1964 г. для тепловозов М62.

Тяговые генераторы ГП-311Б для тепловозов 2ТЭ10Л, 2ТЭ10В, 3ТЭ10М, 2ТЭ10М, 4ТЭ10С, 2ТЭ10С мощностью 2000 кВт при 850 об/мин (наибольшая мощность для тяговых генераторов постоянного тока), имеют 10 главных и 10 добавочных полюсов, с двухходовой петлевой обмоткой якоря и уравнительными соединениями между всеми коллекторными пластинами. Вентиляция независимая. Поворотная траверса щеткодержателей с постоянным нажатием на щетку независимо от ее износа. Используются разрезные щетки марки ЭГ-14 размером (12,5×32×65) мм с нажатием 18—20 Н. Выпускались в 1963—1989 гг.

Тяговые генераторы ГП-311БМ для тепловозов ТЭ10У с улучшенным охлаждением обмоток якоря, позволяющим увеличить ток продолжительного режима от 4320 до 4500 А, а следовательно, и силу тяги продолжительного режима каждой секции тепловоза от 240 до 250 кН. Выпускаются с 1989 г.

Тяговые генераторы ГП-311В для тепловозов ТЭП60, 2ТЭП60 отличаются от генераторов ГП-311Б некоторыми параметрами работы при меньшей частоте вращения якоря. Фланцы для установки остова на поддизельной раме размещаются на 85 мм ниже оси якоря (у генератора ГП-311Б они расположены на уровне оси), выброс охлаждающего воздуха происходит с обеих сторон остова, монтаж всех выводных проводов обмоток — от торца остова. Поворотная траверса щеткодержателей усилена для уменьшения вибрации. Выпускались с 1963 по 1987 г.

Таблица 62.54. **Марки тяговых электрических машин**

Тепловоз	Тяговый генератор	Тяговый электродвигатель	Возбудитель	
			постоянного тока	переменного тока
ТЭ10М	ГП-311БУ2	ЭД-118БУ1	В-600У2	—
ТЭ10У	ГП-311БМУ2	ЭД-118БУ1 ЭД-125БУ1	В-600У2	—
М62	ГП-312У2	ЭД-118АУ1	В-600У2	—
ТЭП60, 2ТЭП60	ГП-311ВУ2	ЭД-108АУ1	В-600У2	—
ТЭМ2*	ГП-300БУ2	ЭД-118АУ1	МВТ-25 МВТ-942	—
2ТЭ116	ГС-501АУ2	ЭД-118АУ1 ЭД-125БУ1	—	ВС-650ВУ2
ТЭП70	ГС-501АУ2	ЭД-119У1 ЭД-121У1	—	ВС-650ВУ2
2ТЭ121	Тяговый агрегат А-714	ЭД-126АУХЛ1	—	—
ТЭМ7, ТЭМ7А	ГС-515У2	ЭД-120АУ1	—	ВС-650ВУ2

* Для тепловозов, поставляемых в страны с тропическим климатом, электрические машины и аккумуляторные батареи выпускаются в тропическом исполнении.

ТЯГОВЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ СИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Согласно нормали завода «Электротяжмаш» тепловозные тяговые синхронные генераторы имеют типы ГС-501, ГС-515 и т.д. Тяговые и вспомогательные синхронные генераторы выполняются с прямой схемой работы (якорная обмотка — на статоре, обмотка возбуждения — на роторе). Якорная обмотка выполнена в виде двух трехфазных звезд, сдвинутых одна относительно другой на $\pi/6$. Ротор выполняется с явно выраженными 12 полюсами ($2p = 12$). Обычно применяется принудительная (независимая) вентиляция. Обмотка независимого возбуждения получает питание через контактные кольца от синхронного возбудителя (на тепловозах 2ТЭ116, ТЭП70, ТЭМ7) или от вспомогательного генератора тягового агрегата (на тепловозах 2ТЭ121) (табл. 62.55, 62.56, рис. 62.31 и 62.32).

Тяговые синхронные генераторы ГС-501А мощностью 2190 кВт при 1000 об/мин с 1971 г. выпускаются для тепловозов 2ТЭ116, а с 1978 г. эти генераторы с увеличенной до 2800 кВт мощностью устанавливаются на тепловозах ТЭП70 (начиная с № 008).

Тяговые синхронные генераторы ГС-515 мощностью 1400 кВт при 1000 об/мин устанавливаются с 1975 г. на тепловозах ТЭМ7 и ТЭМ7А.

ТЯГОВЫЕ АГРЕГАТЫ

На тепловозах более поздней постройки (2ТЭ121 и др.) для повышения компактности конструкции и снижения ее массы тяговый и вспомогательный генераторы объединяются в тяговый агрегат (типы А-714, А-713 и т.п., рис. 62.33).

При этом тяговый генератор имеет обычное назначение на тепловозе, вспомогательный генератор служит для возбуждения тягового генератора, для

Таблица 62.55. **Технические данные тяговых генераторов постоянного тока**

Показатель	ГП-300Б	ГП-312	ГП-311Б	ГП-311БМ	ГП-311В
Номинальная мощность, кВт	780	1270	2000	2000	2000
Мощность, используемая на тепловозе (при 20 °С), кВт	737	1232	1780	1780	1870
Напряжение, В:					
продолжительного режима	645	356	465	445	465
максимальное	870	570	700	700	635
Ток, А:					
продолжительного режима	1210	3570	4320	4500	4320
при высшем напряжении	900	2230	2870	2870	3150
Частота вращения, об/мин	750	750	850	850	750
Масса, кг	4800	7400	8700	8700	9000

Таблица 62.56. **Технические данные тяговых синхронных генераторов**

Показатель	ГС-501А	ГС-515	Тяговый агрегат А-714	
			Тяговый генератор	Вспомогательный генератор
Номинальная мощность, кВт	2190 (2800)	1400	2800	630
Напряжение, В:				
продолжительного режима	290 (360)	175	360	400
максимальное	535 (580)	280	580	400
Ток, А:				
продолжительного режима	2350 (2400)	2500	2400	570
при высшем напряжении	1330 (1500)	1540	1520	570
Частота вращения, об/мин	1000	1000	1000	1000
Частота тока, Гц	100	100	100	100
Число фаз	2×3	2×3	2×3	2×3
Масса, кг	6000	5200	8200	

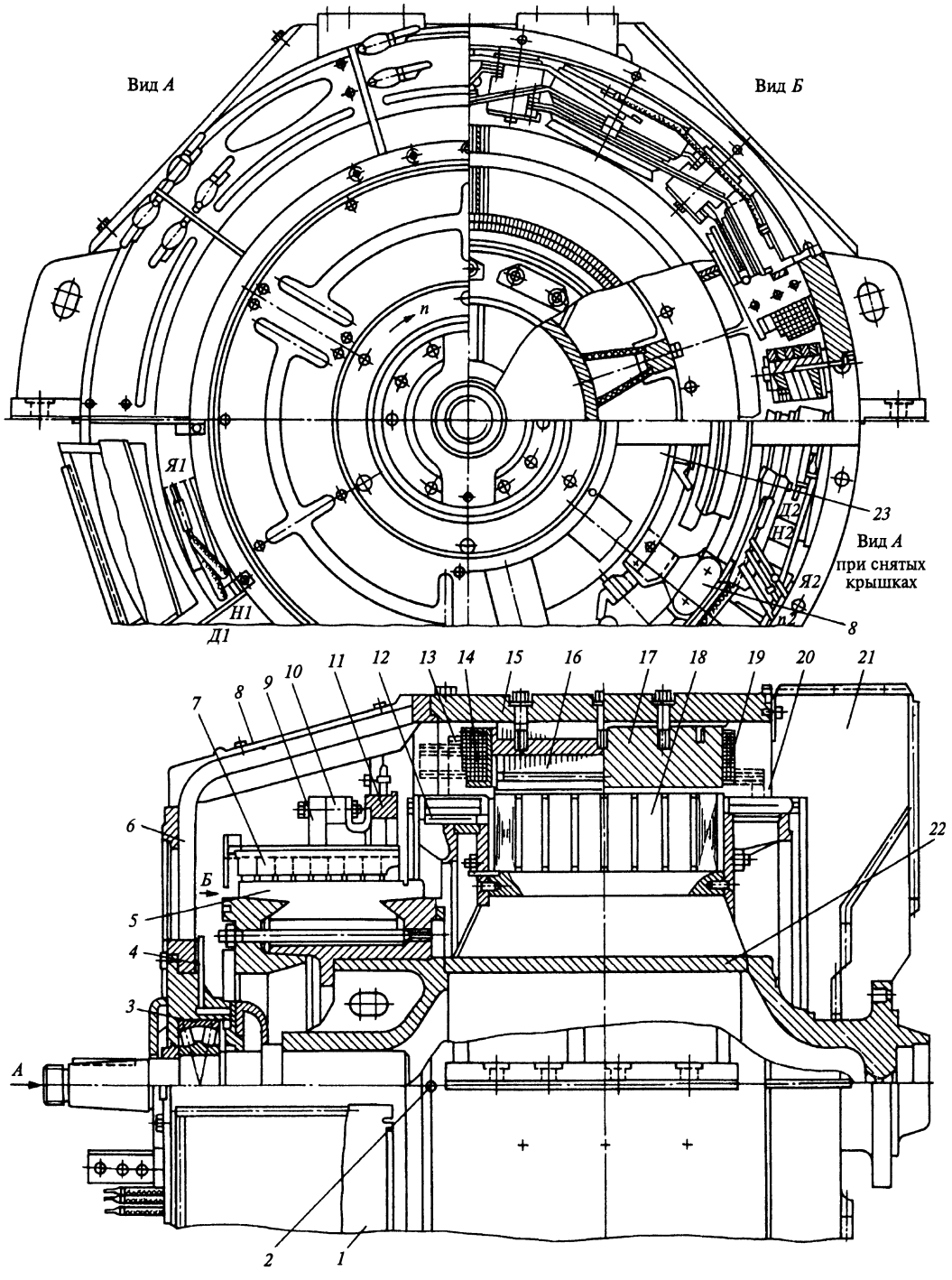


Рис. 62.31. Тяговый генератор ГП-311Б (продольный и поперечный разрезы):

1 — отверстия для выброса охлаждающего воздуха; *2* — штифт призонный; *3* — роликоподшипник; *4* — трубка подачи смазки; *5* — коллектор; *6* — щит подшипниковый; *7* — щеткодержатели; *8* — крышка; *9* — бракеты; *10* — изоляторы; *11* — траверса поворотная; *12* — уравнители; *13* — пусковая обмотка; *14* — обмотка независимого возбуждения; *15* — станина; *16* — главный полюс; *17* — добавочный полюс; *18* — сердечник якоря; *19* — обмотка добавочного полюса; *20* — обмотка якоря; *21* — воздухоподводящий патрубок; *22* — корпус якоря; *23* — электрощетки

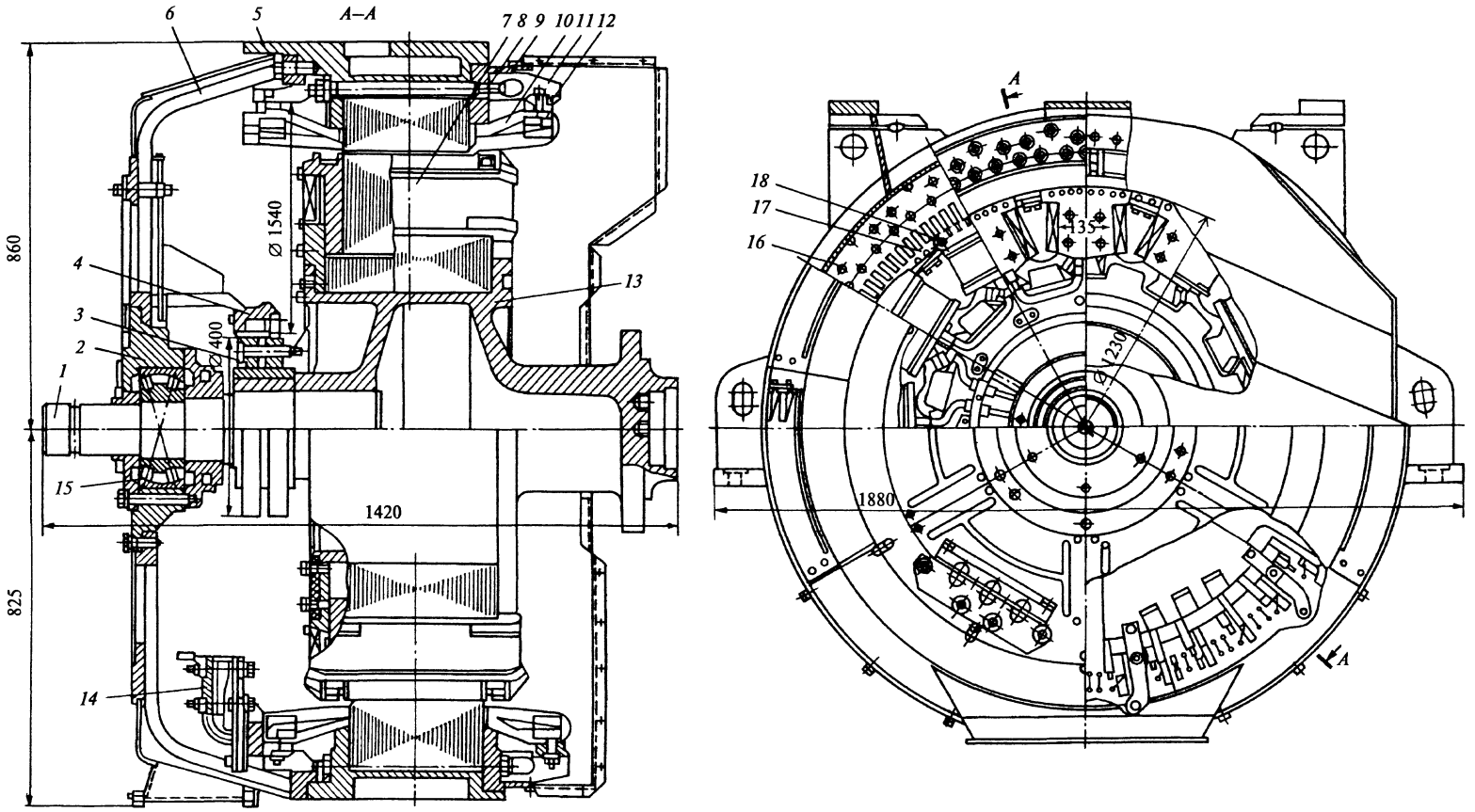


Рис. 62.32. Тяговый синхронный генератор ГС-501А:

1 — вал; *2* — капсула; *3* — контактные кольца; *4* — щеткодержатель; *5* — станина; *6* — щит подшипниковый; *7* — катушка полюса ротора; *8*, *10* — сердечник и обмотка статора; *9* — нажимная шайба; *11* — ребра; *12* — кольцо; *13* — корпус ротора; *14* — выводы; *15* — подшипник; *16* — вентиляционный канал; *17* — паз; *18* — демпферная обмотка

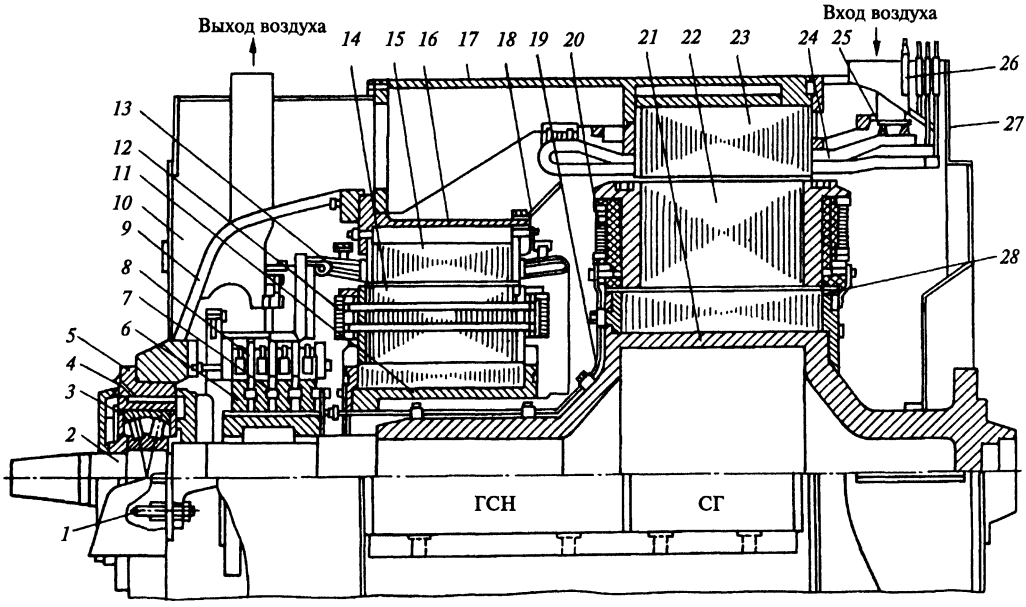


Рис. 62.33. Тяговый агрегат А-714:

1 — выводы обмоток ротора; *2* — вал; *3* — подшипник; *4* — маслснка; *5* — втулка высмная; *6*, *7* — кольца контактные; *8* — щсткодсржатели; *9* — щит подшипниковый; *10* — патрубок для выхода охлаждающего воздуха; *11*, *21* — остовы ротора вспомогатсльного и тягового гснсраторов; *12*, *14*, *20*, *22* — катушки и сердсчники полюсов роторов; *13*, *15*, *23*, *24* — обмотки и сердечник статоров; *16*, *17* — корпуса статоров гснсраторов; *18* — направляющий щиток; *19* — сосдинснис обмотки ротора с контактными кольцами; *25* — крсплснис лобовых частей обмотки; *26* — выводы фаз и нулсвых точск звсзд обмотки статора; *27* — патрубок для входа воздуха; *28* — сосдинснис катушск полюсов ротора

питания асинхронных вспомогательных электродвигателей, а на пассажирских тепловозах для отопления поезда.

ТЯГОВЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

Согласно нормали завода «Электротяжмаш» тепловозные тяговые электродвигатели имеют типы ЭД-107, ЭД-108, ЭД-118, ЭД-120 и т.д. (табл. 62.57, 62.58). Тяговые электродвигатели имеют высокопрочную надежную конструкцию в связи с большими динамическими нагрузками под рамой локомотива. Тяговые электродвигатели в режиме тяги имеют последовательное возбуждение. На тепловозах, где применяется электрическое торможение, предусмотрено переключение обмотки возбуждения на независимое возбуждение от тягового генератора.

Тепловозные тяговые электродвигатели имеют четыре главных и четыре добавочных полюса, двигатели ЭД-126А имеют по шесть главных и добавочных полюсов. Конструктивно сердечники и катушки полюсов после пропитки эпоксидным компаундом представляют собой неразъемную конструкцию (изоляция «Монолит-2»), которая более устойчива к вибрациям и температурным деформациям. Двигатели имеют простую петлевую обмотку с уравнительными соединениями первого рода.

Тепловозные тяговые электродвигатели имеют четыре щеткодержателя с тремя щетками каждый. Двигатели ЭД-126А имеют поворотную траверсу с шестью щеткодержателями на две щетки каждый, при этом конструкцией предусмотрено постоянное нажатие на щетку независимо от ее износа. Двигатели выполняются как с опорно-осевым (ЭД-118А, ЭД-118Б, ЭД-125Б, ЭД-120А), так и с опорно-рамным подвешиванием (ЭД-108А, ЭД-121А, ЭД-126А).

Тяговые электродвигатели ЭД-118А и ЭД-118Б являются наиболее распространенными для тепловозов типов 2ТЭ10М, ТЭ10У, М62, ТЭМ2, а также для тепловозов 2ТЭ116. Двигатели ЭД-118А имеют польстерную систему смазки моторно-осевых подшипников при помощи фитиля, а двигатели ЭД-118Б — принудительную (циркуляционную) подачу смазки к моторно-осевым подшипникам.

Таблица 62.57. **Параметры тяговых электродвигателей**

Двигатель	Тепловоз	Мощность, кВт	Напряжение, В		Ток, А			Частота вращения, об/мин			Передаточное число	КПД при продолжительном режиме и полном поле	Степень ослабления возбуждения		Q, $м^3/ч$	H, мм вод. ст.
			продолжительного режима	максимальное	продолжительного режима	при максимальном напряжении	максимальный кратковременный	продолжительного режима	при полной мощности	максимально допустимая			I ступень	II ступень		
ЭД-118А ЭД-118Б	ТЭ10М, ТЭ10У, 2ТЭ116	305	463	700	720	476	1100	585	1790	2290	4,41	0,915	0,60	0,36	80	170
ЭД-125Б	ТЭ10У, 2ТЭ116	301	444	700	750	452	1200	553	1710	2320	4,41	0,905	0,60	0,36	80	170
ЭД-108А	ТЭП60, 2ТЭП60	305	475	635	700	525	1100	610	1870	1880	2,32	0,917	0,60	0,36	70	120
ЭД-121А	ТЭП70	413	542	750	830	600	1250	704	2160	2320	3,12	0,918	0,58	0,34	100	140
ЭД-126А	2ТЭ121	406	510	600	880	600	1350	533	1835	1910	4,318	0,900	0,57	0,34	100	180
ЭД-120А	ТЭМ7, ТЭМ7А	136	208	360	790	456	1160	245	1890	2320	4,41	0,83	0,48	0,24	90	175

Таблица 62.58. **Технические данные тяговых электродвигателей**

Показатель	ЭД-118А, ЭД-118Б	ЭД-125Б	ЭД-108А	ЭД-121А	ЭД-126А	ЭД-120А
Масса двигателя, кг	3100/3350	3250	3350	2950	3600	3000
Количество главных полюсов	4	4	4	4	6	4
Количество витков на полюс	19	16	19	20	16	20
Сечение провода, мм	8×25	7×30	8×25	8×30	4×70	8×30
Марка провода	ШММ	ШММ	ШММ	ШММ	ШММ	ШММ
Класс нагревостойкости изоляции	F	F	F	F	F	F
Количество добавочных полюсов	4	4	4	4	6	4
Количество витков на полюс	17	18	17	18	11	18
Сечение провода, мм	6×30	5,5×30	6×30	5,5×30	7×22	5,5×30
Марка провода	ШММ	ПММ	ШММ	ПММ	ПММ	ПММ
Класс нагревостойкости изоляции	F	F	F	F	F	F
Диаметр сердечника якоря, мм	493	493	493	493	660	493
Количество пазов	54	58	54	58	105	58
Количество катушек	54	58	54	58	105	58
Количество секций в катушке	4	4	4	4	3	4
Количество стержней в секции	3	1	3	1	1	1

Тяговые электродвигатели ЭД-125Б могут применяться на тех же тепловозах, что и двигатели ЭД-118А и ЭД-118Б. Они имеют систему принудительной подачи смазки к моторно-осевым подшипникам. Главные полюса крепятся к остову вынесенным из сердечника стержнем и болтами; добавочные полюса прикреплены к остову проходными болтами с гайками. Такое крепление внедрено на двигателях ЭД-118А, ЭД-118Б (рис. 62.34).

Коллектор крепится пружинным разрезным кольцом вместо стяжных болтов.

Якорь имеет промежуточную втулку (остов), что позволяет легко сменить поврежденный вал. Обмотка якоря выполнена с изоляцией класса Н (полиамид), которая обеспечивает больший срок службы якоря. Задний обмоткодержатель закрытого типа защищает лобовые части обмотки от повреждений.

Щеткодержатели крепятся к кронштейнам привалочной поверхностью в виде «гребенки».

Тяговые электродвигатели ЭД-108А установлены на тепловозах ТЭП60 и 2ТЭП60, их электрические параметры и характеристики соответствуют характеристикам двигателей ЭД-107А грузовых тепловозов 2ТЭ10Л. Двигатели имеют опорно-рамную подвеску типа «Альстом».

Тяговые электродвигатели ЭД-121А с опорно-рамной подвеской типа «Альстом» устанавливаются на тепловозах ТЭП70.

Тяговые электродвигатели ЭД-126А для грузового тепловоза 2ТЭ121 нового поколения имеет увеличенную нагрузку на ось, диаметр колес 1250 мм, опорно-рамная подвеска типа «Шкода» (рис. 62.35). Особенностью такой конструкции является наличие полого вала якоря, через который проходит торсионный вал привода колесной пары. Двигатель имеет шесть главных и шесть добавочных полюсов. Обмотка главных полюсов выполнена шиной, намотанной на «узкое ребро». Крепление главных и добавочных полюсов такое же, как у двигателя ЭД-125Б.

В якоре диаметром 660 мм (на всех остальных двигателях — 493 мм) предусмотрена промежуточная втулка (остов) для более простой смены поврежденного вала. Задний держатель обмотки закрытого типа защищает лобовые части обмотки от повреждений. Обмотка якоря имеет улучшенную изоляцию (полиамид) класса Н.

Шесть щеткодержателей укреплены на поворотной траверсе с шестеренчатым приводом. Щеткодержатели имеют постоянное нажатие на щетку независимо от ее износа.

Корпус электродвигателя — круглый сварной из листового проката.

Тяговые электродвигатели ЭД-120А для маневрового тепловоза. Конструктивно аналогичны двигателям ЭД-121А и ЭД-125Б. Подвешивание двигателя — опорно-осевое. Моторно-осевые подшипники имеют польстерную систему смазки.

Обмотка якоря — петлевая, с полным числом уравнительных соединений. Кабели питания подсоединяются в специальной коробке зажимов.

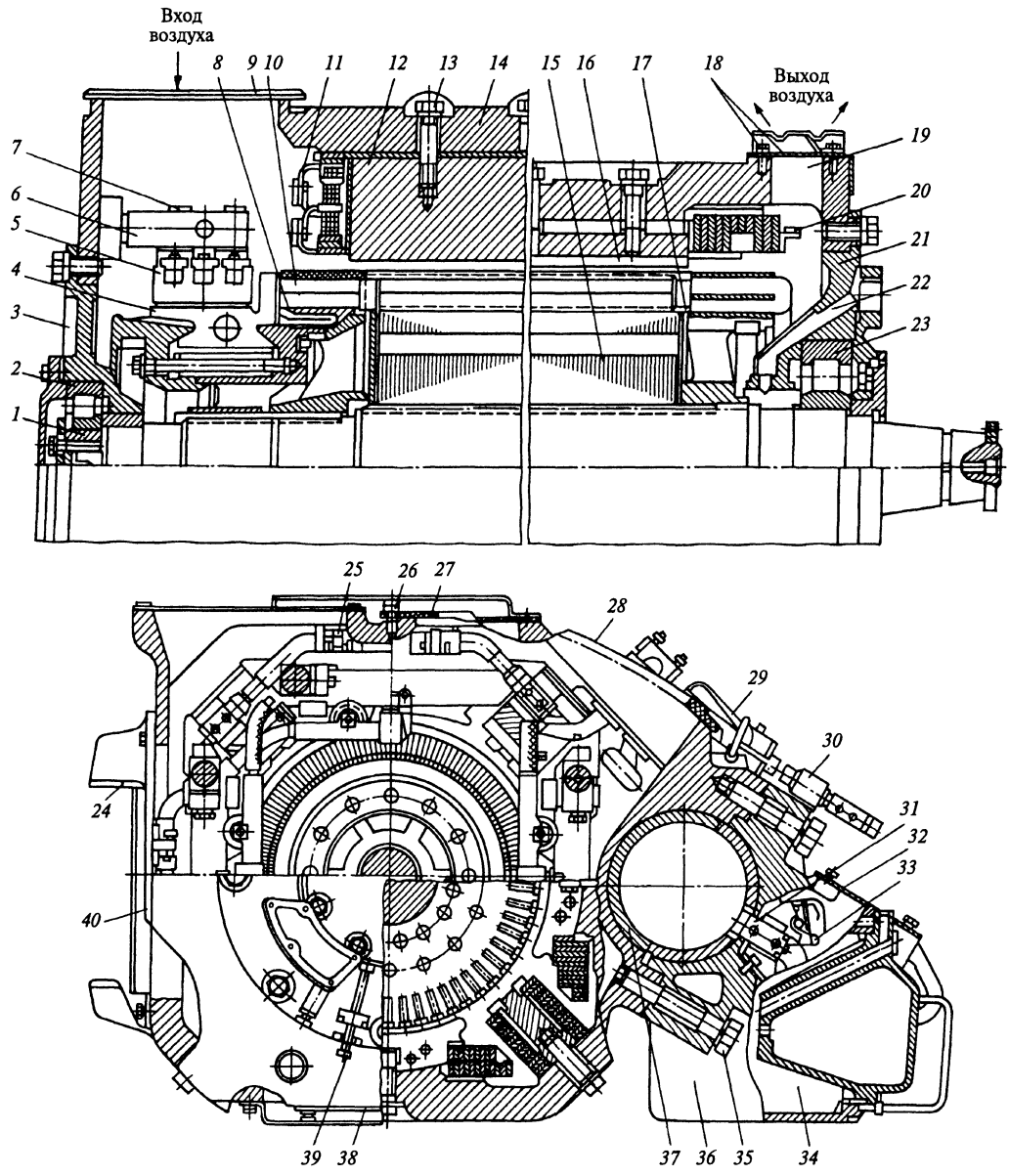


Рис. 62.34. Тяговый электродвигатель ЭД-118Б:

1 — вал; *2*, *23* — подшипники роликовые; *3*, *21* — щиты подшипниковые; *4* — коллектор; *5* — щеткодержатель; *6* — кронштейн; *7* — изолятор; *8* — соединения уравнительные; *9* — крышка (закрыта в нерабочем состоянии); *10*, *15* — обмотка и сердечник якоря; *11*, *20* — соединения межкатушечные; *12* — добавочный полюс; *13* — болт, залитый кварцкомпаундом; *14* — корпус (остов); *16* — полюс главный; *17* — кольца нажимные или пакеты сварные; *18* — щитки; *19* — отверстие для выхода воздуха; *22* — канал атмосферный; *24* — накладки сменные; *25* — крепление межкатушечного соединения к остову; *26* — бобышка; *27* — уплотнение; *28* — крышка верхняя; *29* — замок; *30* — провод выводной; *31* — фитиль; *32*, *38*, *40* — крышки; *33* — устройство нажимное; *34* — ванна; *35* — болт; *36* — корпус (шапка) моторно-осевого подшипника; *37* — вкладыши моторно-осевого подшипника; *39* — трубка подачи масла

Таблица 62.59. **Технические данные аккумуляторных батарей**

Показатель	Значение показателей для батарей	
	46ТПЖН-550	32ТН-450, 48ТН-450, 48ТН-350
Тип	Щелочная, железоникелевая	Кислотная, свинцовая
Емкость, А · ч	550 (при 5-час токе и минимальном напряжении 1 В на элемент)	450/350* (при 10-час токе и минимальном напряжении 1,8 В на элемент)
Прерывистый ток, А	2200	1700
Общее количество аккумуляторов	46	32/48**
Соединение аккумуляторов	Последовательное	
Общее номинальное напряжение, В	57,5	64/96**
Количество пластин, шт.:		
положительных	36	19
отрицательных	34	20
Толщина пластин, мм:		
положительных	2,15	4,7
отрицательных	2,0	3,3
Конструкция пластин	В рамки запрессованы отдельные коробочки из стальной никлированной ленты, заполненные активной массой	Решетка из свинцово-сурьмянистого сплава (95 % свинца и 5 % сурьмы) с ячейками, заполненными активной массой
Активная масса пластин:		
положительных	Гидрооксид никеля $Ni(OH)_3$	Диоксид свинца PbO_3
отрицательных	Губчатое железо Fe	Чистый губчатый свинец
Конструкция сепараторов	Перфорированная и гофрированная винипластовая пленка	Микропористый лист, перфорированный винипласт, стекловойлок
Электролит	Раствор в дистиллированной воде или конденсате едкого калия, добавка моногидрата лития 20—22 г/л	Раствор в дистиллированной воде серной кислоты (ГОСТ 667—73)
Плотность электролита, г/мл	1,19—1,21	1,24—1,25 (1,26—1,27)***
Количество электролита на батарею, л	46×8 = 368	228/340**
Уровень электролита над пластинами, мм	50—60	Более 15
Сопротивление изоляции (по формуле Фриша), кОм	25	25
Масса аккумулятора, кг, не более:		
без электролита	35	—
с электролитом	45	38
Количество аккумуляторов в секции	11 или 12	4/3**
Количество секций	4	8/16**

* В числителе — для батарей 32ТН-450, 48ТН-450; в знаменателе — для батарей 48ТН-350.

** В числителе — для батарей 32ТН-450, в знаменателе — для батарей 48ТН-450 и 48ТН-350.

*** В скобках указано значение плотности в условиях низких температур.

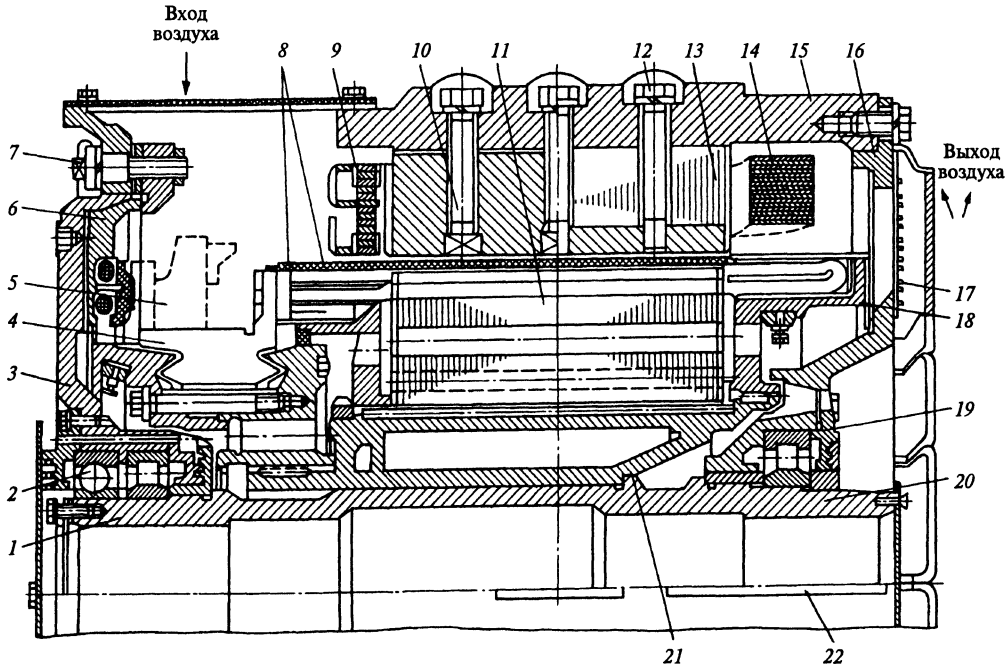


Рис. 62.35. Тяговый электродвигатель ЭД-126А:

1 — вал полый; *2* — подшипники; *3, 16* — щиты подшипниковые; *4* — коллектор; *5* — щеткодержатель; *6* — траверса щеткодержателей поворотная; *7* — привод шестеренчатый; *8* — обмотка якоря и уравнительные соединения; *9* — полюс добавочный; *10* — болт проходной; *11* — сердечник якоря; *12* — болт; *13* — стержень сердечника; *14* — катушка главного полюса; *15* — остов; *17* — козырек; *18* — обмоткодержатель; *19* — подшипник радиальный; *20* — конец вала конусный; *21* — остов якоря; *22* — поверхности опорные

АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ

На тепловозах применяются щелочные железоникелевые и кислотные свинцовые аккумуляторные батареи (табл. 62.59).

62.7. РЕГУЛИРОВАНИЕ СИЛ ТЯГИ И ТОРМОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

ОГРАНИЧЕНИЯ ТЯГОВОЙ И ТОРМОЗНОЙ ОБЛАСТЕЙ

Благодаря обратимости тяговых электрических машин (ТМ) на электроподвижном составе (ЭПС) относительно просто реализуется электрическое торможение (ЭТ), включая и рекуперативное — с возвратом электрической энергии в ее источник в режиме тяги, что является важнейшим преимуществом ЭПС перед другими транспортными средствами.

Показанные на рис. 62.36 тяговая и тормозная области ЭПС (площади, ограниченные в координатах скорость движения v — сила тяги или торможения T предельными для каждого значения v значениями T) для всех разновидностей ЭПС с любыми типами ТМ (коллекторными ТМ постоянного и однофазного переменного тока и бесколлекторными трехфазного переменного тока, асинхронными, вентильными и индукторными) принципиально подобны.

Основным из ограничений силы T, обусловленных внешними по отношению к ЭПС факторами, является ограничение условиями сцепления, определяемое максимальным значением коэффициента сцепления колес с рельсами Ψ. Физическое значение Ψ определяется действием многих факторов и может изменяться в несколько раз (до пяти) в зависимости от загрязнения и износа рельсов, атмосферных воздействий, причем существенные изменения Ψ могут происходить даже в пределах одного оборота колеса. Вместе с тем реализуемое в процессе тяги и торможения значение $\Psi_к$ зависит от жесткости динамических тяговых и тормозных характеристик тягового электропривода (ТЭП), а также от конструкции механической части ЭПС [62.24]. Поэтому для каждого типа ЭПС экспериментально определяется используемая в эксплуатации зависимость $\Psi_к(v)$ и по формуле $T_\Psi = \Psi_к \Pi_0$,

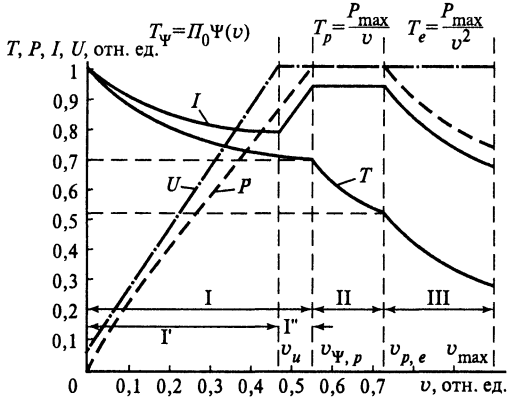


Рис. 62.36. Ограничения тяговой и тормозной областей ЭПС

где Π_0 — нагрузка от колесной пары на рельсы определяется ограничением T_Ψ в зоне I тяговой и тормозной областей.

Значение коэффициента $\Psi_к$ при увеличении скорости υ снижается, причем при малых его значениях более интенсивно. Общая закономерность изменения $\Psi_к(\upsilon)$ характеризуется формулой для грузового электровоза постоянного тока:

$$\Psi_к = 0{,}28 + \frac{3}{50 + 20\upsilon} - 0{,}0007\upsilon .$$

При увеличении υ в зоне I тяговой области мощность P, развиваемая ТМ, увеличивается пропорционально произведению $T\upsilon$. Реально мощность ТМ недостаточна для реализации T_Ψ при высоких υ. Поэтому при увеличении υ наступает ограничение T, обычно по мощности ТМ, но в общем случае — по мощности любого элемента электрооборудования, в частности тормозного резистора и даже по допустимому току в контактной сети. При дальнейшем увеличении υ реализуемая ЭПС мощность не должна превышать P_{max} и остается постоянной, а T_p в зоне II уменьшается обратно пропорционально увеличению υ.

В зоне II напряжение питания ТМ максимальное и относительно постоянное, следовательно, неизменен и ее ток. Поэтому при увеличении υ и частоты вращения ТМ ускоряется процесс коммутации тока в коллекторной ТМ или в преобразователе частоты и числа фаз (ПЧФ) ЭПС с бесколлекторными ТМ, что ухудшает условия работы коллекторно-щеточного аппарата ТМ или ПЧФ. При превышении значения $\upsilon_{p,e}$ ток ТМ должен быть уменьшен, так как в коллекторных ТМ достигается предельное значение реактивной ЭДС коммутируемой секции обмотки якоря e_r, которое при расчете по методике А.Б. Иоффе [62.25] составляет 6—8 В. При дальнейшем увеличении скорости ток якоря должен изменяться обратно пропорционально ее значению. Его зависимость от υ может быть рассчитана [62.26]:

$$I_я = 90\frac{\alpha\beta_к\left(u_к - \frac{a}{p} + \gamma + \varepsilon_к\right)D_{в.к}e_r}{u_к w^2 l_a \lambda_1 D_к \mu \upsilon}10^3 ,$$

где a — число пар параллельных ветвей обмотки якоря; p — число пар полюсов возбуждения; w — число витков в секции обмотки якоря; $u_к$ — число коллекторных пластин на паз якоря; λ_1 — проводимость потока рассеяния паза якоря; $\beta_к$ — коллекторное деление, см; γ — число коллекторных пластин, перекрытых щеткой; $\varepsilon_к$ — укорочение шага обмотки якоря в коллекторных делениях; l_a — длина сердечника якоря, см; $D_к$ — диаметр коллектора, см; $D_{в.к}$ — диаметр ведущего колеса, мм; μ — передаточное отношение редуктора.

Аналогично изменяется в зоне III ток в бесколлекторных ТМ вследствие его ограничения условиями коммутации в ПЧФ. Поэтому в зоне III мощность ТМ уменьшается обратно пропорционально υ и, следовательно, T_e — обратно пропорционально υ^2.

В некомпенсированных коллекторных ТМ постоянного тока в зоне III значение e_r может быть меньше допустимого, а ограничение тяговой (тормозной) области — определяться предельным максимальным межламельным напряжением, которое можно рассчитать [62.26]:

$$e_м = \frac{2pU_к}{\alpha K}\left(1 + 0{,}05625\frac{NI_я}{apw_в I_в}\right),$$

где $U_к$ — напряжение на коллекторе ТМ; K — число коллекторных пластин; α — коэффициент полюсного перекрытия; N — число стержней обмотки якоря; $w_в$ — число витков обмотки возбуждения; $I_в$ — ток обмотки возбуждения.

Используя эту формулу и нагрузочные характеристики ТМ, легко рассчитать [62.26] ограничение T значением $e_м$ в зоне III. Принципиально характер этой зависимости мало отличается от ограничения T значением e_r. Это обусловлено тем, что ТМ в зоне III не насыщены, и поэтому зависимость потока возбуждения Ф от $I_в$ близка к линейной. Но при $U_к$ = const поток возбуждения изменяется обратно пропорционально υ и, следовательно, также изменяется $I_в$. В то же время при $e_м$ = const и $I_я/I_в$ = = const. Поэтому $I_я$ тоже должен изменяться обратно пропорционально υ, как и при ограничении T значением e_r.

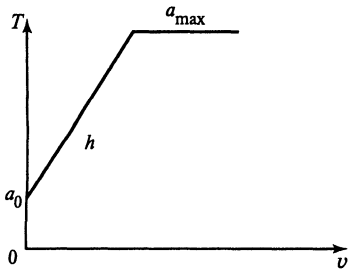


Рис. 62.37. Ограничения ускорений ЭПС при пуске

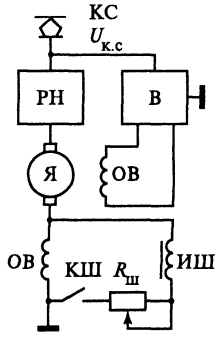


Рис. 62.38. Структурная схема регулирования силы тяги ЭПС постоянного тока

В компенсированных коллекторных ТМ постоянного тока в зоне III действует ограничение T по e_r.

В результате последовательного снижения T в зонах II и особенно III максимальные силы тяги и торможения при высоких скоростях движения в несколько раз меньше допустимых по условиям сцепления, что обусловливает необходимость предельного использования потенциальных возможностей ТЭП в этих зонах.

Кроме рассмотренных выше ограничений T в установившихся режимах имеются и их ограничения по условиям динамики ЭПС. При пуске пассажирского ЭПС сила тяги должна изменяться (рис. 62.37) с учетом ограничения начального ускорения $a_0 \le 0{,}4$ м/с^2 и его последующего увеличения без превышения $h \le 0{,}6$ м/с^3, а T_{max} дополнительно ограничена значением $a_{max} = 1{,}8$—$2{,}0$ м/с^2.

РЕГУЛИРОВАНИЕ СИЛЫ ТЯГИ ЭПС

Регулирование силы тяги ЭПС со всеми типами ТМ производится по принципиально одинаковому алгоритму: в начале пуска путем регулирования напряжения питания ТМ, а затем регулированием потока возбуждения. В наиболее явной форме этот алгоритм реализуется на ЭПС с коллекторными ТМ. На рис. 62.38 показано, что напряжение контактной сети $U_{к.с}$ подводится к якорю (Я) через регулятор напряжения (РН), а обмотка возбуждения (ОВ) может быть при использовании последовательного возбуждения (ПВ) включена в цепь якоря или при независимом возбуждении (НВ) питаться от возбудителя В. Практически на всем отечественном ЭПС используется ПВ, хотя НВ имеет существенные преимущества [62.26]. На трамваях и троллейбусах используется и смешанное возбуждение, когда работают обе показанные на рис. 62.38 обмотки возбуждения.

При ПВ регулирование Ф, называемое ослаблением поля, производится шунтированием обмотки возбуждения цепью из последовательно включенных резисторов $R_ш$ и индуктивного шунта (ИШ), которые включаются при помощи КШ (контактора включения шунта). Индуктивный шунт необходим для уменьшения приращений $I_я$ при скачкообразном изменении напряжения $U_{к.с}$. На эксплуатируемом ЭПС используется от двух до шести ступеней ослабления поля, осуществляемых за счет ступенчатого изменения сопротивления $R_ш$.

При большом разнообразии исполнений регуляторов напряжений они объединяются в группы со ступенчатым и с плавным регулированием $U_к$. На рис. 62.36 показаны изменения параметров ЭПС с коллекторными ТМ постоянного тока и плавным регулированием $U_к$ и $I_в$ при независимом возбуждении. Ограничения T по условиям динамики ЭПС в начальной стадии пуска могут выполняться при помощи регулирования $I_я$ или $I_в$ или $I_я = I_в$ при последовательном возбуждении. На рис. 62.36 эти дополнительные ограничения тяговой области не отражены.

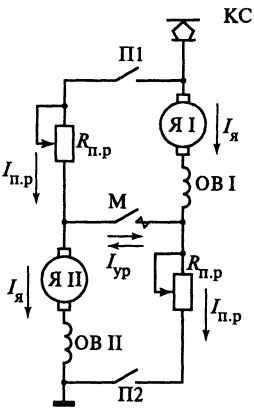
Падение напряжения в обмотках ТМ при $I_{я.ном}$ составляет несколько процентов от $U_{к.ном}$ и поэтому при $v = 0$ пусковое значение $I_я$ достигается при малом значении $U_к$, равном U_0. В начале пуска при небольшом, особенно у грузовых электровозов, приращении v ток $I_в$ достигает максимального значения и при дальнейшем увеличении v ЭДС ТМ $E = C\Phi v$ линейно увеличивается. Напряжение $U_к$ увеличивается, несмотря на возможное изменение $I_я$, практически пропорционально v. При $v_и$ рост $U_к$ прекращается. На большинстве типов ЭПС его разгон продолжается без увеличения $I_я$. Но можно продолжить пуск при $T \equiv \Psi_к$ за счет увеличения $I_я$. Этим зона I расширяется на величину I″ до $v_{\Psi p}$.

В зонах I″, II и III происходит регулирование T при постоянном $U_к$ за счет изменения $I_в$. В этих зо-

нах для изменения $I_я$ в широких пределах достаточно малого уменьшения или приращения $I_в$.

На ЭПС с бесколлекторными ТМ в процессе его разгона производится согласованное изменение напряжения питания ТМ U_1 и его частоты f_1. На ЭПС с вентильными ТМ используется тот же алгоритм управления, что и на ЭПС с коллекторными ТМ, но имеется дополнительная возможность изменения T при помощи регулирования угла опережения инвертора [62.27, 62.28]. На ЭПС с асинхронными ТМ для уменьшения потерь энергии используется закон частотного управления М.П. Костенко [62.29]:

$$\frac{U_1}{U_{1\,ном}} = \frac{f_1}{f_{1\,ном}}\sqrt{\frac{T}{T_{ном}}}.$$



Группировка	Контакторы	
	М	П
БСГ	X	—
ПП	X	X
РПГ	—	X

Рис. 62.39. Принципиальная схема и таблица замыканий контакторов для перегруппировки ТМ по схеме моста

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ ТМ

На ЭПС постоянного и переменного тока с коллекторными ТМ применяется дискретное и плавное регулирование напряжения $U_к$ на коллекторах ТМ.

РЕГУЛЯТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ ЭПС ПОСТОЯННОГО ТОКА С КОЛЛЕКТОРНЫМИ ТМ

В качестве регуляторов напряжения при дискретном управлении используются пусковые резисторы со ступенчатым изменением сопротивления. На ряде типов ЭПС схема включения ТМ в процессе его разгона не изменяется: на троллейбусах установлена только одна ТМ, на моторных вагонах электропоездов (ЭП) типов ЭР22, ЭР2Р, ЭР2Т, ЭД4 и на их модификациях четыре ТМ включены постоянно последовательно, а на трамвайных вагонах Т-3 две группы из двух последовательно соединенных ТМ включены постоянно параллельно. При этом достигается упрощение схем силовых цепей ЭПС, но велики потери энергии в пусковых резисторах, которые теоретически равны энергии, потребленной ТМ до их выхода на автоматическую, безреостатную характеристику. Для уменьшения реостатных потерь применяют перегруппировки ТМ, причем одна перегруппировка снижает их вдвое, а две — в 3 раза [62.2].

Для перегруппировок используются разные способы и схемы [62.30], иногда даже, как на электровозе ЧС2Т, два разных способа на одной единице ЭПС. На рис. 62.39 приведена схема перегруппировки мостовым способом, теоретически позволяющая осуществить ее без изменения сил тяги всех ТМ. В процессе реостатного пуска с последовательным соединением ТМ, их якорей и обмоток возбуждения сопротивление включенного в их цепь пускового резистора ступенями уменьшается до нуля и образуется безреостатная сериесная группировка (БСГ), на которой приложенное к каждой группе ТМ напряжение равно половине напряжения $U_{к.с}$ в контактной сети. Затем пусковые резисторы отключаются от цепи тока якорей и разбиваются на две группы с равными сопротивлениями, которые через разомкнутые контакторы П1, П2 подсоединяются параллельно ТМ. Перегруппировка начинается включением контакторов П1, П2, которыми через замкнутый мостовой контактор М к контактной сети подключаются последовательно соединенные группы пусковых резисторов, т.е. образуется переходная позиция (ПП). При этом теоретически режим работы ТМ не изменяется и если $I_{п.р} = I_я$, ток в контакторе М исчезает. В этом случае при размыкании контактора М, которым заканчивается перегруппировка, $I_я$ не изменяется и, следовательно, перегруппировка происходит без толчков силы тяги. Реально $I_{п.р} \neq I_я$ и их разность — уравнительный ток $I_{ур}$ течет через контактор М. При выключении контактора М в рассматриваемом режиме могут быть незначительные толчки силы тяги, но главная неприятность состоит в плохой работе контактора М при малых $I_{ур}$ из-за неэффективного дугогашения. Поэтому предпринимаются меры для устранения тока $I_{ур}$. Одной из них является выбор $R_{п.р}$, при котором $I_{п.р} > I_я$ с включением в цепь контактора М диода. При независимом возбуждении возможно достижение $I_я = I_{п.р}$ за счет регулирования тока $I_в$.

После отключения контактора М образуется схема реостатной параллельной группировки (РПГ) и при ступенчатом выключении $R_{п.р}$ уменьшается падение напряжения в них. Напряжение на коллекторах $U_к$ достигает значения $U_{к.с}$. В результате образуется схема безреостатной параллельной

группировки (БПГ) и регулирование напряжения заканчивается.

Ступенчатое регулирование сопротивления пусковых резисторов осуществляется как индивидуальными, так и групповыми контакторами (реостатными контроллерами). Для увеличения числа ступеней изменения $R_{п.р}$ при том же числе контакторов используются различные способы изменения схем соединений секций пусковых резисторов при регулировании их сопротивлений $R_{п.р}$ [62.30]. Недостатками реостатного регулирования напряжения считаются большие потери энергии в пусковых резисторах и снижение реализуемой силы тяги из-за ее колебаний при пуске. Действительно, реостатные потери на ЭПС без перегруппировок ТМ достигают 40 % у трамваев и троллейбусов и 20 % у электропоездов от общего потребления энергии в режиме тяги, но при использовании одной перегруппировки они снижаются до 10 % у электропоездов и до 8 % у вагонов метрополитена, а применение энергосберегающего алгоритма управления пуском, исключающего реостатные потери на параллельной группировке ТМ, позволяет уменьшить их до 5 % у электропоездов и до 4 % у вагонов метрополитена. Вместе с тем реализуемые пусковые силы тяги определяются не столько их колебаниями, сколько динамическими характеристиками тягового привода в режимах потери сцепления колес с рельсами.

Исключить реостатные потери и колебания силы тяги можно, используя *импульсный регулятор напряжения*, принципиальная схема которого и поясняющие ее работу диаграммы показаны на рис. 62.40. Для реализации импульсного управления (ИУ) достаточно включить в цепь $I_я$ коммутатор, в качестве которого на эксплуатируемом ЭПС используется импульсный тиристорный преобразователь (ИП), и зашунтировать ТМ обратным диодом VD_0. Цепь ТМ обладает индуктивностью, и поэтому $I_я$ при включенном ИП возрастает, а при выключенном — снижается, замыкаясь через VD_0, относительно медленно. При постоянной частоте f включения ИП, определяющей период времени работы T импульсного регулятора напряжения (ИРН), изменением времени $t_в$ замкнутого состояния ИП регулируется подведенное к ТМ напряжение $U'_я = t_в U'_{к.с}/T = \lambda U'_{к.с}$, где λ — коэффициент заполнения ИРН. При использовании в ИРН только ТП и VD_0 пульсации тока $I_я$ и потребляемого из контактной сети тока $I_{к.с}$ намного превышают допустимые значения.

Пульсации тока якоря $\Delta I_я = I_{я max} - I_{я min}$, ухудшают коммутацию ТМ и вызывают дополнительные потери. Приближенно $\Delta I_я = U'_{к.с}\,\lambda\,(I - \lambda')/fL_\Sigma$, а коэффициент пульсации $K_п = \Delta I_я / 2I_{я.ср}$. Его максимальное значение при $\lambda = 0{,}5$ и допустимое — при λ_{max} составляет 0,05—0,1 [62.31, 62.32]. Значение $K_п$ уменьшается при увеличении f и L_Σ — суммарной индуктивности цепи $I_я$. При используемых на ЭПС частотах 300—400 Гц индуктивность ТМ недостаточна для ограничения $K_п$ допустимым значением. Поэтому в цепь ТМ включается дополнительная индуктивность $L_я$. При $I_я = I_{о.в}$ пульсация последнего вызывала бы пульсации потока Ф и ЭДС ТМ. Для ослабления их отрицательных последствий обмотка ОВ шунтируется резистором $R_ш$, уменьшающим ток $I_в$ ориентировочно на 5 %.

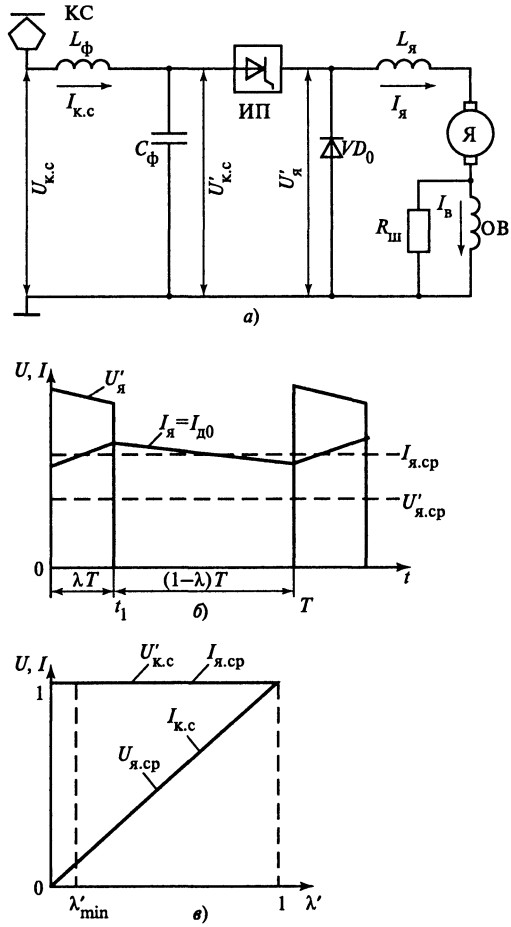


Рис. 62.40. Принципиальная схема (*а*), диаграмма электрических процессов (*б*) и энергетические показатели (*в*) импульсного регулятора напряжения

Гораздо более жесткие требования предъявляются к ограничению пульсаций $I_{к.с}$, так как на железнодорожном транспорте и в метрополитене он протекает по рельсовым цепям, по которым передаются и кодовые сигналы, обеспечивающие безопас-

ность движения поездов. Поэтому даже при потреблении поездами токов в несколько килоампер их обусловленная пульсациями переменная составляющая не должна превышать десятых долей ампера. Это вынуждает включать между контактной сетью и ИРН эффективный фильтр, в качестве которого практически всегда используется Г-образный *LC*-фильтр. Для уменьшения емкости конденсатора $C_ф$ и индуктивности фильтра $L_ф$ используют подключения к одному фильтру нескольких (преимущественно двух) ИРН, при смещении включения которых на I/n периода T частота пульсаций тока и напряжения фильтра $f_ф = nf$. Этим достигается снижение максимальных пульсаций $I_{к.с}$ и напряжения $U_ф$ на $C_ф$, которые вычисляются: $\Delta I_{к.с} = I_{я.ср}/(64f^2n^2L_ф C_ф)$ и $\Delta U_ф = I_{я.ср}/8fnC_ф$ [62.31].

Для исключения резонансных явлений при выборе параметров *LC*-фильтра необходимо обеспечить достаточную разность $f_ф$ и его собственной частоты автоколебаний $f_0 = 1/2\pi\sqrt{C_ф L_ф}$, которая выбирается в 2—3 раза меньшей $f_ф$ [62.31]. Кроме того, нужно учитывать возможность генерирования фильтром в КС переменного тока при скачках $U_{к.с}$ или нагрузки ИРН, а также необходимость ограничения $U_ф$ при возникновении перенапряжений в КС для защиты полупроводниковых приборов ИРН.

Наличие *LC*-фильтра обеспечивает потребление из КС практически постоянного тока $I_{к.с}$. При включенном ТП энергия потребляется как от КС, так и из конденсатора $C_ф$, напряжение которого при $U'_{к.с} = U'_я$ снижается.

В процессе пуска ЭПС с идеальным, без потерь энергии, ИРН при увеличении λ от 0 до 1 среднее значение тока $I_я$ поддерживается равным заданному (см. рис. 62.40, *в*), принятому за единицу, и $U_я$ линейно увеличивается от 0 до 1, т.е. до $U'_{к.с}$. Аналогично изменяется и ток $I_{к.с}$. Следовательно, $U_я = \lambda U_{к.с}$; $I_{к.с} = \lambda I_я$ и $I_{к.с}U_{к.с} = I_{я.ср}U_{я.ср}$, т.е. пуск происходит без потерь энергии в регуляторе напряжения. В этом состоит одно из главных преимуществ ИУ, которое послужило основанием для начала работ по созданию ЭПС с ИУ. На основании идеализированной оценки показателей ИУ были наиболее четко и последовательно сформулированы его потенциальные преимущества: повышение надежности электрооборудования благодаря устранению контактной коммутирующей аппаратуры; безреостатный плавный пуск, позволяющий наряду с устранением реостатных потерь повысить ускорение поезда; плавное регулирование скорости во всем диапазоне ее изменения; плавное рекуперативное торможение до малой скорости движения при сохранении последовательного возбуждения ТМ; устранение необходимости перегруппировок ТМ; возможность постоянного параллельного соединения ТМ, улучшающего тяговые свойства ЭПС; возможность повышения на 10—20 % напряжения на коллекторах ТМ и соответствующего увеличения реализуемой ими мощности; защита ТМ от воздействия перенапряжений и колебаний напряжения в КС; простота автоматизации операций по управлению ЭПС [62.32].

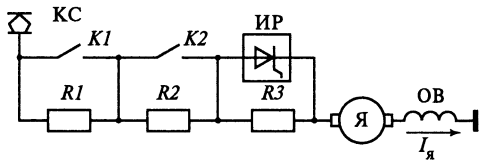


Рис. 62.41. Принципиальная схема плавного межступенчатого регулирования сопротивления пускового резистора

Однако реальные показатели ИУ оказались существенно хуже ожидавшихся. В частности, использование режимов работы ТМ с $U_к < U_{к.с}$, особенно с $U_к = 0{,}5U_{к.с}$, оказалось невозможным из-за низких энергетических показателей ЭПС при постоянной работе ИРН с $\lambda < 1$, особенно с $\lambda = 0{,}5$. Более того, при использовании ИРН только для регулирования $U_к$ от 0 до $U_{к.с}$ сумма потерь энергии во всех устройствах ИУ и дополнительных пульсационных потерь в ТМ [62.33, 62.34] превышает потери в ТЭП с дискретно-резисторным управлением (ДРУ). В итоге практически по всем показателям ЭПС с ИУ уступает ЭПС с ДРУ с перегруппировками ТМ, особенно при использовании на последнем энергосберегающего алгоритма управления [62.35].

Для уменьшения числа контакторов и секций пусковых резисторов на ЭПС с резисторным управлением может использоваться межступенчатое плавное регулирование сопротивления пусковых резисторов при помощи импульсного регулятора. При этом достигается плавное регулирование сил тяги и реостатного торможения. На рис. 62.41 показана схема с тремя секциями пусковых резисторов, хотя их количество может быть любым. В начале пуска контакторы *K1* и *K2* разомкнуты и импульсный регулятор ИР выключен, сопротивление пусковых резисторов максимальное. С увеличением λ ИР от 0 до 1, сопротивление резистора *R3* плавно уменьшается до нуля. Затем замыкается контактор *K1*, а ИР одновременно вновь выключается, и далее повторяется процесс плавного выключения *R3*. Такая схема использована на скоростном электропоезде ЭР200 [62.36].

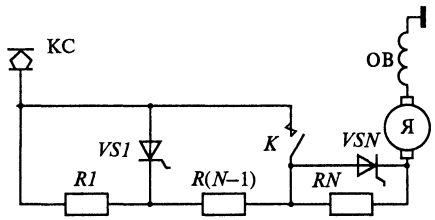


Рис. 62.42. Схема регулирования сопротивления пускового резистора с полупроводниковыми коммутирующими элементами

Другой возможностью уменьшения количества контакторов и секций пусковых резисторов на ЭПС с ДРУ является использование в качестве коммутирующих элементов в схеме регулирования сопротивления пусковых резисторов полупроводниковых вентилей [62.31]. Упрощенная схема такого РН с использованием тиристоров показана на рис. 62.42. В ней последовательно включены $N-1$ резистор с равными и относительно малыми сопротивлениями и резистор RN, причем $\sum_{1}^{N-1} R = RN$. Резисторы от 1-го до $N-2$-го выключаются из цепи $I_я$ шунтированием их тиристорами, а $N-1$ — включением контактора K, что обеспечивает выключение всех включившихся ранее тиристоров. Затем выключается контактор K и одновременно включается VSN и резисторы $1\ldots(N-1)$ повторно выключаются из цепи $I_я$. Такая схема использована на созданных по разработкам МЭИ опытных моторных вагонах метрополитена, на которых при 18 тиристорах получено 48 пусковых ступеней [62.37], т.е. достигнуто практически плавное регулирование силы тяги.

РЕГУЛЯТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ ЭПС ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С КОЛЛЕКТОРНЫМИ ТМ

В отечественной классификации к ЭПС переменного тока относят все его разновидности, получающие питание от контактной сети переменного тока, независимо от типа используемых на нем ТМ. Основным преимуществом системы тяги переменного тока является возможность значительного, теоретически неограниченного, повышения $U_{к.с}$, которое при помощи тягового трансформатора (ТТ) (рис. 62.43) с коэффициентом трансформации $K_т$ снижается до оптимального для устройств ТЭП значения $U_{к.с}/K_т$. Регулирование напряжения питания ТМ производится РН и может быть ступенчатым или плавным.

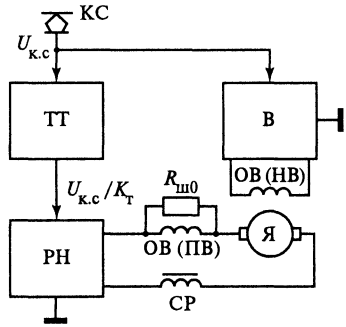


Рис. 62.43. Структурная схема регулирования силы тяги ЭПС переменного тока с коллекторными ТМ

Ступенчатое регулирование производится путем изменения числа последовательно включенных секций первичной или вторичной обмотки ТТ, т.е. изменением его $K_т$. При регулировании на стороне низкого напряжения ТТ, обычно называемого низковольтным (НВР), снижение $U_{к.с}$ до $U_{т.м}$ с его изменением от нуля до номинального производится переключением секций вторичной обмотки ТТ (рис. 62.44, *а*). Преимуществом НВР является простота, недостатком — необходимость коммутации больших токов и ограниченное число секций ТТ из-за больших габаритных размеров их выводов. При регулировании на стороне высокого напряжения — высоковольтном регулировании (ВВР) — подведенное к понижающему трансформатору (ПТ) с неизменным $K_т$ напряжение изменяется от нуля до $U_{к.с}$ при помощи автотрансформатора (АТ). При использовании в схеме ВВР (рис. 62.44, *б*) двух отдельных АТ и ПТ их суммарная установленная мощность превышала бы мощность ТТ в схеме НВР в 2 раза. Для снижения массы и габаритных размеров ТТ при ВВР используется конструкция (рис. 62.44, *в*) с размещением обмоток обоих трансформаторов на одном сердечнике, средний стержень которого имеет вдвое большее сечение по сравнению с крайними. Благодаря этому установленная мощность трансформатора снижается и превышает типовую мощность ТТ при НВР только в 1,44 раза [62.30].

Недостатками ВВР по сравнению с НВР являются: большая масса ТТ и пониженные значения коэффициентов полезного действия η и мощности λ на промежуточных ступенях регулирования $U_{т.м}$. Преимущества обусловлены простотой получения большого количества выводов обмотки АТ, а следовательно, числа ступеней регулирования $U_{т.м}$, и снижением массы и габаритных размеров коммутирующей аппаратуры — переключателя ступеней напряжения ТТ. Последнее обстоятельст-

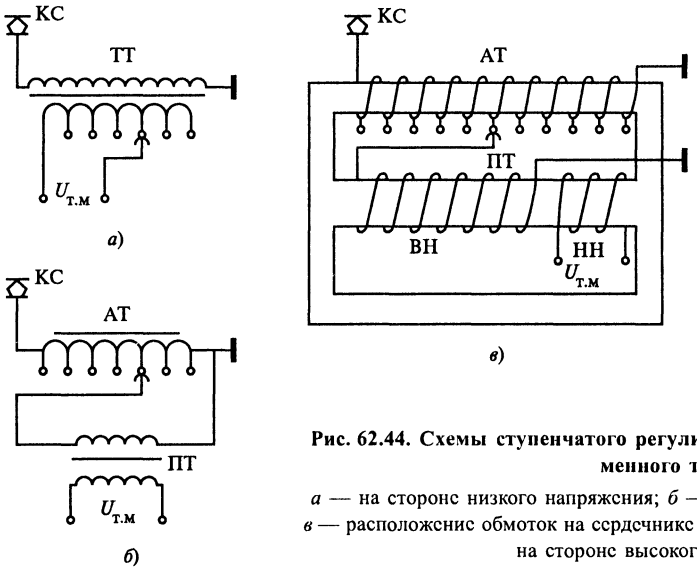


Рис. 62.44. Схемы ступенчатого регулирования напряжения ЭПС переменного тока:

а — на стороне низкого напряжения; *б* — на стороне высокого напряжения; *в* — расположение обмоток на сердечнике трансформатора при регулировании на стороне высокого напряжения

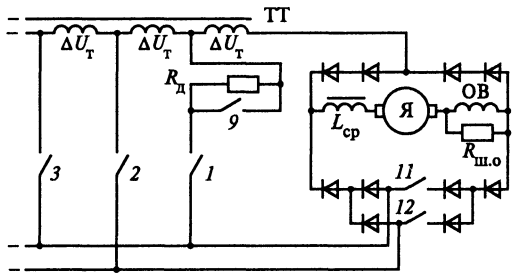
во имеет особое значение для ЭПС с коллекторными ТМ переменного тока, который широко используется в Австрии, Германии, Норвегии, Швейцарии, Швеции. Во время создания этого типа ЭПС переменного тока не существовало пригодных для практического применения выпрямителей, поэтому использование коллекторных ТМ переменного тока было вынужденным.

Переменный магнитный поток главных полюсов вынуждает использовать шихтованный магнитопровод статора и создает трансформаторную ЭДС в обмотке якоря, которая резко усложняет задачу обеспечения приемлемого качества коммутации тока в якоре. Для решения этой проблемы приходится уменьшать $U_{т.м}$ до 500 В при соответствующем увеличении $I_я$ и, следовательно, длины коллектора, а также увеличивать число полюсов до 8—12 при обязательном использовании компенсационной обмотки, включать между коллекторными пластинами и секциями обмотки якоря резисторы и шунтировать дополнительные полюсы резисторами. Эти меры приводят к снижению КПД рассматриваемых ТМ по сравнению с коллекторными ТМ постоянного тока на несколько процентов. Кроме того, у коллекторных ТМ переменного тока выше износ щеток [62.38]. По оценкам немецких специалистов, при частоте $16^2/3$ Гц мощность коллекторных ТМ однофазного тока меньше чем у ТМ постоянного тока в 1,4 раза.

Увеличение тока якоря $I_я$ однофазных коллекторных ТМ в 2—3 раза по отношению к коллекторным ТМ постоянного тока практически вынуждает использовать ВВР на ЭПС с этим типом ТМ. Вместе с тем ВВР используется и на ЭПС с коллекторными ТМ постоянного тока, в частности оно применено на всех поставленных в СССР электровозах переменного тока серий К, Ф и ЧС [62.39]. На пассажирских электровозах ЧС4 [62.40] и ЧС8 обмотка АТ имеет 33 вывода и регулирование $U_{т.м}$ осуществляется 32 ступенями, причем переход на каждую следующую позицию производится подключением очередной секции ТТ вначале через переходный резистор, который затем, после отключения работавшей на предыдущей позиции секции АТ, закорачивается, т.е. в схеме регулирования $U_{т.м}$ имеется 32 промежуточных неходовых позиции. Выпрямленное напряжение $U_{т.м}$ на электровозах ЧС4 изменяется в пределах от 0 до 1040 В, а токи в обмотке АТ составляют 300—400 А при часовой мощности ТМ 5100 кВт.

На всех изготовленных в СССР электровозах и электропоездах переменного тока, кроме построенных в 1961 г. первых трех восьмиосных электровозов ВЛ80В и выпущенного в 1962 г. электровоза ВЛ62-001 с ВВР [62.39], используется НВР.

При НВР из-за увеличения по отношению к ВВР коммутируемых токов в 20—40 раз практически невозможно использовать число секций вторичной обмотки ТТ, равное необходимому числу ступеней регулирования $U_{т.м}$. Ограниченное число секций вторичной обмотки ТТ вынуждает использовать различные схемные решения для увеличения числа ступеней регулирования напряжения по отношению к числу секций обмотки ТТ [62.30]. Одним из таких решений является показанная на рис. 62.45 используемая на всех отечественных электропоездах (ЭП) переменного тока типа ЭР9 схема с вентильным переходом и несимметричным регулированием напряжения по полупериодам [62.41, 62.42], которая обеспечивает удвоение числа ступеней регулирования напряжения по отноше-



а)

Ступень РН	Замкнутые контакторы	Форма U_d	U_d, отн. ед.
1	*1, 11, 12*		$\approx 0{,}5\,\Delta U$
2	*1, 9, 11, 12*		ΔU_d
3	*1, 2, 9, 11*		$1{,}5\,\Delta U$
4	*1, 2, 9, 11, 12*		$2\,\Delta U$
5	*2, 3, 9, 12*		$2{,}5\,\Delta U$

б)

Рис. 62.45. Схема (*а*) межступенчатого несимметричного регулирования напряжения с вентильным переходом и поясняющая ее работу таблица (*б*)

нию к числу секций обмотки ТТ (на электропоездах ЭР9 это 16 и 8).

На рис. 62.45, *а* сохранены обозначения контакторов, использованные в схеме ЭП. Работа схемы поясняется таблицей на рис. 62.45, *б*. На первой, маневровой, позиции напряжение $\Delta U_т$ первой секции ТТ подводится к мостовому выпрямителю через добавочный резистор $R_д$, поэтому подведенное к ТМ напряжение меньше расчетного значения выпрямленного напряжения ΔU_d одной секции ТТ. На второй позиции $R_д$ закорачивается контактором *9* и $U_{т.м}$ увеличивается до ΔU_d. На третьей позиции замыкается контактор *2* и размыкается контактор *12*, но короткого замыкания второй секции ТТ при одновременно включенных контакторах *1* и *2* не происходит, так как встречно при обеих полярностях напряжения $\Delta U_т$ включены диоды, а $U_{т.м}$ увеличивается до $1{,}5\Delta U_d$ благодаря возникающему режиму несимметричного выпрямления: при «+» слева к цепи ТМ прикладывается напряжение $2\Delta U_т$, а при «+» справа вследствие разомкнутого состояния контактора *12* — только $\Delta U_т$. После замыкания контактора *12* восстанавливается режим симметричного выпрямления, а на пятой позиции при замкнутых контакторах *2*, *3* и *12* выпрямление становится вновь несимметричным. На последующих ступенях регулирования напряжения алгоритм работы схемы повторяется.

При питании ТМ непосредственно пульсирующим напряжением выхода выпрямительного моста пульсации тока в них ухудшают коммутацию и вызывают большие дополнительные потери. Поэтому в цепь ТМ включают сглаживающие реакторы, индуктивность $L_{ср}$ которых выбирается исходя из допустимого коэффициента пульсации тока $K_п = (I_{я\,max} - I_{я\,min})/I_{я.ном}$ не более 30 %. Для снижения пульсаций потока возбуждения при такой пульсации тока в обмотках возбуждения последние постоянно шунтированы резисторами $R_{ш.о}$, сопротивление которых выбирается исходя из коэффициента ослабления поля $\beta_о \approx 0{,}95$. В результате этих мероприятий вызванное пульсацией тока увеличение потерь в активных сопротивлениях снижается до 5 % [62.30], а добавочные потери от переменной составляющей тока в ТМ, называемые пульсационными, уменьшаются до 1—2 % [62.43].

Несимметричное регулирование создает несимметричную нагрузку тяговой сети и системы внешнего электроснабжения. Но при использовании его на ЭП действие этого недостатка ослабляется несовпадением во время пуска позиций групповых аппаратов разных моторных вагонов. Кроме того, можно использовать на моторных вагонах несимметрию нагрузки в другой полупериод. Малое число ступеней регулирования напряжения на ЭП определяется количеством позиций групповых аппаратов и приемлемо для эксплуатации.

На электровозах необходимо большее число ступеней регулирования напряжения и нежелательно несимметричное потребление тока из КС. Поэтому используются схемы, позволяющие при симметричном потреблении тока из КС увеличить число пусковых ступеней при том же числе секций обмотки ТТ. На всех отечественных электровозах переменного тока со ступенчатым регулированием $U_{т.м}$ используется разделение обмотки ТТ на регулируемую и нерегулируемую части, что позволяет почти удвоить число пусковых ступеней при том же числе секций ТТ. На электровозах ВЛ80 (рис. 62.46, *а*) напряжение холостого хода нерегулируемой обмотки равно 638 В при $U_{к.с.ном} = 25$ кВ, а каждой из четырех секций регулируемой — 145 В. При этом увеличение $U_{т.м}$ до половины от номинального может осуществляться двумя способами: увеличением напряжения регулируемой обмотки при выключенной нерегулируемой или уменьшением первого при встречном включении обеих обмоток. Затем обе обмотки включаются согласно и дальнейшее увеличение напряжения до максимального достигается за счет увеличения напряжения регулируемой обмотки.

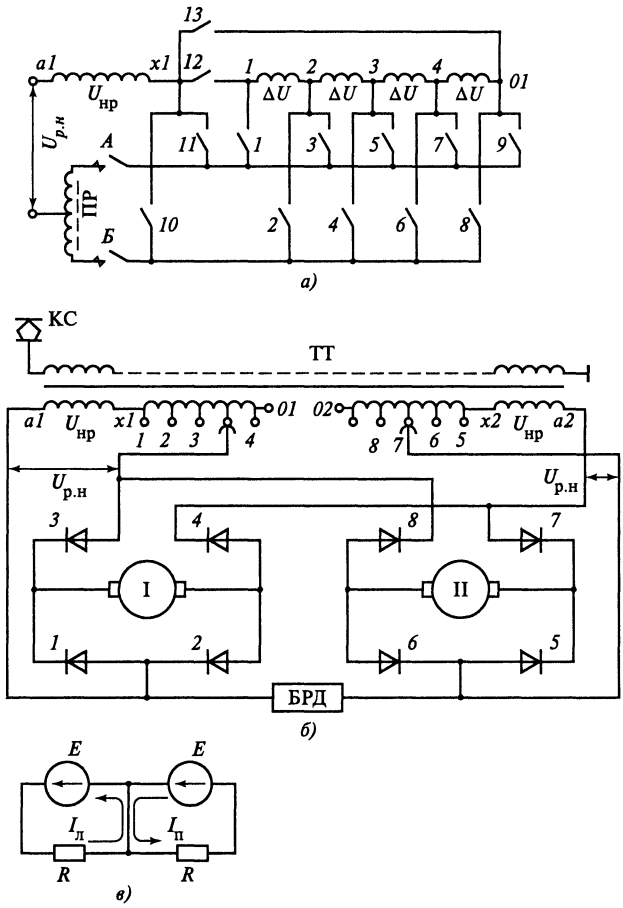


Рис. 62.46. Схема ступенчатого регулирования напряжения с разделением вторичной обмотки трансформатора на регулируемую и нерегулируемую части (*а*), схема ее использования на отечественных электровозах с симметрируемым несимметричным регулированием (*б*) и поясняющая ее работу принципиальная схема (*в*)

Для переключения ступеней напряжения ΔU без разрыва токов в схеме рис. 62.46, *а* может быть использован вентильный переход, который был применен на электровозе ВЛ62-002, но без несимметричного регулирования. На всех других электровозах серий ВЛ60 и ВЛ80 для увеличения числа ступеней регулирования $U_{т.м}$ вдвое используется деление на промежуточных ступенях напряжения ΔU секций ТТ пополам. Оно может быть выполнено при помощи включения в цепь тока ТТ дополнительного резистора, как это сделано на электровозах с ВВР и на маневровой позиции ЭП ЭР9 (см. рис. 62.45), а также с использованием резисторного делителя напряжения. Очевидным недостатком этих способов являются большие потери энергии в резисторах. Поэтому на отечественных электровозах используются индуктивные делители напряжения — переходные реакторы (ПР).

На всех типах отечественных электровозов переменного тока со ступенчатым регулированием $U_{т.м}$, кроме электровозов ВЛ80СМ и поставленных в КНР электровозов серии 8G, в начале пуска используется встречное включение нерегулируемой и регулируемой частей обмотки ТТ. На первой, маневровой, позиции (см. рис. 62.46) замкнуты контакторы *13*, *1* и *А*. При этом у электровозов серий ВЛ80К, ВЛ80Т и ВЛ80С напряжение $U_{р.п}$ выхода ТТ равно разности напряжений нерегулируемой обмотки $U_{нр} = 638$ В и четырех секций регулируемой обмотки $U_{рег} = 4\Delta U = 580$ В, т.е. 58 В. Под нагрузкой оно дополнительно снижается за счет падения напряжения в полуобмотке переходного реактора. На второй ступени дополнительно включены контакторы *2* и *Б*. При этом переходный реактор работает делителем напряжения и $U_{р.п}$ увеличивается на $\Delta U/2$

вследствие уменьшения на это же значение $U_{рег}$. В процессе включения третьей ступени вначале кратковременно размыкается контактор *А* с дугогашением, а затем отключается обесточенный контактор *1* и замыкается контактор *3*. В результате обе намотанные бифилярно полуобмотки переходного реактора подключаются к одному выводу *2* и $U_{р\,п}$ увеличивается еще на $\Delta U/2$. На этой, ходовой, позиции потери в переходном реакторе минимальны и определяются активными потерями в его обмотках, так как теоретически магнитного потока в сердечнике переходного реактора нет.

Далее описанный алгоритм работы схемы повторяется и после включения контакторов *8* и *9*, когда $U_{р\,п} = U_{пр} \approx U_{max}/2$, производится переход на согласное включение обмоток ТТ. Для этого замыкаются контакторы *10* и *11* и размыкаются *8* и *9*, затем выключается контактор *13* и включается *12*. В реальной схеме переход осуществляется при переключении электрического контактора группового (ЭКГ) с 17-й позиции на 18-ю с использованием четырех дополнительных промежуточных позиций ЭКГ. Первая после перехода на согласное включение обмоток ступень увеличения $U_{р\,п}$ на $\Delta U/2$ достигается выключением контактора *10* (с предварительным кратковременным разрывом цепи тока контактором *Б*) и включением контактора *2*. При замкнутых контакторах *11*, *2*, *А* и *Б* переходной реактор работает делителем напряжения. Дальнейшее увеличение $U_{р\,п}$ до максимального, равного 1218 В, производится включением секций регулируемой обмотки с тем же алгоритмом работы контакторов, что и при встречном включении.

Использование двух контакторов *А* и *Б* с дугогашением позволяет не применять его на остальных контакторах, что снижает массогабаритные показатели и стоимость ЭКГ.

Все отечественные электровозы со ступенчатым регулирование $U_{т\,м}$ имеют две двух- или трехосные тележки в одной секции электровоза. Схема силовых цепей регуляторов напряжения одной секции электровоза, питающих группы I и II ТМ двух тележек через мостовые выпрямительные агрегаты (ВА) показана на рис. 62.46, *б*. Для увеличения числа ступеней регулирования силы тяги секции электровоза при том же числе ступеней регулирования $U_{р\,п}$ каждого из РН используется схема соединения плеч двух ВА, обеспечивающая протекание токов «левого» и «правого» РН в один полупериод по группам «своих» ТМ, а в другой — «чужих»: в один полупериод «левый» РН питает группу I ТМ, а «правый» — группу II; в другой полупериод «левый» РН питает группу II ТМ, а «правый» — группу I. Этим достигается одинаковое приращение сил тяги обеих тележек при увеличении $U_{р\,п}$ только одного РН. В результате при кратности регулирования одного РН $\Delta U_{р\,п} = \Delta U/2 = 72{,}5$ В подведенное к обоим ВА напряжение изменяется одинаковыми ступенями $\Delta U_{р\,п}/2 = 36$ В. На позициях регулирования $U_{т\,м}$ с неравными значениями $U_{р\,п}$ «левого» и «правого» РН подведенное к ВА напряжение несимметрично, как на позициях *3* и *5* в схеме рис. 62.45, но при равных токах обеих групп ТМ нагрузка ТТ и намагничивание его сердечника симметричны и, следовательно, симметрична нагрузка КС.

При полярности $U_{р\,п}$ с плюсом справа (рис. 62.46, *б*, на котором сохранены используемые на заводских схемах обозначения выводов обмоток ТТ) токи обоих РН протекают по «своим» группам ТМ по очевидным цепям: «левого» РН от вывода *4* через вентили *3* и *2* к выводу *a1* и «правого» — от вывода *a2* через вентили *7* и *6* к выводу *7*.

При обратной полярности $U_{р\,п}$, в другой полупериод, нет очевидных цепей для замыкания токов РН, текущих по «своим» группам ТМ, но есть цепи для токов, протекающих по «чужим» группам. При этой полярности $U_{р\,п}$ питание ТМ группы I от вывода *a1* своего «левого» РН может быть только по цепи вентилей *1* и *4*, но последний не имеет прямого соединения с четвертым выводом ТТ. По проводу, в который включен блок реле дифференциальной защиты (БРД) ток от вывода *a1* через вентили *5* и *8* и группу II ТМ подведен к выводу *4* обмотки ТТ. Аналогично при рассматриваемой полярности $U_{р\,п}$ протекает ток и «правого» РН: от вывода *7* через БРД, вентиль *1*, ТМ группы I, вентиль *4* к выводу *a2* обмотки ТТ. Этими, формально безупречными, соображениями подтверждается высказанное ранее положение о питании в рассматриваемый полупериод $U_{р\,п}$ обеих групп ТМ от «чужих» РН. Но в них есть и некоторое противоречие: токи по проводу от БРД от «левого» и «правого» РН текут в разные стороны, поэтому при их равенстве ток в этом проводе отсутствует и появляется только при их неравенстве, что и вызывает срабатывание БРД, в частности, при неисправностях в цепях ТМ одной из групп. Это противоречие состоит в том, что тока в проводе с БРД нет, а токи в группах ТМ есть. Но это противоречие мнимое, так как в рассматриваемом режиме работы схемы один и тот же ток протекает последовательно по всем элементам схемы: группам тяговых машин I и II и обмоткам обоих РН. При этом образуется схема, аналогичная показанной на рис. 62.46, *в*, в которой два источника ЭДС *Е* питают два резистора *R*, а ток в закорачивающем их средние точки проводе равен нулю. В схеме рис. 62.46, *б* ток в рассматриваемом полупериоде $U_{р\,п}$ протекает по цепи: вывод *a1*, вентиль *1*, группа I ТМ, вентиль *4*, выводы *a2* и *7*, вентиль *5*, группа II ТМ. вентиль *8* и вывод *4*.

Схема рис. 62.46 при 14 выводах обмотки ТТ и 39 позициях ЭКГ дает 33 ступени регулирования $U_{т.м}$, но только каждая пятая из них является ходовой, на которой разрешается длительная работа электровоза. На этих девяти позициях (1, 5 — 29, 33) соединения обмоток обоих РН симметричны и оба вывода каждого переходного реактора подключены к одному выводу ТТ.

Главным доводом для обоснования использования на первых ступенях регулирования $U_{т.м}$ отечественных электровозов встречного включения обмоток ТТ было достигаемое при этом снижение приращений токов ТМ на начальных позициях вследствие большого реактивного сопротивления обмоток ТТ, что, якобы, улучшает тяговые свойства электровоза благодаря повышению плавности регулирования силы тяги при пуске. Ошибочность этого предположения была экспериментально показана еще в начале 60-х годов на электровозе ВЛ60-317 [62.44], на котором встречное включение обмоток ТТ было заменено согласным. В результате резко увеличилась жесткость тяговых характеристик на первых пусковых позициях, которая приблизилась к жесткости характеристики сцепления, что снизило вероятность возникновения разносного боксования при неизбежных срывах сцепления и повысило тяговые свойства локомотива [62.24, 62.26]. В итоге тяговые свойства электровоза резко улучшились, несмотря на значительное увеличение колебаний силы тяги на первых ступенях ее регулирования. Несмотря на этот опыт, согласное включение было внедрено только спустя более четверти века на электровозах 8G и ВЛ80СМ. Эксплуатация последних, отличающихся от аналогичных по электрооборудованию электровозов ВЛ80С (кроме замены встречного включения обмоток ТТ согласным) использованием в связях кузова с тележками наклонных тяг, подтвердила существенное улучшение тяговых свойств электровозов ВЛ80СМ по сравнению с ВЛ80С: у них вес поезда увеличился на 13 % (некоторая часть этой добавки реализуемой силы тяги может быть отнесена на счет наклонных тяг).

Кроме того, у электровозов ВЛ80СМ при том же ЭКГ увеличилось число ступеней регулирования $U_{т.м}$ до 36 против 33 у ВЛ80С и в 1,2 раза уменьшился расход песка.

Рассмотренная отечественная система ступенчатого регулирования $U_{т.м}$ в рациональном варианте с согласным включением регулируемой и нерегулируемой обмоток ТТ при относительно малом числе контакторов ЭКГ и выводов ТТ обеспечивает приемлемую дискретность регулирования силы тяги и удовлетворительные противобоксовочные, а следовательно и тяговые, свойства электровозов. В то же время, использование контакторов с любым

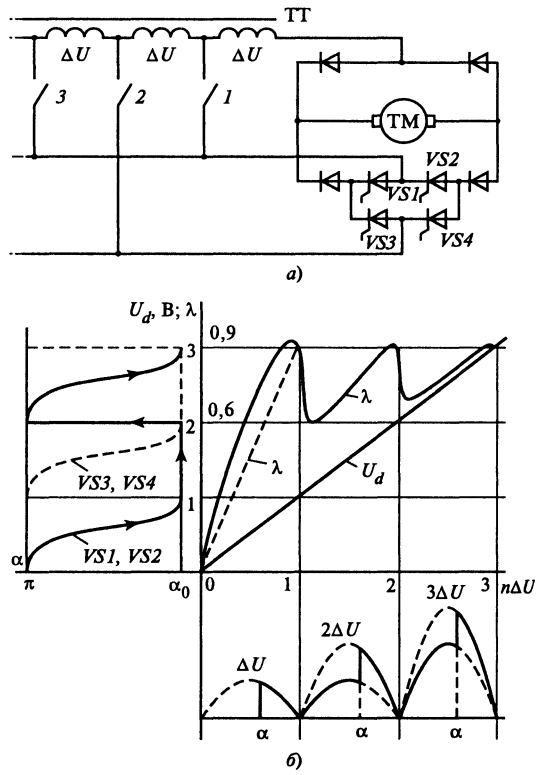


Рис. 62.47. Схема (*а*) и диаграмма изменений напряжения и коэффициента мощности (*б*) при плавном межступенчатом регулировании напряжения

типом привода и ступенчатое инерционное регулирование $U_{т.м}$ (время полного набора, как и сброса, позиций ЭКГ составляет 28 с) нежелательно. Поэтому были разработаны схемы, обеспечивающие плавное регулирование $U_{т.м}$ при меньшем числе контакторов и без их использования вообще.

На опытной партии электровозов ВЛ60КУ было использовано межступенчатое регулирование напряжения по схеме рис. 62.47, *а*. На этих электровозах использовался штатный ТТ серийных электровозов со ступенчатым регулированием напряжения. Поэтому число ступеней напряжения ΔU равнялось восьми. В первой зоне регулирования $U_{т.м} = U_d$ замкнут только контактор *1* и увеличение U_d достигается за счет изменения угла α включения тиристоров *VS1* и *VS2* от 180 до 15°. Во второй зоне (рис. 62.47, *б*) замыкается контактор *2*, тиристоры *VS1* и *VS2* продолжают работать при $α_0$, а регулирование U_d производится изменением угла включения тиристоров *VS3* и *VS4*. При этом к диодному выпрямителю часть полупериода до угла α подводится напряжение одной ступени ΔU, а затем двух

$2\Delta U$. Далее алгоритм работы схемы повторяется: в третьей зоне разомкнут контактор *1* и замкнут *3*, тиристоры *VS3* и *VS4* работают при α_0, а увеличение U_d достигается изменением от 180° до α_0 угла включения тиристоров *VS1* и *VS2*.

Существенным недостатком плавного регулирования $U_{т.м}$ фазовым управлением работой выпрямителя является снижение коэффициента мощности λ (произведением $\cos\varphi$ на коэффициент искажения $k_и$ тока и напряжения). Значение λ в схеме с диодным выпрямителем и регулированием подведенного к нему напряжения изменением коэффициента трансформации ТТ составляет 0,9. Еще ниже значение λ при регулировании U_d при помощи полностью управляемого выпрямителя (рис. 62.47, *б*, штриховые линии).

В схеме электровозов ВЛ60КУ отрицательные последствия снижения λ при плавном регулировании $U_{т.м}$ ослабляются большим числом зон регулирования, полученным благодаря использованию регулируемой и нерегулируемой обмоток ТТ, как и в схеме серийных электровозов (см. рис. 62.46, *а*), что снижает провалы λ при увеличении U_d и обеспечивает возможность использования в длительных режимах тяги только полных зон ΔU.

Подобный алгоритм регулирования U_d может быть реализован и в схемах без контакторов. Одним из таких решений является схема рис. 62.48 с последовательным включением нескольких мостов *M1—MN*, питающихся от изолированных обмоток ТТ. В первой зоне, как и в схеме рис. 62.47, регулирование U_d происходит уменьшением угла α включения тиристоров *M1*, а во всех других мостах, число которых обычно два или три, ток I_d течет по последовательно включенным диодным плечам. Далее последовательно включаются в работу очередные мосты. Такая схема используется на электровозах во Франции и в Швеции и применена на построенных в СССР для Финляндии электровозах SrI, а также на электровозах ВЛ84. В ней, используя разное соотношение напряжений обмоток ТТ, можно получить число зон регулирования U_d больше числа мостов. В частности, при трех мостах с соотношением напряжений 1:2:3 или 1:2:4 их число может быть шесть и семь.

Преимущество схемы рис. 62.48 по отношению к схеме рис. 62.47 состоит в бесконтактности регулирования U_d, но оно достигается за счет увеличения числа выводов ТТ и количества полупроводниковых приборов, а также за счет увеличения потерь энергии в постоянно последовательно включенных вентилях. Эти недостатки частично устраняются в схеме секционированного моста (рис. 62.49), используемой на электровозах ВЛ80Р, ВЛ85, ВЛ65 и ЭП1. Схема обеспечивает рекуперативное торможение. При рекуперации схема обеспечивает инвертирование тока ТМ за счет выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП). В тяговом режиме ВИП работает в режиме полууправляемого выпрямителя, что обеспечивает увеличение коэффициента мощности λ (см. рис. 62.47, *б*). В первой зоне регулирования U_d плечи *1* и *2* включаются при минимальном угле управления α_0, т.е. работают в близком к диодному режиме и образуют демпферный контур для замыкания тока I_d. Регулирование U_d происходит за счет изменения фазы включения плеч *3* и *4*. В конце первой зоны подключенные к первой секции ТТ плечи *1—4* работают при α_0. Во второй зоне к постоянному максимальному напряжению первого моста добавляется плавно увеличивающееся за счет изменения α плеч *5* и *6* напряжение второй секции ТТ, т.е. происходит регулирование U_d так же, как в схеме рис. 62.47. В конце второй зоны с α_0 работают плечи *1*, *2*, *5* и *6*, а плечи *3* и *4* выключаются. Затем осуществляется синхронный переход: плечи *1* и *2* выключаются, а плечи *7* и *8* включаются и работают при α_0. При этом напряжение U_d не изменяется, так как напряжение подключаемой третьей секции ТТ равно сумме напряжений выключаемых первой и второй секций. В третьей зоне для регулирования U_d используются плечи *3* и *4*, а в четвертой — *1* и *2*. Таким образом, при трех секциях ТТ обеспечивается четырехзонное регулирование U_d.

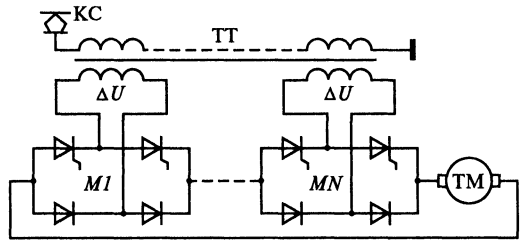


Рис. 62.48. Схема плавного регулирования напряжения с последовательным соединением полууправляемых мостовых выпрямителей (схема Ожье)

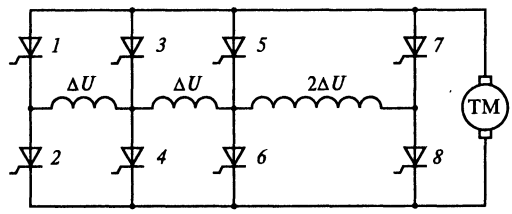


Рис. 62.49. Схема секционированного моста для плавного регулирования напряжения



Рис. 62.50. Зависимости коэффициента мощности электровозов с ВИП и ДП от напряжения:

1 — ДП, расчет; *2* — ВИП, расчет; *3* — ВИП, тяга, эксперимент; $I_{я.ср}$ = 700—900 А; *4* — ВИП, РТ, $I_я$ = = 800—900 А; *5* — ВИП, РТ, $I_я$ = 570—650 А

Схема рис. 62.49 имеет очевидные достоинства: плавное регулирование U_d, малое число выводов ТТ и плеч ВИП и работа при полном напряжении только четырех из них, что исключает потери энергии в остальных четырех. Снижение λ в процессе пуска электровозов при поверхностном анализе также представляется малозначимым: пуски электровозов редки, а значение λ при полном напряжении U_d не ниже, чем при использовании ступенчатого регулирования. Однако в реальной эксплуатации энергетические показатели ВИП много хуже, так как они практически всегда работают при неполном напряжении. Это обусловлено тем, что ВИП должен обеспечивать номинальное $U_{т.м}$ при пониженном $U_{к.с}$. Поэтому при номинальном и повышенном $U_{к.с}$ из-за необходимости ограничения $U_{т.м}$ ВИП работают с неполным напряжением, в среднем используя три с половиной зоны. В этом режиме постоянно работают плечи *3* и *4* и существенно снижается значение λ. Представление о реальном снижении λ по отношению к расчетным значениям у электровозов с ВИП и по отношению к электровозам со ступенчатым регулированием U_d и с диодными преобразователями (ДП) дают расчетные и экспериментальные зависимости $\lambda(U_d)$ электровозов ВЛ80Т и ВЛ80Р соответственно с ДП и ВИП (рис. 62.50).

Электровозы с ДП благодаря большому числу ступеней регулирования U_d при любом $U_{к.с}$ работают с λ_{max}. В реальной эксплуатации они в основном работают на 29-й ступени, т.е. при $0{,}879U_{d\,max}$, что соответствует трем с половиной зонам электровозов с ВИП.

Работа электровозов с ВИП с неполным U_d и, следовательно, с пониженным λ приводит к существенному увеличению потерь энергии по отношению к электровозам с ДП как в электрооборудовании электровозов, так и в устройствах тягового и внешнего электроснабжения, которое не компенсируется возвратом энергии в сеть при использовании на электровозах с ВИП рекуперативного торможения [62.45]. Такое влияние уменьшения λ у электровозов с ВИП по отношению к электровозам с ДП на энергетические показатели системы тяги переменного тока долгое время отрицалось специалистами, определявшими направления развития ТЭП. Поэтому устройства, повышающие λ, не применялись на отечественном ЭПС, несмотря на их использование в зарубежной практике. Но затем, особенно после ужесточения требований к качеству потребляемой электроэнергии со стороны производителей энергии, этой проблеме стали уделять должное внимание.

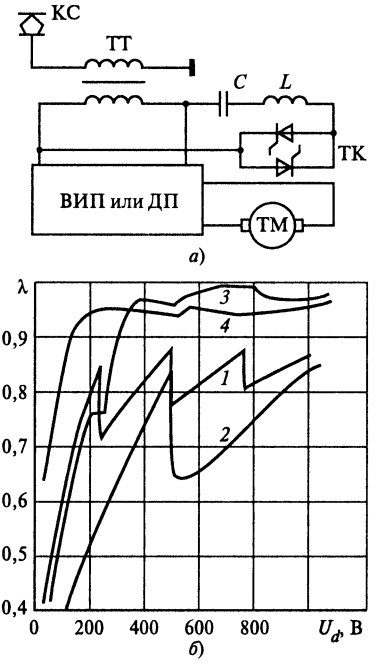


Рис. 62.51. Схема компенсатора реактивной мощности (*а*) и иллюстрирующие ее эффективность кривые (*б*)

Простейшим способом повышения λ электровозов с ВИП и ДП является применение пассивного компенсатора реактивной мощности (КРМ) в виде подключенного параллельно вторичной обмотке ТТ колебательного *LC*-контура с частотой собственных колебаний порядка 135 Гц (рис. 62.51,*а*). Использование КРМ увеличивает λ за счет создания емкостной нагрузки и уменьшения углов коммутации токов в ВИП и ДП. По этим показателям наиболее эффективно использование КРМ с резонансной частотой 150 Гц. Но в этом случае в потребляемом электровозом токе появляется четко выраженная третья гармоника, т.е. электровоз ста-

новится ее генератором, что ухудшает энергетические показатели системы электроснабжения и поэтому недопустимо. Экспериментальные исследования [62.46] показали, что близкое к предельному увеличение λ достигается при использовании КРМ с резонансной частотой 135 Гц. Их количественные результаты, полученные при часовой нагрузке ТМ ($I_я$ = 900 А и $I_{ВИП}$ = 1800 А) и КРМ с параметрами C = 2200 мкФ и L = 0,63 мГн показанны на рис. 62.51, *б*. Кривые *1* и *2* иллюстрируют зависимости $\lambda(U_d)$ штатного, некомпенсированного, ВИП в режимах четырех- и двухзонного регулирования, а кривые *3* и *4* — те же зависимости при подключенном КРМ с указанными выше параметрами. Наиболее близкими к оптимальным являются КРМ, имеющие реактивную мощность 520 квар (1475 мкФ) с резонансной частотой 135 Гц. В этом случае можно ожидать, что среднее значение λ электровоза будет на уровне 0,92. При использовании КРМ можно ограничиться и двумя зонами регулирования U_d. Наряду с уменьшением угла коммутации тока в плечах ВИП (от 24 до 19° при $I_{т.м}$ = 865 А) применение КРМ позволяет на 15 % уменьшить амплитуду свободных послекоммутационных колебаний напряжения на токоприемнике электровоза в некоторых вариантах его электроснабжения. Соответственно снижается амплитуда приложенного к тиристорам ВИП напряжения.

Однозвенный КРМ с резонансной частотой, близкой к частоте третьей гармоники, недостаточно эффективно снижает влияние электровоза на линии связи. Поэтому были испытаны двухзвенные КРМ из двух параллельных *LC*-контуров с резонансными частотами 150 и 250 Гц. Оказалось, что эффективность повышения λ при их использовании примерно такая же, как и у однозвенного КРМ. При использовании КРМ необходимы меры по предотвращению аварийных режимов работы электрооборудования. Очевидно, что его подключение к ТТ может производиться либо в момент перехода напряжения ТТ через нуль, либо при равенстве последнего и напряжения на конденсаторе КРМ. Последний вариант предпочтительнее, так как не требует предварительного разряда емкости. Поэтому для подключения КРМ к ТТ используется тиристорный ключ. Кроме того, включение одного КРМ при работающих других вызывает броски токов ТТ и КРМ, превышающие амплитуды токов холостого хода соответственно на 25 и 60—65 %, а выключение быстродействующего выключателя (БВ) при работающих КРМ вызывает в них ударные токи, в 2,5 раза превышающие их установившиеся значения, что делает необходимым предварительное отключение КРМ.

Для уменьшения амплитуды высокочастотных колебаний напряжения ТТ при использовании КРМ с высокой добротностью параллельно

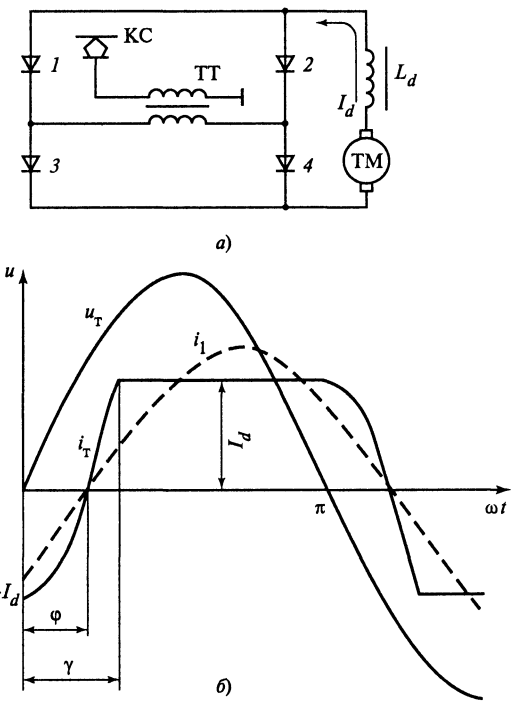


Рис. 62.52. Схема мостового выпрямителя (*а*) и иллюстрирующие его работу кривые (*б*)

индуктивности КРМ необходимо подключить защитную *RC*-цепь.

Потери энергии в КРМ компенсируются их снижением в ТТ вследствие увеличения λ. Более эффективно, с меньшими массой дополнительного электрооборудования и потерями энергии, повышение λ при помощи принудительной коммутации тока в плечах выпрямителя до уменьшения напряжения ТТ до нуля. В диодном и тиристорном выпрямителях (рис. 62.52, *а*) при минимальном угле управления α_0 при обычном допущении об отсутствии пульсаций тока I_d в ТМ вследствие большой индуктивности L_d в конце полупериода через вторичную обмотку ТТ течет ток I_d. Процесс коммутации тока в выпрямителе начинается после перехода напряжения $u_т$ через нуль (рис. 62.52, *б*). Если в предыдущий полупериод работали вентили *2* и *3*, то в начале следующего появляется и увеличивается к концу коммутации до I_d ток в вентилях *1* и *4*. Но ток в вентилях *2* и *3* из-за большой индуктивности его цепи не может исчезнуть мгновенно и протекает до конца коммутации. Поэтому в течение коммутации тока из пары вентилей *2* и *3* в пару *1* и *4* все они обтекаются током. Следовательно, вторичная обмотка ТТ оказывается замкнутой накоротко по цепям вентилей *1* и *2*, *3* и *4*. В контуре тока

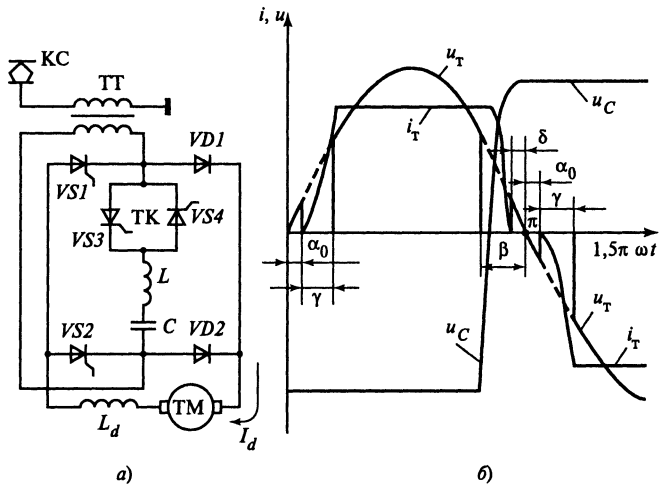


Рис. 62.53. Схема принудительной коммутации тока в мостовом выпрямителе (*а*) и поясняющие ее работу кривые (*б*)

короткого замыкания $i_к$ действует напряжение трансформатора $u_т = U_m \sin\omega t$. Активное сопротивление обмотки ТТ невелико, и изменение $i_к$ в ней в процессе коммутации определяется ее индуктивным сопротивлением $X_т = \omega L_т$ и происходит по закону $i_к = U_m(1 - \cos\omega t)/X_т$.

В процессе коммутации ток трансформатора $i_т = -I_d + i_к$. Коммутация начинается при $i_т = -I_d$ и заканчивается при $i_т = I_d$, так как дальнейшее увеличение $i_к$ невозможно: токи в вентилях *2* и *3* должны бы были течь в непроводящем направлении, а в вентилях *1* и *4* они не могут быть больше I_d, который по допущению неизменен из-за большой индуктивности L_d. Таким образом, в процессе коммутации $i_т$ изменяется на $2I_d$.

В процессе коммутации, протекающей в течение времени соответствующего углу коммутации γ, напряжение $u_т = 0$, а ток I_d протекает по последовательно включенным вентилям *1* и *3*, *2* и *4*.

Первая гармоника i_1 тока ТТ отстает от $u_т$ на угол φ. Вместе с отклонением формы $i_т$ от синусоиды, характеризуемым коэффициентом искажения $K_и$, это обусловливает уменьшение $\lambda = K_и \cos\varphi$. Очевидно, что для уменьшения φ необходимо уменьшить γ и обеспечить снижение $i_т$ до нуля во втором полупериоде $u_т$ до его перехода через нуль. Обе эти цели достигаются использованием принудительной коммутации тока в конце полупериода $u_т$.

Принудительная коммутация практически применяется только в управляемых выпрямителях, у которых снижение λ существенно больше, чем у диодных (см. рис. 62.47 и 62.50). Поэтому рассмотрим работу соответствующего устройства применительно к полууправляемому выпрямителю. Принудительная коммутация обеспечивается подключенной параллельно вторичной обмотке ТТ коммутирующей цепью, состоящей (рис. 62.53, *а*) из тиристорного ключа (ТК) и двух встречно-параллельно включенных тиристоров *VS3* и *VS4* и коммутирующей емкости *C* (включенный последовательно с емкостью *C* дроссель *L* снижает $di_к/dt$ до допустимого для тиристоров значения). Если в первом полупериоде $u_т$ направлено слева направо (работают вентили *VD1* и *VS2*), то емкость *C* заряжена до значения u_C с плюсом внизу. При угле β, отсчитываемом от угла π в отрицательном направлении, включается тиристор *VS3* и ток $i_к$ разряда емкости *C* практически мгновенно коммутирует ток I_d из диода *VD1* в диод *VD2*. Следовательно, I_d замыкается по вентилям *VS2* и *VD2*, а приложенное к ТМ напряжение падает до нуля. Ток трансформатора $i_т$ при этом замыкается через *VS3*, *L* и *C* и благодаря большим значениям $u_т$ и $L_т$ изменяется в начале перезаряда емкости незначительно. После того, как u_C изменит знак и достигнет значения $u_т$, начинается быстрое падение $i_т$ под воздействием направленной встречно разности $u_C - u_т$. Ток $i_т$ падает до нуля ранее, чем $u_т$ перейдет через нуль на угол δ. Одновременно достигается максимальное значение u_C, но другой полярности, что и обеспечивает аналогичную коммутацию I_d из *VD2* в *VD1* в следующем полупериоде.

Таким образом, в конце полупериода обмотка ТТ обесточена и при включении в начале следующего полупериода при угле α_0 тиристоров *VS1* или *VS2* ток в ней не изменяет направление, увеличиваясь от $-I_d$ до I_d, а увеличивается от 0 до I_d. Этот процесс естественной коммутации тока в плечах выпрямителя протекает под воздействием $u_т$ аналогично процессу коммутации в диодном выпрямите-

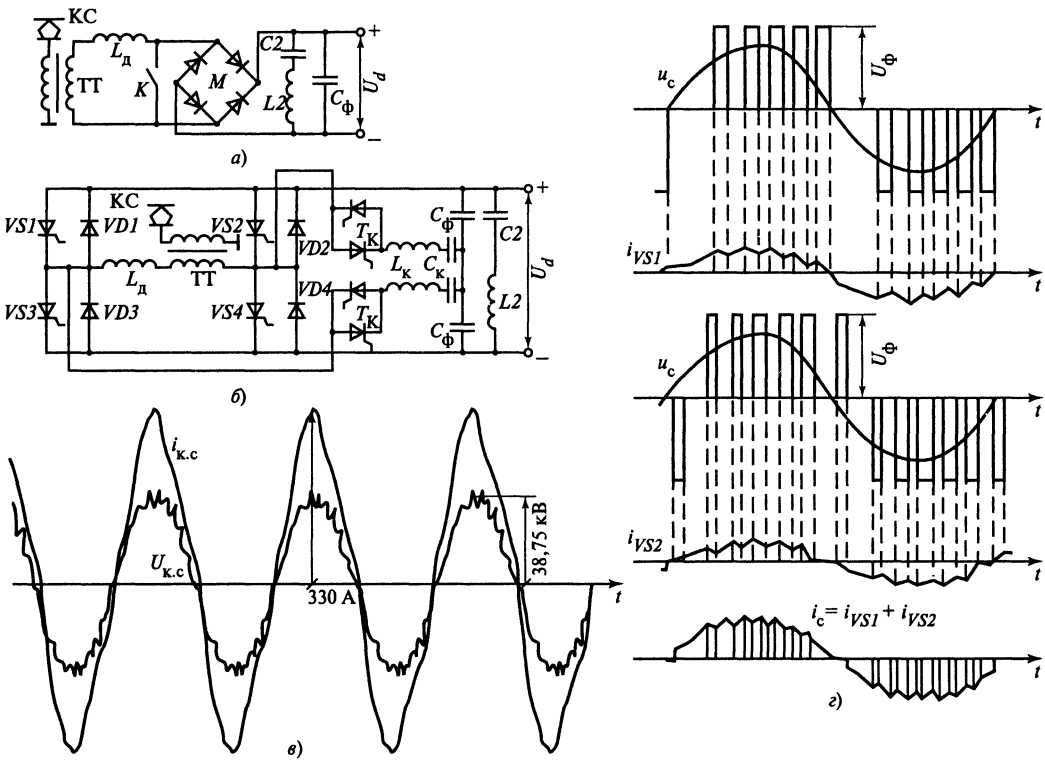


Рис. 62.54. Функциональная (*а*) и принципиальная (*б*) схемы четырехквадрантного преобразователя, осциллограмма кривых тока и напряжения в контактной сети (*в*) и диаграмма происходящих в нем электрических процессов (*г*)

ле (см. рис. 62.52), но занимает меньше времени благодаря вдвое меньшему изменению $i_т$. Уменьшение угла γ и протекание $i_т$ в фазе с $u_т$ практически от начала полупериода при прерывании $i_т$ до конца полупериода приближают первую гармонику i_1 тока $i_т$ по фазе к $u_т$, что и обеспечивает увеличение λ по отношению к диодному выпрямителю.

Приложенное к цепи ТМ напряжение U_d определяется частью кривой $u_т$ в пределах от $\alpha_0 + \gamma$ до $\pi - \beta$ (рис. 62.53, *б*). Это дает возможность при регулировании U_d путем согласованного изменения углов α и β получить симметричную относительно середины полупериода $u_т$ кривую $i_т$ и, следовательно, потребляемого из КС тока, что обеспечивает высокое значение λ в широком диапазоне регулирования U_d. При таком регулировании число ступеней напряжения ТТ можно уменьшить до двух [62.47].

Высокое значение λ при одной ступени напряжения ТТ, но с неизменным значением U_d обеспечивает четырехквадрантный преобразователь (рис. 62.54, *а*). В схеме используется ТТ с большим напряжением короткого замыкания (25 % у электровоза ВЛ86Ф), последовательно с вторичной обмоткой которого включена дополнительная индуктивность $L_д$. Эта цепь в каждом полупериоде $u_т$ максимальное число раз замыкается накоротко и размыкается коммутатором K. При замкнутом K ток $i_т$ и сетевой ток $i_с$ в КС увеличиваются и происходит накопление энергии в индуктивностях $L_д$ и $L_{т.т}$. В рабочем режиме напряжение U_d на подключенной к выходу диодного моста M емкости фильтра $C_ф$ больше $u_т$ (на электровозе ВЛ86Ф в 1,4 раза). Поэтому при выключенном K ток $i_т$ уменьшается по закону, определяемому без учета незначительного влияния активных сопротивлений уравнением $(L_д + L_т)\frac{di_т}{dt} = U_т - U_d$ и поддерживается за счет накопленной в индуктивностях энергии. Ток i_d на выходе моста M содержит большую переменную составляющую двойной частоты, а также высшие гармоники. Вторая гармоника замыкается через настроенный на нее резонансный L_2C_2-контур, а высшие гармоники — через емкость фильтра $C_ф$.

Принципиальная схема четырехквадрантного преобразователя показана на рис 62 54, *б* Многократное в каждом полупериоде $u_т$ короткое замыкание с последующим размыканием цепи из вторичной обмотки ТТ и $L_д$ производится тиристорным мостом *VS1—VS4* с устройствами принудительного выключения тиристоров и с противопараллельно подключенным диодным мостом *VD1– VD4* При включении в одном из полупериодов $u_т$ тиристоров *VS1* или *VS4* образуются цепи короткого замыкания ТТ и $L_д$ соответственно через диоды *VD2* и *VD3* В другой полупериод работают тиристоры *VS2* и *VS3* и цепи замыкаются через диоды *VD1* и *VD4* Выключение тиристоров осуществляется $L_кC_к$-контурами, которые подключаются к соответствующим тиристорам тиристорными же ключами ТК Необходимая для выключения основных тиристоров энергия аккумулируется в коммутирующих конденсаторах $C_к$ в периоды между коммутациями первых Для сведения к минимуму сдвига по фазе тока в КС по отношению к напряжению и максимального его приближения к синусоиде при каждом последующем включении тиристоров длительность их включенного состояния автоматически изменяется Эффективность достигаемого при этом увеличения коэффициента мощности растет с увеличением числа включений тиристоров за полупериод $u_т$ Однако это число ограничено, в частности увеличением коммутационных потерь энергии В преобразователях рассматриваемого типа оно обычно равно 11 Но и это число слишком велико, особенно при частоте питающего напряжения 50 Гц Поэтому в схеме рис 62 54, *б* используется поочередное включение в одном полупериоде тиристоров *VS1* и *VS4*, а в другом — *VS2* и *VS3* Этим снижается число коммутаций тока в каждом из них вдвое по отношению к числу пульсаций тока в ТТ На электровозе ВЛ86Ф число коммутаций одного моста составляет пять, другого шесть за полупериод На стороне постоянного тока оба моста соединены параллельно Форма токов и напряжений, формируемых таким преобразователем показана на рис 62 54, *г*, на котором $u_с$ — напряжение в КС, i_{VS1} и i_{VS2} — токи, формируемые в ТТ обоими тиристорными мостами, а $i_{к\,с}$ — их сумма, ток в КС

Обычно в теоретическом анализе работы четырехквадрантного преобразователя [62 29] (рис 62 54, *г*) принимается, что напряжение $u_с$ в КС не искажается Фактически как это подтверждается осциллограммой (рис 62 54, *в*), полученной на электровозе ВЛ86Ф, искажения $u_с$ существенны Четырехквадрантный преобразователь позволяет получить угол сдвига φ первых гармоник тока и напряжения в КС в пределах ±3°, т е обеспечивает $\cos\varphi$ не меньше 0,998 Поэтому снижение коэффициента мощности λ до 0,94—0,98 в зависимости от нагрузки преобразователя обусловлено в основном искажением форм напряжения и тока в КС

Описанный выше упрощенный алгоритм управления работой четырехквадрантного преобразователя не обеспечивает подобия кривых роста тока и напряжения ТТ в начале полупериода, так как необходимая в это время наибольшая производная тока не может быть достигнута за счет $u_т$ из-за его малости и большой индуктивности цепи тока Поэтому в начале полупериода применяется согласное включение $u_т$ и U_d Для этого при направлении $u_т$, например, слева направо (см рис 62 54, *б*) включаются тиристоры *VS1* и *VS4*, и ток в ТТ и КС интенсивно растет под воздействием суммы напряжений $u_т + U_d$ Этим обеспечивается потребление необходимой для работы преобразователя реактивной мощности со стороны постоянного напряжения, а исключением ее потребления из КС достигается совпадение фаз тока и напряжения в ТТ Первая гармоника напряжения на сетевых зажимах преобразователя по отношению к напряжению трансформатора $u_т$ смещена на угол ψ, который при используемой индуктивности цепи вторичнои обмотки ТТ составляет 20—25° Схема рис 62 54, *б* обеспечивает возврат энергии в сеть Кроме высоких требований к параметрам тиристоров и сложности схема управления, ее недостатком является необходимость предварительного заряда фильтровых конденсаторов и их разряда после выключения преобразователя

РЕГУЛЯТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ ЭПС С БЕСКОЛЛЕКТОРНЫМИ ТМ

Питание бесколлекторных ТМ производится от преобразователей частоты и числа фаз (ПЧФ), преобразующих постоянное или переменное однофазное напряжение КС в регулируемое по значению и частоте трехфазное напряжение Поэтому входящие в состав ПЧФ выходные преобразователи представляют собой выполненные по трехфазной мостовой схеме автономные инверторы (АИ) Известно большое число разработанных для использования на ЭПС с асинхронными (АТМ) [62 29] и вентильными (ВТМ) [62 27] ТМ схем АИ, отличающихся способами коммутации тока в плечах АИ и, следовательно, в фазах ТМ и способами формирования кривой напряжений выхода Автономные инверторы делятся на две группы инверторы напряжения (АИН) и тока (АИТ) На рис 62 55, *а* показана схема АИН электровозов ВЛ80А и ВR120

Отличительной особенностью АИН является подключение встречно-параллельно каждому из главных тиристоров трехфазного моста обратных диодов *VD*, по которым замыкаются токи фаз ТМ после выключения соответствующих тиристоров (например, ток фазы *А* после выключения *VS1* замыкается через *VD4*) Если АИН построен на тиристорах, то для выключения последних в нем используются устройства принудительной коммута-

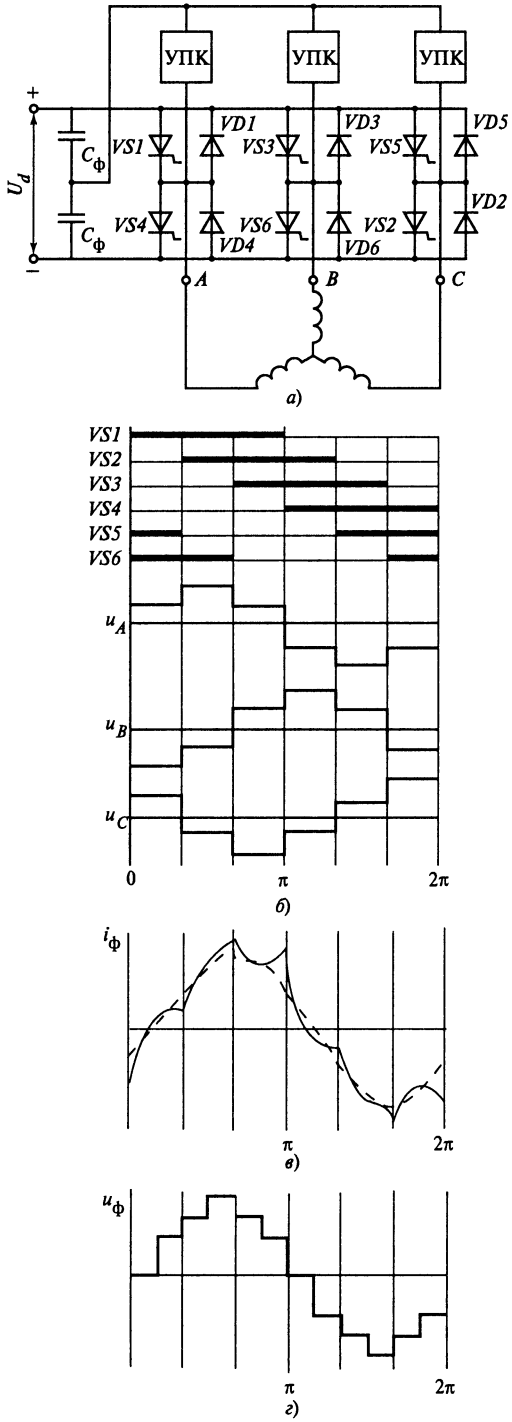


Рис. 62.55. Принципиальная схема автономного инвертора напряжения (*а*), интервалы проводимости его вентилей и форма напряжения выхода (*б*), форма тока фазы при 180-градусном управлении, (*в*) и форма напряжения фазы при 150-градусном управлении (*г*)

ции (УПК), аналогичные применяемым в четырехквадрантном преобразователе (см. рис. 62.54, *б*).

Формирование симметричной трехфазной системы напряжения с требуемой частотой достигается при показанной на рис. 62.55, *б* последовательности включения плеч АИН. При этом приложенное к фазам ТМ напряжение имеет вид двухступенчатой кривой с напряжением первой ступени $U_d/3$ и второй $2U_d/3$. Такое управление работой АИН называется 180-градусным по времени проводимости тока его плечами. Его недостатком является существенное отличие формы напряжения от синусоиды, при котором коэффициент искажения формы напряжения, равный отношению действующего значения первой гармоники к действующему значению всех составляющих, K_u = 0,955. Но форма тока в фазе АТМ (рис. 62.55, *в*) меньше отличается от синусоиды: у нее коэффициент искажения K_i = = 0,98—0,985.

При использовании рассмотренного амплитудного алгоритма управления работой АИН необходимое при пуске линейное увеличение $U_{т.м}$ возможно только путем соответствующего изменения U_d. Здесь неизбежны пульсации момента ТМ на стадии пуска, которые при 180-градусном управлении составляют примерно 10 %. Их можно уменьшить до 5 % применением 150-градусного управления, при котором включение плеч АИН происходит с задержкой на π/6 после выключения плеч данной фазы. В результате форма напряжения приближается к синусоидальной за счет появления дополнительной, третьей, ступени с $u = 0{,}5U_d$ и равенства напряжения нулю в течение π/6 (рис. 62.55, *г*). Этим достигается снижение искажений форм тока и напряжения.

При постоянном входном напряжении U_d, в частности при питании АИН непосредственно от КС постоянного тока или от четырехквадрантного преобразователя, формирование кривой напряжения выхода и его значения достигается путем многократного включения и выключения работающих в течение соответствующего полупериода вентилей АИН. Изменяя число и длительность импульсов напряжения в течение полупериода напряжения выхода АИН, можно достичь максимального приближения результирующего напряжения к синусоиде и требуемого изменения его значения.

Преимуществами широтно-импульсной модуляции (ШИМ) являются: однократное преобразование энергии, в отличие от двукратного при амплитудном регулировании, и возможность формирования близкого к синусоидальному напряжения. Однако при этом увеличиваются коммутационные потери как в самом АИН, так и в ТМ вследствие пульсаций тока и напряжения. Для уменьшения потерь в ТМ в цепи статоров каждой ТМ включают реакторы, масса каждого из которых на электровозе

BR120 больше 200 кг. Недостатками ШИМ являются высокие требования к параметрам тиристоров и необходимость применения быстродействующих диодов, а также реакторов в цепи КЗ U_d, возникающей на короткое время при повторных включениях тиристоров в процессе формирования напряжения выхода АИН.

Практически на ЭПС без регулирования U_d на первой стадии пуска при увеличении $U_{т.м}$ до максимального используется ШИМ, а затем амплитудное регулирование с постоянным U_d. Такая последовательность регулирования напряжения выхода АИН использована на электровозах BR120 и на электровозе ВЛ86Ф, на котором масса преобразователя с системой охлаждения на одну ТМ составляла 2650 кг.

АИН нашли наибольшее применение на ЭПС с АТМ, а на ЭПС с ВТМ используются в основном АИТ — инверторы тока, ток в плечах которых коммутируется вместе с током фаз ТМ. В плечах АИТ нет обратных диодов, а в цепи их питания от звена постоянного тока включают большие индуктивности. Поэтому в теоретическом анализе работы ВТМ с ее питанием от АИТ принимается, что ток в фазах ТМ в течение большей части полупериода (исключая время его коммутации) постоянный и не пульсирует, хотя реально пульсации есть. При использовании АИТ его коммутирующие токи входят в контуры машинной коммутации, поэтому форма тока в фазах ТМ повторяет форму тока в плечах инвертора. При питании ТМ от АИН коммутирующий ток не входит в контур машинной коммутации, а лишь выключает тиристоры плеч инвертора. При этом вследствие наличия обратных диодов форма тока в фазах ТМ существенно отличается от формы тока в плечах инвертора, а также от формы его выходного напряжения (см. рис. 62.55, *б* и *в*).

Инверторы, используемые для питания АТМ, должны обладать возможностью принудительной коммутации тока. В то же время на ЭПС переменного тока с ВТМ могут применяться инверторы без принудительной коммутации. Такие АИТ установлены на электровозах ВЛ80В с ВТМ (рис. 62.56). На диаграмме лучами *1*—*6* показаны направления результирующих магнитодвижущих сил обмотки якоря ВТМ при работе соответствующих плеч АИТ. В круглых скобках указаны обтекаемые током в соответствующих направлениях фазы обмотки якоря ВТМ, а в квадратных — работающие при этом плечи АИТ.

Регулирование напряжения $U_{вх}$ на входе АИТ может производиться с использованием тех же устройств, которые применяются на выпрямительном ЭПС с коллекторными ТМ. В частности, на макетной секции электровоза ВЛ80Б с ВТМ использовалось близкое по исполнению к схеме серийных электровозов переменного тока 36-ступенчатое регулирования $U_{вх}$, а на электровозах ВЛ80В вторичная обмотка трансформатора разделена на нерегулируемую и состоящую из трех секций регулируемую части, что вместе с межступенчатым фазным регулированием обеспечивает семизонное плавное регулирование $U_{вх}$. Сглаживающие реакторы (СР) снижают пульсации тока в фазах ВТМ до приемлемого уровня.

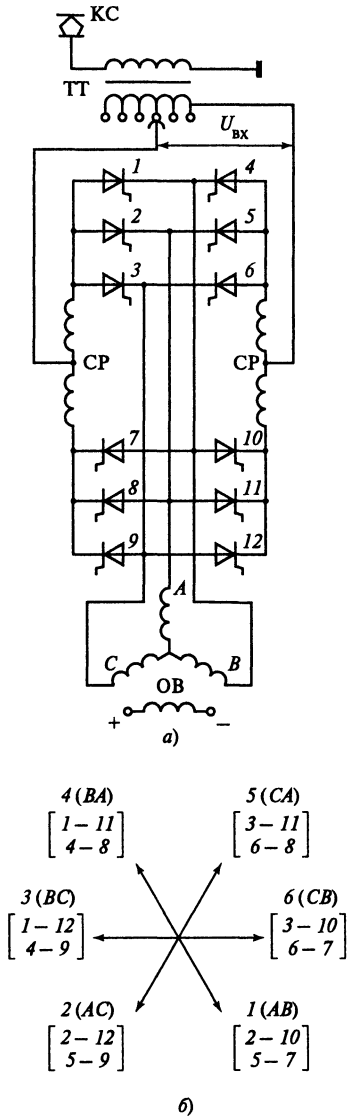


Рис. 62.56. Принципиальная схема автономного инвертора тока без принудительной коммутации (*а*) и диаграмма последовательности работы ее вентилей (*б*)

В начальной стадии пуска, когда частота тока в ВТМ существенно меньше частоты напряжения в КС, одни и те же тиристоры АИТ работают по несколько полупериодов, а коммутация тока в его плечах осуществляется под действием $U_{к.с}$ — про-

исходит сетевая коммутация. При увеличении скорости движения увеличивается ЭДС ТМ и коммутация тока осуществляется ею — происходит машинная коммутация. При максимальной скорости движения частота тока в ВТМ в 2,5 раза выше его частоты в КС.

Частота тока в обмотках якоря ВТМ должна строго соответствовать частоте вращения ее ротора Поэтому каждая ВТМ должна питаться от своего преобразователя, управляемого сигналами датчика положения ротора. Это является недостатком ЭПС с ВТМ. На ЭПС с АТМ возможно питание нескольких ТМ от одного преобразователя, хотя при этом неизбежен разброс их нагрузок.

РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ ТЯГОВЫХ МАШИН

Пуск ЭПС в зоне I (см. рис. 62.36) целесообразно производить с максимальным потоком возбуждения Φ_{max}: при этом снижается скорость, при которой заканчивается регулирование $U_{т\,м}$, и уменьшаются потери в регуляторах напряжения, в частности в пусковых резисторах ЭПС постоянного тока. Однако Φ_{max} ограничен насыщением ТМ и нагревом их обмоток возбуждения В этой связи режим работы ТМ вагонов метрополитена и наземных электропоездов с $I_{в\,max}$ называется режимом усиленного поля (УП), а в расчетном часовом режиме $I_в = 0{,}5I_{в\,max}$.

Так как $I_{т\,м} = (U_{т\,м} - E_{т\,м})/R_{т\,м}$, а $R_{т\,м}$ невелико (падение напряжения в пределах $0{,}05U_{т\,м}$) и $E_{т\,м} = C\Phi v$, т.е. при $\Phi = \text{const}$ пропорциональна v, то при постоянном $U_{т\,м}$ поддержание пускового значения $I_{т\,м}$ или изменение его по любой расчетной зависимости от v возможно только за счет уменьшения Ф обратно пропорционально росту v, причем практически независимо от закона изменения $I_{т\,м}$. Регулирование Ф на ЭПС с коллекторными и вентильными ТМ реализуется изменением токов $I_в$ в их обмотках возбуждения.

Наиболее эффективным регулирование $I_{т\,м}$ за счет изменения $I_в$ может быть при независимом возбуждении ТМ, использование которого вместо последовательного возбуждения обеспечивает улучшение ряда показателей ЭПС, в том числе и тяговых свойств [62.26, 62.48]. Однако на отечественном ЭПС в режиме тяги независимое возбуждение ТМ использовалось только на опытных электровозах ВЛ80В [62.27], ВЛ12 [62.26] и ВЛ60 [62.48]. Это обусловлено сложностью решения во время создания большинства типов эксплуатируемого ЭПС проблемы ограничения скачков $I_{т\,м}$ при колебаниях $U_{к\,с}$ и ограничения разброса нагрузок ТМ при их параллельном включении.

Применение практически исключительно ПВ ТМ на ЭПС с коллекторными ТМ объясняется также рядом его ценных качеств в режиме тяги При подключениях к ТМ с нулевым Ф полного напряжения и при скачкообразных приращениях $U_{к\,с}$ на ЭПС с инерционными регуляторами напряжения броски $I_{т\,м}$ ограничиваются наиболее эффективно благодаря пропорциональному приращению $I_в$ и замедляемому только действием вихревых токов в магнитопроводе ТМ росту Ф и $E_{т\,м}$

Пропорциональное изменение токов якорей $I_я$ и обмоток возбуждения $I_в$ снижает разброс нагрузок ТМ, который обусловлен неидентичностью их магнитных характеристик и отклонениями частот вращения из-за неравенства диаметров колес Разница диаметров колес у единицы ЭПС может достигать 1,5 %, а различия потоков ТМ при равенстве их $I_в$ — 8 %. Обусловленное этими факторами общее отклонение характеристик ТМ может превышать 9 % В результате при одинаковых $U_{т\,м}$ и $I_{т\,м}$ их частоты вращения $n = E/C_e\Phi$ и вращающие моменты $M = C_м\Phi I_я$ могут существенно отличаться. Но частоты n на ЭПС могут отличаться только на значение, обусловленное разбросом диаметров колес. Поэтому при ПВ токи $I_я \equiv I_в = (U_{т\,м} - E_{т\,м})/R_{т\,м}$ параллельно включенных ТМ отличаются на значение, компенсирующее в основном разброс характеристик ТМ и обеспечивающее примерное равенство их ЭДС. В результате образуется разброс токов и сил тяги F отдельных ТМ (рис 62.57, *а*) Если при одинаковых $I_в = I_{т\,м}$ поток Ф у первой ТМ больше, то сила тяги F_1 у соответствующей колесной пары выше, а частота вращения, определяющая скорость движения v_1, ниже. Но частоты вращения обеих ТМ при равных диаметрах колес принудительно практически равны. Поэтому при любой v, на рисунке равной $0{,}5v_{max}$, токи ТМ отличаются на ΔI, а силы тяги соответствующих колесных пар — на ΔF. Но эти отклонения благодаря виду характеристик ТМ при ПВ невелики.

Если же вместо ПВ использовать НВ, то жесткость скоростных характеристик резко увеличится, так как при $\Phi = \text{const}$ скорость $v = E/C_e\Phi = (U_{т\,м} - I_{т\,м}R_{т\,м})/C_e\Phi$ с ростом $I_{т\,м}$ без учета влияния на Ф реакции якоря снижается линейно, но незначительно (рис. 62.57, *б*). Практически также изменяется и $F = C_м\Phi I_{т\,м}$. В итоге резко увеличиваются $\Delta I_{т\,м}$ и ΔF, вплоть до возможности перехода отдельных ТМ в тормозной режим при том же отклонении их магнитных характеристик, что и в случае использования ПВ. Поэтому использование НВ возможно только при оборудовании ЭПС устройствами, обеспечивающими выравнивание нагрузок ТМ путем индивидуального регулирования $I_в$ всех параллель-

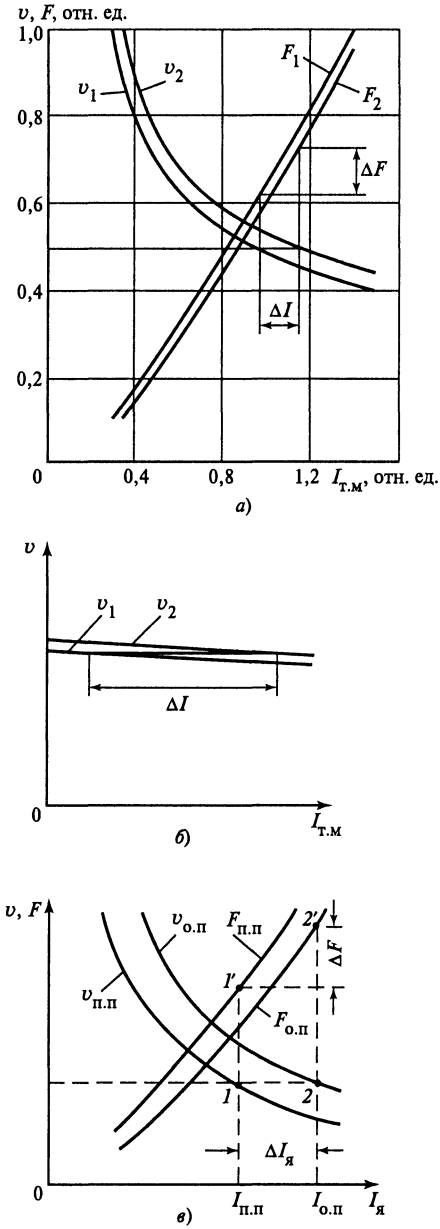


Рис. 62.57. Характеристики, иллюстрирующие разброс нагрузок ТМ последовательного (*а*) и независимого (*б*) возбуждения и кривые, поясняющие построение характеристик при ослабленном поле возбуждения ТМ (*в*)

но включенных ТМ, а при использовании ПВ удовлетворительное выравнивание $I_{т.м}$ достигается автоматически.

Другим недостатком НВ по отношению к ПВ являются броски тока $I_{т.м}$ при колебаниях $U_{к.с}$ из-за невозможности такой же, как при ПВ, интенсивности изменения $I_в$. Поэтому на ЭПС с НВ ТМ в их цепи необходимо включать токоограничивающие индуктивности и обеспечивать максимальное быстродействие и эффективность регулирования $I_в$ [62.26].

Пропорциональное изменение токов $I_я$ и $I_в$ при ПВ обеспечивает также при $U_{т.м}$ = const автоматическое ограничение силы тяги значениями $e_м$ или $e_г$ в зоне III тяговой области (см. рис. 62.36). В этой зоне ТМ не насыщена, и поэтому $\Phi \cong I_в$. Вместе с тем Ф, а следовательно и $I_в$, изменяются обратно пропорционально v и при $I_я \equiv I_в$ $e_г \equiv I_я v$ = const. Постоянство отношения $I_я/I_в$ прямо обусловливает постоянство $e_м$.

Однако при ПВ затруднено управление возбуждением ТМ. Хотя известно несколько способов решения этой задачи с использованием секционирования ОВ [62.30, 62.49], но реально в основном используется (см. рис. 62.38) шунтирование ОВ цепью из последовательно соединенных индуктивности ИШ и резистора $R_ш$ со ступенчатым регулированием его сопротивления. Если $R_{о.в}$ — сопротивление ОВ, то при ее шунтировании ($R_ш + R_{и.ш}$)-цепью в последнюю ответвляется часть $I_я$ и устанавливается соотношение токов $I_в = \beta I_я$, где β — коэффициент регулирования возбуждения (коэффициент ослабления поля). Очевидно, что $\beta = (R_ш + R_{и.ш})/(R_{о.в} + R_ш + R_{и.ш})$.

Включение ($R_ш$—$R_{и.ш}$)-цепи называют ослаблением поля (ОП), хотя поток Ф при этом не может измениться, так как практически неизменной остается $E_{т.м} = C_e \Phi v$. Поэтому применение ОП приводит к увеличению $I_я$ и, следовательно, F, что и является целью использования ОП.

Для построения характеристик тягового привода при ОП используются известные зависимости $v_{п.п}(I_я)$ и $F_{п.п}(I_я)$ при полном поле (ПП). Построение выполняется в предположении, что после включения ОП при токе $I_{п.п}$ (точки *1* и *1′* на рис. 62.57, *в*) новые значения $I_я = I_{о.п}$ и силы тяги $F_{о.п}$ устанавливаются без изменения скорости движения v (точки *2* и *2′*). При этом допущении Ф и $I_в$ сразу после включения ОП практически не изменяются и, следовательно, $I_я = I_в/\beta$ увеличивается до значения $I_{о.п} = I_{п.п}/\beta$. Поэтому скоростная характеристика $v_{о.п}(I_я)$ может быть получена из характеристики $v_{п.п}$ умножением ее абсцисс при всех значениях v на $1/\beta$. Новое значение $F_{о.п}$ также можно найти, используя $F_{п.п}$ и учитывая, что Ф при включении ОП не меняется, а $I_я$ увеличивается до $I_{о.п} = I_{п.п}/\beta$. Поэтому $F_{о.п}$ в точке *2* увеличится до $F_{п.п}/\beta$. Таким образом, включением ОП достига-

ется приращение $\Delta F = F_{\text{п.п}}(1/\beta - 1)$ за счет соответствующего увеличения $I_{\text{я}}$ при неизменном потоке Ф. В таком построении характеристик ОП не учитывается влияние на ЭДС ТМ изменения $I_{\text{я}}$, а на силу тяги — изменения потерь в ТМ. Но влияние этих факторов невелико.

Управление полем ТМ с ПВ шунтированием ОВ имеет два существенных недостатка. Минимальное значение β, ограниченное напряженностью работы коллекторно-щеточного аппарата (значениями $e_{\text{м}}$ и e_{r}) приходится выбирать для режима работы ЭПС при максимальном $U_{\text{к.с}}$ и наибольшем сопротивлении ОВ, нагретой до расчетного допустимого значения. Реально $U_{\text{к.с}}$ чаще ниже номинального, а нагрев ОВ меньше допустимого. Поэтому реальные возможности ТМ, особенно при пониженном $U_{\text{к.с}}$, существенно недоиспользуются. Этот недостаток может быть устранен заменой ПВ на автоматически регулируемое НВ [62.26].

При шунтировании ОВ резистором отсутствует автоматическое ограничение скачков $I_{\text{т.м}}$ при резких колебаниях $U_{\text{к.с}}$, так как из-за большой индуктивности ОВ ток в ней нарастает медленно, а значительная часть $I_{\text{я}}$ в начале переходного процесса ответвляется в $R_{\text{ш}}$ [62.49]. Поэтому последовательно с $R_{\text{ш}}$ включается индуктивность — ИШ. Эффективность ограничения рассматриваемых скачков $I_{\text{т.м}}$ повышается при увеличении $L_{\text{и.ш}}$, но последняя ограничена увеличением массы, габаритных размеров и стоимости ИШ. Кроме того, на ЭПС переменного тока с питанием ТМ пульсирующим напряжением для снижения пульсаций потока и их вредного влияния на работу ТМ (в частности, для уменьшения трансформаторной ЭДС в обмотке якоря, ухудшающей коммутацию) ОВ постоянно шунтированы резистором $R_{\text{ш0}}$ (см. рис. 62.43), т.е. изначально ТМ работает при $\beta_0 < 1$. Поэтому значение $L_{\text{и.ш}}$ выбирают исходя из условия достижения приемлемого ограничения $\Delta I_{\text{т.м}}$ при минимальной $L_{\text{и.ш}}$.

Влияние отношения потокосцеплений ИШ, ОВ и β_0 на максимальное значение $\Delta I_{\text{т.м}}$ качественно характеризуется приведенными на рис. 62.58 кривыми, полученными при ударном включении ТМ [62.50] мощностью 800 кВт в режиме работы предположительно при $\beta \approx 0{,}5$. На основании экспериментальных результатов в [62.50] рекомендовано использовать ИШ с $L_{\text{и.ш}} = (0{,}28—0{,}35)L_{\text{о.в}}$, хотя в [62.25] для ТМ мощностью в пределах 100 кВт рекомендуется $L_{\text{и.ш}} = (0{,}5—0{,}75)L_{\text{о.в}}$.

На трамваях и троллейбусах отечественного производства [62.51] используются ТМ смешанного возбуждения (СВ), у которых (рис. 62.59, *а*) две обмотки возбуждения: последовательная — ПВ и

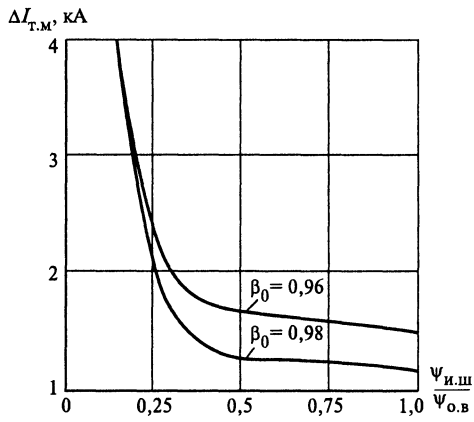


Рис. 62.58. Зависимости бросков тока якорей при резком увеличении напряжения в КС от отношения потокосцеплений индуктивного шунта и обмотки возбуждения при двух значениях сопротивлений активных шунтов

независимая — НВ. Последняя обычно питается от контактной сети и ток $I_{\text{п.в}}$ в ней составляет от 3 до 7 % от $I_{\text{т.м}}$. Управление возбуждением ТМ СВ может производиться как изменением $I_{\text{п.в}}$, так и шунтированием обмотки ПВ. При преобладании обмотки ПВ часто при помощи КШ2 отключается НВ, а затем, как у ТМ ПВ, включают КШ1 и используют ряд ступеней $R_{\text{ш}}$.

По своим свойствам ТМ СВ занимает промежуточное положение между ТМ ПВ и ТМ НВ и имеет как их преимущества, так и недостатки. Наличие НВ расширяет возможности управления возбуждением в тяговом и тормозном режимах: обеспечивается переход в режим рекуперативного торможения при увеличении скорости без переключений в схеме силовых цепей (рис. 62.59, *б*). Вместе с тем существенным недостатком ТМ СВ является усложнение ее конструкции.

Обычно электромеханические характеристики ТМ СВ даются для нескольких значений $I_{\text{п.в}}$. При необходимости характеристики для промежуточных значений $I_{\text{п.в}}$ строят, используя ближайшие бóльшие $I_{\text{п.в}}$. Полагая, что процесс перехода от исходных характеристик к новым (от точек *1* и *1′* на рис. 62.59, *б* к точкам *2* и *2′*) происходит без изменения скорости движения v и учитывая, что поток возбуждения ТМ в этом случае не может существенно измениться, получаем: $I_{\text{п.в1}}w_{\text{п.в}} + I_{\text{п.в1}}w_{\text{п.в}} = I_{\text{п.в2}}w_{\text{п.в}} + I_{\text{п.в2}}w_{\text{п.в}}$, т.е. уменьшение МДС независимого возбуждения должно компен-

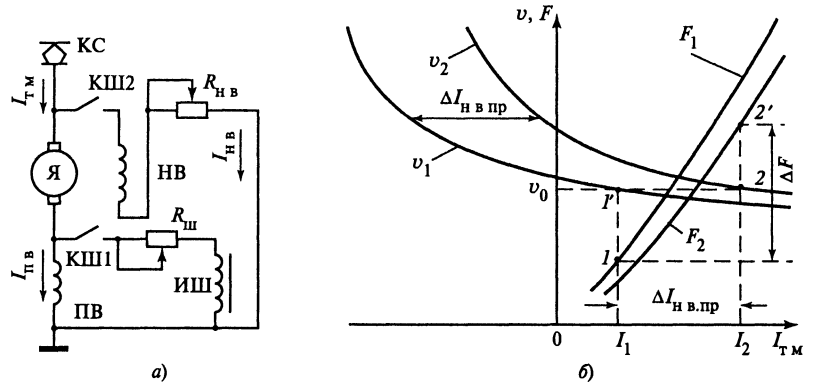


Рис. 62.59. Схема (*а*) и характеристики (*б*) тягового электропривода с ТМ смешанного возбуждения

сироваться увеличением МДС ПВ При нешунтированной обмотке ПВ $I_{п в} = I_{т м}$ увеличивается до

$$I_2 = I_1 + (I_{н в1} - I_{н в2})w_{н в}/w_{п в} = I_1 + \Delta I_{н в пр},$$

где $\Delta I_{н в пр}$ — приведенный к ПВ ток независимой обмотки возбуждения.

Следовательно, построение новой скоростной характеристики производится увеличением $I_{т м}$ исходной характеристики на $\Delta I_{н в пр} = (I_{н в1} - I_{н в2}) \times \times w_{н в}/w_{п в} = \text{const}$ при всех значениях v.

Учитывая, что при уменьшении $I_{н в}$ поток Ф не изменяется, а ток $I_{т м}$ якоря ТМ увеличивается на $\Delta I_{н в пр}$, новое значение силы тяги F без учета влияния на ее значение изменения потерь в ТМ определяем как $F_2 = F_1 I_2/I_1 = F_1(I_1 + \Delta I_{н в пр})/I_1$. Следовательно, приращение силы тяги $\Delta F = F_1 \Delta I_{н в пр}/I_1$.

В режиме движения с некоторой скоростью v_0 величины $I_{т м}$ и F определяются их значениями в точке *1* (рис. 62.59, *б*). При уменьшении $I_{н в}$ до $I_{н в2}$ ток $I_{т м}$ увеличивается до I_2, но скорость не изменяется. Этими координатами определяется точка *2* новой скоростной характеристики. Точка *2* новой характеристики $F(I_{т м})$ определяется при I_2 по величинам F_2 или ΔF.

Плавное регулирование возбуждения может производиться при помощи импульсного преобразователя (ИП), включенного параллельно или последовательно с ОВ [62.30, 62.31, 62.49, 62.51]. В тяговом режиме преимущественно используется параллельное включение ИП и ОВ, при торможении — последовательное. Это обусловлено характером зависимости коэффициента ослабления поля $\beta(\lambda)$ от коэффициента заполнения ИП.

Регулирование $U_{т м}$ в схеме с параллельным включением ИП в схеме рис. 62.60, *а* может производиться любым из известных типов регуляторов напряжения РН, включая и ИП. В последнем случае такое импульсное управление называют раздельным. Сопротивление $R_ш$, значение которого обычно составляет (20—40)$R_{о в}$, определяет при выключенном ИП наименьшее ослабление поля с $\beta_{max} = R_ш/(R_ш + R_{о в})$. При включенном ИП достигается определяемое сопротивлением параллельно включенных резисторов $R_ш$ и $R_о$ наибольшее ослабление поля при $\beta_{min} = R_о R_ш/(R_о R_ш + R_о R_{о в} + R_ш R_{о в})$. Промежуточные значения β определяются значениями λ [62.51]:

$$\beta = I_я/I_в = 1/\{1 + R_{о в}/R_ш[1 - R_ш\lambda/(R_о + R_ш)]\}.$$

Степень нелинейности зависимостей $\beta(\lambda)$ определяется величиной β_{max}, а небольшое уменьшение β_{min} ведет к существенному снижению β_{max} (рис. 62.60, *б*). Уменьшение β_{max} нежелательно, так как приводит к снижению силы тяги при пуске. Еще одним недостатком является появление пульсаций $I_я$ с частотой работы ИП, которые оказывают мешающее влияние на передаваемые по рельсам сигналы устройств автоматического регулирования режимов работы и обеспечения безопасности движения ЭПС. По этой причине оказалось невозможным использование в режиме тяги ОП при помощи преобразователя типа РТ-300 [62.31] на вагонах метрополитена серии 81-717 (714) с реостатным пуском.

На ЭПС с импульсным РН благодаря наличию входного фильтра и дополнительной индуктивности в цепи якорей ТМ (см. рис. 62.40 и 62.60, *в*) ограничений для регулирования возбуждения ИП практически нет. Кроме того, появляется возможность использования совмещенного регулирования, когда плавное ОП достигается с использованием только одного ИП, установленного для регулирования $U_{т м}$. Одна из возможных схем совмещенного регулирования показана на рис. 62.60, *в*. Ток $I_я$ в цепи якоря Я за период работы ИП вследствие

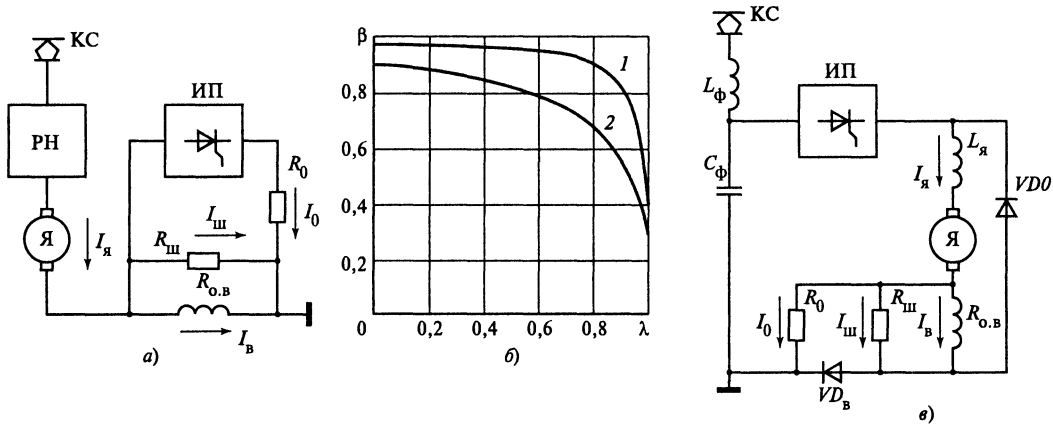


Рис. 62.60. Схема импульсного регулирования ослабления поля с параллельным включением ИП (*а*) и ее характеристики (*б*) при $\beta_{max} = 0{,}98$ и $\beta_{min} = 0{,}4$ (кривая *1*) и $\beta_{max} = 0{,}9$ и $\beta_{min} = 0{,}3$ (кривая *2*) и схема совмещенного регулирования напряжения и ослабления поля (*в*)

большой суммарной индуктивности его цепи изменяется незначительно, причем при разомкнутом ИП он замыкается через нулевой диод *VD0*. При этом в квазиустановившемся режиме $\beta_{max} = R_ш/(R_ш + R_{о.в})$, как и в схеме на рис. 62.60, *а*, так как $I_0 = 0$ из-за наличия $VD_в$. При включенном ИП в квазиустановившемся режиме β_{min} с погрешностью в пределах 1,5—3 % определяется выражением $R_0/(R_0 + R_{о.в})$, так как $R_0 << R_ш$. Выражения для β_{min} и зависимости $\beta(\lambda)$ для схемы рис. 62.60, *а*, *в* одинаковы.

В режимах работы ИП в совмещенной схеме при $1 > \lambda > 0$ и включенном ИП ток $I_в$ уменьшается, а при выключенном — увеличивается.

Преимущество совмещенного регулирования состоит в упрощении электрооборудования, но за счет ухудшения тяговых характеристик, так как при постоянном $I_я$ уменьшение $I_в$ происходит с начала регулирования $U_{т.м}$. Этот недостаток может быть устранен использованием в схеме рис. 62.60, *а* в качестве РН также ИП. При этом регулирование $I_в$ начинается после окончания регулирования $U_{т.м}$ и сила тяги при увеличении $U_{т.м}$ остается постоянной.

ПОСТРОЕНИЕ ПУСКОВЫХ ДИАГРАММ

Целью построения пусковых диаграмм является определение изменений параметров силовых цепей ЭПС, обеспечивающих регулирование силы тяги в соответствии с ее ограничениями. При построении пусковых диаграмм ЭПС с коллекторными ТМ постоянного тока последовательного или смешанного возбуждения используются характеристики $F(I_{т.м})$ и $v(I_{т.м})$ при номинальном напряжении $U_{т.м}$ на коллекторах. Пусковые диаграммы ЭПС постоянного тока строятся в координатах v—$I_{т.м}$, переменного — $U_{т.м}$—$I_{т.м}$.

С наибольшей точностью регулирование силы тяги по расчетным значениям ограничивающих ее параметров достигается при плавном регулировании $U_{т.м}$ и $I_{т.м}$. Максимальная пусковая сила тяги F_{max} электровозов ограничивается только расчетными значениями коэффициента сцепления (см. рис. 62.36), трамваев, троллейбусов, электропоездов метрополитена и, реже, наземных ЭП — допустимыми значениями ускорения a_{max} по условиям комфорта пассажиров (см. рис. 62.37). Показатель $a_{max} = 2$ м/с^2 обычными наземными ЭП не может быть реализован из-за наличия прицепных вагонов, а ЭП метрополитена — из-за дополнительного ограничения допустимым током в контактном рельсе. Поэтому F_{max} наземных ЭП определяется значением $\Psi_к$, а ЭП метрополитена — значением $a_{max} \le 1{,}4$—$1{,}5$ м/с^2. При заданном ускорении обеспечивающая его сила тяги, кг, одной колесной пары определяется как

$$F_0 = [102(1 + \gamma)a + w_0]\Pi'_0,$$

где Π'_0 — вес единицы ЭПС или ЭП, включая прицепные вагоны, приходящийся на одну движущую ось, т; γ — коэффициент инерции вращающихся частей, средний для движущих и необмоторенных осей; w_0 — удельное сопротивление движению, кг/т.

Зависимости $w_0(v)$ могут быть рассчитаны по приведенным в [62.2] формулам. Учитывая его малое влияние на процесс пуска ЭПС при больших ускорениях в зоне малых скоростей движения, допустимо использовать следующие постоянные значе-

ния w_0 в расчетах пусковых диаграмм до выхода ТМ на автоматическую характеристику: для троллейбусов 12, для трамваев 5, для электропоездов, наземных и метрополитена, 1,2—1,3. Значение γ составляет для троллейбусов 0,15—0,2, трамваев — 0,1—0,14, наземных ЭП — 0,07—0,09 и ЭП метрополитена — 0,1—0,13 [62 2]

Возможность реализации F_0, полученной для a_{max}, нужно проверить по условиям сцепления. если $F_0 > П_0\Psi_к$ (где $П_0$ — нагрузка на одну ведущую ось), то принятое значение a_{max} не может быть реализовано.

По приведенной выше формуле может быть найдена зависимость $F_0(v)$, обеспечивающая заданные ограничения $a(v)$ По найденной зависимости $F_0(v)$ и известным характеристикам $F(I_{т\,м})$ для используемой ТМ, можно вычислить искомую функцию $v(I_{т\,м})$

На ЭПС с плавным регулированием напряжения найденная зависимость $v(I_{т\,м})$ обеспечивается соответствующим изменением $U_{т\,м}$, а на ЭПС постоянного тока с реостатным пуском — плавным регулированием сопротивления $R_{п\,р}$ пускового резистора.

ПОСТРОЕНИЕ ПУСКОВЫХ ДИАГРАММ ЭПС С РЕОСТАТНЫМ ПУСКОМ

Плавное регулирование F_0 на ЭПС с реостатным пуском достигается путем импульсного межступенчатого регулирования $R_{п\,р}$ (см. рис. 62.41). Близкое к плавному регулирование F может быть достигнуто и при ступенчатом изменении $R_{п\,р}$. Например, на трамвайных вагонах Т-3 с клавишными реостатными контроллерами число пусковых позиций составляет 75 [62.51], на опытных вагонах метрополитена с тиристорными реостатными контроллерами — более 50 [62.37], причем это число может быть легко увеличено. На этих типах ЭПС колебания силы тяги при пуске до выхода на безреостатные позиции малы.

На ЭПС с автоматическим пуском (электропоезда, трамваи, троллейбус) в зоне I ограничения F (см. рис 62.36) при помощи реле ускорения обычно поддерживается постоянное значение тока уставки $I_{уст}$, при котором происходит выключение очередной ступени сопротивления пускового резистора $\Delta R_{п\,р}$. При плавном регулировании $R_{п\,р}$ или при малых значениях $\Delta R_{п\,р}$ реализуется пуск с практически неизменным $I_{т\,м} \approx I_{уст} = \text{const}$. При этом F постоянная, а ускорение изменяется незначительно вследствие малого изменения w_0 в зоне регулирования $R_{п\,р}$.

Пусковые диаграммы для ЭПС с любым числом z движущих осей обычно строят для одной ТМ. При этом находят зависимость приведенного к одной ТМ сопротивления пускового резистора $R'_{п\,р}$ от скорости движения, которая для одноступенчатого пуска без перегруппировок ТМ и для их первой (сериесной) группировки при многоступенчатом пуске рассчитывается.

$$U'_{к\,с} = I_{т\,м}(R'_{п\,р} + R_{т\,м}) + C\Phi v + L_d I_{т\,м}/dt,$$

где $U'_{к\,с} = U_{к\,с}/n$, $R'_{п\,р} = R_{п\,р}/n$; $R_{т\,м}$ — сумма сопротивлений обмоток ТМ, L — сумма индуктивностей в цепи $I_{т\,м}$, n — число последовательного включенных ТМ.

Если $I_{т\,м}$ постоянный, $L_d I_{т\,м}/d\,t = 0$ и $R'_{п\,р} = (U_{к\,с} - C\Phi v)/I_{т\,м} - R_{т\,м}$. При последовательном возбуждении Ф постоянный, поэтому

$$R'_{п\,р} = R'_{п\,р0} - cv,$$

где $R'_{п\,р0} = U'_{к\,с}/I_{т\,м} - R_{т\,м}$, c — коэффициент.

Следовательно, на рассматриваемом участке пусковой диаграммы (рис. 62.61, *а*) при плавном регулировании $R_{п\,р}$ сопротивление $R'_{п\,р}$ плавно уменьшается от $R'_{п\,р0}$ при $v = 0$ до нуля при скорости выхода на автоматическую характеристику $v_{а\,х}$. Но при полученном значении $R'_{п\,р0}$ начальное ускорение ЭПС было бы равно a_{max}, что недопустимо (см. рис. 62 37). Поэтому пуск начинается при $R'_{п\,р\,max} > R'_{п\,р0}$ и этим обеспечивается уменьшение пускового тока до I_0 и ускорения до $a_0 \le 0{,}4$ м/с^2. Затем $R'_{п\,р}$ уменьшается по закону, обеспечивающему постоянное приращение ускорения h, и при v_1 достигается a_{max} и рост $I_{т\,м}$ ограничивается значением тока уставки реле ускорения $I_{уст}$.

Расчет зависимости $R'_{п\,р}(v)$ на участке $h = \text{const}$ относительно сложен, но сам диапазон изменения v в этом режиме невелик. В частности, при $a_0 = 0{,}4$ м/с^2, $h = 0{,}6$ м/с^3 и $a_{max} = 1{,}8$ м/с^2 $v_1 = 5{,}88$ км/ч и достигается за 2,33 с.

Величина a_0 при определяемом значением $R'_{п\,р\,max}$ значении I_0 может быть дополнительно уменьшена, как это делается на вагонах метрополитена, применением ослабления поля ТМ в начале пуска. Для уменьшения общего числа ступеней регулирования сопротивления $R_{п\,р}$ целесообразно ограничиться их минимумом в зоне $I_{т\,м} < I_{уст}$, но при этом ухудшается динамика разгона ЭПС. На эксплуатируемом ЭПС число рассматриваемых ступеней имеет большой разброс: на вагонах метрополитена их до 10, у троллейбусов и трамваев — 4—6, у электропоездов ЭР2Р, ЭР2Т и ЭД4 — 4, у электропоездов ЭР2 — всего 2.

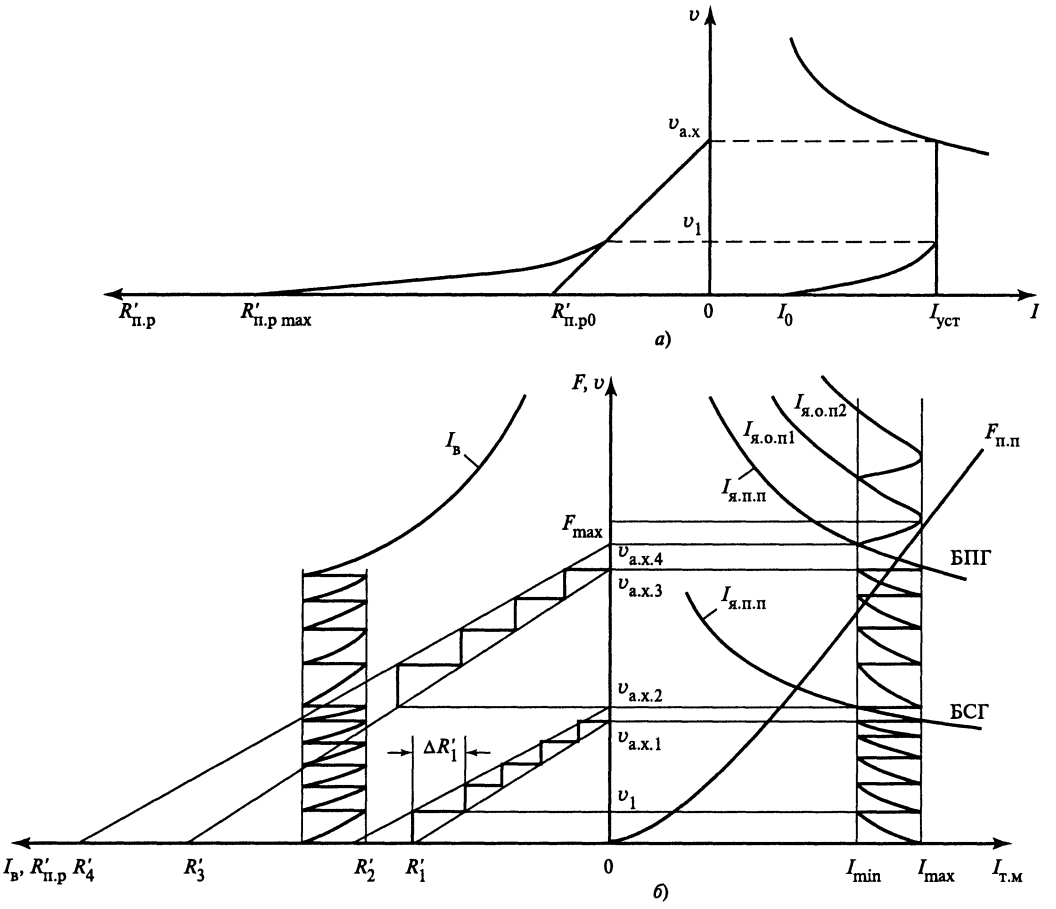


Рис. 62.61. Построение пусковых диаграмм ЭПС с реостатным пуском при одноступенчатом пуске с плавным регулированием сопротивления пускового резистора (*а*) и при двухступенчатом пуске с дискретным регулированием сопротивления пускового резистора (*б*)

У электровозов с ручным управлением число рассматриваемых ступеней от 5 до 7 у грузовых и до 10 у пассажирских.

На эксплуатируемом ЭПС с перегруппировками ТМ после достижения $v_{а.х}$ на первой группировке продолжается реостатный пуск после переключения ТМ на следующую группировку, наибольшее число которых, используемое только на электровозах, равно трем: сериесная с последовательным включением всех ТМ, сериес-параллельная с параллельным включением двух групп из последовательно соединенных трех (у шестиосных электровозов) и четырех (у восьмиосных электровозов) ТМ и параллельная с параллельным включением всех групп из постоянно последовательно соединенных двух ТМ (соответственно три и четыре группы ТМ). Используемый на электровозах пуск с двумя перегруппировками называется трехступенчатым.

На всех типах отечественного ЭПС постоянного тока, кроме троллейбусов с одной ТМ, на параллельной группировке остаются последовательно включенными две или четыре ТМ. На моторных вагонах метрополитена и электропоездов типа ЭР1 и ЭР2 используется двухступенчатый пуск с одной перегруппировкой с последовательного соединения четырех ТМ на параллельное включение двух групп из последовательно включенных двух ТМ. Несмотря на резкое ухудшение энергетических показателей из-за увеличения реостатных потерь, одноступенчатый пуск без перегруппировок ТМ, используется на всех эксплуатируемых трамвайных вагонах при постоянном параллельном соединении двух групп из последовательно включенных двух ТМ, а также на электропоездах ЭР2Р, ЭР2Т и ЭД4 с постоянным последовательным включением четырех ТМ.

Двухступенчатый пуск используется на электропоездах, моторные вагоны которых соединены по схеме сплотки — с последовательным соединением восьми ТМ двух вагонов и с перегруппировкой их в две параллельные цепи по четыре последовательно соединенных ТМ каждого вагона. Такая схема использована на отечественных электропоездах ЭР200 [62.36] и ЭР2С с энергосберегающей системой тягового электропривода [62 52], а также на всех японских электропоездах, включая и поезда метрополитена [62 35].

На всех типах отечественного ЭПС с реостатным пуском, кроме электропоездов ЭР200, используется ступенчатое регулирование $R_{п\,р}$, хотя на трамваях Т-3 эти ступени мелкие и регулирование $R_{п\,р}$ близко к плавному. Оно осуществляется с использованием индивидуальных (на отечественных электровозах) и групповых кулачковых контакторов, для уменьшения числа которых необходимо уменьшать количество ступеней $R_{п\,р}$ до минимального, обусловленного допустимыми приращениями силы тяги ΔF при выключении очередной ступени $\Delta R_{п\,р}$, определяемыми приращениями тока ТМ $\Delta I_{т\,м} = I_{max} - I_{min}$. Допустимые значения $\Delta F = F_{max} - F_{min}$ вычисляют, используя допустимые по воздействиям на пассажиров приращения ускорений Δa. Амплитуды колебаний величин $I_{т\,м}$, F и a относительно их средних значений принято [62.2, 62.30] характеризовать коэффициентами неравномерности $K_{н}$. Для $I_{т\,м}$ коэффициент $K_{нI} = \Delta I/2I_{ср} = (I_{max} - I_{min})/(I_{max} + I_{min})$. При этом расчетное значение $\Delta I_{р} = I_{max} - I_{ср} = I_{ср} - I_{min}$ при допущении о равенстве положительных и отрицательных отклонений токов от $I_{ср}$ вдвое меньше его фактического приращения при выключении ступени $R_{п\,р}$.

Аналогично вычисляются коэффициенты неравномерности пуска по силе тяги $K_{нF}$ и ускорению $K_{на}$. При этом $K_{нI} < K_{нF} < K_{на}$, так как относительное значение ΔF при том же $\Delta I_{т\,м}$ больше из-за большего изменения F вследствие одновременного с изменением $I_{т\,м}$ согласного изменения потока Ф. Коэффициент $K_{на}$ больше $K_{нF}$ из-за того, что сопротивление движению $w_{о}$ не влияет на Δa, но уменьшает $a_{ср}$. Следовательно, $K_{на}$ при тех же ΔF возрастает по мере снижения $a_{ср}$ из-за увеличения $w_{о}$. Этим объясняется уменьшение допустимого значения $K_{нI}$ при увеличении $a_{ср}$. Так, для трамваев и троллейбусов допустимыми считаются [62.51] $K_{нI}$ = 0,1—0,2; 0,08—0,15 и 0,06—0,1 при $a_{ср}$ = = 0,6—0,8; 1—1,2 и 1,3—1,5 м/с^2. Для моторных вагонов обычно принимают $K_{нI}$ = 0,2—0,25, 0,1—0,15 и 0,06—0,1 при $a_{ср}$ = 0,4—0,6; 0,6—0,8 и больше 1 м/с^2, для электровозов $K_{нI}$ = 0,07—0,08; и даже 0,04—0,05 [62.2]. Наименьшее значение $K_{нI}$ у электровозов обусловлено не столько малыми ускорениями, сколько необходимостью реализации на них гораздо больших коэффициентов тяги $K_{т} = F_{0}/П_{0}$, т.е. использования на них режимов работы с предельными значениями коэффициента сцепления, что требует снижения колебаний F.

С учетом приведенных выше сведений графоаналитическое построение пусковой диаграммы ЭПС со ступенчатым резисторным пуском и с перегруппировками ТМ последовательного возбуждения в зоне $I_{уст}$ = const производится в следующей последовательности (см. рис. 62.61, *б*):

1. Используя известную автоматическую характеристику $v(I_{т\,м})$ при номинальном $U_{т\,м}$ (на рис 62.61, *б* это безреостатная параллельная группировка — БПГ), строят автоматические характеристики для других группировок [на рис. 62.61, *б* — для безреостатной сериесной группировки (СГ) с последовательным соединением всех n_{1} ТМ]. Так как поток возбуждения Ф при одном и том же $I_{т\,м} = I_{в}$ одинаков при всех группировках ТМ, построение искомых характеристик выполняется по соотношениям:

$$v_{с\,г}/v_{п\,г} = C\Phi v_{с\,г}/C\Phi v_{п\,г} = E_{с\,г}/E_{п\,г} = (U_{к\,с}/n_{1} - IR_{т\,м}) : (U_{к\,с}/n_{2} - IR_{т\,м}).$$

Следовательно, $v_{с\,г} = v_{п\,г}\dfrac{n_{2}}{n_{1}}\dfrac{U_{к\,с} - n_{1}IR_{т\,м}}{U_{к\,с} - n_{2}IR_{т\,м}}$, где n_{2} — число последовательно включенных ТМ на ПГ, обычно $n_{2} = 2$.

Отношение $v_{п\,г}/v_{с\,г}$ зависит от $R_{т\,м}$. У моторных вагонов при $n_{1} = 4$ и $n_{2} = 2$ при I_{max} оно составляет около 2,2, а при малых токах снижается до 2,05.

2. По описанной выше методике (см. рис. 62.61, *а*) определяется F_{max} по допустимому ускорению для пассажирского ЭПС и по коэффициенту сцепления $\Psi_{к}$ для электровозов. Используя известную зависимость силы тяги оси при полном поле $F_{п\,п}$ от $I_{т\,м}$, по F_{max} определяют максимальный пусковой ток ТМ I_{max}, значение которого не должно превышать допустимого для используемой ТМ.

3. Выбрав рекомендованное для данного типа ЭПС с принятым ускорением значение коэффициента неравномерности пуска по току $K_{нI}$, вычисляют $I_{min} = I_{уст} = I_{max}(1 - K_{нI})/(1 + K_{нI})$. Найденные I_{max} и I_{min} определяют пределы изменения токов ТМ $\Delta I_{т\,м}$ при работе на всех реостатных позициях, а также скорости выхода на БСГ $v_{а\,х1}$ и БПГ $v_{а\,х3}$ и скорости $v_{а\,х2}$ и $v_{а\,х4}$ достижения на них I_{min}, при которых заканчивался бы реостатный пуск с I_{max} и I_{min} в случае плавного регулирования $R_{п\,р}$ на ЭПС с последовательным соединением четырех и двух ТМ. В этих режимах $R'_{п\,р\,о}$ определяется как

$U_{к\,с}/4I_{т\,м} - R_{т\,м}$ и $U_{к\,с}/2I_{т\,м} - R_{т\,м}$ На рис. 62 61, *б* они обозначены R'_1 и R'_4. Соединив прямыми точки $v_{а\,х}$ и R с одинаковыми номерами, получаем границы изменения $R'_{п\,р}$ для обеих группировок ТМ.

4. Построение пусковой диаграммы и определение ступеней изменения $R'_{п\,р}$ производятся графически. При R'_1 устанавливается I_{max}, по мере увеличения v ток уменьшается до $I_{min} = I_{уст}$ при v_1 и производится выключение первой ступени сопротивления пускового резистора $\Delta R'_1$, что обусловливает увеличение $I_{т\,м}$ до I_{max}. Если ускорение ЭПС невелико, то справедливо обычно используемое допущение о неизменности v при увеличении $I_{т\,м}$ В этом случае ток увеличивается до I_{max} скачком Далее процесс повторяется до выхода на БСГ при $v_{а\,х1}$. После уменьшения тока до I_{min} при $v_{а\,х2}$ производится перегруппировка ТМ и в их цепи вводится ПР с сопротивлением на одну ТМ несколько большим R'_1. При этом $I_{т\,м}$ увеличивается до I_{max} и дальнейшее построение пусковой диаграммы на реостатных позициях ПГ производится так же, как и на СГ. Реостатный пуск заканчивается при $v_{а\,х3}$, когда выключается последняя ступень $R_{п\,р}$ и к ТМ подводится полное напряжение, т.е. заканчивается зона I (см. рис. 62.36) регулирования силы тяги.

5. Если после увеличения скорости до $v_{а\,х4}$ не изменить режим работы ТМ, то сила тяги будет резко снижаться, так как при увеличении v будут одновременно уменьшаться токи якорей $I_я$ и обмоток возбуждения $I_в$ ТМ, причем $I_в = I_{я\,п\,п}$. Для сохранения принятого значения $I_я$ при $v_{а\,х4}$ включается ослабление поля и происходит описанный выше (см. рис. 62.57, *в*) рост $I_я$ и F. Если этот процесс происходит при v = const, то $I_в$ практически не изменяется и необходимый для увеличения $I_я$ до I_{max} коэффициент ослабления поля находится как $\beta_1 = I_в/I_я = I_{min}/I_{max}$. Далее ТМ работает по характеристике ослабленного поля $I_{я\,о\,п1}$ при $I_в = \beta_1 I_я$, которая строится умножением абсцисс характеристики $I_{я\,п\,п}$ на $1/\beta_1$. После уменьшения $I_я$ до I_{min} включается следующая ступень ОП, и если $I_я$ увеличивается до I_{max}, то $\beta_2 = \beta_1 I_{min}/I_{max} = \beta_1^2$. Следовательно, при неизменном $\Delta I_я$, $\beta_i = \beta_1^i$.

Число ступеней ОП составляет от двух на электропоезде ЭР2 до шести на электропоездах ЭР2Т и ЭР2С.

В отличие от используемого при построении пусковых диаграмм допущения о v = const при увеличении $I_{т\,м}$ при выключении ступени $R_{п\,р}$, верном для электровозов, скорость ЭПС с большими ускорениями за это время увеличивается. Поэтому $I_{т\,м}$ не достигает расчетного значения I_{max} и изменяется не так резко Отличие реальных зависимостей $I_{т\,м}(v)$ от идеализированных растет по мере уменьшения $R_{п\,р}$ вследствие замедления роста $I_{т\,м}$ в результате увеличения постоянной времени его цепи Наиболее ярко это отличие проявляется в области ОП (см. рис. 62 61, *б*).

Для сокращения реостатных потерь энергии на ПГ целесообразно после выхода на БСГ продолжать разгон поезда, применяя ОП, с неизменным или увеличивающимся $I_я$ [62 45, 62.52].

Действительные значения сопротивлений ступеней ПР $\Delta R_{п\,р}$ определяются по полученным при построении пусковой диаграммы удельным значениям $\Delta R'_{п\,р}$ для СГ и при включении в каждую параллельную цепь ТМ на ПГ индивидуальных ПР (как это сделано на вагонах метрополитена) умножением $\Delta R'_{п\,р}$ на соответствующее число n последовательно включенных ТМ При использовании же на ПГ общего для всех m параллельных цепей ПР $\Delta R_{п\,р} = \Delta R'_{п\,р} n/m$.

Полученные расчетные значения $\Delta R_{п\,р}$ при реальной конструкции и схемах соединений элементов ПР не могут быть реализованы без заметных отклонений и являются предварительными Затем они корректируются с учетом реальных возможностей приближения к расчетным. Поэтому I_{max} при реостатном пуске с $I_{уст} = I_{min}$ = const на части ступеней заметно отклоняется от среднего расчетного значения.

ПОСТРОЕНИЕ ПУСКОВОЙ ДИАГРАММЫ ЭПС ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СО СТУПЕНЧАТЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

Преимуществом ЭПС переменного тока является возможность постоянного параллельного включения всех ТМ, что обеспечивает увеличение силы тяги в зоне ее ограничения условиями сцепления [62.24, 62.26]. Поэтому оно используется на всех электровозах На электропоезде ЭР9 для упрощения электрооборудования сохранено последовательно-параллельное соединение ТМ.

Задачей построения пусковой диаграммы является предварительное определение минимального числа ступеней регулирования подведенного к ТМ напряжения U_d, достаточного для ограничения колебаний $I_{т\,м}$ в заданных пределах от I_{min} до I_{max}, которые определяются так же, как и для ЭПС постоянного тока.

Число ступеней регулирования U_d при заданных I_{max} и I_{min} определяется жесткостью внешней ха-

рактеристики выпрямителя — зависимостью $U_d(I_d)$, т.е. $U_d(I_{т.м})$. Последняя описывается [62.30]:

$$U_d = U_{d0} - \Delta U_d(I_d) - \Delta U_в,$$

где $U_{d0} = 0{,}9U_{х.т}$ — выпрямленное напряжение при $I_d = I_{т.м} = 0$; $\Delta U_в$ — падение напряжения в вентилях, которым можно пренебречь; $\Delta U_d = R_{эп}I_d$ — общие потери напряжения выпрямителя.

При реализуемых значениях пульсации выпрямленного тока при $K_п = 0{,}5$—$0{,}6$ и напряжения КЗ трансформатора $u_к$ порядка 10 % эквивалентное сопротивление преобразователя

$$R_{э.п} = 0{,}7(X_т + R_т) + R_d,$$

где $X_т = u_{к.ном}U_{т.ном}/100I_{dном}$ — индуктивное сопротивление трансформатора; $R_т = R_1/K^2 + R_2 \approx \approx 0{,}1X_т$ — приведенное ко вторичной обмотке сопротивление обмоток трансформатора; R_d — активное сопротивление цепи выпрямленного тока, за исключением $R_{т.м}$.

При малом значении R_d жесткость внешней характеристики определяется индуктивной потерей напряжения, обусловленной длительностью коммутации тока в плечах выпрямителя, $\Delta U_х = 0{,}7X_т I_d \equiv \equiv u_к$. Пропорциональность $\Delta U_х$ $u_к$ обусловливает возможность получения желаемого числа ступеней регулирования за счет выбора $u_к$ трансформатора. Однако пределы его изменения ограничены. При малом $u_к$ растут токи короткого замыкания и появляется опасность повреждения обмоток трансформатора электродинамическими силами. При больших $u_к$ возрастают время и угол коммутации и снижается коэффициент мощности λ, ухудшая энергетические показатели тяги. В частности, при $I_х = = U_х/X_т = 1{,}85\ I_d$ коэффициент λ = 0,5 против 0,8 при $I_х = 5{,}9I_d$. На эксплуатируемом ЭПС $u_к$ трансформаторов составляет примерно 9 % (у электровозов ВЛ80Т — 8,7 % и у электропоездов ЭР9 — 9,6 %).

При реальных параметрах электрооборудования на высшей ступени регулирования напряжения $\Delta U_d \approx 1{,}3\Delta U_х$. Приведенные данные и соотношения позволяют построить внешнюю характеристику на высшей n-й ступени регулирования U_{dn}. Для известных значений тока и напряжения выбранной ТМ определяют $U_{d\,ном} = U_{т.м.ном}$ и, приняв $u_к$ трансформатора равным 9 %, вычисляют $\Delta U_{d\,ном}$ при $I_d = I_{т.м.ном}$. Тогда $U_{d0} = U_{d\,ном} + \Delta U_{d\,ном}$. По полученным двум точкам строят высшую внешнюю характеристику (рис. 62.62). Для построения пусковой диаграммы необходима зависимость $\Delta U_d(U_{d0})$ при I_{min}. На высшей ступени регулирования ΔU_d определяется по уже построенной характеристике U_{dn} как $\Delta U_{dn} = U_{d\,о.п} - U_{dn}(I_{min})$, а на низшей ступени в случае регулирования U_d последовательным увеличением числа витков вторичной обмотки трансформатора $\Delta U_d < \Delta U_{dn}$ ориентировочно в 6 раз [62.30]. Это позволяет построить показанную во втором квадранте линейную зависимость $\Delta U_d(U_{d0})$.

Полученные исходные характеристики выпрямителя и известные нагрузочные характеристики выбранной ТМ достаточны для построения пусковой диаграммы. Как и при реостатном пуске ЭПС постоянного тока оно выполняется с допущением о неизменности скорости движения v при увеличении $I_d = I_{т.м}$ от I_{min} до I_{max}. Вследствие равенства $I_в$ и $I_я$ поток возбуждения ТМ на всех ступенях регулирования U_d увеличивается на одно и то же значение ΔФ. Поэтому приращения ЭДС ТМ $\Delta E_{т.м} = = C\Delta\Phi v$ на каждой ступени регулирования пропорциональны соответствующей скорости движения. Это позволяет выполнить графоаналитическое построение пусковой диаграммы в следующей последовательности:

1. По нагрузочным характеристикам ТМ найти Φ_{min} и Φ_{max}, а по характеристике U_{dn} определить $U_{d\,a}$ при I_{max} (точка *a* на рис. 62.62).

2. Вычислить $E_{т.м\,a} = U_{d\,a} - I_{max}R_{т.м}$ и соответствующую скорость движения $v_n = E_{т.м\,a}/C\Phi_{max}$, при которой произошло включение n-й ступени U_d.

3. Вычислить $\Delta E_{т.м\,n} = C\Delta\Phi v_n$ при включении последней ступени регулирования $U_{d\,n}$ (при изменении U_d между точками *b* и *a*) и U_d при I_{min} на предыдущей ступени $U_{d\,(n-1)}$ (точка *b*) как $U_{d\,b} = = E_{т.м\,a} - \Delta E_{т.м\,n} + I_{min}R_{т.м}$.

4. Определить соответствующее $U_{d\,b}$ значение $\Delta U_{d\,(n-1)}$ (отрезок между точкой *c* и осью ординат), используя которое, определить U_{d0} для предыдущей ступени регулирования (точка *d*).

5. Провести прямую через точки *d* и *b*, которая и является внешней характеристикой $U_{d\,(n-1)}$ на предыдущей ступени регулирования. В точке *e* ее пересечения с прямой I_{max} определяется $U_{d\,e}$, и далее построение повторяется с последовательным нахождением координат точек *f*, *g*, *h* и *i*.

Заключительная стадия построения пусковой диаграммы может быть выполнена графически [62.30]. В построении предварительно определяется положение в третьем квадранте полюса *p*, в котором пересекаются с продолжением прямой $I_{т.м}R_{т.м}$ все прямые, проходящие через точки пересечения прямых I_{min} и I_{max} с характеристиками $E_{т.м} + I_{т.м}R_{т.м}$, построенными для любой скорости движения v, что объясняется постоянством и независимостью от v при последовательном возбуждении ТМ отноше-

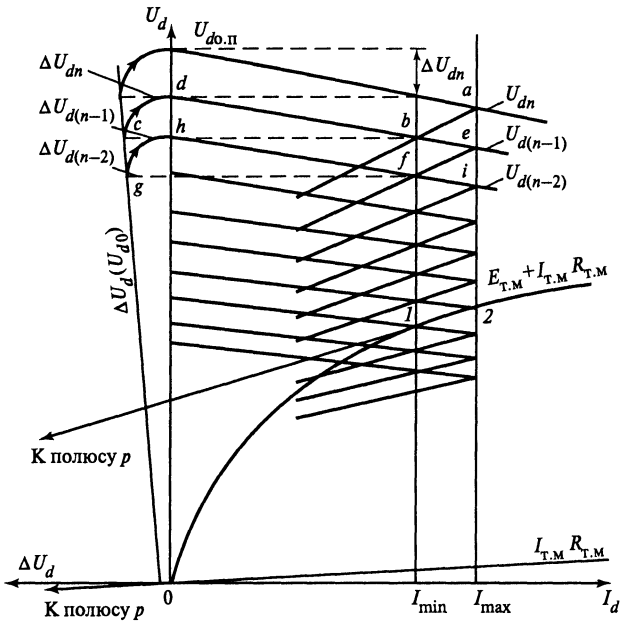


Рис. 62.62. Построение пусковой диаграммы ЭПС переменного тока со ступенчатым регулированием напряжения

ний $E_{т.м}(I_{max})/E_{т.м}(I_{min})$. Поэтому для нахождения полюса p достаточно построить характеристику $E_{т.м}+I_{т.м}R_{т.м}$ для одного значения v и провести через точки *1* и *2* диаграммы прямую до пересечения с прямой $I_{т.м}R_{т.м}$.

При известных (построенных так же, как и в графоаналитическом методе) исходных характеристиках выпрямителя и полюсе p графическое построение пусковой диаграммы выполняется в следующей последовательности:

1. Проводится прямая между точками a и p и полученное при ее пересечении с прямой I_{min} в точке b значение $U_{d\,b}$ переносится на характеристику $\Delta U_d(U_{d\,0})$ в точку c, ордината которой определяет ΔU_d при I_{min} $(n-1)$-й внешней характеристики. Используя найденное значение ΔU_d, определяют $U_{d\,0}$ для $(n-1)$-й внешней характеристики, которой является прямая, проведенная через точки d и b.

2. Далее построение повторяют, проводя прямые между точками пересечения каждой следующей внешней характеристики с прямой I_{max}.

Для поддержания неизменными приращений токов необходимо по мере уменьшения $U_{d\,0}$ уменьшать и разность приращений U_d при включении его следующей ступени. Реально это выполнить невозможно. Поэтому приращения $\Delta U_{d\,0}$ на каждой ступени его регулирования одинаковы. При этом значение I_{max} при неизменном значении I_{min} при увеличении U_d и скорости движения уменьшается. Следовательно, уменьшается средняя сила тяги, и ее зависимость от скорости движения подобна изменению коэффициента сцепления.

Рассмотренное построение пусковой диаграммы является предварительным. Она корректируется в соответствии с реальными ступенями приращений $\Delta U_{d\,0}$ при переключении ступеней регулирования напряжения трансформатора.

РЕГУЛИРОВАНИЕ ТОРМОЗНОЙ СИЛЫ ЭПС С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОРМОЖЕНИЕМ

ЭПС с электрическим тормозом (ЭТ) имеет преимущества перед ЭПС, оборудованным механическим тормозом [62.26, 62.53], важнейшими из которых являются: повышение безопасности движения, увеличение скорости движения по вредным спускам и возможность повышения ее допустимого значения на площадках, снижение износа тормозных колодок и бандажей колес и возврат энергии в сеть при рекуперативном торможении. Применение ЭТ дает большой экономический эффект. Если принять эффект от возврата энергии в сеть за единицу, то удельные значения эффекта от других положительных факторов использования ЭТ на грузовых электровозах в относительных единицах составит: от повышения скорости движения по спускам — 5, от сокращения износа тормозных колодок — 3 и от снижения износа колес — 1 [62.26, 62.54]. При использовании ЭТ на электропоездах за счет возврата энергии в сеть обеспечивается до половины общего экономического эффекта.

Кроме того, в метрополитене эксплуатация ЭПС без ЭТ невозможна, при движении грузовых

поездов по длинным крутым спускам — резко затруднена. Поэтому сегодня все типы выпускаемого и проектируемого ЭПС оборудуются ЭТ.

Принципиально возможны и практически используются три вида ЭТ: рекуперативное, с возвратом энергии в сеть, реостатное, с рассеиванием энергии в тормозном резисторе и рекуперативно-реостатное. Реостатное торможение может быть с самовозбуждением и с независимым возбуждением ТМ. Каждый из этих видов ЭТ имеет свои преимущества и недостатки, а так же области преимущественного использования.

Реостатное торможение с самовозбуждением (СВ). Оно применяется на ЭПС постоянного тока с реостатным пуском, на котором для его реализации нужно дополнительно к используемому в тяге электрооборудованию установить только тормозной переключатель. Схема силовых цепей переключается в режим торможения (рис. 62.63, *а*), в котором включаются последовательно якорь, обмотки возбуждения ТМ и тормозной резистор. При наличии хотя бы малой остаточной ЭДС E_0 нужной полярности после замыкания цепи $I_{т.м}$ начинается процесс самовозбуждения (рис. 62.63, *б*): при увеличении $I_{т.м}$ линейно увеличивается падение напряжения в его цепи $U_{т.м} = I_{т.м}(R_т + R_{т.м})$ и по закону, определяемому характеристикой намагничивания ТМ, растет $E_{т.м} = C\Phi v$. Увеличение $I_{т.м}$ прекращается при $E_{т.м} = U_{т.м}$, причем установившееся значение $I_{т.м}$ увеличивается при уменьшении сопротивления $R_т$. При $R_{т1} > R_{т2}$ установившееся значение $I_{т.м1} < I_{т.м2}$.

Время самовозбуждения определяется индуктивностью L цепи $I_{т.м}$ и разностью $E_{т.м} - U_{т.м} = L\,di/dt$. Оно увеличивается с ростом сопротивления $R_т$ и может достигать при низкой скорости 2—3 с [62.55]. Это в некоторых случаях вынуждает предпринимать меры по его сокращению. Это может быть оборудование ТМ специальными обмотками подмагничивания или кратковременная подпитка ОВ от постороннего источника напряжения.

Схемы силовых цепей ЭПС с реостатным торможением (РТ) и СВ должны обеспечивать сохранение направления магнитного потока при переходе от тяги к торможению и выравнивание токов в параллельно включенных цепях ТМ. Эти задачи решает используемая на вагонах метрополитена и трамвая схема рис. 62.63, *в*. В режиме тяги замкнут контактор *К1* и разомкнут *К2* и показанные штриховыми линиями направления токов в якоре и ОВ совпадают, причем токи якорей текут по своим ОВ. В тормозном режиме, когда замкнут контактор *К2* и разомкнут *К1*, показанные сплошными стрелками токи в ОВ сохраняют направление, а токи якорей меняют направление и протекают по чужим ОВ, что и обеспечивает их выравнивание.

Построение тормозной диаграммы и тормозных характеристик РТ с ОВ может быть выполнено как аналитически, так и с использованием графического метода. В обоих случаях оно носит предварительных характер, так как полученные ступени $\Delta R_т$ регулирования сопротивления $R_т$ неизбежно корректируются, в частности из-за необходимости их согласования с пусковым режимом.

При построении пусковой диаграммы пределы изменения $I_{т.м}$ от I_{min} до I_{max} определяются по тем же критериям, что и в тяговом режиме (см. рис. 62.61), но в ограничениях тяговой области появляется дополнительный параметр — максимальное напряжение U_{max} на коллекторах ТМ, которое выбирают предельно возможным для уменьшения при той же тормозной силе $I_{т.м}$ и тепловой нагрузки ТМ. Реально U_{max} может превышать номинальное напряжение более чем в 2 раза (на вагонах метрополитена [62.55] в 2,17 раза). По известным значениям U_{max} и I_{max} (последнее обычно на 10 % меньше, чем в тяговом режиме) вычисляется $R_{т\,max} = U_{max}/I_{max}$.

Используя полученные значения I_{min}, I_{max} и $R_{т\,max}$, тормозную диаграмму с определением $\Delta R_т$ регулирования сопротивления $R_т$ можно рассчитать в следующей последовательности:

1. По известной скоростной характеристике $v(I)$ используемой ТМ при $U_{ном}$ находим соответствующие I_{min} и I_{max} значения произведений потока на машинную постоянную $C\Phi_{min}$ и $C\Phi_{max}$: по формуле $C\Phi = E/v = (U - I_{т.м}R_{т.м})/v$.

2. При известных $R_{т\,max}$, I_{max} и $C\Phi_{max}$ ордината точки *а* диаграммы (рис. 62.63, *г*) вычисляется как $v_a = E_a/C\Phi_{max} = I_{max}(R_{т\,max} + R_{т.м})/C\Phi_{max}$.

3. При работе тормоза с $R_{т\,max}$ ток $I_{т.м}$ уменьшается до I_{min}. Следовательно, в точке *b* диаграммы $E_b = I_{min}(R_{т\,max} + R_{т.м})$ и $v_b = E_b/C\Phi_{min}$. Зависимость $v(I)$ при уменьшении v от v_a до v_b нелинейна, но без большой погрешности ее можно заменить прямой.

4. В точке *b* происходит выключение первой ступени $R_т$. При допущении о неизменности v в процессе роста $I_{т.м}$ последний скачком увеличивается до I_{max} на $\Delta I = I_{max} - I_{min}$. Соответственно на $\Delta E = E_c - E_b = v_b\Delta C\Phi$ растет ЭДС ТМ. Обозначим сопротивления $R_т$ на первой тормозной позиции через $R_a = R_{max}$ и на второй — через R_c. Тогда $\Delta R_1 = R_a - R_c$ определится из уравнения $\Delta E = I_{max}(R_c + R_{т.м}) - I_{min}(R_a + R_{т.м})$, откуда $\Delta R_1 = \Delta E/\Delta I - R_{т.м} =$

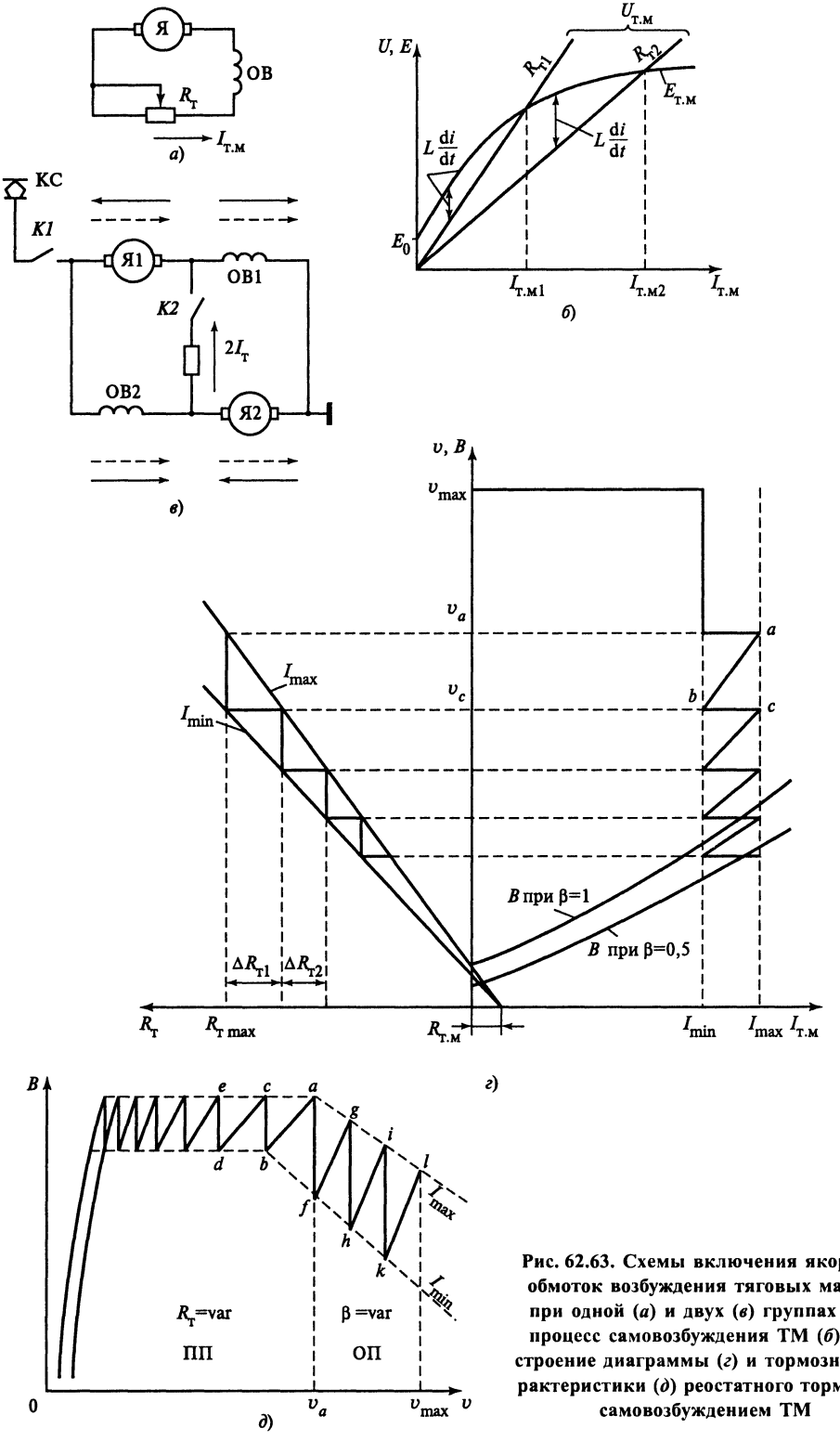


Рис. 62.63. Схемы включения якорей и обмоток возбуждения тяговых машин при одной (*а*) и двух (*в*) группах ТМ, процесс самовозбуждения ТМ (*б*), построение диаграммы (*г*) и тормозной характеристики (*д*) реостатного тормоза с самовозбуждением ТМ

$= \Delta C\Phi v_b/\Delta I - R_{т.м}$. Участки диаграммы на следующих ступенях $R_т$ рассчитываются аналогично. Так как $\Delta C\Phi$ и ΔI на всех ступенях регулирования $R_т$ одинаковы, то $\Delta R_i = kv_i - R_{т.м}$. Следовательно, ΔR линейно уменьшается по мере снижения скорости движения.

Тормозную диаграмму в рассмотренной зоне регулирования сопротивления $R_т$ можно построить графически. Предполагая возможность плавного регулирования сопротивления $R_т$ и используя найденные значения I_{min}, I_{max}, $C\Phi_{min}$, $C\Phi_{max}$ и $R_{т\,max}$, вначале строят характеристики $v(R_т)$ при I_{min} и I_{max} по уравнению $v = E/C\Phi = I(R_т + R_{т.м})/C\Phi$. При постоянных значениях I и $C\Phi$ скорость $v = k(R_т + R_{т.м})$. Следовательно, $v = 0$ при $R_т = -R_{т.м}$. При $R_т = 0$ роль тормозного резистора выполняет $R_{т.м}$. Затем по характеристикам $v(R_т)$ при I_{max} и I_{min} при $R_{т\,max}$ находят скорости v_a и $v_b = v_c$ (см. рис. 62.63, *г*) и строят отрезок *ab* тормозной диаграммы, а также находят сопротивление $\Delta R_{т1}$ первой выключаемой ступени $R_т$. Далее построение диаграммы выполняется аналогично.

Построение тормозной диаграммы в зоне изменения $I_{т.м}$ от нуля до I_{min} может быть выполнено как графически, так и аналитически.

При графическом построении рассчитывают характеристики $v(R_т)$ для принятых значений $I_{т.м}$, а затем наносят ординаты пересечений вертикалей $R_т = R_{тi}$ для уже полученных ступеней регулирования $R_т$ на вертикали соответствующих значений $I_{т.м}$ [62.51].

Аналитически эти же характеристики $v(I_{т.м})$ могут быть получены в следующей последовательности: для выбранных значений $I_{т.м}$ по скоростной характеристике ТМ находятся соответствующие значения $C\Phi$, затем вычисляются соответствующие им скорости движения при известных сопротивлениях $R_т$ как $v = E/C\Phi = I_{т.м}(R_{тi} + R_{т.м})/C\Phi$.

Вследствие повышения напряжения на коллекторах ТМ они работают с полным полем, т.е. при регулировании тормозной силы за счет изменения сопротивления $R_т$, до высокой скорости движения, составляющей у вагонов метрополитена 64 км/ч при конструкционной скорости 90 км/ч. В зоне бóльших скоростей движения $R_т = \text{const} = R_{т\,max}$, а ТМ работают с ослабленным полем, которое может регулироваться как плавно, так и ступенчато. На вагонах метрополитена серий 81.717 (81.714) используется плавное регулирование тока возбуждения импульсным регулятором РТ300/300 А [62.55].

При плавном регулировании ослабления поля ток якорей ТМ поддерживается равным I_{min}. Для этого поток возбуждения должен уменьшаться обратно пропорционально скорости движения, что и достигается соответствующим регулированием тока в обмотках возбуждения ТМ.

Тормозные характеристики $B(v)$ строятся по тормозной диаграмме, на которую наносятся зависимости $B(I_{т.м})$.

При ступенчатом изменении ОП могут быть сохранены принятые для зоны регулирования $R_т$ токи якорей $I_я = I_{т.м}$ (I_{min} и I_{max}). Необходимые для этого ступени изменения коэффициента ослабления поля $\beta = I_в/I_я$ могут быть определены при построении тормозной диаграммы в зоне ОП в следующей последовательности (рис. 62.63, *д*):

1. В точке *f* выключается первая ступень ОП с β_1. Для нее известны $E_f = I_{min}(R_{т\,max} + R_{т.м})$ и v_a. По ним вычисляется $C\Phi = E/v$ и по нагрузочной характеристике ТМ, которая может быть построена с использованием известных скоростных характеристик, находится ток возбуждения $I_{вf}$.

2. Найденное значение $\beta_1 = I_{min}/I_{вf}$ позволяет найти ординату точки *g*, в которой $I_в = \beta_1 I_{max}$, определив $C\Phi_g$ по нагрузочной характеристике и вычислив $v_g = I_{max}(R_{т\,max} + R_{т.м})/C\Phi_g$. Далее расчет производится аналогично, последовательно определяются ординаты точек *h*, *i*, *k* и *l*.

Реально в тормозном режиме используются те же ступени ОП, что и в тяговом. Если в зоне ОП выключение очередной ступени ОП, т.е. усиление поля, происходит по мере снижения скорости движения при одном и том же I_{min}, то ординаты соответствующих точек диаграммы (*f*, *h*, *k* на рис. 62.63, *д*) можно установить в следующей последовательности: для известного β_i вычисляется соответствующий ему $I_в = \beta_i I_{min}$, по нагрузочной характеристике находится $C\Phi_i$ и вычисляется $v_i = E/C\Phi_i = I_{min}(R_{тmax} + R_{т.м})/C\Phi_i = k/C\Phi_i$.

При этом $I_{max} \neq \text{const}$. Их значения могут быть определены графоаналитическим методом (см. рис. 62.63, *б*): при известных нагрузочной характеристике $C\Phi(I_в)$, β_i и v_i строятся характеристики $E_i(I_я)$ как $E_i = v_i C\Phi(\beta_i I_я)$ и в точках их пересечений с прямой $U = I_я R_{т\,max}$ находятся искомые токи.

Для уменьшения начального замедления и его постепенного увеличения до максимального в зоне ОП можно использовать увеличение I_{min} по мере снижения v.

По полученным при построении тормозной диаграммы значениям $I_я$, $C\Phi$, v и $R_т$ могут быть рассчитаны тормозные характеристики $B(v)$ с использованием соотношений $B \equiv C\Phi I_я$ или $B \equiv P/v = I_я^2 R_т/v$. Их можно построить графически, предварительно нанеся на тормозную диаграмму зависи-

мости $B(I_я)$ для полного поля и используемых ступеней его ослабления. Последние можно построить по характеристикам $F(I_я)$ тягового режима, скорректировав их с учетом того, что сумма потерь в ТМ и в тяговой передаче увеличивает тормозную силу и уменьшает силу тяги. Поэтому $B > 0$ при $I = 0$ (рис. 62.63, *г*).

Соответствующие тормозной диаграмме тормозные характеристики приведены на рис. 62.63, *д*. Теоретически, без учета потерь, ограничения тормозной области значениями I_{min} и I_{max} в зоне ОП должны располагаться на гиперболах, так как при $R_т$ = const рассеиваемая в тормозном резисторе мощность также постоянна, а тормозная сила при этом изменяется обратно пропорционально v.

Тормозные характеристики классического РТ с СВ имеют недостатки: большое число ступеней регулирования $R_т$ и β, значительные колебания тормозной силы в зоне ОП и резкое ее снижение при большой скорости (у вагонов метро около 12 км/ч). Недостатки могут быть устранены за счет определенного усложнения электрооборудования. Плавное регулирование тормозной силы в зоне ОП может быть получено за счет плавного регулирования β, как это сделано на вагонах метрополитена серии 81-714 и 81-717 [62.55], а в зоне работы ТМ с полным полем — за счет плавного межступенчатого регулирования сопротивления $R_т$, как это сделано на скоростных электропоездах ЭР200 [62.36]. В итоге достигается плавное регулирование тормозной силы по ее ограничению значением I_{max}.

На ЭПС с ТМ смешанного возбуждения (трамвай и троллейбус) с преобладанием МДС обмотки независимого возбуждения в режиме РТ обмотки НВ и последовательного возбуждения включаются встречно. В результате увеличение $I_{т.м}$ вызывает уменьшение потока возбуждения Ф и тормозная сила при неизменном сопротивлении $R_т$ изменяется незначительно в широком диапазоне v. Это позволяет не использовать ОП и уменьшить число ступеней регулирования $R_т$. Однако одновременно ухудшается эффективность тормоза из-за недоиспользования магнитного потока и уменьшения возбуждения в зоне малых скоростей [62.51] и из-за питания обмоток НВ от контактной сети теряется важнейшее преимущество РТ с СВ — его автономность, независимость от контактной сети.

В метрополитенах безопасность движения в наибольшей степени зависит от эффективности и надежности работы электрического тормоза (ЭТ). Классическое реостатное торможение с СВ в наибольшей степени отвечает этим требованиям: благодаря предельной простоте как схемы тягового привода в целом, так и ее переключения из режима тяги в режим ЭТ (см. рис. 62.63, *в*) обеспечивается

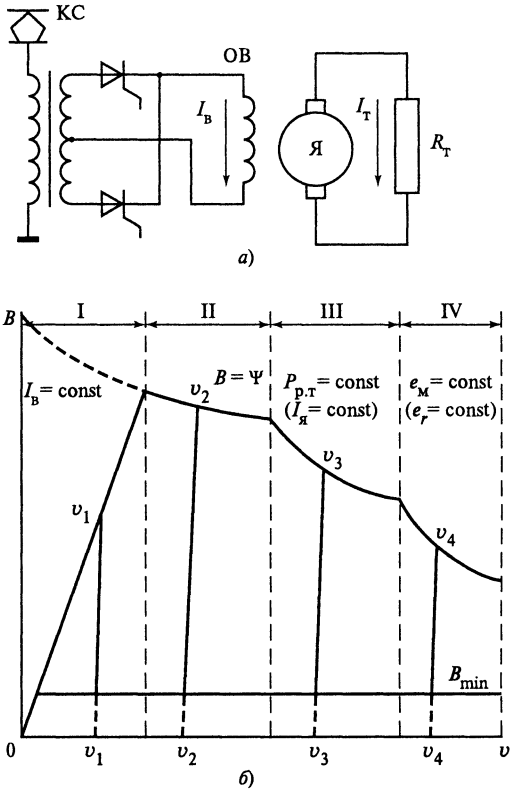


Рис. 62.64. Схема реостатного тормоза с независимым возбуждением ТМ (*а*) и идеальные тормозные характеристики (*б*)

высокая надежность и независимость работы тормоза от напряжения в контактной сети, а благодаря повышению напряжения на коллекторах ТМ вдвое увеличивается при тех же токах якорей тормозная сила. Поэтому все вагоны отечественных метрополитенов оборудованы реостатными тормозами с СВ.

Реостатное торможение с независимым возбуждением (НВ). В схеме ЭТ с НВ (рис. 62.64,*а*) используются нерегулируемые тормозные резисторы $R_т$, а ток $I_в$ в ОВ плавно регулируется специальным возбудителем (В), питающимся от контактной сети. Эта схема используется на ЭПС переменного тока, на котором нет регулируемых пусковых резисторов, что обусловливает необходимость дополнительного оборудования его специальными тормозными резисторами, но просто решается проблема плавного регулирования тока возбуждения, которое обычно осуществляется собранным по схеме с нулевым выводом тиристорным выпрямителем.

При плавном регулировании тока возбуждения можно реализовать в режиме остановочного торможения регулирование тормозной силы по всем ог-

раничивающим ее параметрам, тем же, что и в режиме тяги (см. рис. 62.36), но при нерегулируемом тормозном резисторе в ограничениях тормозной области появляется дополнительный параметр — максимальный ток возбуждения $I_{в\,max}$. Тормозная сила $B \equiv C\Phi I_я$, а $I_я = E/R_т$ и $E \equiv C\Phi\upsilon$. Следовательно, $B \equiv (C\Phi)^2\upsilon/R_т$, т.е. при постоянных значениях Ф и $R_т$ $B = k\upsilon$.

Линейная зависимость $B(\upsilon)$ в зоне ограничения B значением $I_{в\,max}$, определяющим значение Φ_{max}, без учета влияния на Ф реакции якоря рассчитывается:

$$B = [2{,}87/(R_т + R_{т\,м})\eta](pN\mu\Phi/aD_{в.к})^2\upsilon,$$

где a и p — числа пар параллельных ветвей обмотки якоря и полюсов; N — число стержней обмотки якоря; Ф — поток возбуждения ТМ, Вб; $D_{в.к}$ — диаметр ведущего колеса, мм; η — коэффициент, учитывающий магнитные и механические потери, его допустимо принять равным 0,95; μ — передаточное отношение редуктора.

С учетом ограничения по $I_{в\,max}$ ограничения тормозной области РТ с НВ [62.26] имеют четыре зоны (рис. 62.64, *б*): по $I_{в\,max}$, коэффициенту сцепления Ψ, мощности P тормозного резистора или ТМ и по условиям работы коллекторно-щеточного аппарата ТМ. Зависимости $B(\upsilon)$ в зонах III и IV после расчета зависимости $I_я(\upsilon)$ могут быть определены:

$$B \equiv P/\upsilon = 367I_я^2(R_т + R_{тм})10^{-6}/\eta\upsilon.$$

Плавное регулирование $I_в$ позволяет реализовать идеальные тормозные характеристики с ограничением минимальной тормозной силы B_{min} и со стабилизацией скорости движения на заданном уровне при плавном изменении заданного значения. Ограничение B_{min} необходимо для сжатия поезда перед включением остановочного торможения с предельными B и для сохранения сжатого состояния поезда при движении по спуску с переменным уклоном, когда скорость может падать ниже заданной [62.26].

Перед включением остановочного торможения, в котором тормозная сила регулируется по ее предельным значениям, а также при приближении скорости движения по вредному спуску к допустимой машинист на 5—10 с включает торможение с B_{min} для сжатия состава. Если в процессе движения по вредному спуску тормозная сила достигает какого-либо из ее ограничений, то при дальнейшем увеличении скорости вследствие превышения ускоряющей силой тормозной силы последняя регулируется по ее предельным значениям. При остановочном торможении с максимальными силами машинист может перевести тормоз в режим стабилизации скорости, в котором ее малое снижение приводит к

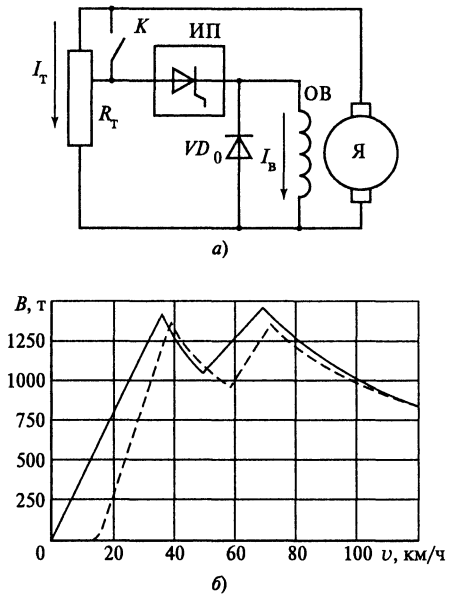


Рис. 62.65. Принципиальная схема (*а*) и тормозные характеристики (*б*) реостатного тормоза с регулируемым самовозбуждением

уменьшению тормозной силы до B_{min}. Этот алгоритм управления используется при выполнении предупреждений об ограничениях скорости.

Близкие к идеальным тормозные характеристики обеспечивает разработанная МЭИ система автоматического управления [62.26], которой оборудованы отечественные электровозы ВЛ80Т, ВЛ80С, ВЛ80СМ и 8G поставленные в КНР. Реостатным тормозом с НВ, обеспечивающим стабилизацию скорости движения и остановочное торможение, оборудованы, поставленные в Финляндию электровозы серии Sr1.

В отечественной системе реостатного торможения перечисленных выше восьмиосных двухсекционных электровозов переменного тока якори ТМ включены на индивидуальные тормозные резисторы, а все ОВ соединены последовательно и питаются от одного возбудителя. Системы автоматического управления этих электровозов имеют устройство, обеспечивающее ступенчатое изменение с пульта машиниста максимальной тормозной силы в зоне ее ограничения условиями сцепления.

Реостатное торможение с регулируемым самовозбуждением. Реостатное торможение с НВ при нерегулируемом сопротивлении тормозного резистора $R_т$ имеет два очевидных недостатка: линейное уменьшение тормозной силы при высокой скорости движения (у электровозов серии ВЛ80 порядка 32 км/ч при $R_т$ = 1 Ом и $I_{в\,max}$ = 1100 А) и зависимость работы тормоза от напряжения в контактной сети. Первый может быть ослаблен приме-

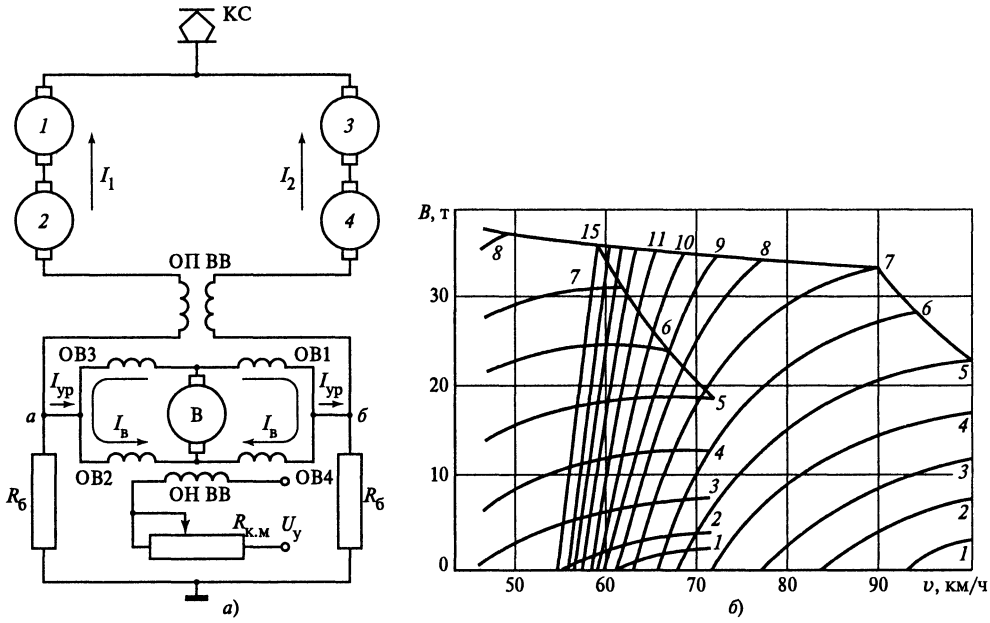


Рис. 62.66. Схема циклической стабилизации (*а*) и тормозные характеристики (*б*) рекуперативного тормоза электровозов постоянного тока:

1—15 — позиции контроллера машиниста

нением ступенчатого регулирования $R_т$. На электровозах ВЛ80 использована только одна ступень с $R_т = 0{,}54$ Ом, на которой B_{max} реализуется при скорости около 20 км/ч. Для обеспечения независимости работы тормоза от напряжения в КС может быть использовано регулируемое самовозбуждение. Оно может быть осуществлено плавным регулированием $I_в$ при помощи включенного параллельно ОВ импульсного преобразователя, как это сделано на электропоездах ЭР200 [62.36] и на вагонах метрополитена [62.55]. В этом решении есть два недостатка [62.30]: замедление самовозбуждения и увеличение скорости, при которой начинается снижение B при $R_т = \text{const}$.

Эти недостатки отсутствуют в схемах электропоездов ЭР25 (рис. 62.65, *а*) с питанием ОВ через ИП от падения напряжения на части $R_т$. Для расширения тормозной области на электропоездах ЭР25, как и на электровозах ВЛ80, используется одноступенчатое уменьшение $R_т$ замыканием контактора K. Характеристика в режиме остановочного торможения изображена на рис. 62.65, *б* (штриховая линия). Ее сравнение с характеристикой, возможной при НВ (сплошная линия) характеризует недостатки регулируемого СВ перед НВ [62.26].

Рекуперативное торможение применяется на всех типах ЭПС. На ЭПС постоянного тока с коллекторными тяговыми машинами применяются две системы рекуперативного торможения: классическая с подключением ТМ непосредственно к контактной сети и импульсная с передачей энергии в КС через импульсный преобразователь.

Классическое рекуперативное торможение возможно только при независимом или смешанном возбуждении, так как при последовательном не обеспечивается электрическая устойчивость тормоза. При подключении якорей ТМ непосредственно к КС (рис. 62.66, *а*) рекуперируемый ток $I_р = (E_{т.м} - U_{к.с})/\Sigma R$, где в ΣR входят $R_{т.м}$, $R_{к.с}$ на участке до приемника энергии рекуперации и $R_б$ — сопротивление используемых в схеме балластных резисторов. При отклонении $I_р$ от установившегося значения (в первую очередь из-за неизбежных колебаний $U_{к.с}$) в схеме с ПВ токи возбуждения $I_в$ изменяются согласно с $I_р$ и происходит лавинообразное увеличение $I_{т.м}$ при снижении $U_{к.с}$ или его уменьшение до перехода в тяговый режим при возрастании $U_{к.с}$.

Схема классического рекуперативного гормоза с независимым возбуждением ТМ идентична схеме тягового режима. Отличие состоит только в изменении направления токов якорей, для чего достаточно незначительного увеличения $I_в$. Поэтому для обеспечения устойчивой работы рекуперативного тормоза необходимо как и в тяговом режиме с НВ ТМ ограничить разброс токов параллельно включенных ТМ в установившихся режимах и их скачков при колебаниях $U_{к.с}$, а также сформировать

приемлемые тормозные характеристики. Известно много способов решения этих задач [62.26, 62 30]. При питании ОВ от электромашинного генератора наиболее рациональным является использование отечественной схемы циклической стабилизации [62.30], которой оборудованы все отечественные электровозы постоянного тока.

В этой схеме (см. рис 62 66, *а*), которой оборудованы все отечественные восьмиосные двухсекционные электровозы ВЛ8, ВЛ10 и ВЛ11, обмотки возбуждения ОВ всех ТМ одной секции питаются от одного генератора-возбудителя В, имеющего обмотку независимого возбуждения (ОН) ВВ и обмотки противовозбуждения (ОП) ВВ, обтекаемые токами якорей ТМ. Ток в ОН ВВ машинист регулирует вручную, изменяя пятнадцатью ступенями сопротивление резистора $R_{к\,м}$ контроллером машиниста.

Подключение ТМ к КС происходит через линейные контакторы по команде реле, срабатывающего при $E_{т\,м} = U_{к\,с}$. Очевидно, что это происходит при разных $I_{о\,н\,в\,в}$, зависящих от скорости движения и группировки ТМ. После включения тормоза машинист регулирует тормозную силу, увеличивая $I_{о\,н\,в\,в}$.

Тормозные характеристики электровоза ВЛ10 на параллельной и частично сериес-параллельной группировках ТМ (рис. 62.66, *б*) иллюстрируют одну из функций ОП ВВ — смягчение тормозных характеристик при фиксированных $I_{о\,н\,в\,в}$, особенно в области высоких скоростей движения. Если бы ОП ВВ не было, то тормозная сила при всех значениях $I_{о\,н\,в\,в}$ возрастала бы линейно с увеличением скорости движения аналогично характеристикам на последних ступенях регулирования $I_{о\,н\,в\,в}$. Это привело бы к резкому увеличению толчков тормозной силы при включении очередной ступени регулирования $I_{о\,н\,в\,в}$, затруднило бы использование тормоза для остановки поезда и исключило бы возможность точной стабилизации скорости движения на спусках. Включение ОП ВВ в цепь $I_р$ обеспечивает уменьшение $I_в$ при $I_{о\,н\,в\,в}$ = const с возрастанием скорости движения и, следовательно, замедляет рост тормозной силы.

Аналогичный вид тормозных характеристик достигается при использовании ТМ с СВ. В этом случае переход от режима тяги в режим рекуперации осуществляется без изменения схемы силовых цепей: при увеличении тока в обмотке независимого возбуждения ток якорей уменьшается и изменяет направление [62.49], а его возрастание при увеличении скорости обусловливает уменьшение потока возбуждения ТМ.

В схеме рис. 62.66, *а* ОП ВВ теоретически решают задачу ограничения скачков токов якорей ТМ при колебаниях $U_{к\,с}$, особенно опасных при снижении $U_{к\,с}$. В последнем режиме $I_р$ растет, что приводит к уменьшению $E_{т\,м}$ и уменьшает приращение $I_р$. Однако эффективность этого механизма невелика из-за большой инерционности каждого его звена: изменение потоков возбуждения ТМ и возбудителя замедляется действием вихревых токов, а $I_в$ изменяется медленно из-за большой индуктивности ОВ и малого и медленного изменения напряжения возбудителя.

Снижение разброса нагрузок параллельных групп ТМ в схеме циклической стабилизации достигается подключением ОВ к цепям токов якорей. При появлении разности ЭДС групп ТМ по цепям ОВ протекает уравнительный ток $I_{ур}$, обусловливающий их выравнивание. Если, например $(E_3 + E_4) > (E_1 + E_2)$ и, следовательно $I_2 > I_1$, то $I_{ур}$ течет от точки «а» к точке «б» и уменьшает потоки возбуждения у третьей и четвертой ТМ, одновременно увеличивая их у первой и второй ТМ.

Как следует из характеристик рис. 62.66, *б*, торможение с максимальной тормозной силой B_{max}, ограниченной вначале условиями работы коллекторно-щеточного аппарата ТМ (точки *5*—*7*), а затем условиями сцепления (точки *7*—*15*), на первой, параллельной, группировке ТМ возможно только до скорости 60 км/ч. Для реализации B_{max} при низких скоростях движения необходимо дважды, при скоростях около 60 и 30 км/ч, выключить тормоз, собрать схему силовых цепей следующей группировки ТМ и вновь подключить ТМ к КС. Все эти операции машинист производит вручную, что резко затрудняет использование рекуперации в остановочном торможении. Этот существенный недостаток может быть устранен использованием схем, обеспечивающих автоматическую перегруппировку ТМ [62.26], одна из которых реализована на электропоездах ЭР2С с энергосберегающей системой тягового электропривода [62.52].

Практически все показатели рекуперативного тормоза улучшаются при замене электромашинного возбудителей на статические, в качестве которых используются полностью управляемые выпрямители, питающиеся от инвертора или генератора переменного тока [62.26]. В этом случае ОВ каждой постоянно включенной последовательно группы ТМ питаются от индивидуальных выпрямителей, что позволяет выравнивать нагрузки параллельно включенных групп ТМ путем коррекции их токов возбуждения, а также обеспечивать равную степень противокомпаундирования тормозных характеристик при использовании традиционной системы управления тормозом, например при модернизации эксплуатируемых электровозов только с заменой электромашинных возбудителей на статические Эффективность такой системы рекуперативного

торможения, разработанной совместно МЭИ и Тбилисским электровозостроительным заводом, подтверждена в эксплуатации на Байкальском перевале 36 двухсекционных 12-осных электровозов ВЛ15 [62.56], на которых возбудители собраны по схеме с нулевой точкой (см. рис. 62.64, *а*).

Использование статических возбудителей на базе полностью управляемых выпрямителей, способных практически мгновенно изменять полярность приложенного к ОВ напряжения при увеличении угла подачи управляющих импульсов сверх $\pi/2$, резко улучшает качество переходных процессов при колебаниях $U_{к.с}$ за счет принудительного уменьшения $I_в$ при скачках $U_{к.с}$ вниз [62.26].

Использование статических преобразователей облегчает также решение проблемы плавного автоматического регулирования тормозной силы по заданному алгоритму, вплоть до реализации идеальных тормозных характеристик (см. рис. 62.64, *б*). Возможность создания и эффективность работы таких систем рекуперативного торможения подтверждается опытом эксплуатации электропоездов ЭР2Р, ЭР2Т и ЭД4, на которых возбудители собраны по схеме полностью управляемого трехфазного моста и питаются от генератора переменного тока, а также результатами испытаний опытной партии из четырех вагонов метрополитена, на которых возбудители, как и на электровозах ВЛ15, питаются однофазным напряжением [62.37].

Импульсная рекуперация осуществляется при последовательном возбуждении ТМ, и в этом состоит одно из ее преимуществ перед классической рекуперацией, если она применяется на ЭПС с ПВ ТМ в режиме тяги.

Для реализации на ЭПС с импульсным регулятором напряжения в тяге (см. рис. 62.40) рекуперативного торможения достаточно поменять местами ТП и *VD0*. Образуемая при этом схема рис. 62.67, *а* обеспечивает рекуперативное торможение до низких скоростей движения. В начальной части периода λT (рис. 62.67, *б*) ТП замкнут и реализуется режим реостатного торможения с самовозбуждением при $R_т = 0$ (см. рис. 62.63) при соответствующем увеличении $I_я$. Когда ТП размыкает цепь $I_я$ на период времени $(1 - \lambda)T$, сумма ЭДС ТМ и самоиндукции $L_я$ превышает $U'_{к.с}$ и через диод *VD* течет ток рекуперации $I_р = I_я$ и энергия передается в КС. При этом ток $I_я = I_{к.с}$ снижается, поэтому ЭДС самоиндукции положительна, а напряжение $U'_{к.с} = U'_я$ растет вследствие заряда емкости фильтра $C_ф$. Следовательно, рекуперация осуществляется частично за счет энергии, накопленной в $L_я$ во время роста $I_я$ при включенном ТП. В этом состоит вторая, кроме снижения пульсаций $I_я$, функция $L_я$.

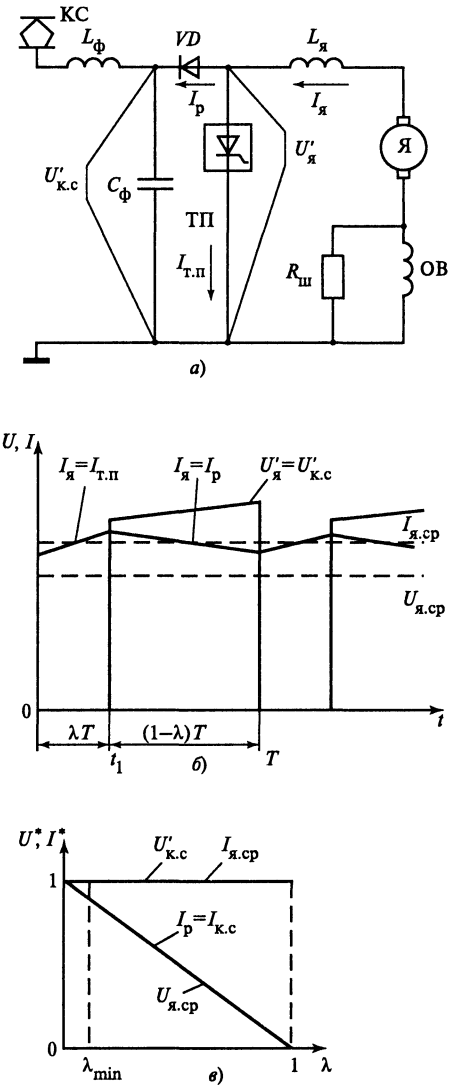


Рис. 62.67. Принципиальная схема (*а*), диаграмма электрических процессов (*б*) и энергетические показатели (*в*) импульсной рекуперации

Описанный процесс рекуперации возможен только при соблюдении условия $U_я < U_{к.с}$. В противном случае $I_я$ будет расти и при замкнутом, и при разомкнутом состоянии ТП, т.е. произойдет неконтролируемый рост $I_я$ до аварийных значений. Практически $U_я$ должно быть меньше $U_{к.с}$ на 20 %, что существенно снижает энергетическую эффективность импульсной рекуперации по сравнению с классической. Если же считать, как это и делалось при обосновании эффективности импульсного управления, что разность $U_{к.с} - U_я$ пренебрежимо мала и действуют все рассмотренные при описании

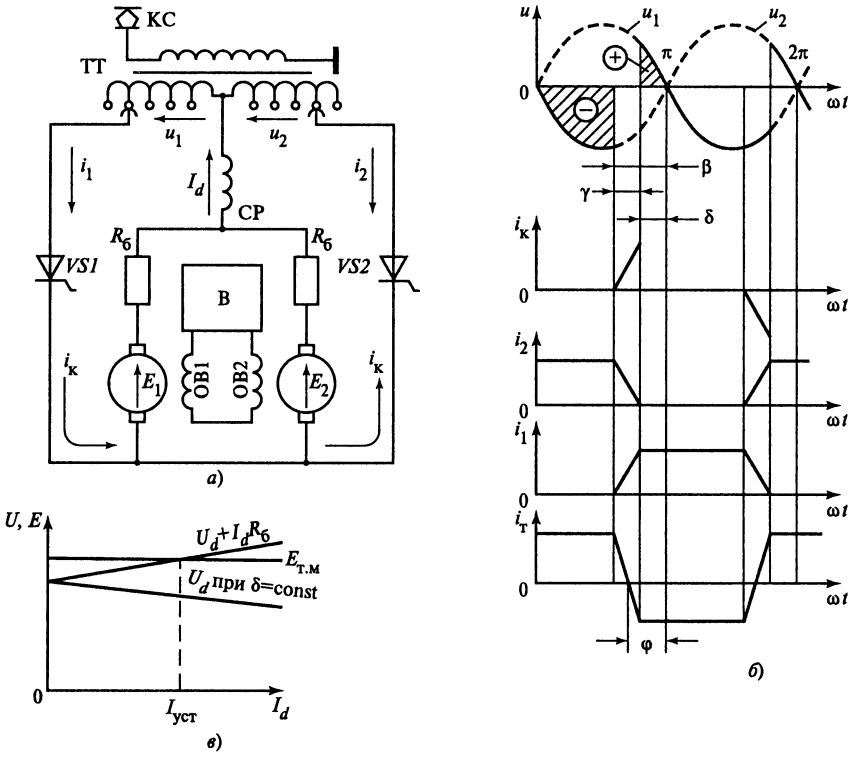


Рис. 62.68. Принципиальная схема (*а*), диаграмма (*б*) и характеристики, поясняющие обеспечение устойчивости (*в*) рекуперативного тормоза ЭПС переменного тока

режима тяги допущения, то в режиме рекуперации по мере снижения скорости движения теоретически λ растет от 0 до 1 (рис. 62.67, *в*), а $I_р$ и напряжение $U_{я.ср}$ снижается от 1 до 0 при постоянном, равном заданному, значении $I_{я.ср}$. При этом $U_{я.ср} = (1 - \lambda)U_{к.с}$, $I_р = (1 - \lambda)I_я$ и $U_{к.с}I_р = U_я I_я$, т.е. рекуперация происходит без потери энергии с постоянной тормозной силой теоретически до остановки ЭПС. Практически же рекуперация заканчивается приблизительно при той же скорости, что и реостатное торможение с самовозбуждением, а ее энергетическая эффективность существенно ниже этого показателя на ЭПС с перегруппировками ТМ [62.35].

Кроме того, при использовании на ЭПС независимого возбуждения ТМ в режиме тяги у классической рекуперации появляется дополнительное преимущество: для ее реализации не нужно производить переключений в схеме силовых цепей — достаточно только увеличить ток возбуждения.

Рекуперативное торможение выпрямительного ЭПС переменного тока осуществляется также при независимом возбуждении ТМ путем инвертирования токов их якорей. Принципы работы рекуперативного тормоза и электрические процессы в его силовых цепях проще и нагляднее рассмотреть на примере схемы (рис. 62.68, *а*) с выпрямительно-инверторным преобразователем (ВИП) с нулевой точкой. Такая схема была использована на электровозах ВЛ60Р с игнитронными выпрямителями [62.39]. На электровозах с тиристорными выпрямителями ВЛ80Р, ВЛ85 и ВЛ65 использована мостовая схема ВИП (см. рис. 62.49), но принципы ее работы, исключая замену ступенчатого регулирования напряжения вторичной обмотки тягового трансформатора ТТ на электровозах ВЛ60Р плавным, не изменились.

На всех отечественных тиристорных электровозах используется групповая схема питания двух ТМ от одного ВИП, а ОВ всех ТМ в режиме рекуперации включаются последовательно и питаются от одного возбудителя. Поэтому для ограничения разброса нагрузок ТМ в цепи их якорей включены балластные резисторы $R_б$. Для перехода из режима тяги в режим рекуперации необходимо изменить полярность $E_{т.м}$ и увеличить угол управления вентилями *VS1* и *VS2* выше π/2.

В режиме рекуперации углы на диаграмме электрических процессов (см. рис. 62.68, *б*) отсчитываются влево от перехода напряжения через нуль. Если при $t = 0$ включен *VS2*, то при показан-

ной на рис 62 68, *а* полярности u_2 навстречу ему течет ток $\imath_2$, так как $E_{\text{т м ср}} > U_{2\text{ср}}$, т е осуществляется режим инвертирования — рекуперации Если не выключить *VS2* до перехода u_2 через нуль, то произойдет так называемое опрокидывание инвертора ток $\imath_2$ резко возрастет, так как в его контуре будет действовать не разность, а сумма $E_{\text{т м}}$ и u_2 Для выключения *VS2* при угле управления β включается *VS1* и под действием $u_2 + u_1$ в контуре *VS2*—ТТ—*VS1* начинает протекать коммутирующий ток $\imath_{\text{к}}$ навстречу $\imath_2$ Коммутация тока I_d из *VS2* в *VS1* заканчивается при угле запаса δ, при котором $\imath_{\text{к}} = I_d$ С этого времени до угла π направления тока $\imath_1$ и напряжения u_1 в ТТ совпадают, т е ВИП работает в режиме выпрямления Во время угла коммутации $\gamma = \beta - \delta$ ток $\imath_2$ снижается до нуля, $\imath_1$ увеличивается до I_d, а ток $\imath_{\text{т}}$ в первичной обмотке ТТ меняет знак при угле $\varphi = \delta + + \gamma/2 = (\beta + \delta)/2$

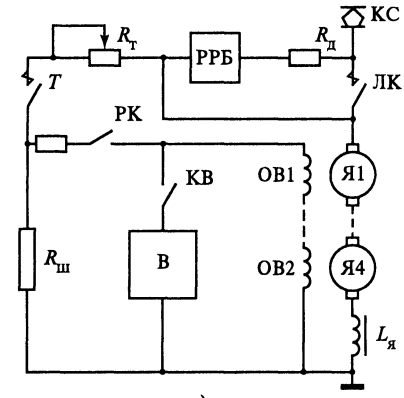
Ток $\imath_{\text{к}}$ изменяется по сложному нелинейному закону, но в качественном анализе работы рекуперативного тормоза допустимо принять линейную зависимость $\imath_{\text{к}}(t)$ Угол коммутации $\gamma \equiv I_d/U_{\text{т т}}$ и может достигать π/6 Угол запаса δ теоретически нужен для восстановления запирающих свойств вентилей, так как в противном случае после перехода u_2 через нуль *VS2* вновь включится и инвертор опрокинется Однако δ должен быть многократно большим необходимого для восстановления запирающих свойств вентилей для предотвращения опрокидываний инвертора вследствие роста I_d при случайном уменьшении $U_{\text{к с}}$ Реально $\delta \geq \pi/6$ При этом угол сдвига φ между напряжением и током ТТ может превышать π/4, что обусловливает резкое снижение коэффициента мощности λ электровоза, который дополнительно снижается из-за пульсаций $\imath_{\text{т}}$

Зависимость $\lambda(U_d)$ тиристорных электровозов характеризуется кривыми *4* и *5* (ВИП, РТ) на рис 62 50 В реальной эксплуатации средневзвешенное значение λ при рекуперации составляет около 0,52 Это резко снижает ее энергетическую эффективность вследствие снижения напряжения и увеличения потерь энергии в контактной сети, а так же из-за достигающих 20 % выработанной ТМ энергии потерь в балластном резисторе Последние, кроме ограничения разброса нагрузок ТМ, выполняют вторую функцию — обеспечивают возможность работы ВИП с постоянным $\delta_{\min}$ Без балластного резистора случайные отклонения I_d от установившегося значения $I_{\text{уст}}$ (рис 62 68, *в*) приводили бы к лавинообразному изменению I_d в том же направлении Это объясняется тем, что при увеличении I_d увеличивается угол γ, что при постоянном δ вынуждает увеличивать угол β, а это приводит к уменьшению приложенного к ТМ напряжения ВИП (отмеченная знаком ⊖ часть площади, ограниченной кривой u_2) Включение в цепи якорей резисторов $R_{\text{б}}$ увеличивает $(U_d + I_d R_{\text{б}})$ при росте I_d, что и обеспечивает электрическую устойчивость рекуперации Последняя может быть достигнута и без $R_{\text{б}}$, если использовать регулирование работы ВИП с β = const Но в этом случае β должен выбираться исходя из значения $I_{d\,\max}$, что приводит к существенному ухудшению коэффициента мощности и увеличивает пульсации I_d из-за увеличения амплитуды колебаний приложенного к ТМ напряжения

Эффективность рекуперации на выпрямительном ЭПС дополнительно снижается из-за ухудшения энергетических показателей тягового режима Так, средний коэффициент мощности тиристорных электровозов при возврате в сеть 10 % энергии составляет менее 0,65 против 0,8 у диодных электровозов

Рекуперативно-реостатное торможение ЭПС постоянного тока применяется для повышения надежности электрического торможения На ЭПС постоянного тока надежность рекуперативного торможения непосредственно связана с наличием на линии потребителя энергии рекуперации — ЭПС, следующего в режиме тяги Это условие нередко не соблюдается По этой причине мала эффективность использования рекуперации на трамваях и троллейбусах На магистральных железных дорогах использование энергии рекуперации другими видами ЭПС более вероятно, но и здесь могут возникать режимы с отсутствием приемника энергии рекуперации При этом напряжение в КС превышает допустимое, что вынуждает прекращать рекуперативное торможение Оборудование тяговых подстанций инверторными преобразователями дорого Поэтому в некоторых случаях для приема энергии рекуперации используют подключаемые к КС при увеличении в ней напряжения балластные резисторы Другим способом предотвращения срывов электрического торможения является резервирование рекуперативного торможения реостатным, т е оборудование ЭПС рекуперативно-реостатным тормозом (РРТ)

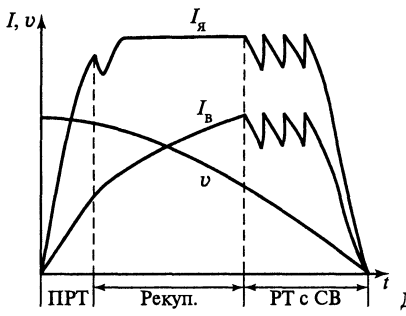
Система РРТ после опробования на опытных электропоездах ЭР6 и ЭР10 была применена на партии из 67 ЭП типа ЭР22 [62 53] Схема силовых цепей этой системы РРТ и реализуемый на ней алгоритм регулирования тока якорей показаны на рис 62 69 Электрическое торможение начинается с подготовительного реостатного с НВ при замкнутых контакторах Т — тормозной и КВ — возбуждения При разности напряжений в КС и на коллекторах ТМ порядка 300 В срабатывает реле разбаланса (РРБ) и включается линейный контактор (ЛК) При этом якоря ТМ подключаются к КС и их ток кратковременно уменьшается В течение короткого



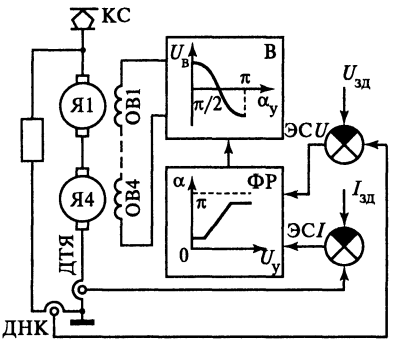
а)

№ п/п	Режим	Контактор			
		ЛК	Т	КВ	РК
1	Подготовка РТ с НВ	–	х	х	–
2	РРТ	х	х	х	–
3	Рекуперация	х	–	х	–
4	П1 (РРТ)	х	х	х	–
5	П2 (РТ с НВ)	–	х	х	–
6	П3	–	х	х	х
7	РТ с СВ	–	х	–	х

б)



в)



г)

Рис. 62.69. Принципиальная схема (*а*), таблица замыканий контакторов (*б*), тормозная диаграмма (*в*) и функциональная схема системы автоматического управления (*г*) рекуперативно-реостатного тормоза:

ПРТ — подготовительное реостатное торможение; РК — реостатный контактор; ЛК — линейный контактор; П1—П3 — переходные позиции; ДНК — датчик напряжения на коллекторе

времени осуществляется рекуперативно-реостатное торможение с возможностью протекания $I_я$ как в тормозной резистор $R_т$, так и в КС. Затем контактор T выключается и начинается рекуперативное торможение с уставкой тока 350 А. В качестве возбудителя на поездах ЭР22 использовался генератор постоянного тока ограниченной мощности. Поэтому рекуперация выключалась при токе возбуждения порядка 250 А и тормоз переключался в режим реостатного торможения с самовозбуждением с целью уменьшения нагрузки возбудителя. Последовательность переключений в схеме силовых цепей поясняется таблицей на рис. 62.69, *б*. Резистор $R_ш$ предотвращает толчок тормозной силы, обеспечивая ограничение $I_в$ значением 250 А при $I_я = 350$ А.

Вследствие применения в качестве возбудителя генератора постоянного тока использование рекуперативного торможения на электропоездах ЭР22 оказалось невозможным из-за плохого качества переходных процессов. Поэтому для питания ОВ был использован синхронный генератор и трехфазный полностью управляемый мост. Разработанная в МЭИ система автоматического управления тормозным процессом для этой модификации РРТ получила обозначение МЭИ-3 [62.26]. Ее упрощенная схема показана на рис. 62.69, *г*. Характеристика возбудителя В позволяет в переходных процессах менять полярность приложенного к ОВ напряжения, что обеспечивает их хорошее качество и точное регулирование $I_я$ по заданному значению $I_{зд}$ путем его сравнения в элементе сравнения ЭСI с истинным значением, получаемым при помощи датчика тока якорей (ДТЯ). Второй канал регулирования таким же способом ограничивает максимальное напряжение на коллекторах ТМ, значение которого измерялось датчиком напряжения (ДН) на коллекторах. Этот же канал ограничивал рост напряжения при отрывах токоприемника от КС. Если этот процесс протекал более 2 с, то тормоз переключался в режим реостатного торможения.

Система МЭИ-3 была использована на ЭП типов ЭР2Р и ЭР2Т и усовершенствована включением в цепь якорей диодной пробки, что позволило не применять подготовительное реостатное торможе-

ние, упростило схему, а также исключило ложные переключения в режим реостатного торможения из-за возникавших перенапряжений при отключении контактора *Т*. Такая система использована на электропоездах ЭД4 и для модернизации поездов ЭР2Т и ЭР2Р.

Существенным недостатком системы РРТ является отсутствие перегруппировок ТМ, что увеличивает потери энергии в тяге и уменьшает ее возврат при рекуперации. Эти недостатки устранены в разработанной системе [62.52], которая за счет перегруппировок ТМ в тяге и рекуперации с использованием энергосберегающих алгоритмов управления в этих режимах обеспечивает сокращение расхода энергии на 30 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

62.1. **Электрическая** тяга на рубеже веков: Сб. научн. тр. / Под ред. А.Л. Лисицина. М.: Интекст, 2000.

62.2. **Теория** электрической тяги / В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров. М.: Транспорт, 1983.

62.3. **Тарнижевский М.В., Томлянович Д.К.** Проектирование устройств электроснабжения трамвая и троллейбуса. М.: Транспорт, 1986.

62.4. **Контактные** и кабельные сети трамваев и троллейбусов / А.С. Афанасьев, Г.П. Долаберидзе, В.В. Шевченко. М.: Транспорт, 1992.

62.5. **Справочник** по электроснабжению железных дорог / Под ред. К.Г. Марквардта. М.: Транспорт, Т. 1. 1980. Т. 2. 1981.

62.6. **Марквардт К.Г.** Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982.

62.7. **Караев Р.И., Волобринский С.Д., Ковалев И.Н.** Электрические сети и энергосистемы. М.: Транспорт, 1988.

62.8. **Правила** устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог / МПС РФ, ЦЭ-197. М.: Транспорт, 1994.

62.9. **Марквардт К.Г.** Контактная сеть. М.: Транспорт, 1994.

62.10. **СНиП.** Трамвайные и троллейбусные линии / Госстрой СССР. М., 1990.

62.11. **Правила** устройства системы тягового электроснабжения железных дорог РФ / МПС РФ, ЦЭ-462. М., 1997.

62.12. **Афанасьев А.С.** Контактные сети трамвая и троллейбуса. М.: Транспорт, 1988.

62.13. **Электрический** транспорт железных дорог: Учебное пособие для студентов специальности 1807 «Электрический транспорт» / Под ред. проф. Ю.Б. Просвирова. Самара: СамИИТ, 1997.

62.14. **Электроснабжение** метрополитена / Под ред. Е.Н. Быкова. М.: Транспорт, 1978.

62.15. **Загайнов Н.А., Финкельштейн Б.С., Кривов Л.Л.** Тяговые подстанции трамвая и троллейбуса. М.: Транспорт, 1988.

62.16. **Тяговые** подстанции трамвая и троллейбуса: Справочник / Под ред. И.С. Ефремова. М.: Транспорт, 1984.

62.17. **Тяговые** подстанции / Ю.М. Бей, Р.Р. Мамошин, В.Н. Пупынин, М.Г. Шалимов. М.: Транспорт, 1986.

62.18. **Быков Е.И., Панин Б.В., Пупынин В.Н.** Тяговые сети метрополитенов. М.: Транспорт, 1987.

62.19. **Карякин Р.Н.** Тяговые сети переменного тока. М.: Транспорт, 1987.

62.20. **Вилькевич Б.И., Вилькевич В.Б., Турсунов К.Т.** Справочник по электрооборудованию тепловозов. Ташкент: Мехнат, 1994.

62.21. **Электрооборудование** тепловозов: Справочник / В.Е. Верхогляд, Б.И. Вилькевич, В.С. Марченко и др. М.: Транспорт, 1981.

62.22. **Передачи** мощности тепловозов / А.Д. Степанов, В.А. Васильев, Б.Г. Кузнецов и др. М.: Машиностроение, 1967.

62.23. **Электрические** передачи переменного тока тепловозов и газотурбовозов / А.Д. Степанов, В.И. Андерс, В.А. Пречисский, Ю.И. Гусевский. М.: Транспорт, 1982.

62.24. **Минов Д.К.** Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей. М.: Транспорт, 1965.

62.25. **Иоффе А.Б.** Тяговые электрические машины: Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. —2-е изд., доп. и перераб. М.: Энергия, 1965.

62.26. **Тулупов В.Д.** Автоматическое регулирование сил тяги и торможения электроподвижного состава. М.: Транспорт, 1976.

62.27. **Вентильные** двигатели и их применение на электроподвижном составе / Под. ред. Б.Н. Тихменева. М.: Транспорт, 1976.

62.28. **Колпахчьян Г.И., Тулупов В.Д.** Возможности повышения тяговых свойств электроподвижного состава с вентильными двигателями // Электричество. 1976. № 4. С. 34—39.

62.29. **Электроподвижной** состав с асинхронными тяговыми двигателями / Под ред. Н.А. Ротанова. М.: Транспорт, 1991.

62.30. **Тихменев Б.Н., Трахтман Л.М.** Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты: Учебник для вузов ж.-д. трансп. —4-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1980.

62.31. **Гаврилов Я.И., Мнацаканов В.А.** Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями. М.: Транспорт, 1986.

62.32. **Тиристорное** управление электрическим подвижным составом постоянного тока / Под ред. В.Е. Розенфельда. М.: Транспорт, 1970.

62.33. **Ранькис И.Я.** Оптимизация параметров тиристорных систем импульсного регулирования тягового электропривода. Рига: Зинатне, 1985.

62.34. **Курбасов А.С.** Повышение работоспособности тяговых электродвигателей М.: Транспорт, 1977.

62.35. **Тулупов В.Д.** Эффективность электроподвижного состава с импульсным управлением // Железнодорожный транспорт. 1994. № 3. С. 46—55; № 4. С. 49—58.

62.36. **Гуткин Л.В., Дымант Ю.Н., Иванов И.А.** Электропоезд ЭР200. М.: Транспорт, 1981.

62.37. **Тулупов В.Д.** и др. Схема силовых цепей вагонов метрополитена с независимым возбуждением тяговых машин и тиристорным реостатным контроллером // Тр. МЭИ. 1992. Вып. 641. С. 36—45.

62.38. **Подвижной** состав электрических железных дорог. Тяговые электромашины и трансформаторы / Д.Д. Захарченко, Н.А. Ротанов, Е.В. Горчаков, П.Н. Шляхто. М.: Транспорт, 1968.

62.39. **Раков В.А.** Локомотивы отечественных железных дорог 1956—1975 гг. М.: Транспорт, 1999.

62.40. **Пассажирский** электровоз ЧС4 / Под ред. В.А. Каптелкина. М.: Транспорт, 1971.

62.41. **Электропоезда:** Учебник для техн. школ ж.-д. трансп. / З.М. Рубчинский, С.И. Соколов, Е.А. Эглон, Л.С. Лынюк; Под ред. З.М. Рубчинского. М.: Транспорт, 1983.

62.42. **Справочник** по электроподвижному составу, тепловозам и дизель-поездам / Под общ. ред. А.И. Тищенко. М.: Транспорт, 1976.

62.43. **Тяговые** электродвигатели электровозов / Под ред. В.Г. Щербакова. Новочеркасск: Агентство «Наутилус», 1998.

62.44. **Баранов Б.К.** О регулировании напряжения на электровозах переменного тока // Железнодорожный транспорт. 1964. № 12. С. 43—45.

62.45. **Тулупов В.Д.** Реальные резервы повышения энергетических показателей электрифицированного железнодорожного транспорта. Экономия электроэнергии в электроэнергетических системах // Тр. МЭИ. 1988. № 187. С. 53—80.

62.46. **Широченко Н.Н., Татарников В.А., Бибинейшвили З.Г.** Улучшение энергетики электровозов переменного тока // Железнодорожный транспорт. 1988. № 7. С. 33—37.

62.47. **Карибов С.И., Минов Д.К.** Интегральные способы оценки энергетических показателей при плавном регулировании напряжения // Доклады научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 1966—1967 гг. Подсекция электрического транспорта. М.: МЭИ, 1967. С. 52—66.

62.48. **Независимое** возбуждение тяговых двигателей электровозов / Под ред. А.Т. Головатого. М.: Транспорт, 1976.

62.49. **Ефремов И.С., Косарев Г.В.** Теория и расчет электрооборудования подвижного состава городского электрического транспорта: Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1976.

62.50. **Проектирование** тяговых электрических машин: Учебн. пособие для вузов ж.-д. транс. / Под ред. М.Д. Находкина. —2-е изд. М.: Транспорт, 1976.

62.51. **Корягина Е.Е., Коськин О.А.** Электрооборудование трамваев и троллейбусов: Учебник для техникумов городского транспорта. М : Транспорт, 1982.

62.52. **Тулупов В.Д.** и др. Энергосберегающая система тягового привода электропоезда постоянного тока: Сб. научн. трудов. М.: МЭИ, 1990. С. 7—16. № 328.

62.53. **Трахтман Л.М.** Электрическое торможение электроподвижного состава. М.: Транспорт, 1965.

62.54. **Тулупов В.Д.** Повышение эффективности систем электрического торможения локомотивов. М.: Транспорт, 1968.

62.55. **Руководство** по эксплуатации вагонов метрополитена моделей 81-714.5 и 81-717.5 / Акционерное общество «Метровагонмаш». М.: Транспорт, 1993.

62.56. **Калинин В.К.** Электрические схемы электровозов ВЛ15С // Электрическая и тепловозная тяга. 1991. № 4. С. 5—6.

Раздел 63

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ АВТОМОБИЛЕЙ И ТРАКТОРОВ

СОДЕРЖАНИЕ

63.1. Система электроснабжения 633
Общие сведения (633). Электрические схемы систем электроснабжения (635). Конструкция генераторов (638). Схемное исполнение регуляторов напряжения (643).

63.2. Система электростартерного пуска 646
Стартерные аккумуляторные батареи (646). Электрические характеристики стартерных аккумуляторных батарей (650). Электростартеры (653). Конструкции электростартеров (657). Схемы управления электростартерами (661).

63.3. Системы зажигания 662
Назначение и принцип действия (662). Контактная система зажигания (664). Контактно-транзисторная система зажигания (664). Электронная система зажигания (665). Элементы системы зажигания (668).

63.4. Электропривод вспомогательного оборудования автомобилей и тракторов 671
Электродвигатели (671). Моторедукторы (673). Мотонасосы (675). Схемы управления электроприводом (675).

63.5. Информационно-измерительная система автомобиля 680
Датчики электрических приборов (681). Указатели автомобильных информационно-измерительных систем (682). Термометры (684). Измерители давления (684). Измерители уровня топлива (685). Измерители зарядного режима аккумуляторной батареи (686). Спидометры и тахометры (687). Эконометр (687). Тахографы (689). Электронные информационные системы (690).

Список литературы 690

63.1. СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Система электроснабжения автомобилей и тракторов состоит из электрического генератора, регулятора напряжения и элементов их защиты от возможных аварийных режимов, а также контроля работоспособности. Генератор с регулятором напряжения образуют генераторную установку. Генераторные установки выпускаются на номинальные напряжения 14 и 28 В. Напряжение 28 В характерно для автомобилей с дизелем. Однако на дизельных автомобилях, например на автомобилях ЗИЛ 5301 («Бычок»), ЗИЛ 4331, ЗИЛ 133ГЛ, возможна и двухуровневая система: напряжение 14 В непосредственно на генераторе для электроснабжения основных потребителей, а 28 В на выходе трансформаторно-выпрямительного блока для подзарядки аккумуляторной батареи, используемой при пуске двигателя.

Генераторная установка питает бортовую сеть автомобилей и тракторов постоянным током. Поэтому генератор снабжается полупроводниковым выпрямителем в повсеместно применяющихся в настоящее время автотракторных вентильных генераторных установках. При этом для питания вспомогательных устройств, например реле блокировки стартера, трансформаторно-выпрямительного блока систем на два уровня напряжения, тахометра и т.п., используется переменный ток, вырабатываемый генератором. Генераторные установки выполняются по однопроводной схеме, в которой с корпусом соединен отрицательный полюс системы. Отечественной нормативной документацией предусматривается изготовление установок и по двухпроводной схеме, но практически такое исполнение не реализуется.

Основные требования к отечественным генераторным установкам, а также методы их испытаний определены ГОСТ 3940—84 «Электрооборудование автотракторное. Общие технические условия».

Принцип действия вентильного щеточного электрического генератора и его принципиальное конструктивное устройство одинаковы у отечественных и зарубежных генераторов. Обычно они имеют шесть пар полюсов, 36 пазов на статоре, трехфазное исполнение и клювообразную полюсную систему. Регуляторы напряжения поддерживают стабильность напряжения в бортовой сети изменением относительного времени включения обмотки возбуждения генератора в цепь питания и обычно встраиваются в конструкцию генератора.

Генераторные установки имеют следующие обозначения выводов: плюс силового выпрямителя «+», В, 30, В+, BAT; масса «–», D–, 31, В–, М, Е,

GRD; вывод обмотки возбуждения Ш, 67, DF, F, EXC, E, FLD; вывод для соединения с лампой контроля исправности (обычно плюс дополнительно выпрямителя, там, где он есть) D, D+, 61, L, WL, IND; вывод фазы ~, W, R, STA, вывод нулевой точки обмотки статора 0, Мр; вывод регулятора напряжения для подсоединения его в бортовую сеть (обычно к «+» аккумуляторной батареи) Б, 15, S; вывод регулятора напряжения для питания его от выключателя зажигания IG; вывод регулятора напряжения для соединения его с бортовым компьютером FR, F.

Способность генераторной установки обеспечивать электропитанием автомобиль во всех режимах его работы характеризует токоскоростная характеристика (ТСХ), т.е. зависимость тока I_d, отдаваемого генератором в нагрузку, от частоты вращения его ротора n при постоянном напряжении на силовых выводах генератора. Вид токоскоростной характеристики генераторных установок легковых автомобилей, построенной в относительных единицах по отношению к номинальному отдаваемому току $I_{d\text{ном}}$, представлена на рис. 63.1. Характеристика демонстрирует существенное преимущество вентильных генераторов — самоограничение отдаваемого ими тока (достигнув определенного значения, ток практически не увеличивается с ростом частоты вращения).

Методика определения ТСХ стандартизирована, ТСХ определяется при работе генераторной установки в комплекте с полностью заряженной аккумуляторной батареей номинальной емкостью, А · ч, составляющей не менее 50 % номинального тока генератора, как в холодном, так и в нагретом его состоянии. При этом под холодным состоянием понимается такое, при котором температура всех частей и узлов генератора равна температуре окружающей среды 23 ± 5 °С. Температура воздуха определяется

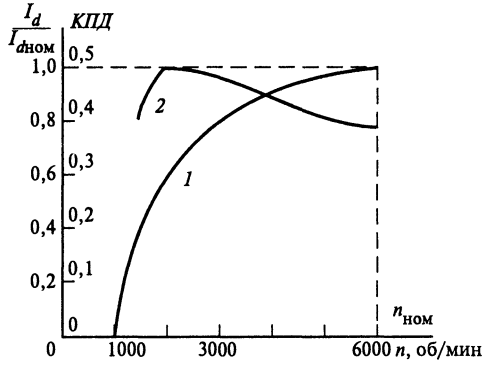


Рис. 63.1. Выходные характеристики генераторной установки:

1 — токоскоростная характеристика; *2* — КПД в режимс снятия ТСХ

в точке на расстоянии 5 см от воздухозаборника генератора. При определении ТСХ в нагретом состоянии генератор прогревается до установившейся температуры его узлов. Токоскоростные характеристики определяются без регулятора напряжения при номинальном напряжении 14 (28) В. Если имеется регулятор напряжения, то ТСХ определяют при напряжениях 13,5 ± 0,1 (27 ± 0,2) В. Допускается и ускоренный метод определения ТСХ в нагретом состоянии (для чего требуется специальный автоматизированный стенд), при котором генератор прогревается в течение 30 мин при частоте вращения 3000 об/мин, соответствующей этой частоте силе тока и указанном выше напряжении. Время снятия характеристики не должно превышать 30 с при постоянно меняющейся частоте вращения.

Токоскоростная характеристика имеет характерные точки, которые определяются следующими параметрами:

n_0 — начальная частота вращения без нагрузки. Поскольку обычно снятие характеристики начинают с тока нагрузки около 2 А, то n_0 получается экстраполяцией снятой характеристики до пересечения с осью абсцисс;

$n_{\text{р.д}}$ — минимальная рабочая частота вращения, т.е. частота вращения, примерно соответствующая частоте холостого хода двигателя. Условно принимается $n_{\text{р.д}}$ = 1500 об/мин (для высокоскоростных генераторов 1800 об/мин). Ток $I_{d\text{д}}$ при этой частоте обычно составляет 40—50 % номинального и во всяком случае должен быть достаточен для обеспечения питанием жизненно важных электропотребителей автомобиля;

$n_{\text{ном}}$ — номинальная частота вращения, при которой вырабатывается номинальный ток $I_{d\text{ном}}$, т.е. ток, значение которого должно быть не меньше номинального (обычно 6000 об/мин);

$n_{\max}$ — максимальная частота вращения. При этой частоте генератор вырабатывает максимальный ток $I_{d\max}$, значение которого обычно мало отличается от номинального. Отечественные изготовители ранее указывали номинальный ток генератора при частоте вращения 5000 об/мин, а также частоту вращения генератора в расчетном режиме $n_{\text{р}}$, соответствующую расчетному току генератора $I_{d\text{р}}$, обычно составляющему две трети номинального тока. В расчетном режиме нагрев узлов генератора наибольший. Характеристики определялись при напряжении 13 или 14 В. В табл. 63.1 приведены параметры отечественных автомобильных генераторных установок, а в табл. 63.2 — генераторных установок легковых автомобилей основных европейских фирм.

Зависимость КПД от частоты вращения, приведенная на рис. 63.1, является ориентировочной, так

Таблица 63 1

Тип генератора	Типы автомобилей и автобусов	Параметры генератора							
		$P_{ном}$, Вт	$U_{ном}$, В	$I_{dном}$, А	n_0, об/мин, не более	$n_р$, об/мин, не более	$U_{dр}$, В	$I_{dр}$, А	Масса, кг
Г221А	ВАЗ 2101, 21011, 2103, 2106	600	14	42	1150	2500	14	30	4,2
Г222	ВАЗ 2105, 2107, ЗАЗ 1102	700	14	50	1250	2400	13	35	4,3
Г273В	КамАЗ 5320, МАЗ 5335	780	28	28	1050	2200	28	20	5,4
37 3701	ВАЗ 2108, 2109, 21213, АЗЛК 214201-10	770	14	55	1100	2000	13	35	4,4
16 3701	ГАЗ 24-10, 31029, 33021	900	14	65	1100	2500	14	45	5,6
29 3701	«Москвич-2140», ИЖ 2125, 2715	700	14	50	1250	2250	13	32	5,0
32 3701	ЗИЛ 431410	840	14	60	1050	2200	14	40	5,0
38 3701	ЗИЛ 4331, 133ГЯ	1260	14	90	900	1800	14	60	8,7
58 3701	«Москвич-21412», ИЖ 2125, 2715	730	14	52	1400	2400	13	32	4,8
63 3701	БелАЗ	4200	28	150	1500	2500	28	150	22,0
65 3701	ЛАЗ 42021, ЛиАЗ 5256	2500	28	90	1250	2400	26	60	9,0
66 3701	ПАЗ 672М, 3201	840	14	60	1150	2600	13	40	4,6
25 3771	ГАЗ 3110	1120	14	80	1100	2200	13	53	5,4
1702 3771	МАЗ, КамАЗ 5332	1260	28	45	1150	2100	28	30	5,2
2022 3771	ЗИЛ 53014	1260	14	90	1100	2400	14	60	6,0
16 3771	УАЗ	800	14	57	1000	2050	13	40	3,4
19 3771	ГАЗ 31029, 3302, 3110	940	14	67	800	2200	14	45	5,8
26 3771*	ВАЗ 2104, 2105, 2108, 2109	770	14	55	1100	2200	14	37	3,8
851 3701	ЗИЛ 53012	1150	14	82	1200	3000	14	55	5,2
9002 3701	ЗИЛ 4334	2240	28	80	1350	2600	18	53	8,7
94 3701*	ГАЗ 3302, ВАЗ 2110	1000	14	70	900	1800	14	40	4,5

* Генераторы компактной конструкции

как КПД зависит от мощности генератора Обычно максимальное значение КПД вентильных автомобильных генераторов составляет 50—60 %

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Принципиальные электрические схемы систем электроснабжения приведены на рис 63 2

Различают два типа регуляторов напряжения в одном (рис 63 2, *а*) выходной коммутирующий элемент регулятора напряжения соединяет вывод обмотки возбуждения генератора с «плюсом», в другом (рис 63 2, *б*, *в*) — с «минусом» бортовой сети Транзисторные регуляторы напряжения второго типа являются более распространенными

Чтобы во время стоянки аккумуляторная батарея не разряжалась, в цепь обмотки возбуждения генератора в схемах рис 63 2, *а*, *б* подается ток через выключатель зажигания В схеме рис 63 2, *в* через выключатель зажигания ток подается в цепь управления регулятора напряжения При отсутствии тока в цепи управления выходной коммутирующий элемент регулятора выключается и ток в обмотке возбуждения прерывается

Автоматическое предотвращение разряда аккумуляторной батареи на обмотку возбуждения обеспечивается в схеме рис 63 2, *д* В этой схеме обмотка возбуждения имеет свой дополнительный выпрямитель, состоящий из трех диодов

В схеме рис 63 2, *д* введена цепь, позволяющая осуществить начальное возбуждение генератора от аккумуляторной батареи через контрольную лампу *8*, которая является одновременно и элементом контроля работоспособности генераторной установки Там же применен стабилитрон *12*, предотвращающий изменения напряжения, опасные для электронной аппаратуры

В схеме рис 63 2, *а* имеется реле с нормально замкнутыми контактами, через которые получает

Таблица 63.2

Фирма (страна)	Тип генератора		Ток отдачи, А, при частоте вращения, об/мин		Наружный диаметр статора, мм	Масса генератора (без шкива), кг
			1500	6000		
Bosch (Германия)	K1-14V	20/45A	20	45	125	4,0
		23/55A	23	55	125	4,2
		23/65A	23	65	125	4,5
		28/70A	28	70	125	4,7
		30/85A	30	85	125	5,1
	N1-14V	36/80A	36	80	138	5,6
		34/90A	34	90	138	5,6
		40/115A	40	115	142	6,2
		25/140A	25	140	142	6,4
	GC-14V*	27-50A	27	50	116	4,0
		27-60A	27	60	116	4,0
		30-70A	30	70	116	4,2
	KC-14V*	40-70A	40	70	125	4,9
		40-80A	40	80	125	4,9
		45-80A	45	80	125	5,4
		45-90A	45	90	125	5,4
	NC-14V*	50-100A	50	100	142	6,0
		60-120A	60	120	142	6,2
		40-140A	40	140	142	6,7
Valco (Франция)	A13N14V	50A	28	52	128	4,1
		60A	28	64	128	4,1
		70A	28	71	128	4,1
		80A	28	80	128	4,1
	A14N14V	75A	35	77	136	5,6
		80A	31	82	136	5,6
		90A	42	96	136	5,6
		105A	40	110	142	6,3
	A11VI	21	35	70	125	4,5
	A11VI	22, 23	30	60	125	4,5
	A13VI	40, 41	40	90	136	5,8
Magneti Marelli (Италия)	AA125R-14V-45		20	48	125—128	4—4,3
		-55	22	57	125—128	4—4,3
		-65	35	68	125—128	4—4,3
Lucas (Англия)	A127	-45	19	45	127	4,0
		-55	24	55	127	4,2
		-65	24	65	127	4,3
		-70	25	70	127	4,3
		-72	25	72	127	4,4

* Генераторы компактной конструкции.

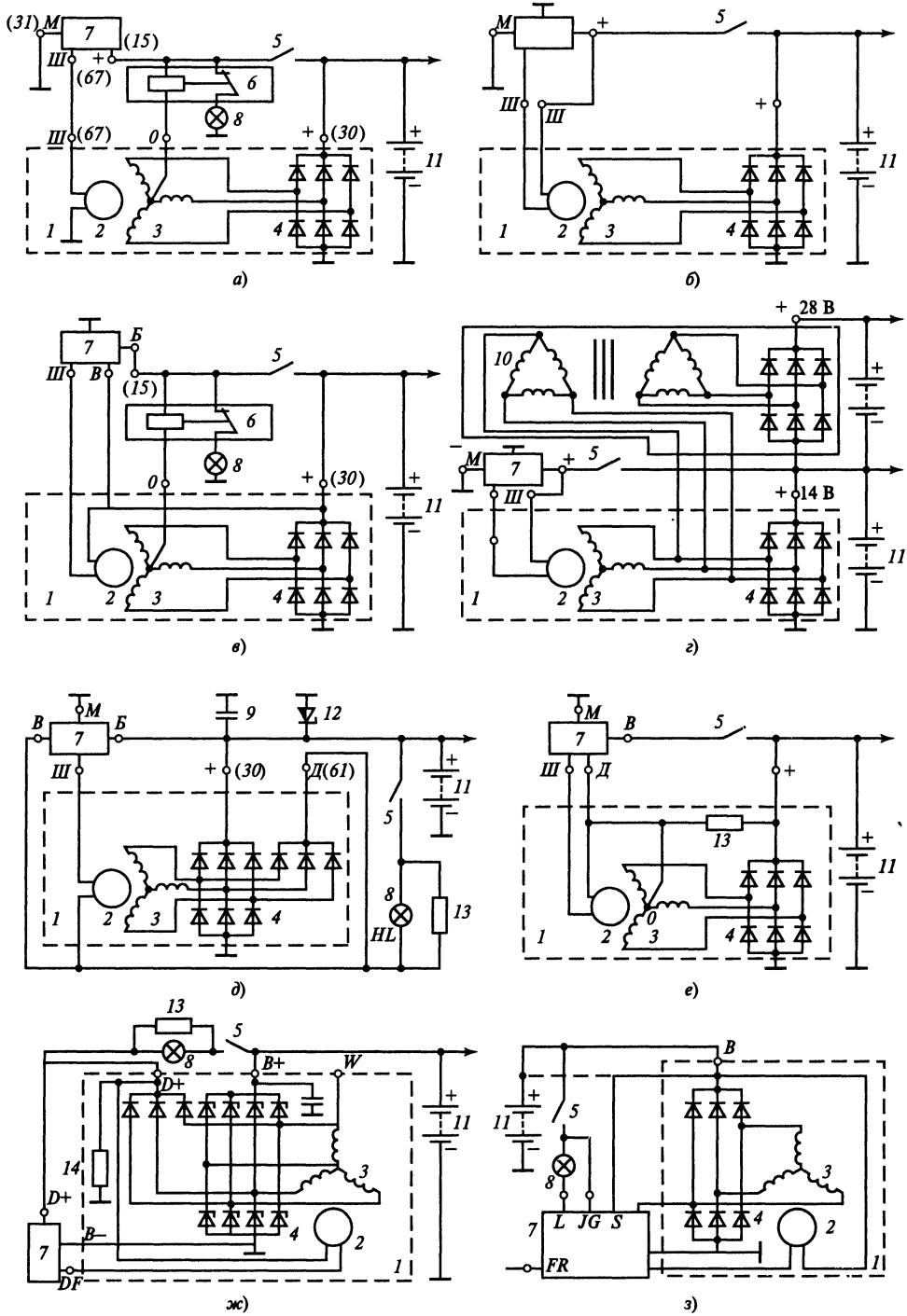


Рис. 63.2. Схемы генераторных установок:

1 — генератор; *2* — обмотка возбуждения; *3* — обмотка статора; *4* — выпрямитель; *5* — выключатель; *6* — реле контрольной лампы; *7* — регулятор напряжения; *8* — контрольная лампа; *9* — помехоподавительный конденсатор; *10* — трансформаторно-выпрямительный блок; *11* — аккумуляторная батарея. *12* — стабилитрон защиты от импульсного увеличения напряжения; *13*, *14* — резисторы

питание контрольная лампа *8* В некоторых случаях обмотка реле *6* контрольной лампы подключается к выводу фазы генератора

Схема рис 63 2, *е* характерна для генераторных установок с номинальным напряжением 28 В В этой схеме обмотка возбуждения подключена к нулевой точке обмотки статора генератора Резистор *13* обеспечивает возбуждение генератора

Система электроснабжения на два уровня напряжения (14 и 28 В) использует схему рис 63 2, *г* Для получения второго уровня используется электронный удвоитель напряжения или трансформаторно-выпрямительный блок (ТВБ), как это показано на рис 63 2, *г* Схема рис 63 2, *ж* является модификацией схемы рис 63 2, *д*, где стабильное напряжение поддерживается регулятором на выводе дополнительного выпрямителя На рис 63 2, *ж* показана схема с дополнительным плечом выпрямителя, выполненная на стабилитронах, которые в нормальном режиме работают как обычные выпрямительные диоды, а в аварийных режимах предотвращают появление опасного импульсного повышения напряжения Резистор *14* расширяет диагностические способности схемы Дополнительное плечо силового выпрямителя, соединенное с нулевой точкой обмотки статора, увеличивает мощность генератора за счет третьих гармонических составляющих, имеющихся в фазном напряжении В схеме на рис 63 2, *з* регулятор прерывает ток в обмотке возбуждения во время стоянки при отсутствии напряжения в фазе генератора На вход регулятора может подаваться напряжение генератора или аккумуляторной батареи (пунктир на рис 63 2, *з*), а иногда и оба эти напряжения сразу

КОНСТРУКЦИЯ ГЕНЕРАТОРОВ

Наиболее распространенные отечественные и зарубежные генераторы имеют конструкцию, в основу которой положена клювообразная полюсная система ротора Это позволяет создать многополюсную систему с помощью одной обмотки возбуждения, питание к которой подводится через кольца и щетки

По организации системы охлаждения генераторы можно разделить на два типа — традиционной конструкции с вентилятором на приводном шкиве и компактной конструкции с двумя вентиляторами у торцевых поверхностей полюсных половин ротора В первом случае охлаждающий воздух засасывается вентилятором через вентиляционные окна в крышке со стороны контактных колец, во втором — через вентиляционные окна обеих крышек Компактную конструкцию отличают вентиляционные отверстия на цилиндрических частях крышек и усиленное оребрение Малый диаметр внутренних вентиляторов позволяет увеличить частоту вращения ротора генераторов компактной конструкции Для автомобилей с высокой температурой воздуха в моторном отсеке или работающих в условиях повышенной запыленности применяют конструкцию с поступлением забортного воздуха через кожух с патрубком и воздуховод

Генераторы различаются по конструкции у одних щеточный узел размещен во внутренней полости генератора, у других — снаружи под специальным пластмассовым кожухом В последнем случае контактные кольца ротора имеют малый диаметр, так как при сборке генератора они должны пройти через внутренний диаметр подшипника задней крышки Уменьшение диаметра колец способствует повышению ресурса работы щеток

На рис 63 3 представлен генератор типа 37 3701 традиционной конструкции, установленный на автомобилях ВАЗ 2108, на рис 63 4 — генератор компактной конструкции фирмы «Bosch» Аналогичную компактную конструкцию имеет генератор типа 9422 3701 автомобиля ВАЗ 2110 и генератор типа 26 3771 автомобилей ВАЗ и АЗЛК В этих генераторах щеточный узел и выпрямительный блок, а также регулятор напряжения закреплены на задней крышке под пластмассовым колпаком

Статор генератора устанавливается между крышками, которые контактируют с наружной поверхностью пакета статора Чем глубже статор утоплен в крышке, тем меньше вероятность появления перекоса подшипников, установленных в крышках Некоторые зарубежные фирмы выпускают генераторы, у которых статор полностью утоплен в переднюю крышку Существуют даже конструкции, у которых средние листы пакета выступают над остальными

Крепежные «лапы» и натяжное «ухо» отливаются заодно с крышками Отечественные генераторы традиционной конструкции имеют двухлапное крепление Зарубежные генераторы легковых автомобилей крепятся на двигателе обычно за одну лапу, которую имеет передняя крышка Пакет статора отечественных генераторов набирается из стальных листов толщиной 0,5—1 мм Однако более прогрессивной технологией является навивка пакета из ленты или набор его из стальных подковообразных сегментов, так как при этом снижается расход стали Листы скрепляются сваркой

Пазы изолированы пленкоэлектрокартоном, полиэтилентерефталатной пленкой или напылением изоляции, обмотки выполняются проводами ПЭТ-200, ПЭТД-180, ПЭТВМ, ПЭСВ-3 и др Схемы обмоток статора представлены на рис 63 5, где цифры обозначают номера зубцов Соединение фаз, как правило, в «звезду», но в генераторах повышенной мощности применяют соединение в «треугольник» или в две «звезды» параллельно («двойная звезда») В табл 63 3 приведены

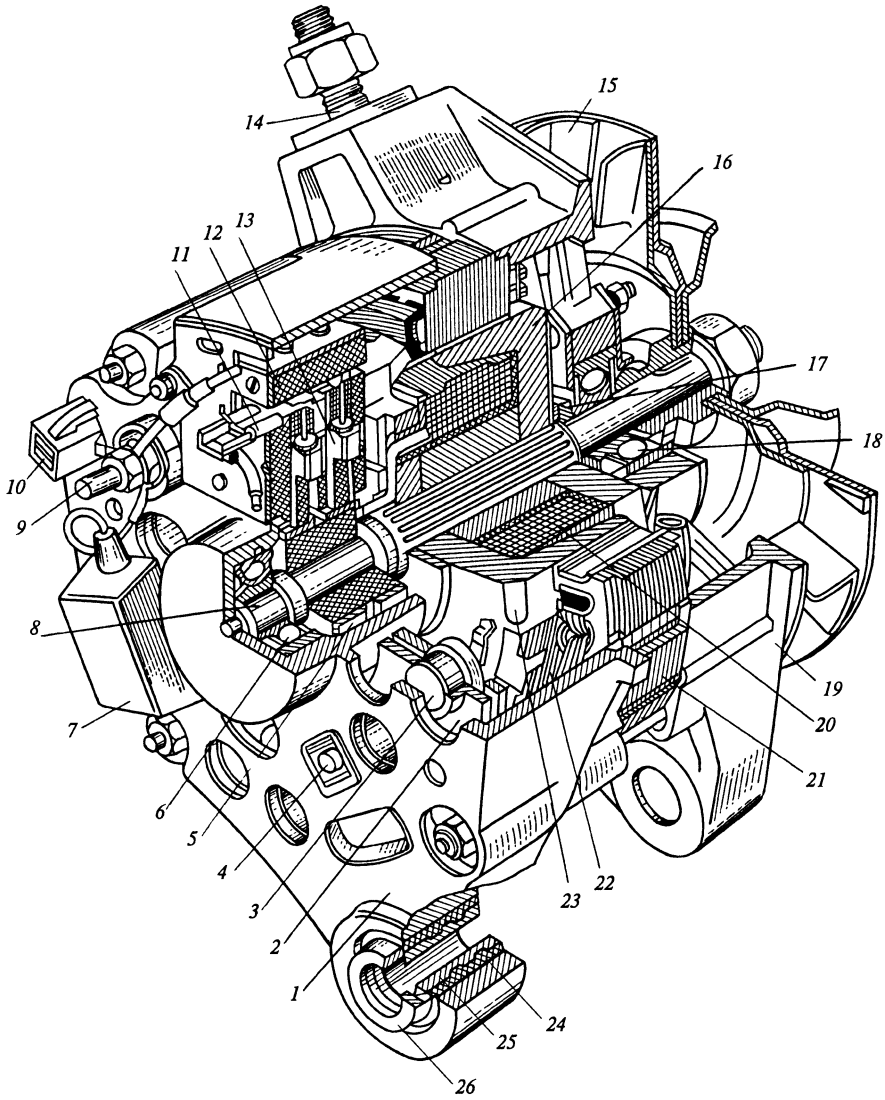


Рис. 63.3. Генератор типа 37.3701:

1 — крышка со стороны контактных колец; *2* — выпрямительный блок; *3* — вентиль (диод) выпрямительного блока; *4* — винт крепления выпрямительного блока; *5* — контактное кольцо; *6* — задний шарикоподшипник; *7* — конденсатор; *8* — вал ротора; *9* — вывод «30» генератора; *10* — вывод «61» генератора; *11* — вывод регулятора напряжения; *12* — регулятор напряжения; *13* — щетка; *14* — шпилька крепления генератора к натяжной планке; *15* — шкив с вентилятором; *16* — полюсный наконечник ротора; *17* — дистанционная втулка; *18* — передний шарикоподшипник; *19* — крышка со стороны привода; *20* — обмотка ротора; *21* — статор; 22 — обмотка статора; *23* — полюсный наконечник ротора; *24* — буферная втулка; *25* — втулка; *26* — подвижная втулка

технические данные обмоток некоторых типов отечественных генераторов.

Отечественные генераторы оборудованы цилиндрическими или торцевыми медными кольцами, к которым припаяны или приварены концы обмотки возбуждения. В мировой практике встречаются кольца из латуни или нержавеющей стали, что снижает их износ и окисление, особенно во влажной среде.

Щеточный узел (блок) — это пластмассовая конструкция, в которой установлены щетки двух типов — медно-графитовые и электрографитированные. В отечественных генераторах применяют-

Таблица 63.3

Тип генератора	Обмотка статора		Обмотка возбуждения		
	Диаметр провода (по меди), мм	Число витков обмотки	Диаметр провода (по меди), мм	Число витков	Сопротивление обмотки при 20 °С, Ом
Г221А	1,25	10	0,69	500 ± 3	4,3 ± 0,2
Г222	1,0	9	0,71	460 ± 3	3,7 ± 0,2
37.3701	1,0	8,5	0,8	420 ± 6	2,6 ± 0,1
16.3701	1,06	9	0,93	440 ± 10	2,5 ± 0,1
19.3701	1,4	8	0,95	544 ± 5	3,0 ± 0,15
29.3701	1,32	9	0,8	550 ± 3	3,7 ± 0,2
32.3701	1,12	16	0,8	550 ± 3	3,7 ± 0,2
38.3701	1,4	6,5	0,9	490 ± 5	3,1 ± 0,15
581.3701	1,18	14	0,75	464 ± 5	3,7 ± 0,2
58.3701					
582.3701	1,18	13	0,8	390 ± 5	2,7 ± 0,2
583.3701					
Г254	1,32	13	0,8	535 ± 5	3,7 ± 0,2
Г266	1,56	10	0,8	550 ± 3	3,7 ± 0,2
Г286	1,7	14	0,93	550 ± 10	3,7 ± 0,2
Г273	1,18	20	0,8	550 ± 3	3,7 ± 0,2
Г289	1,7	8	0,93	550 ± 10	3,7 ± 0,2
Г263	1,8	11	0,93	580 ± 5	3,4 ± 0,2
955.3701	1,06	38	0,8	340 ± 5	2,3 ± 0,4
Г287-Б	1,45	15	0,83	530 ± 5	3,6 ± 0,2
16.3771	1,25	14	0,8	350 ± 5	2,4 ± 0,1
1702.3771	0,95	26	0,63	710 ± 5	8,0 ± 0,2
19.3771	1,25	14	0,8	350 ± 5	2,4 ± 0,1
2022.3771	1,25	14	0,8	350 ± 5	2,4 ± 0,1
15.3771	1,25	14	0,8	350 ± 5	2,4 ± 0,1

ся электрографитированные щетки типа ЭГ51А размером 5×8×18 мм и медно-графитовые типа М1 размером 6×6,5×13 мм.

Выпрямительные блоки, применяющиеся на автомобильных генераторах, разделяются на два типа: пластины-теплоотводы, в которые запрессовываются или к которым припаиваются диоды; сильно оребренные конструкции, к которым припаиваются диоды таблеточного типа.

Типичный отечественный выпрямительный блок типа БПВ11-60 генератора типа 37.3701, блоки генераторов фирм «Bosch» (Германия), «Nippon Denso» (Япония), относящиеся к первому типу, а также блок генераторов фирмы «Magneti Marelli» (Италия) второго типа вместе с применяющимися на них диодами изображены на рис. 63.6.

Выпрямительные блоки отечественных генераторов используют диоды типов Д104-20, Д104-25 и Д104-35 на максимально допустимые токи 20, 25 и 35 А соответственно или их аналоги, имеющие такие же размеры и характеристики, а также в последних конструкциях силовые стабилитроны.

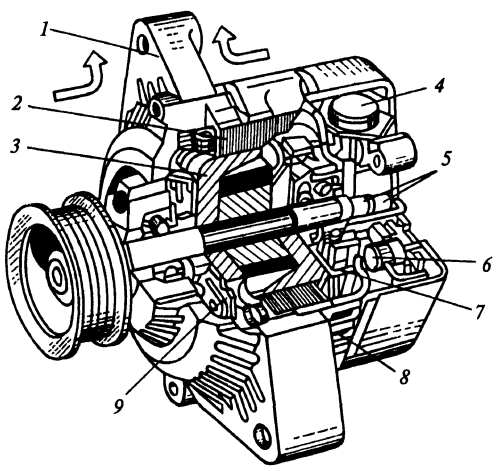


Рис. 63.4. Генератор компактной конструкции фирмы «Bosch»:

1, *8* — крышки; *2* — статор; *3* — ротор; *4* — регулятор напряжения; *5* — контактные кольца; 6 — выпрямитель; *7*, *9* — вентиляторы

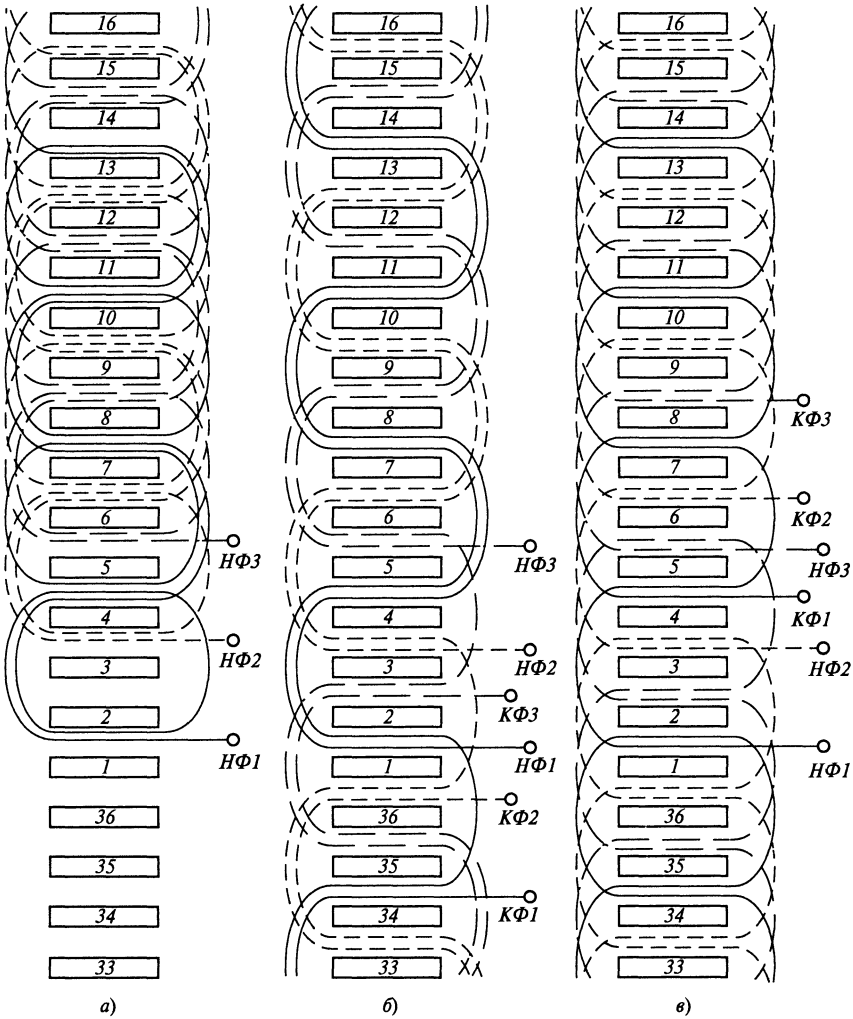


Рис. 63.5. Схемы обмотки статора.

а — петлевая распределенная *б* — волновая сосредоточенная, *в* — волновая распределенная, ——— — первая фаза, - - - - - — вторая фаза, — - - — третья фаза, *НФ* — начало фаз, *КФ* — конец фаз

Стабилитроны применяются в основном там, где на генераторы установлены регуляторы с микросхемой на монокристалле кремния или с использованием полевых транзисторов Для питания обмотки возбуждения генератора используются диоды на ток 2 А Основные параметры наиболее широко применяющихся в отечественных генераторах выпрямительных блоков приведены в табл 63 4

Подшипниковые узлы генераторов содержат радиальные шариковые подшипники с встроенными в них уплотнениями и одноразовой закладкой смазки Посадка шариковых подшипников со стороны контактных колец на вал плотная, в крышку скользящая, со стороны привода, наоборот, посадка в крышку плотная, а на вал скользящая Такая посадка оставляет возможность проворота наружной обоймы подшипника со стороны контактных колец в гнезде Для предотвращения проворота применяют резиновые кольца (в генераторах типов Г221А, Г222, 37 3701), пластмассовые стаканчики (в генераторах типа 94 3701), гофрированные стальные пружины и т п Марки подшипников, применяющихся в отечественных генераторах типов 6-180605К1С9, 6-180603К2С9Ш1, 6-180503К2С9Ш, 0-180502К1С9Ш, 6-1180304КС9Ш1, 6-180302У1С9, 6-180201У1С9, смазка ЛЗ-31М

Привод генератора осуществляется клиновым ремнем через шкив, установленный на валу ротора На высокое передаточное число (до трех) применяются поликлиновые ремни, в частности с генераторами компактной конструкции Поликлиновый ремень кроме генератора приводит во вращение еще

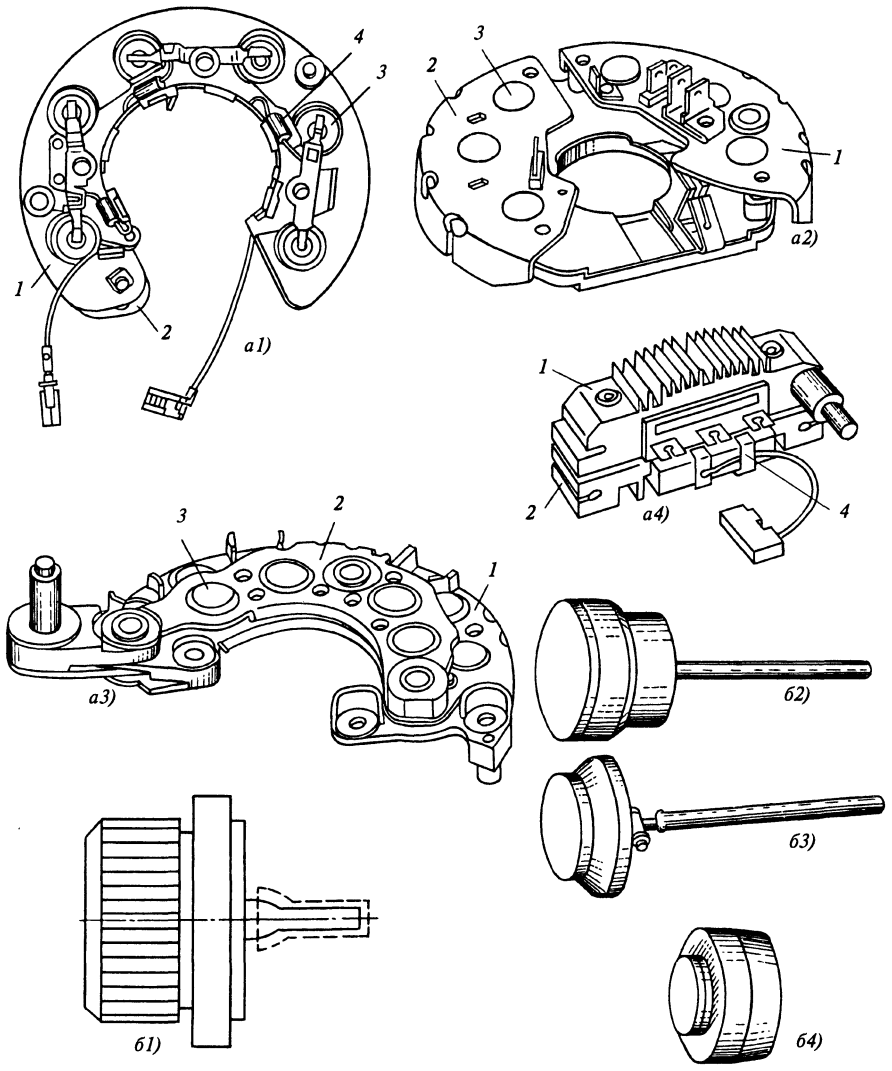


Рис. 63.6. Выпрямительные блоки генераторов:

а1, *а2*, *а3*, *а4* — выпрямительные блоки соответственно БПВ 11-60 генератора типа 37.3701; генераторов фирмы «Bosch»; генераторов фирмы «Nippon Denso»; генераторов фирмы «Magnetti Marelli»; *б1*, *б2*, *б3*, *б4* — диоды этих блоков; *1* — положительный теплоотвод; *2* — отрицательный теплоотвод; *3* — диоды основного выпрямителя; *4* — диоды дополнительного выпрямителя

ряд агрегатов, в то время как для клинового ремня желателен индивидуальный привод генератора. На генераторах с диаметром вала в месте установки шкива до 17 мм (это наиболее распространенный в мире диаметр) шпонка под шкив обычно не устанавливается. Об отсутствии шпонки свидетельствует шестиугольное углубление в торце вала, за которое ключом удерживают вал при затяжке гайки шкива.

Бесщеточные генераторы обладают повышенной надежностью и долговечностью, так как у них отсутствует щеточно-контактный узел, подверженный износу и загрязнению, а обмотка возбуждения неподвижна.

Все отечественные тракторные генераторы бесщеточные. Отечественная промышленность предлагает и для установки на автомобиле ВАЗ индукторный генератор типа 955.3701 (рис. 63.7) со смешанным магнитоэлектромагнитным возбуждением. Он выполнен с использованием традиционной конструкции тракторных генераторов. Ротор генератора представляет собой стальную шестилу-

Таблица 63.4

Тип блока	Тип генератора	Номинальное напряжение, В	Максимальный выпрямленный ток, А	Обратный ток при напряжении 150 В, мА	Число диодов
БПВ 6-50-02	Г221А, Г222	14	50	3	6
БПВ 8-100	Г286, Г289	14 и 28	100	10	12
БПВ 7-100-02	38.123701, Г287	14 и 28	100	10	12
БПВ 11-60	37.3701	14	60	5	9
БПВ 46-65-02	32.3701	14	65	5	6
БПВ 4-60-02	29.3701	14	60	5	6
БПВ 45-65-02	58.3701	14	65	5	6
БПВ 62-100-72	955.3701	14	65	5	15
БПВ 35-65-02	16.3701	14	65	5	6
БПВ 24-45	Г273	28	45	5	6
БПВ 56-65	Г221А, Г222	14	65	5	6
БПВ 76-80-02	94.3701	14	80	5	11
БВ01-105*	9422.3701	14	105	—	9

* Установлены силовые стабилитроны.

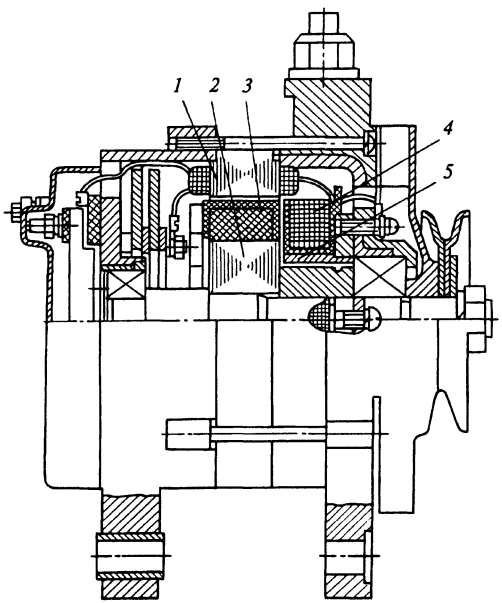


Рис. 63.7. Бесщеточный генератор типа 955.3701:
1 — статор; *2* — ротор; *3* — постоянный магнит; *4* — обмотки возбуждения; *5* — индуктор (магнитопровод обмотки возбуждения)

чевую звездочку, между зубцами ротора размещены постоянные магниты. На зубцах статора помещена катушечная обмотка, соединенная в пятиугольник. Передняя крышка стальная. В ней располагается индуктор с втулкой, прикрепленный за фланец к крышке. На втулке индуктора размещена обмотка возбуждения, намотанная на каркас. Между втулкой индуктора и втулкой ротора имеется воздушный зазор.

На переднюю крышку генератора надет подшипниковый щит с натяжным «ухом» и «лапой», расположение которых позволяет применять генератор на любых автомобилях модели ВАЗ. В задней крышке из алюминиевого сплава находится выпрямительный блок БПВ62-100, расположенный в ее внутренней полости и закрепленный пятью изолированными болтами. Регулирующее устройство, содержащее интегральный регулятор напряжения Я112Б, и подстроечный резистор расположены на наружной поверхности задней крышки и закрыты пластмассовым кожухом. Там же расположен помехоподавляющий конденсатор К-73-21 емкостью 2,2 мкФ. Генератор кроме основной обмотки возбуждения имеет включенную встречно ей размагничивающую обмотку, расширяющую скоростной диапазон генератора. Основные параметры бесщеточных генераторов приведены в табл. 63.5.

СХЕМНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ РЕГУЛЯТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Конструкция, технология изготовления и схемное исполнение регуляторов напряжения тесно связаны друг с другом. Все современные регуляторы напряжения являются электронными устройствами. Однако с развитием электроники наметились существенные изменения в схемном и конструктивном решениях электронных регуляторов.

Таблица 63.5

Тип генератора	Назначение	Номинальное напряжение, В	Ток при 6000 об/мин, А	Начальная частота вращения при холостом ходе, об/мин	Масса без шкива, кг
46.3701	Тракторный	14	60	1500	5,2
96.3701	То же	14	78	1400	5,5
966.3701	»	28	40	1400	5,5
8102.3701	»	28	115*	700	18,5
8152.3701	Автобусный («Икарус»)	28	122	700	18,5
955.3701	Автомобильный (ВАЗ)	14	62	1050	6
958.3701	Автомобильный (КамАЗ)	28	33	1050	6
959.3701	Автомобильный (МАЗ, КамАЗ)	28	42	1200	6
9602.3701-2	Для системы 14/28 В	14/28	62/12	1400	5,6

* При частоте вращения 4000 об/мин.

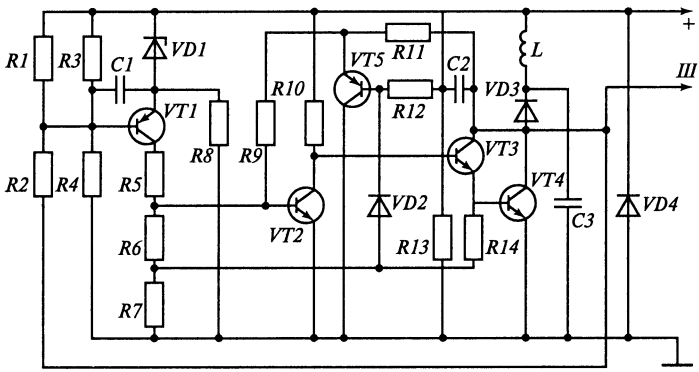


Рис. 63.8. Схема регулятора напряжения типа 13.3702-01

В настоящее время их можно разделить на две группы: регуляторы традиционного схемного исполнения с частотой переключения, изменяющейся с изменением режима работы генератора; регуляторы со стабилизированной частотой переключения, работающие по принципу широтно-импульсной модуляции (ШИМ). По конструкции регуляторы традиционного схемного исполнения выполняются либо на навесных элементах, расположенных на печатной плате, либо в виде гибридных схем, а регуляторы с ШИМ могут быть гибридного исполнения или полностью выполненными на монокристалле кремния. Применение ШИМ позволяет повысить качество стабилизации напряжения и предотвратить влияние на регулятор внешних воздействий.

Современные регуляторы выполняются в основном для встраивания в генератор Исключение составляет регулятор типа 13.3702-01 автомобилей ГАЗ 31029 и ГАЗ 33021, схема которого представлена на рис. 63.8.

Схема работает следующим образом: при открытых транзисторах *VT1* и *VT2* закрыт составной транзистор *VT3*, *VT4*, поскольку его переход эмиттер—база зашунтирован переходом эмиттер—коллектор транзистора *VT2*. Если транзистор *VT1* закрыт, что бывает при напряжении ниже напряжения настройки регулятора (ток через стабилитрон *VD1* не протекает), то закрыт и транзистор *VT2* и открыт составной транзистор *VT3*, *VT4*.

В схеме регулятора имеется резистор жесткой обратной связи *R2*. При переходе составного транзистора *VT3*, *VT4* в открытое состояние резистор *R2*

подключается параллельно резистору *R4* входного делителя напряжения, что приводит к скачкообразному повышению напряжения на стабилитроне *VD1*, ускоренному открытию транзисторов *VT1*, *VT2* и закрытию транзистора *VT3*, *VT4*. Таким образом, резистор *R2* повышает частоту переключения регулятора напряжения. Конденсатор *C1* осуществляет фильтрацию пульсаций входного напряжения и исключает их влияние на работу регулятора напряжения.

Транзистор *VT5* выполняет в схеме две функции. При нормальном режиме работы он обеспечивает форсированный переход транзисторов *VT3*—*VT4* регулятора из закрытого состояния в открытое и обратно, чем снижает потери в них при переключении, т.е. вместе с конденсатором *C2* и резистором *R12* осуществляет гибкую обратную связь в регуляторе.

В аварийном режиме транзистор *VT5* осуществляет защиту выходного составного транзистора *VT3*, *VT4* регулятора от перегрузки. Замыкание в цепи обмотки возбуждения генератора вызывает переход транзистора *VT5*, а следовательно, и транзистора *VT3*, *VT4* в автоколебательный режим. При этом среднее значение тока через транзистор *VT3*, *VT4* невелико и не может вывести его из строя. Диод *VD3* предотвращает опасные изменения напряжения при разрыве цепи обмотки возбуждения составным транзистором *VT3*, *VT4*, т.е. является в схеме регулятора гасящим диодом. Диод *VD4* защищает регулятор от импульсов напряжения обратной полярности. Остальные элементы схемы обеспечивают нужный режим работы ее полупроводниковых элементов.

Интегральные регуляторы напряжения встраиваются в генератор, неразборны и ремонту не подлежат. На рис. 63.9 представлены схемы регуляторов типов Я112А1, Я112В1 и Я120М1. Они выполнены по гибридной технологии на керамической подложке с нанесением на нее толстопленочных резисторов, распайкой переходов выходного транзистора, гасящего диода и навесной микросхемы, состоящей из стабилитрона и входного транзистора. Схемы регуляторов предельно просты.

Базовым является регулятор напряжения типа Я112А1. Регулятор типа Я112В1 отличается тем, что для работы по схеме рис. 63.9, *в* в нем выполнен дополнительный вывод *Б*, к которому напряжение подводится через выключатель зажигания. При неработающем двигателе на выходе *Б* нет напряжения, ток в базовой цепи транзистора *VT2* не протекает, он закрыт и не пропускает ток от аккумуляторной батареи на обмотку возбуждения.

Регулятор типа Я120М1 также имеет дополнительный вывод *Д*, так как он работает по схеме рис. 63.2, *е*, а также вывод *Р* для подключения переключателя посезонной регулировки. Примером регулятора напряжения с ШИМ является регулятор типа Я212А11Е, который аналогичен регулятору типа FL14U4C фирмы «Bosch». Он изготовляется по гибридной технологии в металлостеклянном корпусе, схожем по конфигурации с корпусом мощного транзистора. Схема регулятора представлена на рис. 63.10.

Основу регулятора составляет микросхема, выполненная на кристалле кремния, которая содержит входной делитель *A1*, параметрический стабилизатор напряжения *A2*, усилитель-интегратор *A3*, источник опорного напряжения *A5*, бистабильный триггер *A6* и выходной усилитель *A7*. Вне микросхемы в регуляторе располагаются балластный резистор *R1* параметрического стабилизатора источника питания микросхемы и токоограничивающий резистор *R2*, а также выходной транзистор *VT1* и гасящий диод *VD1*. Питание элементов микросхемы стабилизируется стабилизатором *A2*, а эталонное опорное напряжение создается источником *A5*.

Регулятор работает следующим образом: напряжение генератора через входной делитель *A1* подается на неинвертирующий вход усилителя-ин-

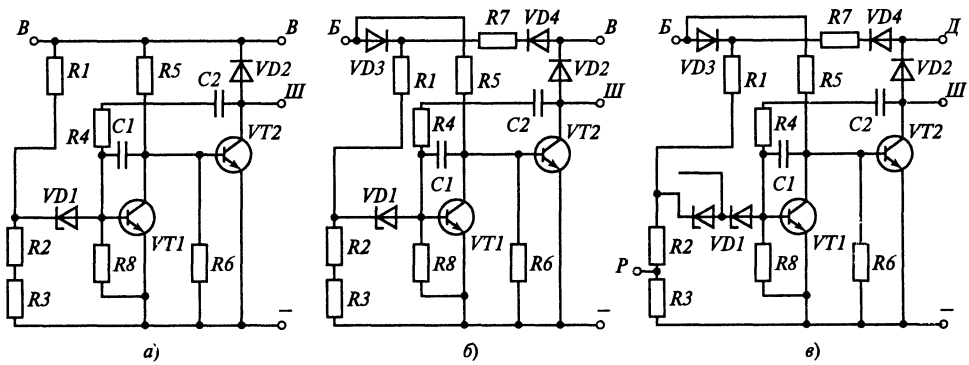


Рис. 63.9. Схемы интегральных регуляторов напряжения типов:
а — Я112А1; *б* — Я112В1; *в* — Я120М1

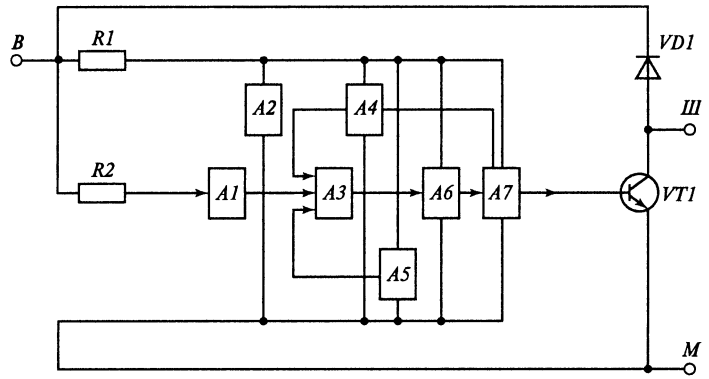


Рис. 63.10. Схема интегрального регулятора напряжения типа Я212А11Е

тегратора *А3*, где сравнивается с опорным напряжением. Если напряжение генератора равно номинальному, то схема выдает через бистабильный триггер *А6* и выходной усилитель *А7* сигнал на переключение выходного транзистора при равенстве времени нахождения его в открытом и закрытом состоянии. Чем больше отклонение напряжения генератора от номинального в ту или другую сторону, тем больше или меньше время заряда-разряда конденсатора интегратора. Напряжение на конденсаторе фиксируется бистабильным триггером *А6*, который через выходной усилитель *А7* увеличивает время нахождения выходного транзистора *VT1* в открытом или закрытом состоянии. Через компаратор обратной связи *А4* на инвертирующий вход *А3* подается добавочное напряжение.

Таким образом, регулятор осуществляет коммутацию в цепи обмотки возбуждения с фиксированной частотой, лежащей в пределах 460 Гц—2,5 кГц (в зависимости от настройки регулятора). Стабилизация же напряжения, как и в традиционной схеме регулятора, происходит при изменении относительного времени включения обмотки возбуждения в цепь питания с соответствующим изменением среднего тока в ней. Применение регуляторов с ШИМ непрерывно расширяется. Некоторые зарубежные фирмы, особенно японские и американские, производят конструкции, в которых в такие регуляторы подводится сигнал от вывода фазы генератора, заставляющий при неработающем генераторе сокращать относительное время включения транзистора и, следовательно, доводить ток возбуждения до значения, не опасного для разряда батареи. Регулятор, кроме того, управляет и лампой контроля работоспособности генераторной установки.

Генераторная установка характеризуется диапазоном изменения выходного напряжения при изменении частоты вращения, нагрузки и температуры. Диапазоны изменения напряжения отечественных генераторных установок представлены в табл. 63.6.

Некоторые регуляторы, имеют два диапазона настройки. Зарубежные фирмы обычно указывают напряжение настройки регулятора напряжения в холодном состоянии генераторной установки при частоте вращения 6000 об/мин, токе 5 А и работе в комплекте с аккумуляторной батареей, а также коэффициент термокомпенсации, т.е. изменение напряжения при изменении температуры окружающей среды на 1 °С. С ростом температуры напряжение уменьшается. Для легковых автомобилей в основном предлагаются напряжения настройки регулятора 14,1 ± 0,1 В при термокомпенсации 7 ± 1,5 мВ/°С и 14,5 ± 0,1 В при термокомпенсации 10 ± 2 мВ/°С.

63.2. СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСТАРТЕРНОГО ПУСКА

Система используется для пуска автотракторных двигателей. Она включает в себя аккумуляторную батарею, стартерный электродвигатель (электростартер), а также элементы управления — тяговое и дополнительное реле и реле блокировки. Структурная схема системы электростартерного пуска представлена на рис. 63.11.

Типовая схема управления электростартером в системе представлена на рис. 63.12.

СТАРТЕРНЫЕ АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ

Классификация. На автомобилях применяют стартерные свинцовые аккумуляторные батареи, которые обеспечивают питание электростартера при пуске двигателя и других потребителей электроэнергии при неработающем генераторе или его недостаточной мощности.

По конструктивно-функциональному признаку в соответствии с ГОСТ 959.0—84Е выделяют аккумуляторные батареи (рис. 63.13):

Таблица 63.6

Тип регулятора напряжения	Тип генератора	Номинальное напряжение $U_{ном}$, В	Диапазон изменения напряжения, В	Падение напряжения при токе возбуждения 3 А, В, не более	Схема по рис. 63.2
121.3702	Г221А	14	13,4—14,6	1,6	*а*
13.3702	16.3701	14	13,4—14,7	1,6	*б*
1307.3702	1607.3701	14	12,9—14,2	1,6	*б*
Я112В1(В2)	Г222, 583.3701-20	14	13,9—14,3	1,5	*в*
Я112А1(А2)	29.3701, Г266	14	13,5—14,8	1,5	*б*
17.3702	37.3701	14	13,5—14,6	1,3	*д*
Я120М1(М2)	Г273А (Б, В, Г)	28	27—28; 28,5—31	1,5	*е*
21.3702	63.3701	28	26—28,5	1,8	*е*
23.3702	57.3701, 65.3701, 9002.3701	28	26,5—28; 28,4—30	1,2	*б*
Я112А1Т	16.3771, 583.3701	14	12,95—14,2	1,5	*б*
Я212А11Е	25.3771, 94.3701	14	13,7—14,5	1,2*	*ж*
1902.3702	3812.3701	14	13,6—13,9; 14,2—14,5	1,4	*г*
2712.3702	Г288, 1702.3771	28	27,2—27,9; 28,4—29,3	1,4	*б*
4332.3702	13.3771	28	29,5—27,1	1,2*	*е*
4202.3702	2022.3771	14	13,3—15,0	1,4*	*б*
3702.3702	3802.3701	14	13,6—13,9; 14,2—14,5	1,4	*г*
4302.3702	58.3701	14	13,55—14,8	1,4*	*б*

* При токе 4 А.

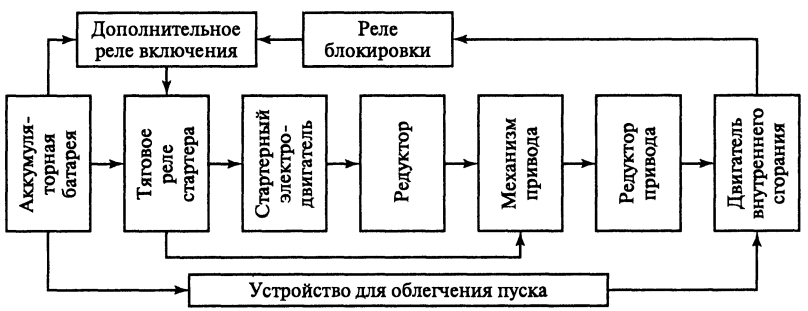


Рис. 63.11. Структурная схема системы электростартерного пуска

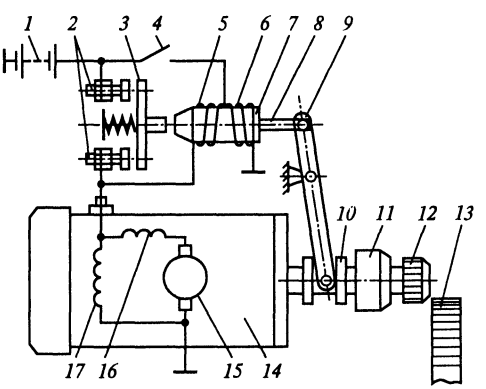


Рис. 63.12. Типовая схема управления электростартером:

1 — аккумуляторная батарея; *2* — контактные болты; *3* — подвижная контактная пластина; *4* — выключатель стартера; *5* — втягивающая обмотка тягового реле; *6* — удерживающая обмотка тягового реле; *7* — якорь тягового реле; *8* — шток; *9* — рычаг привода; *10* — поводковая муфта; *11* — муфта свободного хода; *12* — шестерня привода; *13* — зубчатый венец маховика; *14* — стартерный электродвигатель; *15* — якорь стартерного электродвигателя; *16* — последовательная обмотка возбуждения; *17* — параллельная обмотка возбуждения

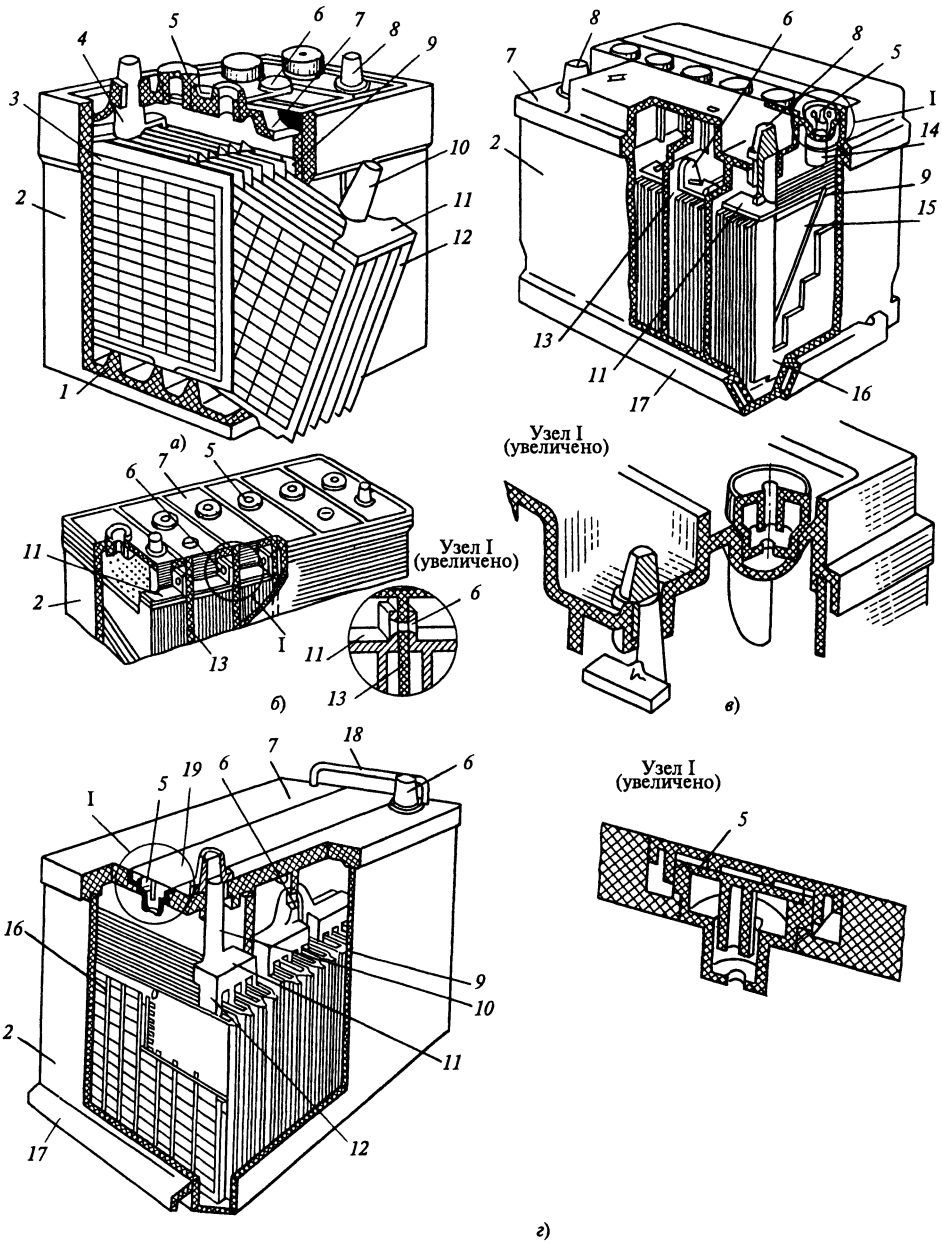


Рис. 63.13. Аккумуляторные батареи:

а — с ячеечными крышками; *б*, *в*, *г* — с межэлементными перемычками через перегородки; *1* — опорные призмы моноблока; *2* — моноблок; *3* — полублок отрицательных электродов; *4* — баретка; *5* — пробка; *6* — межэлементная перемычка; *7* — крышка; *8* —полюсный вывод; *9* — сепаратор; *10* — борн; *11* — мостик; *12* — полублок положительных электродов; *13* — перегородки моноблока; *14* — индикатор уровня жидкости; *15* — положительный электрод; *16* — отрицательный электрод; *17* — выступ моноблока; *18* — переносное устройство; *19* — планка

в моноблоке с ячеечными крышками и межэлементными перемычками над крышками (обычная конструкция);

в моноблоке с общей крышкой и межэлементными перемычками под крышкой;

необслуживаемые — с общей крышкой, не требующие ухода в эксплуатации (термин «батареи необслуживаемые» условный, так как обслуживать их в эксплуатации все-таки требуется, хотя и в значительно меньшем объеме).

Условное обозначение. Условное обозначение типа батареи (например, батарея 6СТ-50А) содержит указание на количество последовательно соединенных аккумуляторов в батарее (три или шесть), характеризующих ее номинальное напряжение $U_{ном}$ (6 или 12 В), указание на назначение по функциональному признаку (СТ—стартерная), номинальную емкость C_{20} в 20-часовом режиме разряда (ампер-часы) и исполнение (при необходимости): А — с общей крышкой; Н — несухозаряженная; З — необслуживаемая, залитая электролитом и полностью заряженная.

В условных обозначениях батарей буквы Э и Т после значения номинальной емкости указывают на материал моноблока (соответственно эбонит и термопласт). Последующие буквы обозначают материал сепаратора (М — мипласт, Р — мипор). На батареи обычной конструкции, предназначенные для эксплуатации в странах с тропическим климатом, дополнительно наносят букву Т.

Техническая характеристика. Основные параметры и размеры батарей должны соответствовать размерно-параметрическому ряду по ГОСТ 959.0—84Е. Батареи, имеющие ручки для переноса, выступы для крепления и другие дополнительные устройства, могут иметь увеличенные размеры до 10 мм по ширине и высоте в местах этих устройств. Допускаются увеличенные размеры по высоте до 25 мм для батарей с гидростатическими пробками.

Основные конструктивные параметры стартерных свинцовых аккумуляторных батарей и их применение на автомобилях указаны в табл. 63.7.

Таблица 63.7

Тип аккумуляторной батареи	Емкость при 20-часовом режиме разряда, А · ч	Разрядный ток в стартерном режиме при −18 °С, А	Размеры, мм			Масса, кг		Применение
			длина	ширина	высота	без электролита	с электролитом	
6СТ-55 ЭМ	55	255	262	174	226	17,5	21,1	Автомобили ВАЗ, АЗЛК, ЛуАЗ, ЕрАЗ
6СТ-55 А1	55	255	242	175	190	11,5	16,0	
6СТ-55 П	55	255	265	182	226	15,0	18,26	
6СТ-60 ЭМ	60	180	283	182	237	19,5	25,0	Легковые автомобили ГАЗ, УАЗ, ЗИЛ 114, ЗИЛ 117, РАФ 9771
6СТ-60 П	60	180	265	182	226	15,8	21,3	
6СТ-66 А1	66	300	301,5	175	190	13,5	18,5	ГАЗ 24-10, ГАЗ 3202
6СТ-75 ЭМ	75	225	358	177	240	23,8	30,5	Грузовые автомобили ГАЗ, КАвЗ 651, 685
6СТ-77 А1	77	350	340	175	190	16,0	20,5	Грузовые автомобили ГАЗ
6СТ-90 ЭМ	90	270	421	186	240	28,3	35,7	ЗИЛ 130, «Урал 375», ЛАЗ 695Н
6СТ-110 А	110	500	331	239,8	230	24,5	33,7	ГАЗ 4509
6СТ-132 ЭМ	132	396	514	211	244	41,0	51,0	Автомобили БелАЗ, КрАЗ, ОдАЗ, тракторы ЛТЗ 145, МТЗ 142
6СТ-132 П	132	396	511,5	197,5	237	33,0	43,6	
6СТ-140 АЛ	140	840	576	242	244	38,5	51,0	«Урал», МАЗ, ЗИЛ
6СТ-182 ЭМ	182	546	522	282	243	56,0	70,7	КрАЗ, БелАЗ, МоАЗ, КАЗ, ЛИАЗ, ЛАЗ
6СТ-190 А	190	570	525	240	243	45,0	60,0	Автомобили КамАЗ, БАЗ, «Урал», ЗИЛ, МАЗ, БелАЗ
6СТ-190 ТМ	190	570	587	237	238	58,0	72,5	

Условия работы. Режим работы аккумуляторной батареи на автомобиле характеризуется температурой электролита, уровнем вибрации и тряски, периодичностью, объемом и качеством технического обслуживания, параметрами стартерного разряда, значением токов и продолжительностью разряда и заряда при циклировании, уровнем надежности и исправности электрооборудования, продолжительностью работы и перерывов в эксплуатации. Аккумуляторные батареи могут эксплуатироваться при температуре окружающего воздуха от –40 до +60 °С (батареи обычной конструкции) и от –50 до +60 °С. (батареи с общей крышкой и необслуживаемые). При этом рабочая температура электролита должна быть не выше 50 °С.

Батареи, эксплуатируемые при низких температурах, рекомендуется заполнять электролитом большей плотности и содержать в заряженном состоянии. При начальной плотности 1,30 г/см^3 электролит даже полностью разряженной батареи может замерзнуть при –14 °С. Низкие температуры значительно ухудшают условия заряда аккумуляторных батарей. Уже при –10 °С разряженная на 60 % батарея может быть заряжена только на 60—65 % от номинальной емкости. При температурах ниже –10 °С для поддержания батареи в заряженном состоянии необходимо повышать регулируемое напряжение генераторной установки автомобиля. Зарядное напряжение должно соответствовать значению, указанному в техническом описании и инструкции по эксплуатации автомобиля. Максимальное регулируемое напряжение генераторной установки должно быть не выше 15,5 и 31,0 В соответственно для систем электрооборудования на 12 и 24 В.

Основные требования. Батареи с общей крышкой и необслуживаемые должны изготовляться в климатическом исполнении О, а батареи обычной конструкции — в климатическом исполнении УХЛ и Т категории размещения 2 по ГОСТ 15150—69.

Провод от отрицательного вывода батареи крепится к двигателю или жесткой раме.

Вибрация в местах установки аккумуляторных батарей должна характеризоваться ускорением не более 1,5g (14,7 м/с^2) при частотах до 60 Гц. Допускается кратковременная вибрационная нагрузка с ускорением 5g при частоте 30 Гц. При вибрации и тряске батарея не должна перемещаться по опорной площадке. Вибрационные нагрузки на батарею должны гаситься амортизаторами или амортизационными прокладками.

Минимальный срок службы батарей обычной конструкции и с общей крышкой в эксплуатации должен составлять 1 год при пробеге транспортного средства в пределах этого срока не более 150 тыс. км или 2 года при пробеге транспортного средства в пределах этого срока не более 90 тыс. км. Минимальный срок службы необслуживаемых батарей в эксплуатации должен составлять 3 года при пробеге транспортного средства не более 100 тыс. км в пределах этого срока службы. Минимальным сроком службы, или наработкой батареи, в эксплуатации считается время до момента снижение емкости ниже 40 % от номинальной или снижение продолжительности стартерного разряда ниже 1,5 мин при температуре электролита 25 ± 2 °С до конечного разрядного напряжения 4,5 В для батарей напряжением 6 В и 9,0 В для батарей напряжением 12 В.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАРТЕРНЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Электродвижущая сила (ЭДС), напряжение. ЭДС аккумулятора зависит от химических свойств активных материалов и плотности электролита. Изменение напряжения на зажимах аккумуляторной батареи при разряде $U_р$ по времени $\tau_р$ зависит от разрядного тока $I_р$ и температуры электролита t (рис. 63.14).

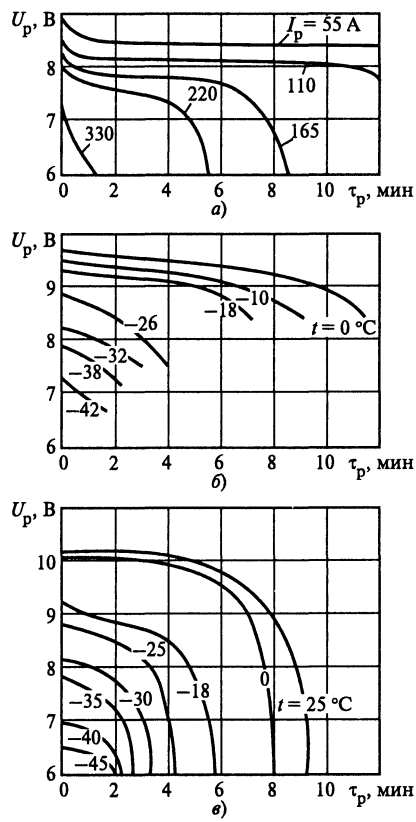


Рис. 63.14. Разрядные характеристики аккумуляторных батарей:

а — 6СТ-55ЭМ при t = –20 °С; *б* — 6СТ-90ЭМ при $I_р$ = 270 А; *в* — 6СТ-190ТР при $I_р$ = 500 А

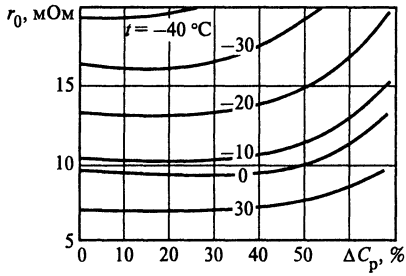


Рис. 63.15. Зависимость сопротивления r_0 аккумуляторной батареи 6СТ-90ЭМ от степени разряженности ΔC_p при различных температурах

Внутреннее сопротивление. Сопротивление аккумулятора складывается из сопротивления поляризации, электродов, электролита, сепараторов, межэлементных перемычек и других токоведущих деталей. Сопротивление электродов и токоведущих деталей мало изменяется с изменением температуры. Рост сопротивления аккумуляторной батареи r_0 с понижением температуры (рис. 63.15) связан в основном с увеличением сопротивления электролита и пропитанных электролитом сепараторов. В стартерных аккумуляторных батареях применяют электроды толщиной 1,4—2,3 мм, шириной 143 мм и высотой (без ножек) 119 и 133,5 мм. Сопротивление заряженных стартерных аккумуляторов и даже батареи последовательно соединенных аккумуляторов составляет от нескольких тысячных до нескольких сотых долей ома.

Емкость. Разрядная емкость C_p — количество электричества, отдаваемое батареей в пределах допустимого разряда. Разрядная емкость уменьшается с увеличением разрядного тока и понижением температуры (рис. 63.16 и 63.17).

Номинальной емкостью для стартерных свинцовых аккумуляторных батарей, гарантируемой заводом-изготовителем, по ГОСТ 959.0—84Е является емкость 20-часового режима разряда C_{20}. Разряд батарей при испытании на номинальную емкость проводят непрерывно током, численное значение которого равно $0{,}05C_{20}$. Температура электролита при этом должна быть 18—27 °С. Разряд прекращают при напряжении на одном аккумуляторе 1,75 В. Емкость батарей, определяемая при 20-часовом режиме разряда не позже четвертого цикла, должна быть не менее 95 %, а необслуживаемых — 100 % номинального значения.

Способность аккумуляторной батареи обеспечить необходимый минимум электрической нагрузки на автомобиле в случае выхода из строя генератора оценивают показателем, называемым «резервной емкостью». Минимум электрической нагрузки складывается из токов, потребляемых системами зажигания и освещения, стеклоочистителем и контрольно-измерительными приборами в режиме движения «зима, ночь», и равняется приблизительно 25 А. Резервная емкость определяется временем разряда в минутах полностью заряженной батареи при 27 ± 5 °С током 25 ± 0,25 А до конечного напряжения на аккумуляторе, равного 1,75 В.

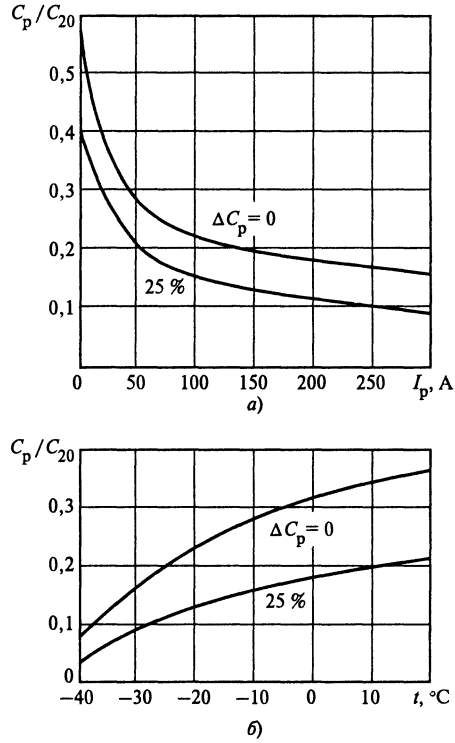


Рис. 63.16. Зависимость разрядной емкости аккумуляторной батареи 6СТ-66А:

а — от тока при температуре –30 °С; *б* — от температуры при токе разряда 300 А

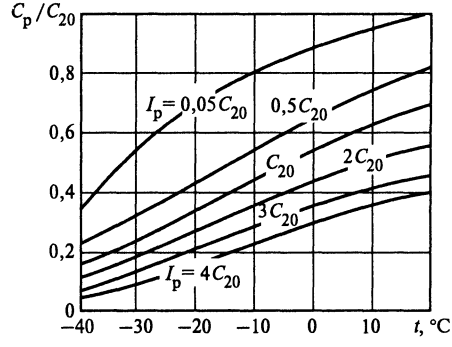


Рис. 63.17. Зависимость разрядной емкости аккумуляторной батареи 6СТ-110А от разрядного тока и температуры при $\Delta C_p = 0$

Стартерный режим разряда оценивают по току холодной прокрутки, который представляет собой максимальный разрядный ток, получаемый от батареи при температуре –18 или –29 °С в течение 30 с при сохранении напряжения не менее 1,2 В на каждом аккумуляторе.

Саморазряд. Заряженные и исправные аккумуляторные батареи теряют емкость при длительном хранении вследствие саморазряда. Саморазряд заряженной батареи, кроме необслуживаемой, после бездействия в течение 1—4 сут при температуре окружающей среды 20 ± 5 °С должен быть не выше 10 %, а после бездействия в течение 28 сут — 20 % номинальной емкости. Саморазряд необслуживаемой батареи после бездействия в течение 90 сут должен быть не выше 10 %, а после бездействия в течение года — 40 % номинальной емкости. Ускоренный саморазряд происходит при попадании на наружную поверхность батареи воды, электролита или других токопроводящих жидкостей.

Вольт-амперные характеристики. Рабочие характеристики стартерного электродвигателя строят для определенной вольт-амперной характеристики аккумуляторной батареи. Уравнение вольт-амперной характеристики $U_р = U_{п.р} - R_б I_р$, где $U_{п.р}$ — начальное разрядное напряжение, В; $R_б$ — расчетное внутреннее сопротивление батареи, Ом. Экспериментальные вольт-амперные характеристики аккумуляторных батарей для третьей попытки пуска при различных температурах электролита t и степени разряженности $\Delta C_р$ приведены на рис. 63.18.

В режиме короткого замыкания, когда напряжение на зажимах батареи $U_р = 0$, ток, А,

$$I_к = U_{п.р} / R_б = I_+ n_+,$$

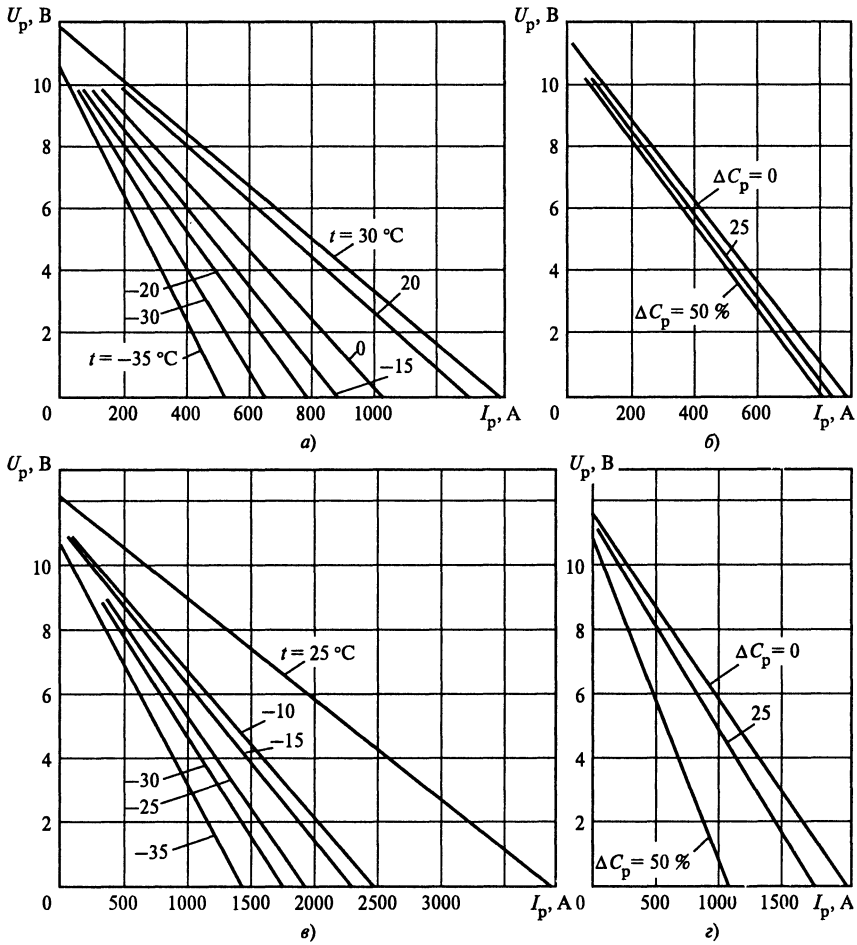


Рис. 63.18. Вольт-амперные характеристики аккумуляторных батарей в различных условиях разряда: *а* — 6СТ-55ЭМ, $\Delta C_р$ = 25 %; *б* — 6СТ-55ЭМ, t = –20 °С; *в* — 6СТ-190ТР, $\Delta C_р$ = 25 %; *г* — 6СТ-190ТР, t = –25 °С

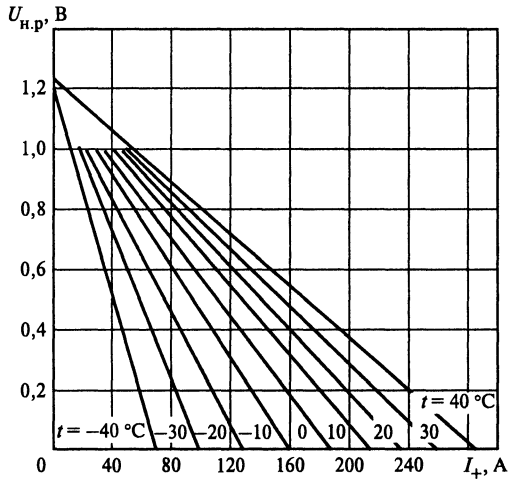


Рис. 63.19. Единые расчетные вольт-амперные характеристики аккумуляторных батарей для $\Delta C_р$ = 0 и температуре электролита от +40 до –40 °С

где I_+ — условный ток короткого замыкания, приходящий на один положительный электрод, А; n_+ — количество положительных электродов в аккумуляторе.

На рис. 63.19 приведены единые расчетные вольт-амперные характеристики одного аккумулятора при $n_+ = 1$; $\Delta C_р = 0$ и температуре электролита от +40 до –40 °С. Переход к конкретному типу аккумуляторной батареи осуществляется путем умножения значений I_+ и $U_{н.р}$ на осях единой характеристики на соответствующее число аккумуляторов в батарее и число положительных пластин n_+.

ЭЛЕКТРОСТАРТЕРЫ

Классификация. Электростартеры отличаются по способу возбуждения электродвигателя, конструкции коллектора, типу механизма привода, степени защиты от проникновения посторонних тел и воды, а также по способу крепления на двигателе.

По типу и принципу работы механизма привода можно выделить следующие основные группы стартеров: с принудительным механическим или электромеханическим вводом шестерни в зацепление и выводом из зацепления с зубчатым венцом маховика; с принудительным электромеханическим вводом шестерни в зацепление с зубчатым венцом маховика и ее автоматическим выводом из зацепления после пуска двигателя (комбинированный привод).

На автомобилях используют электростартеры с принудительным электромеханическим включением шестерни привода (рис. 63.20—63.24). Для предотвращения разрушения якоря под действием центробежных сил после пуска двигателя в электростартеры устанавливают роликовые, храповичные и храповично-фрикционные муфты свободного хода.

Стартеры имеют буквенно-цифровое обозначение (СТ230-Л, СТ402-А и др.) или обозначения по нормали ОН 025.215—69 (631.3708, 25.3708 и др.)

Рабочие характеристики. Свойства электростартеров оценивают по рабочим и механическим характеристикам. Рабочие характеристики (рис. 63.25) представляют собой совокупность зависимостей напряжения на зажимах стартера $U_{ст}$, полезной мощности P_2, частоты вращения $n_я$, и вращающего момента M_2 от тока якоря $I_я$. Они зависят от способа возбуждения и изменяются с изменением номинальной емкости и технического состояния аккумуляторной батареи.

Под номинальной мощностью электростартера понимают наибольшую полезную мощность в кратковременном режиме работы на первой попытке пуска двигателя при питании от аккумуляторной батареи максимально допустимой емкости, указанной для данного стартера в его технических условиях, степени заряженности батареи 100 %, температуре электролита +20 °С, отсутствии падения напряжения в сети.

Параметры электростартеров в режимах номинальной мощности, холостого хода и полного торможения приведены в табл. 63.8. Применение электростартеров на автомобилях указано в табл. 63.9.

Основные требования. Электростартеры изготавливают в соответствии с требованиями ОСТ 37.003.084—88 «Стартеры электрические автотракторные. Общие технические условия», ГОСТ 3940—84 и конструкторской документации на конкретные типы электростартеров.

Режим работы электростартеров по ОСТ 37.003.084—88 кратковременный с длительностью включения до 10 с при 20 °С. При отрицательных температурах допускается длительность работы стартеров до 15 с для карбюраторных двигателей и до 20 с для дизелей.

Тяговое реле современного стартера должно обеспечивать вход шестерни в зацепление и включение стартера при снижении напряжения до 8 В для стартеров напряжением 12 В и до 16 В для стартеров напряжением 24 В при температуре окружающей среды 20 ± 5 °С. Контакты реле стартера должны оставаться замкнутыми при снижении напряжения на стартере до 4 и 8 В при номинальных напряжениях соответственно 12 и 24 В. Автомобильные электростартеры имеют степень защиты не ниже IP44 по ГОСТ 14254—80 (кроме полости привода).

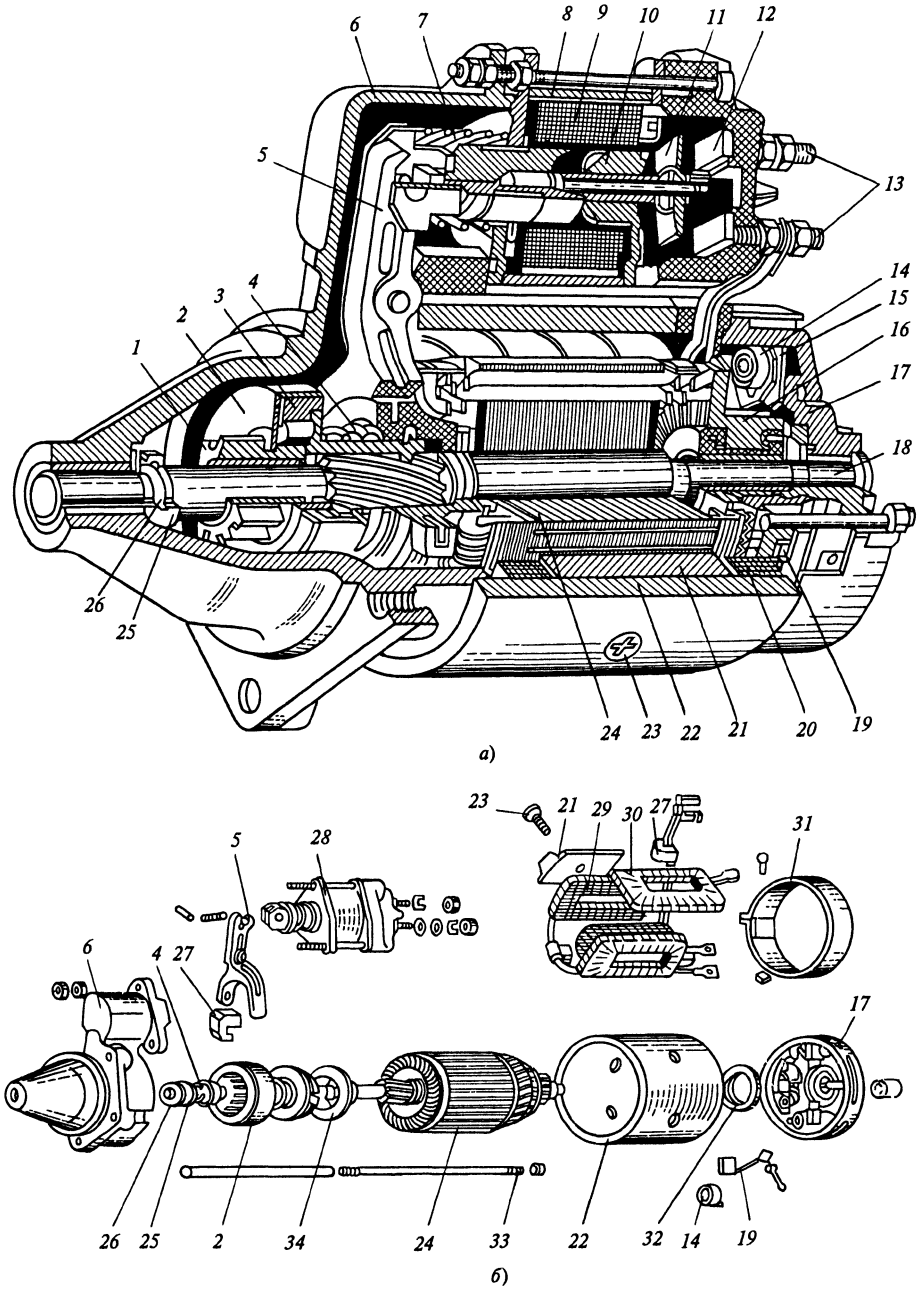


Рис. 63.20. Электростартер типа СТ221:

а — общий вид; *б* — детали стартера; *1* — шестерня привода; *2* — муфта свободного хода; *3* — ведущая обойма муфты свободного хода; *4* — буферная пружина; *5* — рычаг включения привода; *6* — крышка со стороны привода; *7* — возвратная пружина; *8* — корпус тягового реле, *9* — обмотка тягового реле; *10* — сердечник тягового реле; *11* — подвижная контактная пластина; *12* — неподвижный контакт; *13* — контактные болты; *14* — щеточная пружина; *15* — щеткодержатель; *16* — коллектор; *17* — крышка со стороны коллектора; *18* — вал якоря с винтовыми шлицами; *19* — щетка; *20* — обмотка возбуждения; *21* — полюс; *22* —корпус стартера; *23* — полюсный винт; *24* — якорь электродвигателя; *25* — упорное кольцо; *26* — регулировочная шайба; *27* — резиновые заглушки; *28* — тяговое реле; *29* — последовательная обмотка возбуждения; *30* — параллельная обмотка возбуждения; *31* — защитная лента; *32* — тормозной диск; *33* — стяжная шпилька; *34* — ограничитель хода шестерни

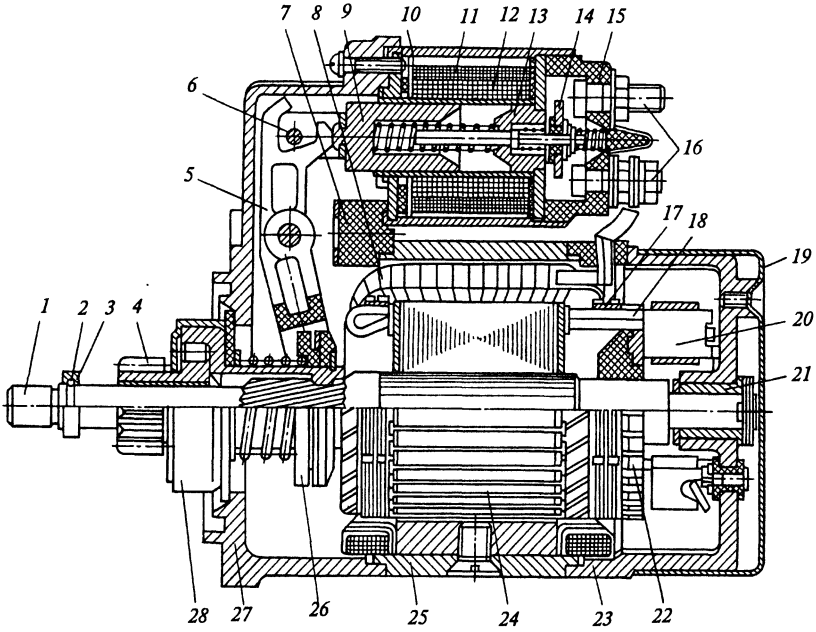


Рис. 63.21. Электростартер типа 29.3708 с одной опорой в крышке со стороны коллектора:
1 — вал якоря; *2* — замковое кольцо; *3* — упорное кольцо; *4* — шестерня привода; *5* — рычаг привода; *6* — тяговое реле; *7* — уплотнительная заглушка; *8* — обмотка возбуждения; *9* — якорь тягового реле; *10* — корпус тягового реле; *11* — удерживающая обмотка; *12* — втягивающая обмотка; *13* — сердечник тягового реле; *14* — подвижный контакт; *15* — крышка тягового реле; *16* — контактные болты; *17* — бандаж лобовой части обмотки якоря; *18* — обмотка якоря; *19* — защитный кожух; *20* — щетка; *21* — вкладыш подшипника; *22* — торцовый коллектор; *23* — крышка со стороны коллектора; *24* — якорь электродвигателя; *25* — корпус; *26* — поводковая муфта; *27* — крышка со стороны привода; *28* — роликовая муфта свободного хода

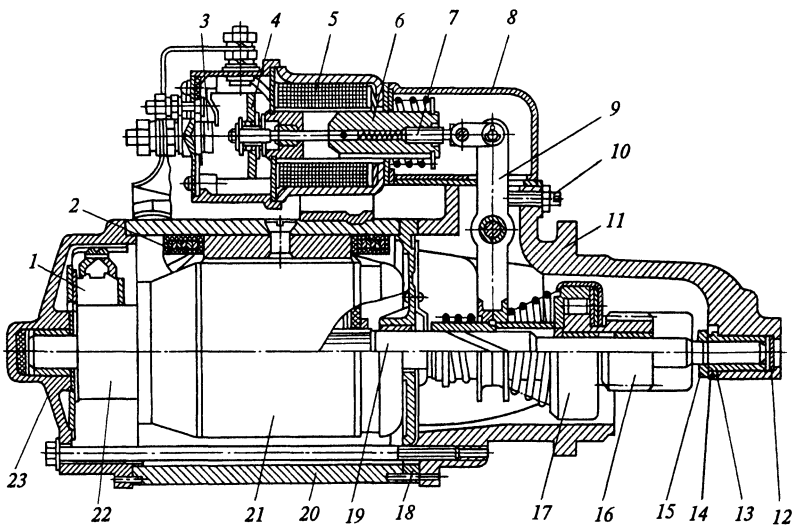


Рис. 63.22. Электростартер типа СТ130-А3 с цилиндрическим коллектором и роликовой муфтой свободного хода:
1 — щетка; *2* — обмотка возбуждения; *3* — неподвижный контакт тягового реле; *4* — подвижный контакт тягового реле; *5* — обмотка тягового реле; *6* — якорь тягового реле; *7* — регулировочный винт; *8* — защитный кожух рычага; *9* — рычаг; *10* — винт регулировки хода шестерни; *11* — крышка со стороны привода; *12* — фильц; *13* — шайба; *14* — замковое кольцо; *15* — упорное кольцо; *16* — шестерня привода; *17* — муфта свободного хода; *18* — промежуточная опора; *19* — вал якоря; *20* — корпус; *21* — якорь; *22* — коллектор; *23* — крышка со стороны коллектора

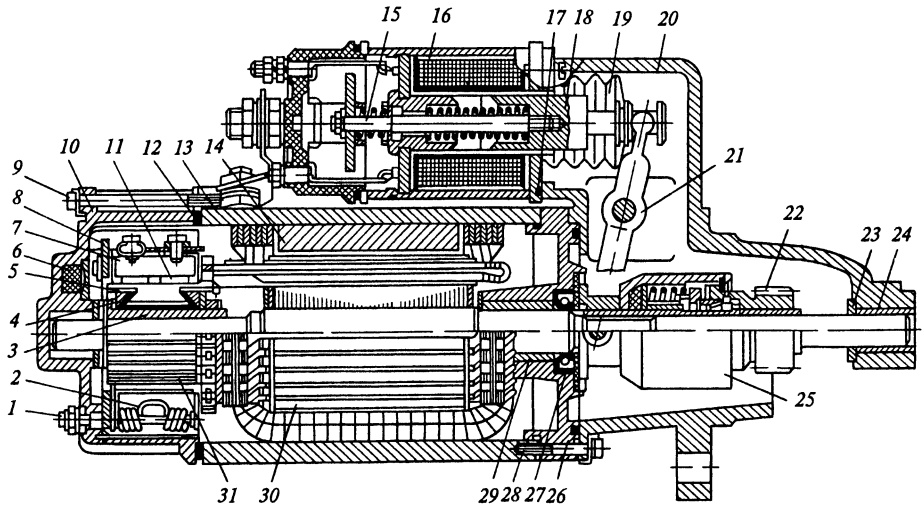


Рис. 63.23. Электростартер типа СТ142 с храповичной муфтой свободного хода:

1 — болт траверсы, *2* — пружина щеткодержателя, *3* — металлическая втулка коллектора, *4* — нажимное металлическое кольцо, *5* — изоляционный конус коллектора, *6* — войлочный фильц, *7* — радиальный щеткодержатель, *8* — траверса, *9* — болт крепления коллекторной крышки, *10* — коллекторная крышка, *11* — щетка, *12*, *17* — резиновые уплотнительные кольца, *13* — корпус, *14* — полюс, *15* — шток тягового реле, *16* — тяговое реле, *18* — якорь тягового реле, *19* — сильфон, *20* — крышка со стороны привода, *21* — рычаг включения привода, *22* — шестерня привода, *23* — упорная шайба, *24* — вкладыш подшипника, *25* — храповая муфта свободного хода, *26* — промежуточная опора, *27* — манжеты, *28* — болт крепления крышки со стороны привода, *29* — вкладыш промежуточного подшипника, *30* — якорь электродвигателя, *31* — коллектор

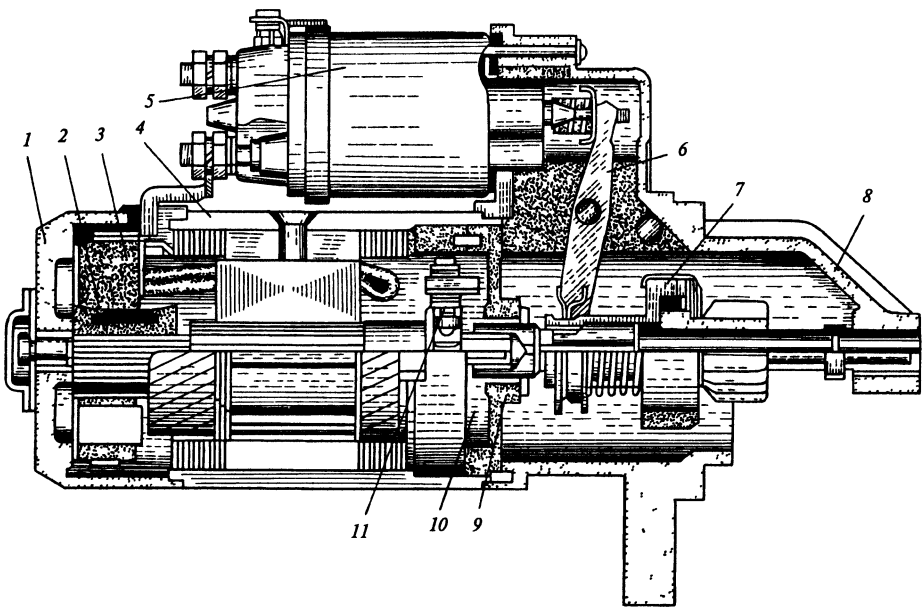


Рис. 63.24. Электростартер с планетарным редуктором:

1 — крышка со стороны коллектора, *2* — коллектор, *3* — щеткодержатель, *4* — корпус стартера, *5* — тяговое реле, *6* — рычаг включения привода, *7* — муфта свободного хода, *8* — крышка со стороны привода, *9* — корпус редуктора с солнечной шестерней, *10* — водило, *11* — шестерни-сателлиты

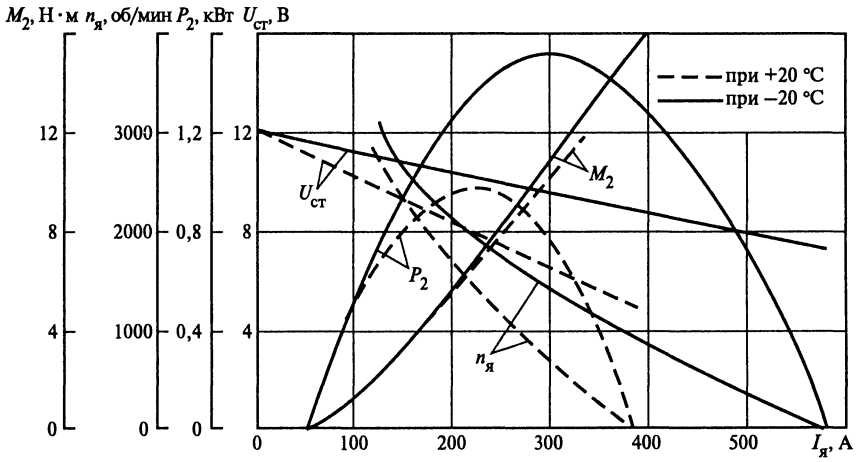


Рис. 63.25. Рабочие характеристики электростартера типа СТ230-А1

Рабочий цикл электростартера (на стенде) должен быть не более 15 с при температуре окружающей среды 20 ± 5 °С. Допускается не более трех пусковых циклов подряд с перерывом между ними не менее 30 с. После охлаждения стартера до температуры окружающей среды допускается еще один пусковой цикл.

КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОСТАРТЕРОВ

Якорь. Якорь изготовляется в виде шихтованного магнитопровода, который напрессовывают на вал, вращающийся в двух или трех опорах. В пазы якоря укладывают одно- или двухвитковые секции простой волновой обмотки. Двухвитковые секции применяют в электростартерах небольшой мощности. Проводники одновитковых секций изолируют друг от друга и от пакета якоря электроизоляционным картоном толщиной 0,2—0,4 мм. Обмотка якоря стартера с редуктором пропитывается компаундом, уменьшающим вероятность его разноса.

Корпус, полюса, обмотки возбуждения. Корпуса электростартеров изготовляют из трубы или стальной полосы с последующей сваркой в месте стыка. К корпусу винтами крепят полюса. Автомобильные электростартеры с электромагнитным возбуждением имеют четыре полюса, а с возбуждением от постоянных магнитов — более четырех. Обмотки возбуждения устанавливают на отдельных полюсах, поэтому число обмоток равно числу полюсов. Обмотки соединяют как последовательно, так и параллельно (рис. 63.26). Постоянные магниты изготавливают из феррита стронция и крепят к корпусу специальными пружинами или приклеивают.

Щеточно-коллекторный узел. В электростартерах применяют сборные цилиндрические коллекторы на металлической втулке, цилиндрические и торцовые коллекторы с пластмассовым корпусом. Сборный коллектор набирают из медных пластин (ламелей) и изолирующих пластин из миканита, слюдинита или слюдопласта толщиной 0,4—0,9 мм. В коллекторах с пластмассовым корпусом пластмасса (обычно АГ-4С) является формирующим элементом коллектора, изолирует пластины от вала и воспринимает нагрузки. Торцовые коллекторы по сравнению с цилиндрическими имеют меньшие размеры. Рабочая поверхность торцового коллектора находится в плоскости, перпендикулярной оси вращения якоря.

Щетки (рис. 63.27) устанавливают в коробчатых щеткодержателях, закрепленных на крышке со стороны коллектора. В мощных стартерах в каждом щеткодержателе устанавливают по две щетки. Радиальные щеткодержатели выполнены в виде тонкостенной (0,6—0,8 мм) стальной обоймы коробчатого типа. Щетки должны свободно перемещаться в обоймах без значительных боковых колебаний.

Крышки. Со стороны коллектора крышки изготовляют методом литья из чугуна, стали, алюминиевого или цинкового сплава, а также штампуют из стали. Крышки могут иметь дисковую или колоколообразную форму. Во втором случае предусматриваются окна для доступа к щеткам.

Крышки со стороны привода изготовляют методом литья из алюминиевого сплава и чугуна. Конструкция крышки зависит от материала, из которого она изготовлена, типа механизма привода, способа крепления стартера на двигателе и тягового реле на стартере.

Механизм привода. Наибольшее распространение получили приводные механизмы с роликовыми муфтами свободного хода. Роликовые муфты

Таблица 63.8

Тип стартера	Номинальная емкость аккумуляторной батареи, А · ч	Режим номинальной мощности				Режим холостого хода			Режим полного торможения		
		Мощность, кВт	Крутящий момент на валу стартера, Н · м	Частота вращения вала стартера, об/мин	Ток, А	Напряжение, В	Ток, А	Частота вращения вала стартера, об/мин, не менее*	Крутящий момент на валу стартера, Н · м	Ток, А	Напряжение, В, не более
Электростартеры на напряжение 12 В											
СТ368	55	0,87	4,3	1980	180	12	70	5000	6,7	260	7
26.3708; 40.3708	55	1,13	6,1	1800	240	12	70	5000	6,7	260	7
СТ4-А1	55	0,59	3,3	1745	140	12	55	4000	9	295	8,5
СТ221	55	1,3	8	1570	270	11,5	35	5000	14	500	6,5
29.3708; 35.3708	55	1,3	7,6	1650	280	11,5	75	5000	14	500	7
42.3708	75	1,65	9,4	1700	315	12	75	5000	16	520	7
421.3708	55	1,65	9,4	1700	315	12	75	5000	16	520	7
СТ2-А	90	1,8	12,5	1400	370	12	80	3400	22,5	700	8
СТ130-А3	90	1,8	12,5	1400	370	12	90	3400	22,5	700	8
СТ230-А1; СТ230-Б1; СТ230-Б3	75	1,5	10,8	1350	295	12	80	4000	22,4	550	7
СТ230-И; СТ230-К1	90	1,6	12,5	1250	320	12	85	4000	22,4	550	7
СТ230-Д	90	1,6	12,5	1250	320	12	75	4000	22,4	550	7
СТ230-Е; СТ230-Л	75	1,52	10,8	1370	295	12	75	4000	22,4	550	7
7102.3708	36	0,9	—	—	—	12	40	7000	7,7	340	6
142Е.3708	215	3,5	24	1400	800	12	100	—	15	550	5
1111.3708	36	1,0	4,1	2000	220	12	35	—	7,2	330	6,1
631.3708	55	1,1	5,0	1700	250	12	35	—	6,5	330	7
425.3708 426.3708	55	1,37	7,0	1700	315	12	75	—	9,0	440	8,9
51.3708	55	1,65	8,0	1800	315	12	70	—	8,4	380	7
Электростартеры на напряжение 24 В											
СТ402; СТ402-А; СТ402-Б	75	1,21	10,2	1160	135	24	35	4000	23	265	19,5
СТ142-Б1	190	8,3	53,5	1510	835	24	130	7000	50	800	8
30.3708	110	7,3	53,1	1340	830	24	130	7000	50	800	8
25.3708	182	8,0	68,3	1140	800	24	110	5000	60	825	7
25.3708-01	182	8,2	62,2	1280	900	24	110	5000	60	900	7
16.3708	190	12	127	920	1600	24	160	2600	65	950	7,5
5652.3708	190	8,2	51	1500	780	24	90	4300	—	900	11,8
5662.3708	190	8,2	51	1500	780	24	90	4300	—	900	11,8
36.3708; 361.3708; 321.3708; 322.3708	190	8,2	51	1500	780	24	90	4300	—	900	11,8
3002.3708	110	7,7	5,5	1400	810	24	100	—	6,0	960	10

Таблица 63.9

Тип стартера	Год начала выпуска	Масса, кг	Применение
СТ368	1976	5,2	ЗАЗ 968М; ЛуАЗ 969МБ
26.3708	1986	4,35	ЗАЗ 1102
40.3708	1986	4,35	ЗАЗ 968М; ЛуАЗ 969М; УАЗ 3151
СТ4-А1	1985	6,7	«Москвич 407, 408, 2138»
СТ221	1970	8,5	ВАЗ 2101, 2102, 2103, 2105, 2107, 2121
29.3708	1984	6,0	ВАЗ 2108, 2109
35.3708	1986	7,5	ВАЗ 2104, 2102, 2105, 2106, 2107, 2121; АЗЛК 2141
42.3708	1988	7,2	УАЗ 3151-01, 31512-01, 3303-01, 3741-01
421.3708	1988	7,2	АЗЛК 21412; ИЖ 2125, 2715
СТ2-А	1983	12,4	ЗИЛ 131, «Урал 375»
СТ130-А3	1980	10,5	ЗИЛ 431410, 131А
СТ230-А1	1984	11,3	ГАЗ 53-12, 66-11; ПАЗ 672М, 3201; КАвЗ 3270, ГАЗ 71, 73
СТ230-Б1	1984	10,2	ГАЗ 24-01, 3102
СТ230-Б3	1984	10,2	УАЗ 451, 469; РАФ 977
СТ230-И	1976	10,1	ЗИЛ 130К, 157КД
СТ230-К1	1985	9,7	ЗИЛ 431410; ЛиАЗ 677М; ЛАЗ 695Н
СТ230-Д	1976	9,2	ЗИЛ 157КД, 164
СТ230-Е	1977	9,2	ГАЗ 52
СТ230-Л	1977	9,2	УАЗ 69
СТ402	1976	12,0	ГАЗ 3402, 4905
СТ402-А	1979	12,0	ГАЗ 41
СТ402-Б	1980	12,0	ГАЗ 49Б, 4908
СТ142-Б1	1979	25,8	КамАЗ; «Урал» (дизельные), КАЗ 4540; ЗИЛ 133ГЯ, 4331
30.3708	1987	22,0	ГАЗ 4301, 4509
25.3708	1988	31,5	МАЗ; КрАЗ; БелАЗ
25.3708-01	1988	29,0	МАЗ; КрАЗ
16.3708	1979	50,0	БелАЗ 75402, 7548
5652.3708	1998	—	КамАЗ 740 и его модификации
5662.3708	1998	—	КамАЗ 7406, 7482
36.3708	1998	—	Дизели 4Ч10,5
361.3708	1998	—	Дизели 6Ч12/14
321.3708	1998	—	Дизели Д-440-11
322.3708	1998	—	Дизели СМД-17Н
7102.3708	2000	4,0	«Ока»
142Е.3708	2000	18,0	Двигатели Д224, Д245
1111.3708	2000	4,3	ВАЗ 1111, «Ока»
631.3708	2000	4,3	«Дачия 1310»
425.3708	2000	6,5	ВАЗ 2101, 2107
426.3708	2000	6,0	ВАЗ 2108, 2109
51.3708	2000	4,3	ГАЗ 3101, 3110
3002.3708	2000	23,5	

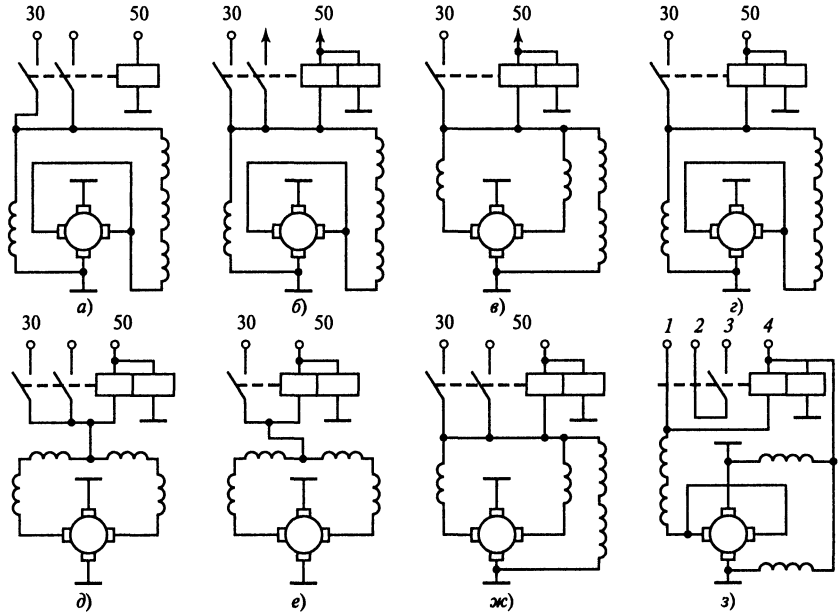


Рис. 63.26. Электрические схемы электростартеров типов:

а — СТ368; *б* — 40.3708; 26.3708; СТ4-А1; *в* — СТ221; *г* — 29.3708; 35.3708; *д* — 42.3708; 421.3708; СТ230-Б3; СТ230-К1; *е* — СТ230-А1; СТ230-Б1; СТ230-И; СТ402; СТ402-А; СТ402-Б; 25.3708, 25.3708-01; СТ142-Б; 30.3708; *ж* — СТ2-А, СТ130-А3; (30, 50 — названия выводов, характерные для электрооборудования семейства ВАЗ: 30 — к положительному выводу аккумуляторной батареи; 50 — к выключателю зажигания или контактам дополнительного реле); *з* — 16.3708 (*1* — к силовым контактам контактора КТ130; *2* — к положительному выводу аккумуляторной батареи; *3* — к обмотке контактора КТ130; *4* — к контактам контактора КТ127)

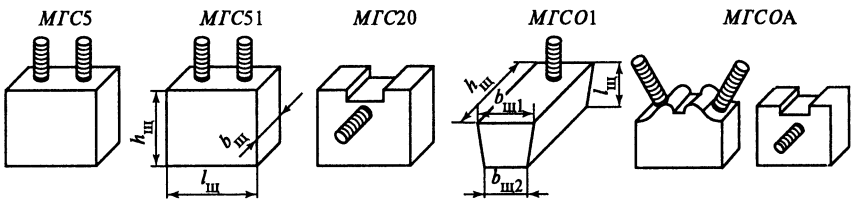


Рис. 63.27. Щетки электростартеров

(см. рис. 63.20—63.22) технологичны в изготовлении, способны при небольших размерах передавать значительные вращающие моменты, бесшумны в работе, малочувствительны к загрязнению, не требуют ухода и регулирования в эксплуатации.

Храповичная муфта свободного хода (см. рис. 63.23) полностью разъединяет валы стартера и двигателя внутреннего сгорания при значительно меньших нагрузках на силовые элементы муфты. Преимуществами храповичной муфты по сравнению с роликовой являются высокая прочность, ремонтопригодность и возможность передачи большего вращающего момента при небольших размерах.

В стартерах могут использоваться цилиндрические и планетарные редукторы.

Тяговое реле. Тяговое реле может иметь одну (СТ368) или две обмотки, намотанные на каркас или латунную втулку. В двухобмоточном реле удерживающая обмотка рассчитана только на удержание якоря реле в притянутом к сердечнику состоянии. Обмотка выполнена из провода меньшего сечения по сравнению с втягивающей обмоткой. Втягивающая обмотка, действуя согласно с удерживающей, создает достаточную притягивающую силу в момент, когда зазор между якорем и сердечником электромагнита максимален. Подвижные контакты тягового реле крепятся к якорю.

Крепление на двигателе внутреннего сгорания, исполнение. Электростартеры обычно имеют торцовое фланцевое крепление. Мощные стартеры устанавливают в углублениях специальных приливов двигателя. К поверхности прилива двигателя корпус стартера прижимают стальными лентами или литыми скобами. От поворота стартер фиксируют шпонками или штифтами.

Шестерня привода стартера может быть установлена между опорами под крышкой или консольно за ее пределами (стартер типа 16.3708).

СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАРТЕРАМИ

Схемы внутренних соединений электростартеров с последовательным и смешанным возбуждением, а также с возбуждением от постоянных магнитов с использованием одно- и двухобмоточных тяговых реле приведены на рис. 63.26. Отличием стартеров с постоянными магнитами является отсутствие обмоток возбуждения. Схемы управления электростартерами представлены на рис. 63.28.

В стартерах с двухобмоточными реле (рис. 63.28, *б* и *в*) при замыкании контактов *S1* выключателя зажигания *2* ток от батареи проходит через втягивающую и удерживающую обмотки. При замыкании контактов реле *K1* втягивающая обмотка замыкается накоротко. Обмотки тягового реле *K1* могут подключаться к источнику тока через контакты вспомогательного реле *K2* (рис. 63.18, *в*, *г* и *д*). Дополнительный контакт в тяговом или вспомогательном реле замыкает накоротко добавочный резистор катушки зажигания.

Надежность системы пуска и срок службы стартера можно повысить за счет автоматизации отключения стартера после пуска двигателя и блокировки его включения при работе двигателя.

Электронное устройство типа 2612.3747 (рис. 63.29) автоматического отключения и блокировки включения стартера содержит блок управления и датчик частоты вращения коленчатого вала. Блок управления настроен на частоту вращения, при которой стартер должен отключаться. Частота эта должна быть больше максимально возможной пусковой частоты вращения коленчатого вала электростартера и меньше минимальной частоты вращения коленчатого вала в режиме прогрева двигателя внутреннего сгорания после пуска.

При пуске двигателя выключатель приборов и стартера переводится в положение *I*, транзистор *VT5* открывается (первое устойчивое состояние триггера на транзисторах *VT4* и *VT5*) и подключает к аккумуляторной батарее вспомогательное реле, которое включает стартер. При вращении коленчатого вала двигателя через вход *4* штекерного разъема на электронное устройство подается синусоидальное напряжение от фазы генератора, которое транзистором *VT1* преобразуется в прямоугольные импульсы нормированной амплитуды. С помощью резисторов *R1*, *R2*, *R3* и конденсатора *C1* ограничивается входное напряжение и отфильтровываются импульсные помехи во входных цепях.

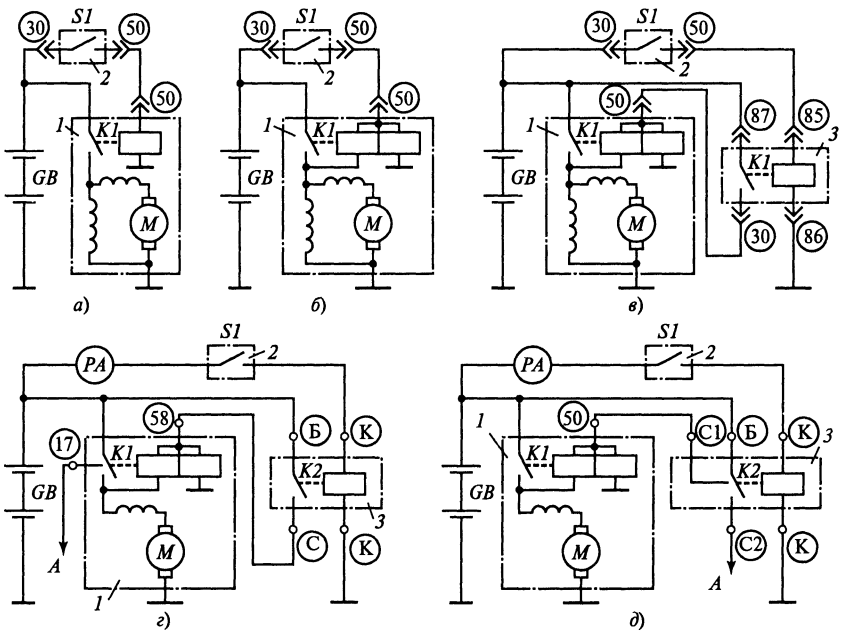


Рис. 63.28. Схемы управления электростартерами типов:

а — СТ221 с однообмоточным реле; *б* — СТ221 с двухобмоточным реле; 29.3708 на первых моделях ВАЗ 2108; *в* — 29.3708 на автомобилях ВАЗ 2108, 2109; *г* — СТ130-А3; *д* — СТ230-Б1; *1* — электростартер; *2* — выключатель зажигания и стартера; *3* — дополнительное реле; *А* — к выводу добавочного резистора; цифры и буквы в кружках — обозначения выводов элементов системы пуска

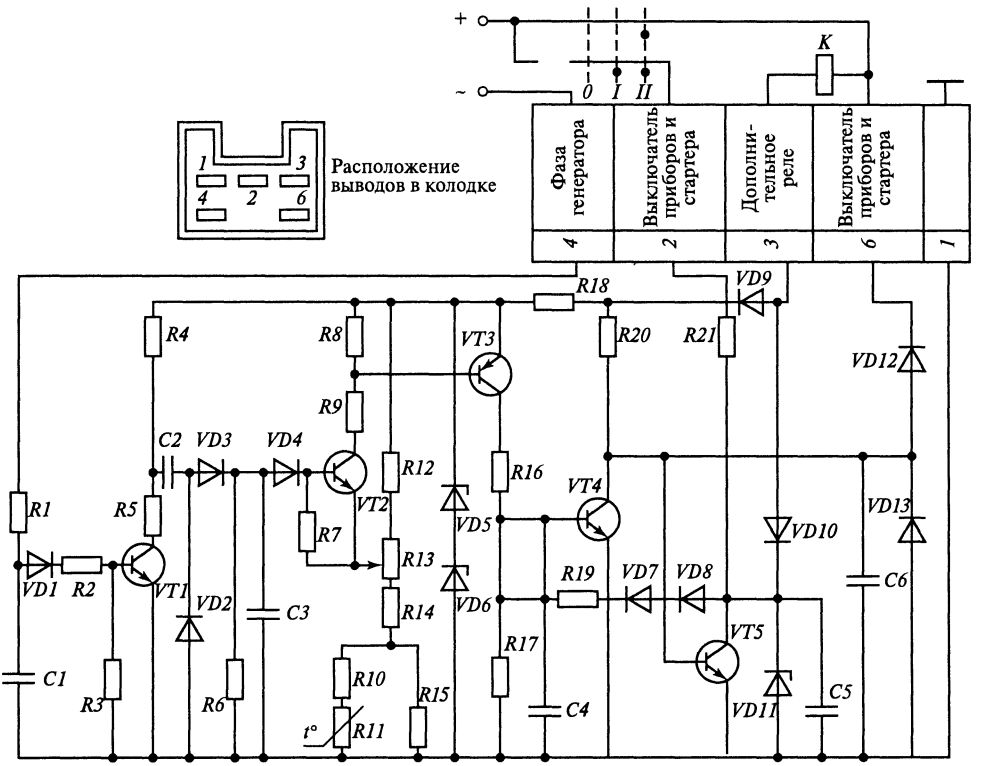


Рис. 63.29. Электронное устройство типа 2612.3747 для автоматического отключения и блокировки стартера типа СТ142-Б:

VT1, *VT2*, *VT4*, *VT5* — транзисторы КТ630А, *VT3* — транзистор КТ3107Б, *VD1*, *VD2*, *VD3*, *VD4*, *VD7*, *VD8*, *VD9*, *VD12*, *VD13* — диоды КД102А, *VD10* — диод КД209А, *VD5*, *VD6* — стабилитроны ДВ14А, *VD*11 — стабилитрон Д816Д, конденсаторы *C1* — 0,05 мкФ, *C2* — 0,22 мкФ, *C3* — 0,47 мкФ, *C4* — 0,05 мкФ, *C5* — 0,1 мкФ, *C6* — 0,05 мкФ, резисторы *R1*, *R2* — 3 кОм, *R3*, *R8* — 10 кОм, *R4* — 5,6 кОм, *R5* — 100 Ом, *R6* — 39,2 кОм, *R7* — 22 кОм, *R9*, *R11*, *R15*, *R16*, *R19* — 2,2 кОм, *R10* — 470 Ом, *R12* — 33 кОм, *R13* — 1 кОм, *R14* — 470 Ом, *R17* — 4,7 кОм, *R18* — 680 Ом, *R20* — 1 кОм, *R21* — 8,2 кОм

Прямоугольные импульсы заряжают конденсатор *C3* преобразователя частота—напряжение Чем больше частота входного сигнала (частота вращения коленчатого вала двигателя), тем меньше промежутки времени между импульсами и разряд конденсатора *C2* При определенной частоте вращения коленчатого вала напряжение на конденсаторе *C3* превышает опорное напряжение на резисторах *R10—R15*, транзисторы *VT2* и *VT3* открываются и триггер переводится во второе устойчивое состояние, когда транзистор *VT4* открыт, а транзистор *VT5* закрыт Вспомогательное реле обесточивается и отключает стартер Диоды *VD10*, *VD13* и конденсаторы *C5*, *C6* обеспечивают надежное закрытие транзисторов *VT5* и *VT4*

Терморезистор *R11* изменяет частоту вращения вала двигателя внутреннего сгорания, при которой стартер должен отключаться, в соответствии с изменением температуры окружающего воздуха

63.3. СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ

НАЗНАЧЕНИЕ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Система зажигания предназначена для воспламенения рабочей смеси в цилиндрах бензиновых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) Основной принцип действия системы — накопление энергии в магнитном поле катушки зажигания с последующим мгновенным выделением ее в искровом промежутке свечи в нужный момент такта сжатия в рабочем цилиндре и в соответствии с заданным порядком работы цилиндров двигателя Процесс сгорания рабочей смеси разделяется на три фазы начальную, в которой формируется пламя, возникающее от искрового разряда в свече, основную, в которой пламя распространяется на большей части камеры сгорания и конечную, в которой пламя догорает у стенок камеры, что требует времени Обеспечение наиболее полного сгорания рабочей смеси достигается своевременной подачей сигнала

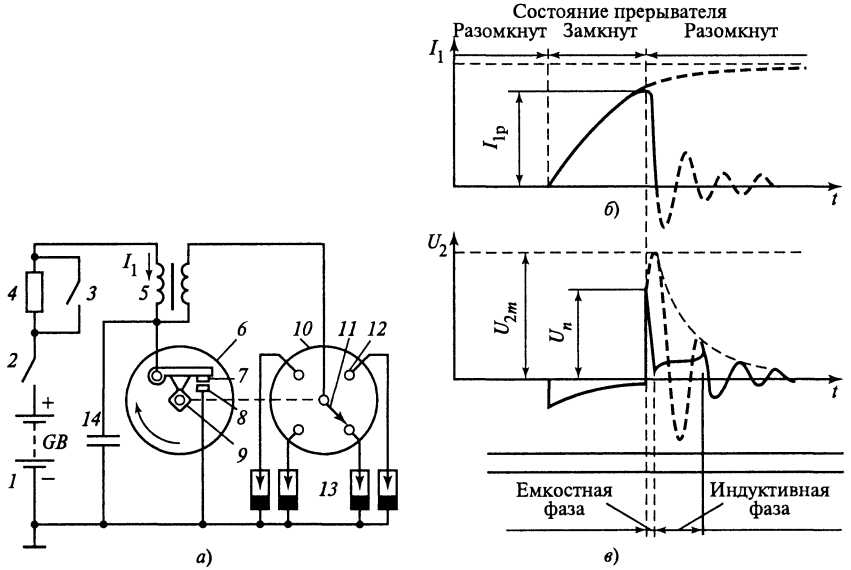


Рис. 63.30. Принципиальная схема классической контактной системы зажигания (*а*) и временны́е диаграммы тока в первичной цепи (*б*) и вторичного напряжения (*в*):

1 — аккумуляторная батарея; *2* — выключатель зажигания; *3* — контакты реле стартера; *4* — добавочный резистор; *5* — катушка зажигания; *6* — прерыватель; *7*, *8* — подвижный и неподвижный контакты прерывателя; *9* — кулачок; *10* — распределитель; *11* — бегунок; *12* — неподвижный электрод; *13* — свеча; *14* — конденсатор

на воспламенение, т.е. оптимальным углом опережения зажигания в зависимости от режима работы двигателя. Угол опережения зажигания определяется по углу поворота коленчатого вала двигателя от момента возникновения искры до положения поршня в верхней мертвой точке.

На начальную фазу сгорания влияют энергия и длительность искрового разряда в свече. В современных системах энергия разряда достигает 50 МДж, а его длительность 1—2,5 мс.

Принцип работы системы зажигания поясняет рис. 63.30, *а*. Выключатель зажигания *2* включает систему в сеть питания. В некоторых системах роль выключателя *2* играют контакты реле, управляемого выключателем зажигания. При вращении вала двигателя происходит замыкание контактов прерывателя *6* и ток I_1 начинает увеличиваться в первичной цепи катушки *5* зажигания по экспоненте, как это показано на рис. 63.30, *б*.

В момент, необходимый для подачи искрового импульса на зажигание, разрываются контакты прерывателя *6*, после чего возникает колебательный процесс, связанный с обменом энергией между магнитным полем катушки и электрическим полем конденсатора *14* и распределенной емкости во вторичной цепи. Амплитуда колебаний напряжения U_{2m}, приложенного к электродам свечи, убывает по экспоненте, как показано на рис. 63.30, *в* пунктиром. Однако интерес представляет лишь первая полуволна напряжения, так как, если ее максимальное значение U_{2m} превышает напряжение пробоя искрового промежутка $U_п$, возникает необходимая для зажигания искра. Значение U_{2m} зависит от коэффициента трансформации катушки зажигания $k_т = w_2 / w_1$ (w_2 и w_1 — соответственно число витков вторичной и первичной обмотки катушки), тока первичной обмотки в момент разрыва тока I_{1p}, а также индуктивности L_1 и емкостей C_1 первичной и C_2 вторичной цепей:

$$U_{2m} = I_{1p} k_т k_n \sqrt{L_1 / (C_1 + C_2 k_т^2)}.$$

Коэффициент k_n учитывает потерю энергии в активных сопротивлениях первичной R_1 и вторичной R_2 цепей, сопротивлении нагара $R_ш$, шунтирующего искровой промежуток, а также в магнитопроводе катушки при его перемагничивании. Обычно k_n лежит в пределах 0,7—0,8. Влияние нагара на свечах на искрообразование значительно снижается с увеличением скорости нарастания вторичного напряжения. В современных системах эта скорость лежит в пределах 200—700 В/мкс. После пробоя искрового промежутка вторичное напряжение резко уменьшается. При этом в искровом промежутке сначала искра имеет емкостную фазу, связанную с разрядом емкостей на промежуток, а затем индуктивную.

Распределение искр по цилиндрам может производиться как на стороне высокого напряжения, так и на стороне низкого напряжения (рис. 63.31). При распределении на стороне низкого напряже-

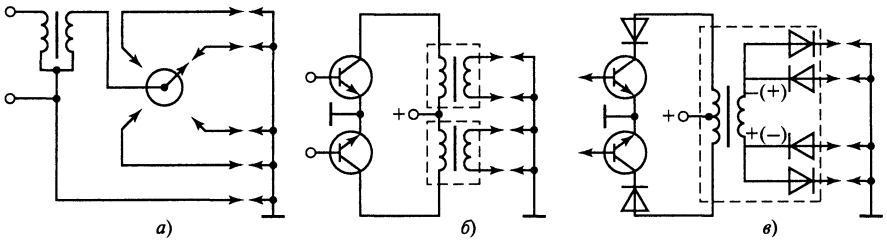


Рис. 63.31. Способы распределения искр по цилиндрам двигателя:

а — распределение на стороне высокого напряжения; *б* — распределение на стороне низкого напряжения с двух- (*б*) и четырехвыводной (*в*) катушками зажигания

ния каждая катушка зажигания обслуживает два либо четыре цилиндра. В первом случае катушка имеет два вывода высокого напряжения (двухвыводная катушка), во втором — четыре (четырехвыводная). Четырехвыводная катушка снабжена первичной обмоткой, состоящей из двух секций, работающих попеременно. Диоды обеспечивают разделение цепей, так как импульсы высокого напряжения такой системы разнополярны.

При одинаковом принципе работы, системы зажигания по конструкциям и схемам делятся на контактную систему (иначе ее называют классической), контактно-транзисторную и бесконтактные электронные системы зажигания.

КОНТАКТНАЯ СИСТЕМА ЗАЖИГАНИЯ

В контактной системе зажигания (см. рис. 63.30, *а*) коммутация в первичной цепи зажигания осуществляется механическим кулачковым прерывательным механизмом. Кулачок прерывателя связан с коленчатым валом двигателя через зубчатую или зубчатоременную передачу, причем частота вращения вала кулачка в 2 раза меньше частоты вращения вала двигателя. Угол опережения зажигания устанавливается изменением положения кулачка относительно приводного вала или углового положения пластины прерывателя, на которой закреплена ось его подвижного рычажка. Время замкнутого и разомкнутого состояния контактов определяется конфигурацией кулачка, частотой вращения и зазором между контактами. Датчиком частоты вращения в центробежном регуляторе опережения зажигания являются грузики, оси вращения которых закреплены на пластине, связанной с приводным валом.

Под действием центробежной силы, зависящей от частоты вращения, грузики стремятся разойтись и повернуть траверсу, жестко связанную с кулачком, при этом центробежная сила преодолевает силу противодействующей пружины. Изменение угла опережения зажигания в зависимости от нагрузки двигателя осуществляет вакуумный регулятор.

Вакуумная камера регулятора соединена с впускным трактом двигателя за дроссельной заслонкой. При увеличении нагрузки дроссельная заслонка открывается, давление за ней снижается и гибкая мембрана через шток поворачивает пластину с контактным механизмом относительно кулачка в направлении уменьшения угла опережения зажигания.

Добавочный резистор устраняет влияние снижения напряжения в бортовой сети при пуске системы зажигания.

Там, где напряжение при пуске понижается мало, добавочный резистор не применяется. Распределительный механизм, который объединен в один узел прерывателем, подводит вывод вторичной обмотки катушки зажигания через контактный уголек к вращающемуся электроду (бегунку), установленном на одном валу с кулачком прерывателя.

При вращении бегунка высокое напряжение последовательно через воздушный промежуток (приблизительно 0,5 мм), электроды распределителя и провода подается на свечи. Момент прохождения бегунка мимо электрода распределителя синхронизирован с размыканием контактов прерывателя.

КОНТАКТНО-ТРАНЗИСТОРНАЯ СИСТЕМА ЗАЖИГАНИЯ

На рис. 63.32 представлена схема контактно-транзисторного зажигания с коммутатором типа ТК 102, которая более четверти века обеспечивала зажигание восьмицилиндровых двигателей автомобилей ЗИЛ и ГАЗ.

Схема работает аналогично классической, однако ток в первичной цепи включает (прерывает) транзистор *VT*, управляемый контактами механического прерывателя. Импульсный трансформатор *T* в схеме ускоряет запирание транзистора, цепочка диодов *VD1*, *VD2* защищает транзистор от перенапряжений, а конденсатор *C2* — от случайных импульсов напряжения по цепи питания. Конденсатор *C1* способствует уменьшению коммутационных потерь в транзисторе. Добавочный резистор *4* закорачивается при пуске.

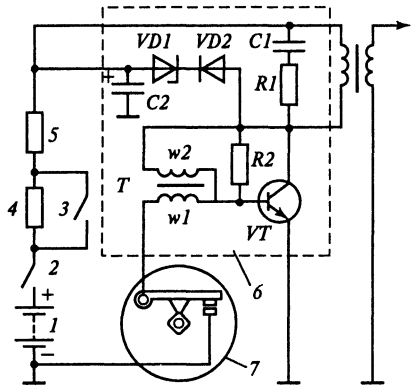


Рис. 63.32. Схема контактно-транзисторной системы зажигания с коммутатором типа ТК102:

1 — аккумуляторная батарея; *2, 3* — контакты выключателя зажигания и реле стартера; *4, 5* — добавочные резисторы; *6* — коммутатор; *7* — прерыватель

Срок службы контактов прерывателя в контактно-транзисторной системе больше, чем у контактной, однако механический износ прерывательного механизма, влияние вибраций на работу контактов в системе не устранены.

ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ЗАЖИГАНИЯ

В электронных системах зажигания контактный прерыватель заменен бесконтактными датчиками. В качестве датчиков используются оптоэлектронные датчики, датчики Виганда, но наиболее часто магнитоэлектрические датчики и датчики Холла. Обычно датчик Холла совмещают с микросхемой, стабилизирующей ток его питания и усиливающей выходной сигнал. В реальном датчике эта схема инвертирует сигнал, т.е. напряжение на его выходе появляется, когда выступ экрана датчика, прерывающий магнитный поток в области расположения чувствительного элемента датчика Холла, проходит мимо чувствительного элемента.

Наиболее простой в схемном и функциональном исполнении является бесконтактная система зажигания с магнитоэлектрическим датчиком.

Бесконтактные системы зажигания с магнитоэлектрическим датчиком. Бесконтактная система зажигания с магнитоэлектрическим датчиком принципиально отличается от контактно-транзисторной только тем, что в ней контактный прерыватель заменен бесконтактным датчиком. На рис. 63.33 приведена схема системы с коммутатором типа 13.3734-01 автомобилей «Волга».

Сигнал с обмотки *L* магнитоэлектрического датчика через диод *VD2*, пропускающий только положительную полуволну напряжения, и резисторы *R2*, *R3* поступает на базу транзистора *VT1*. Транзистор открывается, шунтирует переход база—эмиттер транзистора *VT2*, который закрывается, как и транзистор *VT3*, ток в первичной обмотке катушки зажигания прерывается и на выходе вторичной обмотки возникает высокое напряжение. В отрицательную полуволну напряжения транзистор *VT1* закрыт, открыты *VT2* и *VT3* и ток протекает в первичной обмотке катушки зажигания.

Стабилитрон *VD3* и резистор *R4* защищают схему коммутатора от повышенного напряжения в аварийных режимах.

Система зажигания с датчиком Холла. Применение датчика Холла и некоторых схемных усовершенствований позволяет в значительной мере избавить систему зажигания от недостатка, присущего контактной, контактно-транзисторной и электронной системам зажигания — снижения вторичного напряжения с ростом частоты вращения коленчатого вала ДВС и, как следствие, невозможности обеспечить на высоких частотах вращения большое значение энергии в искровом промежутке свечи без опасных перегревов катушки зажигания

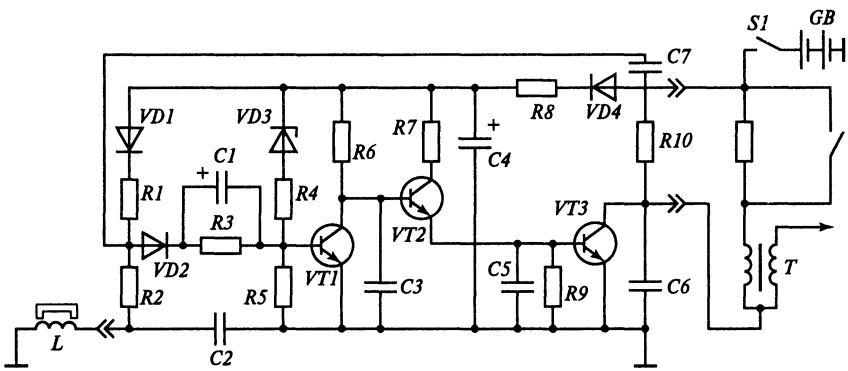


Рис. 63.33. Принципиальная электрическая схема бесконтактной системы зажигания с коммутатором типа 13.3734-01

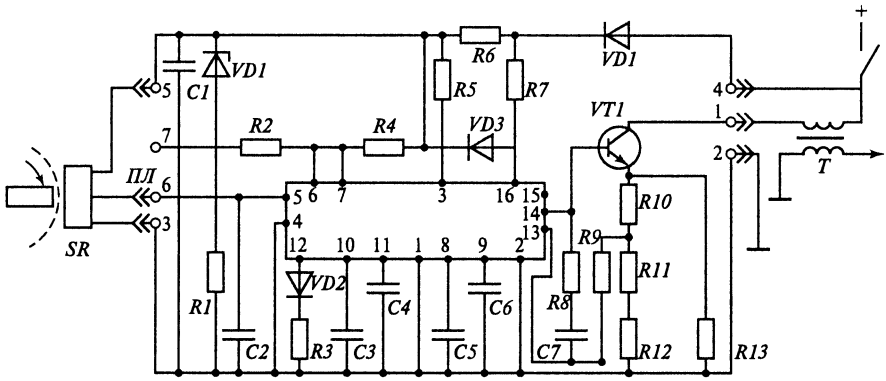


Рис. 63.34. Принципиальная электрическая схема зажигания с коммутатором типа 36.3734-20

на малых частотах вращения. На рис. 63.34 представлена система зажигания автомобиля ВАЗ 2108 с электронным коммутатором типа 36.3734-20 и датчиком Холла. В коммутаторе применена микросхема L497B. В микросхеме коммутатора, примененной в этой схеме, заложен алгоритм стабилизации значения вторичного напряжения. Стабилизация этого значения достигается, во первых, регулированием времени нахождения транзистора *VT1* в открытом состоянии и, значит, времени включения первичной цепи обмотки зажигания в сеть; во вторых, ограничением значения тока в первичной цепи. Последнее, кроме того, предотвращает перегрев катушки и, следовательно, осуществляет защиту ее от аварийных режимов.

Схема работает следующим образом: с датчика Холла на вход коммутатора приходит сигнал прямоугольной формы, значение высокого уровня которого несколько меньше напряжения питания, а длительность соответствует прохождению выступов экрана мимо чувствительного элемента датчика. Нижний уровень значения сигнала соответствует прохождению прорези.

В момент перехода от высокого уровня к нижнему происходит искрообразование. Микросхема коммутатора оборудована четырьмя интеграторами с конденсаторами *C3—C6*. Три из этих интеграторов обеспечивают регулировку времени накопления энергии. Если за время включения катушки ток в первичной цепи успевает дорасти до 94 % тока ограничения, начинают работать интеграторы с конденсаторами *C3*, *C4*. Конденсатор *C4* начинает разряжаться в момент прохождения сигнала датчика низкого уровня, конденсатор *C3* начинает заряжаться при прохождении сигнала высокого уровня. При равенстве напряжений на этих конденсаторах срабатывает схема и первичная цепь катушки включается в цепь питания. С достижением током катушки значения ограничения, конденсатор *C4* начинает заряжаться. Конденсатор *C3* полностью разряжается в момент разрыва первичной цепи. Таким образом, при увеличении частоты вращения сокращается время протекания тока ограничения, а время нарастания тока до этого значения, т.е. время накопления энергии, сохраняется. Если ток первичной цепи не успевает дорасти до 94 % тока ограничения, конденсаторы *C3* и *C4* полностью разряжаются и включается интегратор на конденсаторе *C5*, что обеспечивает более раннее включение первичной цепи для сохранения времени накопления энергии. Интегратор на конденсаторе *C6* применен в схеме управления отключением первичной цепи при неработающем двигателе.

Блок ограничения выходного тока срабатывает по сигналу, снимаемому с резисторов, включенных последовательно в первичную цепь зажигания. Если этот сигнал достигает уровня, соответствующему току 8 А, блок переводит выходной транзистор в активное состояние с фиксированием этого значения тока.

Блок безискровой отсечки отключает катушку зажигания в случае, если включено электропитание, но вал двигателя неподвижен. При этом, если при остановленном двигателе выходное напряжение датчика соответствует низкому уровню сигнала, катушка отключается сразу, в противном случае отключение происходит через 2—5 с. Регулировка угла опережения зажигания осуществляется традиционными способами, т.е. центробежным и вакуумным регуляторами.

Микросхема L497B применяется в двухканальном коммутаторе типа 64.3734-20 для систем с распределителем энергии низкого напряжения. В коммутаторе типа 6420.3734 применен выходной транзистор типа BY 931 ZPF1 с внутренней защитой от перенапряжений, что в значительной мере повысило надежность работы коммутатора.

Микропроцессорные системы зажигания. В микропроцессорной системе зажигания применяется электронное управление углом опережения

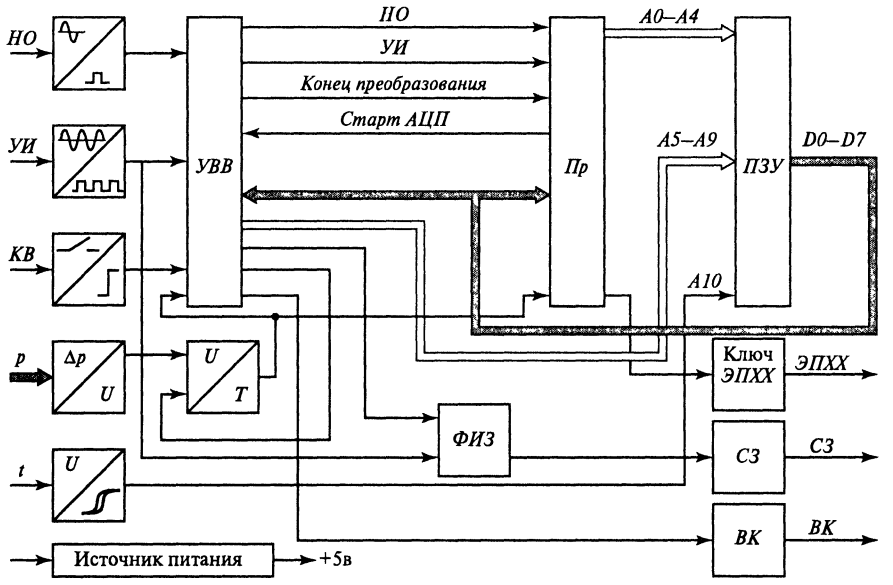


Рис. 63.35. Структурная схема микропроцессорной системы зажигания с контроллером типа МС-2713

зажигания. Как правило, микропроцессорная система одновременно управляет и системой топливоподачи — либо полностью (система «Мотроник» фирмы «Bosch»), либо каким-либо ее элементом, чаще всего экономайзером принудительного холостого хода (автомобиль ВАЗ 21083, ГАЗ 3302 и др.).

Центральной частью микропроцессорной системы является контроллер.

На рис. 63.35 представлена структурная схема контроллера типа МС-2713, применяющегося на некоторых модификациях автомобилей «Волга», «Газель», ЗИЛ 4314, ВАЗ 21083. В задачу контроллера входит обработать информацию, поступающую от датчиков, и в соответствии с ней, установив оптимальный для данного режима угол опережения зажигания, дать команду через коммутатор на образование искры зажигания. В режиме принудительного холостого хода контроллером выдается команда на прекращение подачи топлива. Контроллер получает информацию от индукционного датчика начала отсчета *НО*, установленного на картере сцепления так, что он генерирует импульс напряжения в момент прохождения в его магнитном поле стального штифта, укрепленного на маховике, при положении в верхней мертвой точке поршней цилиндров и датчика угловых импульсов *УИ*, реагирующего на прохождение зубьев шестерни венца маховика и снабжающего контроллер информацией о частоте вращения и угле поворота коленчатого вала двигателя, полупроводникового датчика температуры *t* охлаждающей жидкости, информирующего о достижении температуры заданного уровня, датчика разряжения *p* во впускном коллекторе тензометрического типа, информирующего о нагрузке двигателя.

Для управления экономайзером принудительного холостого хода *ЭПХХ* сигнал поступает с концевого выключателя *КВ* дроссельной заслонки.

Сигналы с датчиков *НО* и *УИ* преобразуются преобразователем сигналов в прямоугольные импульсы, сигнал с датчика разряжения *p*, значение которого по напряжению пропорционально разряжению, преобразуется во временные импульсы *T*.

Система работает следующим образом: в постоянно запоминающем устройстве *ПЗУ* контроллера записана информация об оптимальном угле опережения зажигания в зависимости от частоты вращения и нагрузки двигателя. Информация записана в двух вариантах: характеристики для холодного (температура охлаждающей жидкости ниже 65 °С) и прогретого двигателя. Нужная характеристика выбирается по сигналу с датчика температуры, поступающего на 10-й разряд адреса *ПЗУ A10*. Процессор *Пр*, выполненный на микросхеме КМ1823ВУ1, формирует сигнал *Старт АЦП*, по которому устройство ввода-вывода *УВВ* запускает преобразователь напряжение — время и начинает перевод напряжения с датчика разряжения *p* в цифровой код. По сигналу *Конец преобразования* в сети устанавливается адрес *ПЗУ* в разрядах *A5—A9* с допуском к необходимой информации. Начало измерения загрузки двигателя и вычисления угла опережения зажигания синхронизировано с импульсом *НО*. Вычисление угла опережения зажигания реализуется процессором по жесткому алгоритму. Когда значение вычисленного угла совпада-

ет со значением угла поворота коленчатого вала, по сигналу с процессора через *УВВ* включается блок *ФИЗ* (формирователь импульсов зажигания) на микросхеме КМ1823АГ1, вырабатывающий импульсы зажигания постоянной скважности, подаваемые через ключ *СЗ* на выход блока управления. Каналы управления многоканального коммутатора выбираются по сигналу *ФИЗ* через ключ выбора канала *ВК*.

ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ

Катушка зажигания. В настоящее время применяется два вида катушек: с разомкнутым и замкнутым магнитопроводом. Они могут выполняться по трансформаторной и автотрансформаторной схемам соединения обмоток. Трансформаторная связь обычно применяется в катушках электронных систем зажигания. Устройство катушки с разомкнутым магнитопроводом представлено на рис. 63.36, *а*, с замкнутым магнитопроводом — на рис. 63.36, *б*. Замкнутый магнитопровод позволяет накопить необходимую для воспламенения рабочей смеси энергию в значительно меньшем объеме катушки, снизить расход обмоточной меди, трудоемкость изготовления катушки. Малый объем катушки позволяет некоторым фирмам размещать ее прямо на свече зажигания.

Магнитопровод катушки только условно можно назвать замкнутым, так как в нем имеется воздушный зазор 0,3—0,5 мм, препятствующий насыщению магнитопровода, сдерживающего изменения магнитного потока магнитопровода и, следовательно, вредно влияющего на образование вторичного напряжения.

Внутренняя полость катушки с разомкнутым магнитопроводом заполнена трансформаторным маслом, обмотки катушки с замкнутым магнитопроводом помещены в пластмассовый корпус и заливаются эпоксидным компаундом.

Полученная монолитная конструкция собирается вместе с магнитопроводом. Технические данные некоторых катушек зажигания приведены в табл. 63.10.

Распределители зажигания. Распределители делятся на прерыватели-распределители и датчики-распределители. На рис. 63.37, *а* изображен прерыватель-распределитель, а на рис. 63.37, *б* — датчик-распределитель.

Прерыватели-распределители имеют типовую конструкцию и отличаются друг от друга в основном элементами подсоединения к двигателю и числом выводов, зависящим от числа цилиндров двигателя. Они объединяют в один узел контактный прерыватель тока в первичной цепи катушки зажигания, центробежный и вакуумный регуляторы угла опережения зажигания и распределитель высокого напряжения. Кулачок прерывательного механизма имеет число выступов по числу цилиндров двигателя.

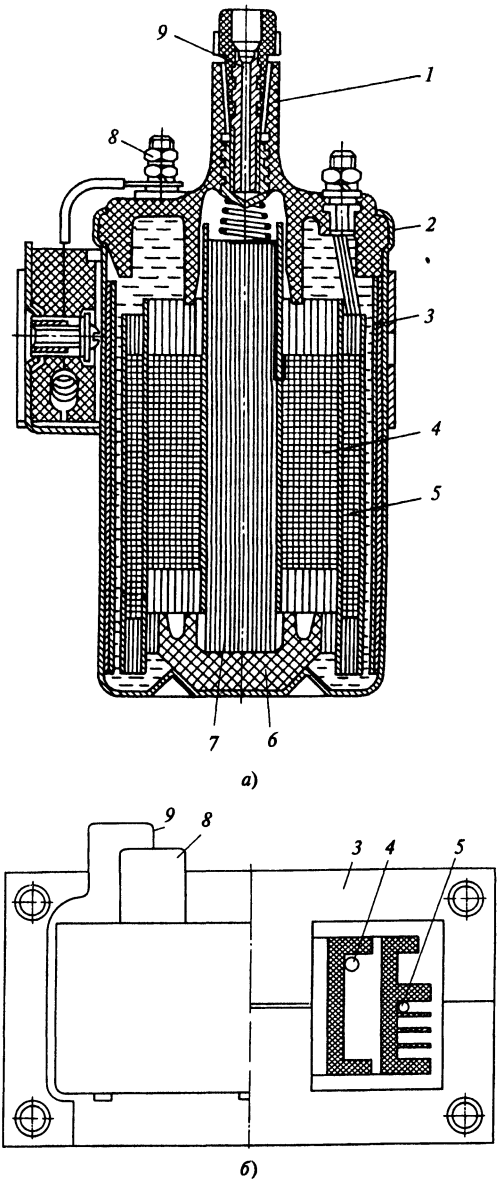


Рис. 63.36. Конструкция катушек зажигания:
а — маслонаполненной с разомкнутым магнитопроводом; *б* — с замкнутым магнитопроводом; *1* — крышка; *2* — корпус; *3* — магнитопровод; *4* — первичная обмотка; *5* — вторичная обмотка; *6* — керамический изолятор; *7* — наборный сердечник; *8* — вывод низкого напряжения; *9* — вывод высокого напряжения

Распределитель высокого напряжения содержит пластмассовый ротор с центральным электро-

Таблица 63.10

Тип катушки	Первичная обмотка		Вторичная обмотка		Коэффициент трансформации, w_2/w_1	Добавочный резистор
	Сопротивление, Ом	Индуктивность, мГн	Сопротивление, кОм	Емкость, пФ		
Б114	0,37—0,41	3—3,3	21,5—23	31—36	227	СЭ107
Б115	1,86—2	9,3—9,8	8,3—9,2	38—44	68	Б115
Б116	0,78—0,79	5,4—5,6	15,6	55—57	153	14.3729
Б117	3,1—3,3	10—11	6,3—9,2	44—47	78,5	--
Б118*	0,72—0,73	5,6—5,8	15	55—57	115	СЭ326
27.3705	0,4—0,5	3,7—3,8	4,5—5,5	31	82	–
29.3705	0,45—0,55	4,1—4,4	11	37	90	--
30.3705	0,4—0,55	5,6—6,2	6,3—6,4	24	70	--

* Экранированное исполнение.

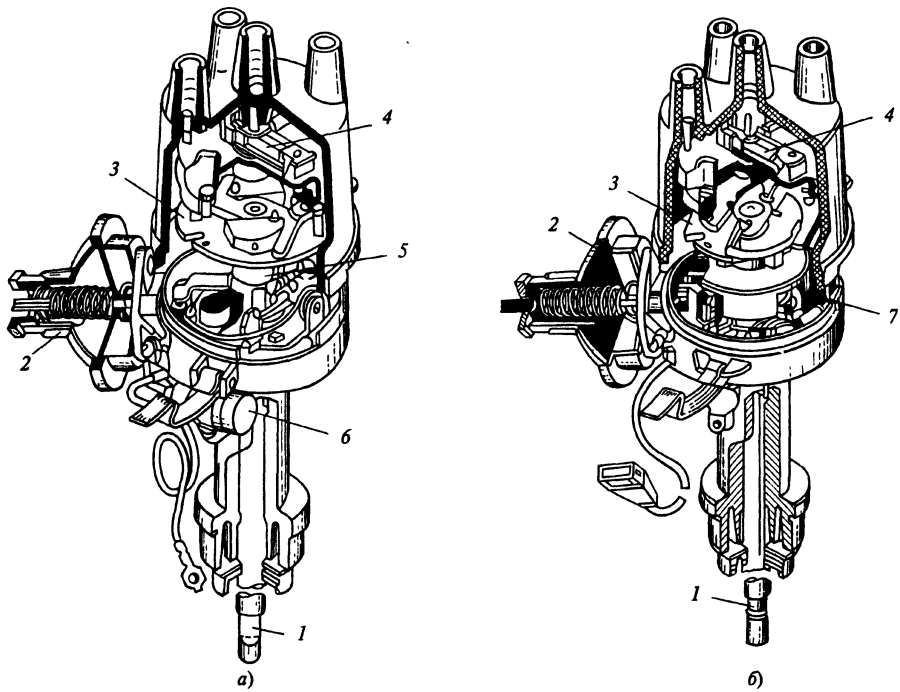


Рис. 63.37. Распределитель зажигания 30.3706.01 (*а*) и датчик-распределитель 5301.3706 (*б*):
1 — приводной валик; *2* — вакуумный регулятор; *3* — центробежный регулятор; *4* — ротор распределителя; *5* — прерывательный механизм; *6* — конденсатор; *7* — датчик

дом и боковые электроды, установленные в пластмассовой крышке. Ротор закреплен на подвижной пластине регулятора угла опережения зажигания. Импульсы высокого напряжения поступают на центральный электрод от катушки зажигания через подпружиненный угольный электрод и резистор 1—6 кОм, подавляющий помехи и закрепленный в углублении ротора.

При вращении ротора импульсы высокого напряжения передаются от центрального электрода через зазор к боковым электродам, а от них через провода к свечам. На корпусе распределителя закреплен конденсатор, включенный параллельно контактам прерывателя для уменьшения их искрения. У прерывателей-распределителей контактно-транзисторных систем зажигания этот конденсатор отсутствует.

Датчики-распределители отличаются в основном тем, что у них контактный прерыватель заменен бесконтактным датчиком (микропереключателем). В бесконтактном датчике магнитоэлектрического типа число пар полюсов соответствует числу цилиндров двигателя, в датчике Холла этому числу соответствует число прорезей вращающегося магнитного экрана. Центробежный регулятор угла опережения зажигания в магнитоэлектрическом датчике поворачивает втулку с расположенным на ней ротором датчика, в датчике Холла поворачивается муфта с закрепленным на ней магнитным экраном (шторкой). Вакуумный автомат поворачивает пластину крепления микропереключателя.

Технические данные некоторых типов распределителей сведены в табл. 63.11.

Свечи зажигания. На рис. 63.38 представлена конструкция свечи зажигания. Корпус свечи представляет собой полую резьбовую конструкцию с головкой под шестигранный ключ. Внутри корпуса располагается керамический изолятор. Изолятор должен выдерживать напряжение не менее 30 кВ при максимальной температуре. Внутри изолятора закреплен центральный электрод и выводной стержень. Центральный электрод изготавливается из хромотитановой 13Х25Т или хромоникелевой Х20Н80 сталей. В свечах с расширенным температурным диапазоном (термоэластик) центральный

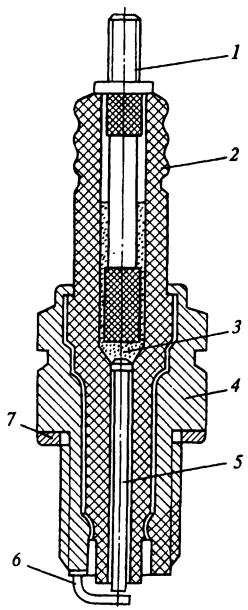


Рис. 63.38. Конструкция свечи зажигания:

1 — контактная головка; *2* — изолятор; *3* — токопроводящий герметик; *4* — корпус; *5* — центральный электрод; *6* — боковой электрод; *7* — прокладка

Таблица 63.11

Тип распределителя	Число обслуживаемых цилиндров	Угол опережения зажигания** регуляторов, град	
		центробежного	вакуумного
24.3706*	8	0-2/200	0-2/0,013
		3,5-5,5/500	4,5-6,5/0,027
		8-10/1000	7,5-9,5/0,033
		13-15/1500	—
30.3706	4	0-1/400	0-2/0,011
		3-5/700	1-3/0,013
		8-10/1100	3,75-5,75/0,019
		9,5-11,5/1400	5-7/0,021
		14,5-16,5/2500	—
38.3706	4	0-1/400	0-2/0,011
		3-5/700	1-3/0,013
		8-10/1100	3,75-5,75/0,019
		9,5-11,5/1700	5-7/0,021
		14,5-16,5/2500	—
40.3706	4	0-5/500	0-2/0,015
		3,25-5,25/1100	3,25-5,25/0,02
		5,5-7,5/1300	6-8/0,024
		8,25-10,25/2000	—
		11-13/2800	—
46.3706	8	0-2/500	0-1/0,013
		4,5-1,5/1100	1-3/0,021
		8-10/1400	—
47.3706	4	0-1,75/900	0-2,5/0,013
		1,75-3,5/1200	3,5-6/0,015
		4,75-6,5/1700	9,5-12/0,02
		6,25-8,5/2300	9,5-12/0,027
		8,5-10,5/2500	—
		8,5-10,5/3000	—
53.3706*	4	1,5-3,5/500	0-2/0,011
		3,5-5,5/800	3,5-5,5/0,013
		5,5-7,5/1100	6,5-8,5/0,016
		9,5-11,5/1500	—
		11-13/2000	—
54.3706*	4	1,75-3,5/1200	0-2,5/0,011
		4,5-6,5/1700	3,5-6/0,013
		—	9,5-12/0,023
		—	9,5-12/0,024
19.3706*	4	0,5-3/300	0-2,2/0,011
		9,5-11,5/850	0-2/0,008
		12-14/1250	4,5-6,5/0,021
		15-18/1750	8-10/0,026

* Датчик-распределитель.

** Дробью указаны соответственно углы опережения зажигания и частота вращения, об/мин, а для вакуумного регулятора — разряжение, МПа. Параметры центробежного регулятора (частота вращения и угол опережения зажигания) указаны по валу распределителя.

электрод выполняется из меди, серебра или платины с термостойким покрытием рабочей части

Герметизация центрального электрода и выводного болта производится специальной токопроводящей стекломассой К корпусу свечи приварен боковой электрод из никельмарганцевого или хромоникелевого сплава Некоторые фирмы, например «Bosch», применяют до четырех боковых электродов в свече Увеличение числа боковых электродов способствует снижению устойчивой частоты вращения двигателя Между центральным и боковым электродом устанавливается зазор 0,5—1,2 мм Чем больше зазор, тем больше воспламеняющая способность искры, но при этом от системы зажигания требуется более высокое напряжение Уплотнительная прокладка обеспечивает герметизацию цилиндра двигателя Герметизированные экранированные свечи, например, типа СН443 имеют встроенный помехоподавляющий резистор

Важнейшей характеристикой свечи является калильное число, которое оценивает ее тепловые свойства При температуре ниже 400 °С на свече образуется нагар, который вызывает перебой в работе двигателя, при температуре свыше 920 °С возникает калильное зажигание — самовоспламенение топливной смеси от нагретого конуса свечи Среднее индикаторное давление специального одноцилиндрового двигателя, соответствующее возникновению калильного зажигания, определяет калильное число, которое должно соответствовать ряду 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26 В некоторых странах под калильным числом понимают время работы эталонного двигателя до начала калильного зажигания Так обозначает калильное число, например, фирма «Bosch»

Применение меди, серебра и платины в центральном электроде повышает теплоотдачу и расширяет температурный диапазон свечи

Маркировка отечественных свечей содержит расширенную информацию об их конструкции и свойствах Первая буква определяет размеры резьбы А — М14×1,25, М — 18×1,5, вторая буква характеризует особенности конструкции свечи К — с коническим уплотнением без прокладки, М — малогабаритная, следующая цифра указывает калильное число, стоящие после цифры буквы Д или Н обозначают длину резьбовой части 19 или 11 мм, при отсутствии буквы длина равна 12 мм, буква В соответствует выступанию теплового конуса изолятора за торец корпуса, буква Т означает герметизацию центрального электрода термоцементом Через дефис может указываться порядковый номер разработки Похожее обозначение имеют свечи фирмы «Bosch» Первая буква в их обозначении W соответствует отечественной А, и D—М, далее может идти буква, обозначающая исполнение свечи, R — с встроенным резистором, затем цифра, характеризующая ее тепловые характеристики, следом идет буквенное обозначение длины резьбы (D соответствует 19 мм), наконец, буквенное обозначение числа боковых электродов, если их больше одного (D — два, Т — три, Q — четыре) и исполнение центрального электрода С — медь, Р — платина, S — серебро В табл 63 12 приведены отечественные искровые системы зажигания и их зарубежные аналоги

В настоящее время на одной и той же марке автомобиля могут применяться различные элементы системы зажигания как отечественного, так и зарубежного производства В табл 63 13 приведены аппараты зажигания, наиболее распространенные в эксплуатации

63.4. ЭЛЕКТРОПРИВОД ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ И ТРАКТОРОВ

Электропривод вспомогательного оборудования автомобилей и тракторов образуют электродвигатель, система передачи механическои энергии потребителю и система управления Довольно часто электродвигатель объединяют с системой передачи энергии и частично с системой управления и защиты Электродвигатель, объединенный с редуктором, образует моторедуктор а с насосом — мотонасос

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

С помощью электродвигателей приводятся в действие отопительные и вентиляционные установки, стекло- и фароочистители, стеклоподъемники и т п На автомобили устанавливаются коллекторные электродвигатели постоянного тока с электромагнитным возбуждением или с возбуждением от постоянных магнитов мощностью, выбираемой из ряда 6, 10, 16, 25, 40, 60, 90, 120, 150, 180, 250 Вт и частотой вращения, соответствующей ряду 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 8000, 9000 и 10 000 об/мин

Двигатели с электромагнитным возбуждением имеют параллельное, последовательное и смешанное возбуждение Регулирование их частоты вращения может осуществляться введением резистора в цепи возбуждения или якоря или переключением в цепи обмотки возбуждения Реверсивные двигатели снабжены двумя обмотками возбуждения Конструкция электродвигателя с электромагнитным возбуждением представлена на рис 63 39 Электродвигатели малой мощности (до 60 Вт) выполняются двухполюсными, пакеты статора и якоря набираются из стальных пластин толщиной 0,6— 1 мм Однако электродвигатели с электромагнитным возбуждением постепенно вытесняются электродвигателями с возбуждением от постоянных магнитов (рис 63 40) Применение постоян-

Таблица 63.12

Отечественные свечи	Свечи зарубежных фирм					Применение
	«Bosch», Германия	«Champion», Англия	«Motor Kraft», США	«Marelli», Италия	«NGK», Япония	
А11	W8A;W9A; W8AP; W9AP; W8AC; W9AC	L88A; L88	AE52	CW3N	B5HS	ГАЗ 53А; ЗиЛ 431410; УАЗ 4696
А14Д	W8CC	N15	AG3; AG31	CW5L	—	ГАЗ 3102 с двигателем ЗМЗ 4022.10
А17ДБ	W7DC; W7DP; WR7DC; WR7DP	N10Y	AG252	CW7LP	BP6ES	ВАЗ 2101-07; АЗЛК 2141 с двигателем ВАЗ 2106-70
А17ДБ-10	W7DC; W7DP; W7DTC; WR7DP; WR7DC	N9Y	AG252	CW7LP	BP6ES	ВАЗ 2108-09; ЗАЗ-1102
А20Д1; А20Д2	W6CC	N3	AG4	CW7L	B7ES	«Москвич 412, 2140»; 21412, ИЖ 2121 с двигателем УЗАМ 412
А23	W5A; W5AP; W5AC	LW81; LW82	AE2; AE3	CW7N; CW7NI	B7HS	ЗАЗ 968 А, М; ЛУАЗ 969 А, М с двигателем МеМЗ-968, 969

Таблица 63.13

Автомобиль	Тип распределителя	Тип катушки зажигания	Тип электронного коммутатора
Контактные системы зажигания			
ГАЗ 24	Р119Б	Б115-В	—
АЗЛК 21412	47.3706	Б115-В2	—
ВАЗ 21011, 2104, 2105	30.3706-01	Б117-А	—
ВАЗ 21053, 2106, 2107	30.3706	Б117-А	—
ВАЗ 2121	30.3706-02	Б117-А	—
Контактно-транзисторные системы зажигания			
ГАЗ 53А	Р133	Б114-Б	ТК102, ТК102-А
ЗИЛ 131-А, 431410	46.3706	Б114-Б	47 3734, ТК102-А
Автобусы ПАЗ, КАвЗ	Р133-Б	Б114-Б	47.3734, ТК102-А
Бесконтактные электронные системы зажигания			
ГАЗ 24-10	19.3706	Б116	13.3734-01
ГАЗ 3102	36.3706	Б116	13.3734-01
ВАЗ 2106, 2107, 2121	38.3706	27.3705	36.3734-20
ВАЗ 2108, 2109	40.3706	27.3705	36.3734-20
ВАЗ 1111	55.3706	29.3705	36.3734-20
АЗЛК 21412	54.3706	27.3705	36.3734-20
ЗАЗ 1102	53.3706	27.3705	36.3734-20
Микропроцессорные системы зажигания			
ВАЗ 21083-02, 21093-02, АЗЛК-2141	МС2715-03	29.3705	42.3734
ГАЗ 3302	МС2713-01	3022.3705	6420.3734

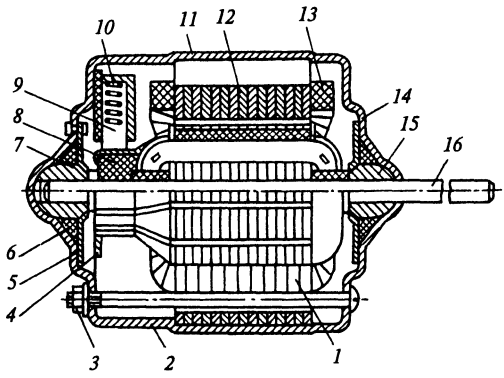


Рис. 63.39. Электродвигатель с электромагнитным возбуждением:

1 — якорь; *2* — крышка; *3* — винт; *4* — траверса; *5*, *14* — плоские пружины; *6* — набивка; *7*, *15* — подшипники; *8* — коллектор; *9* — щетки; *10* — щеткодержатель; *11* — корпус; *12* — пакет статора; *13* — обмотка возбуждения; *16* — выходной вал

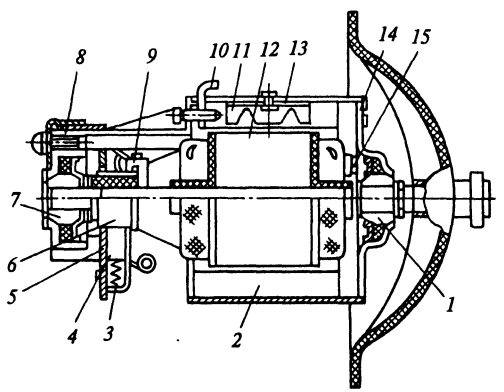


Рис. 63.40. Электродвигатель типа 45.3730 с возбуждением от постоянных магнитов:

1, *7* — подшипники; *2* — постоянный магнит; *3* — щеткодержатель; *4* — щетка; *5* — траверса; *6* — коллектор; *8*, *14* — крышки; *9* — катушка индуктивности; *10* — крепежная пластина; *11* — пружина крепления магнита; *12* — якорь; *13* — корпус; *15* — изоляционная пластина якоря

ных магнитов экономит обмоточную медь и упрощает конструкцию электродвигателя. На электродвигателях малой мощности устанавливаются подшипники скольжения. Коллекторы выполняются штамповкой из медной ленты или трубы с продольными пазами на внутренней поверхности и опрессовываются пластмассой. В автотракторных электродвигателях используются магниты из гексаферрита бария изотропные 6БИ240, М6БИ230Ж и анизотропные 24БА210, 18БА220 и МБА255. Последние три цифры в наименовании магнита указывают значение его коэрцитивной силы в килоамперах. Остаточная индукция для батарей 6БИ240 составляет 0,19 Тл, 18БА220—0,33 Тл, 24БА210—0,37 Тл.

В электродвигателях применяются щетки марок М1, 96, 960, ЭГ51. В двухскоростных электродвигателях между двумя основными щетками устанавливается третья. При подаче питания на третью щетку частота вращения растет.

Технические данные основных типов электродвигателей с электромагнитным возбуждением приведены в табл. 63.14, а с возбуждением от постоянных магнитов в табл. 63.15.

Коэффициент полезного действия электродвигателей зависит от их мощности, но обычно не превышает 60 %.

МОТОРЕДУКТОРЫ

Моторедукторы применяются в стекло- и фароочистителях, электроприводе блокировки замков дверей, стеклоподъемниках. На рис. 63.41 представлен моторедуктор заднего стеклоочистителя типа 47.3730. Конструкция моторедуктора определяется конструкцией входящего в него электродвигателя, при этом вал электродвигателя удлинен и заканчивается нарезкой червяка редуктора. Стенка корпуса редуктора играет роль передней крышки электродвигателя, щеточный узел расположен со стороны редуктора. Червячное колесо приводит в действие кривошипно-шатунный механизм, состоящий из рубчатых секторов, преобразующий вращательное движение вала двигателя в постоянное движение щеток. Зубчатые секторы позволяют расширить угол колебания щеток до 120°.

В моторедуктор встроены концевой выключатель, обеспечивающий укладку щеток в крайнем положении при выключении моторедуктора, и биметаллический предохранитель. Для очистки фар круглой формы достаточен угол колебания щеток 60°. Поэтому малогабаритные моторедукторы не имеют червячного механизма. Выходящий вал редуктора, параллельный валу двигателя, получает колебательное движение от многоступенчатого редуктора и двухзвенного кривошипно-шатунного механизма, состоящего из шатуна и поводка.

Для прямоугольной фары достаточен угол колебаний 45°, и моторедуктор таких фар имеет однозвенный кривошипный механизм, состоящий из шатуна и закрепленного на боковой поверхности пальца, входящего в прорезь шатуна.

Концевой выключатель разрывает цепь электроснабжения двигателя, когда его шток попадает в углубление на выходной шестерне. Многие моторедукторы стеклоочистителей не имеют шатунно-кривошипного механизма. В этом случае враща-

Таблица 63.14

Тип электродвигателя	Напряжение, В	Полезная мощность, Вт	Ток, А	Частота вращения, об/мин	Масса, кг
Параллельное возбуждение					
МЭ7Б, Д	12	15	3,8	2000	0,83
МЭ7Г	12	10	3	2600	0,83
МЭ12	12	15	3,8	6500	1,3
МЭ22А	12	120	28	3000	6,3
МЭ230	24	15	2,1	5500	1,3
МЭ231	24	12	1,8	2200	1,3
Последовательное возбуждение					
МЭ65В	24	40/16*	5,4/4*	3000/2000	2,7
МЭ106	12	40/16	11/6,5	3000/2000	3,5
МЭ201	12	11	3,5	5500	0,5
МЭ202А	12	11	3,5	4500	0,5
МЭ202Б, В	24	11	1,9	4500	0,5
МЭ208	24	11	1,7	5500	0,5
МЭ211Б	12	25	5,3	3000	1,3
МЭ218В	12	25	5,3	3000	1,3
МЭ222	12	220	43	6500	5,0
МЭ226	12	40	7,5	3500	1,65
МЭ226В	24	40	4	3000	1,65
МЭ225А	12	12	4,5	4000	0,85
МЭ247А	24	25	2,1	3600	1,3
МЭ252	24	180	12,5	6500	4,7
МЭ252Б	24	280	18,1	8000	4,8
МЭ256Б	24	220	22	7000	5,2
11.3730	24	150	16,5	3000	6,5
Смешанное возбуждение					
32.3730	12	180	29	6500	4,7
МЭ14А, Б	12	15	4,2	1500	1,3

* Параметры двухскоростных двигателей.

тельное движение преобразуется в колебательное рычажным механизмом щетки.

Конструкция моторедукторов стеклоподъемников в значительной мере зависит от размеров электродвигателя. Если габариты малы и допускают расположение моторедуктора в зоне механизма подъема стекла, то редуктор объединен с двигателем в единую конструкцию, в которой редуктор через червячное колесо осуществляет управление механизмом подъема (рис. 63.42). Такая конструкция может содержать одно или многоступенчатый промежуточный редуктор, позволяющий при той же скорости подъема стекла увеличить частоту вращения якоря электродвигателя и, следовательно, уменьшить его габариты и массу.

Если габариты электродвигателя не позволяют разместить его в зоне стеклоподъемного механизма, то там располагается лишь червячный редуктор, вал которого приводится во вращение гибким валом, стальной струной или иными способом от вала электродвигателя.

Моторедуктор блокировки замков дверей аналогичен моторедуктору стеклоподъемника, его выходная шестерня перемещает зубчатую рейку, осуществляющую в зависимости от направления вращения вала двигателя блокировку или разблоки-

Таблица 63.15

Электродвигатель	Привод	Напряжение, В	Полезная мощность, Вт	Частота вращения, об/мин	Масса, кг
МЭ268	Омывателя	12	10	9000	0,14
МЭ268В		24	10	9000	0,15
45.3730	Отопителя	12	90	4100	1,0
МЭ11, 81.3730		12	6	3000	0,5
МЭ237		24	25	3000	0,9
МЭ236		12	25	3000	1,0
МЭ255		12	20	3000	0,8
19.3730		12	40	3000	1,3
МЭ250		24	40	3000	1,3
51.3730		12	90	3000	1,3
49.3730		12	27	4500	0,68
491.3730		12	50	5000	0,68
492.3730		24	27	4500	0,68
493.3730		24	50	5000	0,68
74.3730		12	11	5500	0,5
9702.3730		24	90	3000	1,6
9742.3730		12	90	3000	1,6
МЭ237Б	Стеклоочистителя	12	12	2000	0,9
МЭ237Е		24	12	2000	0,9
МЭ251	Вентилятора	24	5	2500	0,5
68.3730		12	110	2600	2,5
70.3730		12	110	2600	1,8
73.3730		24	5	2500	0,5
62.3730		24	5	2500	0,5
81.3730		12	6	3000	0,5

ровку дверных замков через передвижной шток. В моторедуктор типа 87.3730 встроено устройство коммутации цепи управления. Моторедуктор типа 871.3730 устройства коммутации не имеет. Основные технические данные моторедукторов представлены в табл. 63.16.

МОТОНАСОСЫ

Мотонасосы применяются в системах омывателей стекол и фар, в струйной фароочистке, системах перекачки жидкости в системе обогрева и т.п. Мотонасос представляет собой соединение в одну общую конструкцию электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов и жидкостного насоса. На рис. 63.43 показана конструкция мотонасоса типа 2002.3730 струйной фароочистки автомобиля ГАЗ-3102. Крыльчатка центробежного насоса, закрепленная на валу электродвигателя, выполнена из пластмассы. Внутренняя полость электродвигателя защищена от попадания влаги резиновой манжетой. Режим работы мотонасосов — кратковременный или повторно-кратковременный. В табл. 63.17 приведены основные технические параметры мотонасосов.

СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Схема управления электроприводом осуществляет его включение и выключение, изменение частоты и устанавливает направление вращения вала электродвигателя, заданное время и очередность включения отдельных элементов электропривода, а также защиту их от аварийных режимов и перегрузок. У большинства агрегатов автомобиля включение электродвигателя осуществляется непо-

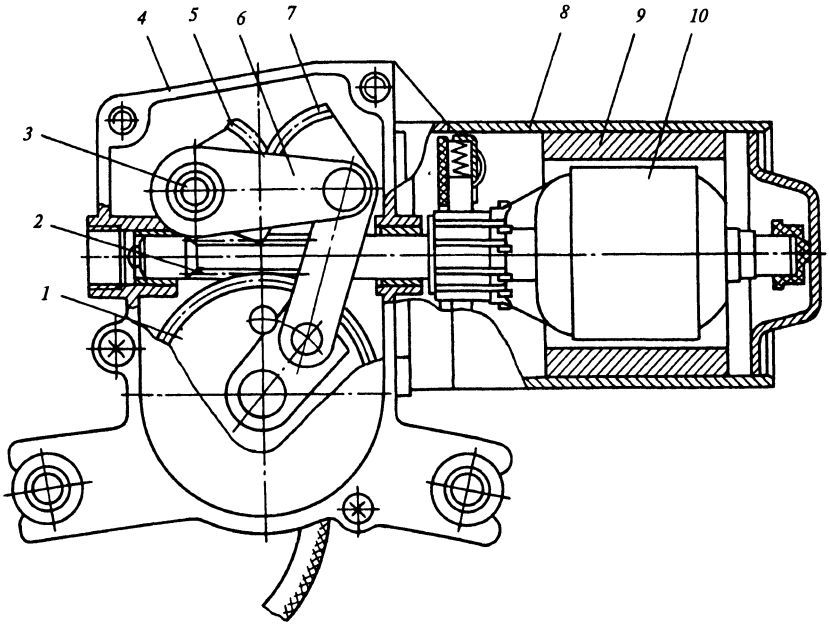


Рис. 63.41. Моторедуктор типа 47.3730 стеклоочистителя заднего стекла:

1 — шестерня; *2* — червяк; *3* — выходной вал; *4* — корпус редуктора; *5*, *7* — зубчатые сектора; *6* — серьга; *8* — корпус электродвигателя; *9* — постоянный магнит; *10* — якорь

средственно выключателем или через контакты промежуточного реле. В более сложных системах используются датчики, таймеры и т.п.

Электровентиляторы системы охлаждения двигателей внутреннего сгорания (рис. 63.44) управляются реле *KV*, обмотка которого включается в сеть через контакты *SK* термобиметаллического датчика. Если температура в системе охлаждения ДВС ниже, чем температура срабатывания датчика *SK*, то даже при включении выключателя *SA* электродвигатель *M* остается отключенным от сети. Если же нагрев системы охлаждения ДВС достигнет уровня срабатывания датчика *SK*. он замыкает свои контакты и реле *KV* включает электродвигатель вентилятора в работу. При переохлаждении ДВС вентилятор вновь отключается Алгоритм управления стеклоочистителем в простейшем случае должен обеспечивать работу с малой и большой частотой вращения его электродвигателя и укладку щеток в крайнее положение при отключении стеклоочистителя. На рис. 63.45 приведены схемы управления стеклоочистителем.

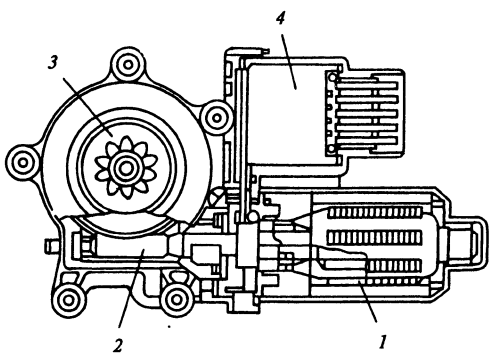


Рис. 63.42. Моторедуктор стеклоподъемника:

1 — электродвигатель; *2* — червячный редуктор; *3* — выходная шестерня; *4* — система управления

В положении *I* выключателя *SA* электропитание подается непосредственно на основные щетки электродвигателя и он работает с низкой частотой вращения. Положение *II* подводит питание к третьей щетке электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов или через резистор $R_д$ к параллельной обмотке возбуждения двигателя со смешанным электромагнитным возбуждением. При этом двигатель переходит на высокую частоту вращения с повышенной интенсивностью очистки. Для остановки привода выключатель переводится в положение «0». При этом двигатель продолжает работать до размыкания контактов концевого выключателя *SQ*. В схеме рис. 63.45, *а* замыкающий контакт концевого выключателя переводит двигатель в режим динамического торможения. В схеме рис. 63.45, *б* остановка двигателя происходит соединением щеток через обмотки возбуждения. Бо-

Таблица 63.16

Моторсдуктор	Привод	Напряжснис, В	Ток, А	Момснт на выходном валу, Н · м	Частота вращсния, об/мин	Масса, кг
16.3701	Стеклоочистителя	24	2/3*	3,2	35/51	2,5
161.3701		12	4/6	3,2	35/51	2,5
171.3701		12	3,5/5	3,2	35/55	2,0
46.3701		12	4,5/7,5	2,35	35/53	2,5
471.3701		12	2	0,49	50	1,1
52.3701		24	2,5/3,5	2,94	35/51	2,8
84.3701		12	4/4,4	5	46/65	1,5
85.3701		12	3	1	60	1,3
22.3701	Фароочистителя	12	1,5	0,49	50	0,65
30.3701		12	1,5	0,49	50	0,65
7902.3701	Подъсма антснны	12	4	—	4000	0,5
87.3701	Блокировки замков	12	5	25**	—	0,2

* Дробью указаны парамстры двухскоростных моторсдукторов.
** Усилис втягивания рсйки, Н.

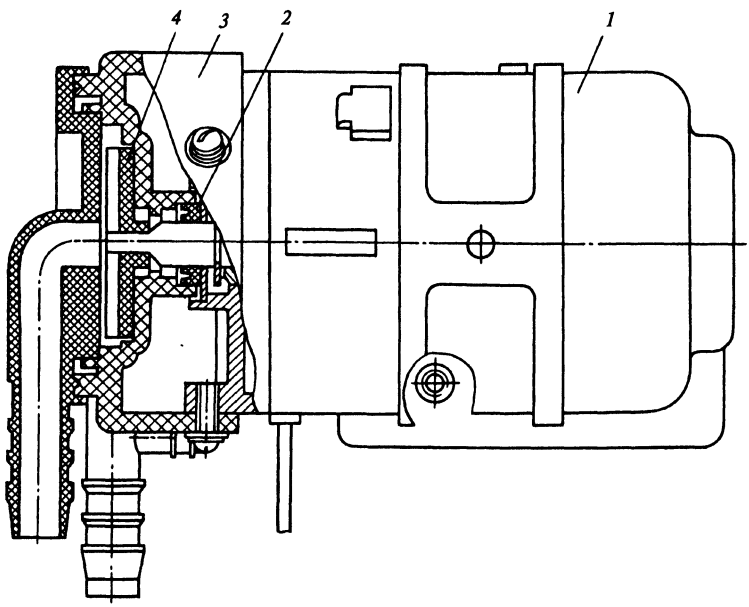


Рис. 63.43. Мотонасос типа 2002.3730:
1 — элсктродвигатсль; *2* — манжста; *3* — корпус насоса; *4* — крыльчатка насоса

лее полный алгоритм управления стеклоочисткой содержит требования периодичности включения стеклоочистителя с перерывом 2—7 с, а также совместное со стеклоочистителем управление стеклоомывателем. На рис. 63.46 представлена схема управления стеклоочистителем и омывателем стекла с электронным реле типа 522.3747.

Положению переключателя *SA* соответствуют следующие состояния работы системы: *I* — система отключается с динамическим торможением электродвигателя *M1* стеклоочистителя. При положении *IV* напряжение сети через встроенный в стеклоочиститель термобиметаллический предохранитель *F3* подается на основные щетки электро-

Таблица 63.17

Мотонасос	Назначение	Напряжение, В	Ток, А, не более	Перепад давления, МПа	Применение
2002.3730	Струйная фароочистка	12	40	0,3	ГАЗ 3102, двигатель ЗМЗ-402
9602.3730		12	20	0,38	ГАЗ 3102, двигатель ЗМЗ-406
274.3730	Омыватель стекол	12	3	0,16	ВАЗ, ГАЗ 3101
99.3730		12	3	0,11	БАЗ-3778
351.3730	Обогрев салона	12	3,7	0,015	ГАЗ 33023, 2705, 3221 и др.
75.3730	Электробензонасос	12	6,5	3,9	РАФ 22038

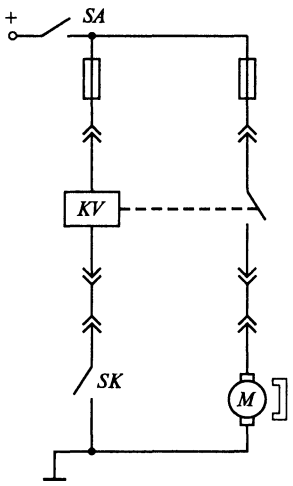


Рис. 63.44. Схема управления электровентилятором системы охлаждения двигателя

двигателя *M1* и он работает с малой частотой вращения. При переводе выключателя *SA* в положение *V* подводится питание к третьей дополнительной щетке электродвигателя и он начинает работать с высокой частотой вращения. В положении *II* и *III* (не фиксированном и фиксированном) осуществляется прерывистый режим работы стеклоочистителя. В этом режиме напряжение бортовой сети попадает на основные щетки электродвигателя *M1* только в том случае, если замкнуты контакты реле *KV1*. Срабатыванием реле *KV* управляет электронная схема реле времени, собранная на операционном усилителе *ДА* и транзисторах *VT2*, *VT3*, *VT4*. Появление напряжения на выводе *S* реле типа 522.3747 происходит с частотой 14 циклов в минуту. Реле типа 522.3747 при включении стеклоомывателя одновременно включает в работу и двигатель стеклоочистителя с малой частотой вращения.

В положении *VI* (стеклоомыватель включен) через вывод *86* происходит смещение в прямом направлении перехода база-эмиттер транзистора *VT1*, переход в открытое состояние транзисторов *VT1*, *VT2*, *VT3*, *VT4*, замыкание контактов *KV1* и стеклоочиститель вступает в работу. После отключения стеклоомывателя на время разряда конденсатора *C3* стеклоочистка продолжается два-четыре полных цикла.

Схема управления системой блокировки замков дверей с моторедуктором типа 87.3730 и электронным блоком управления типа 7403.3761 представлена на рис. 63.47. Нажатием кнопки *SA2* открываются транзисторы *VT3*, *VT4* и подключается к цепи питания реле *KV2*, которое включает электродвигатель *M* моторедуктора с полярностью «плюс» на его выводе *2* и «минус» на выводе *1*. При этом электродвигатель перемещает рейку в сторону осуществления блокировки дверей. При нажатии

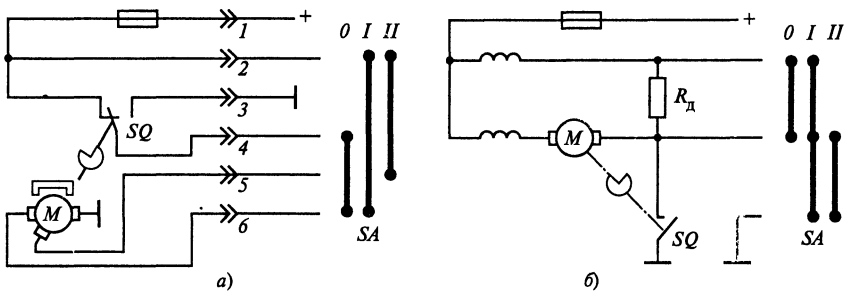


Рис. 63.45. Схема управления двухскоростным стеклоочистителем:
а — возбуждение от постоянных магнитов; *б* — электромагнитное возбуждение

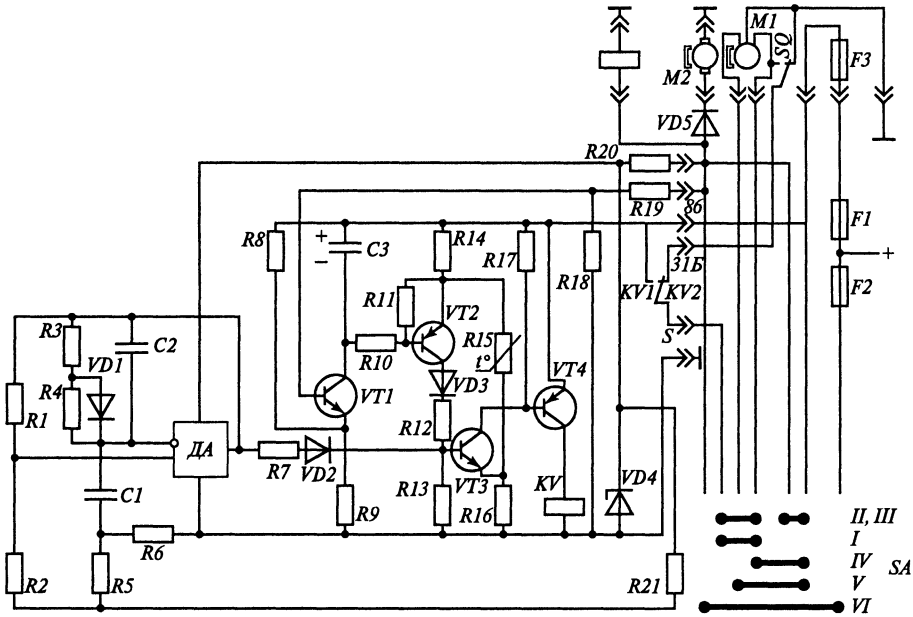


Рис. 63.46. Схема управления стеклоочистителем и стеклоомывателем с реле 522.3747

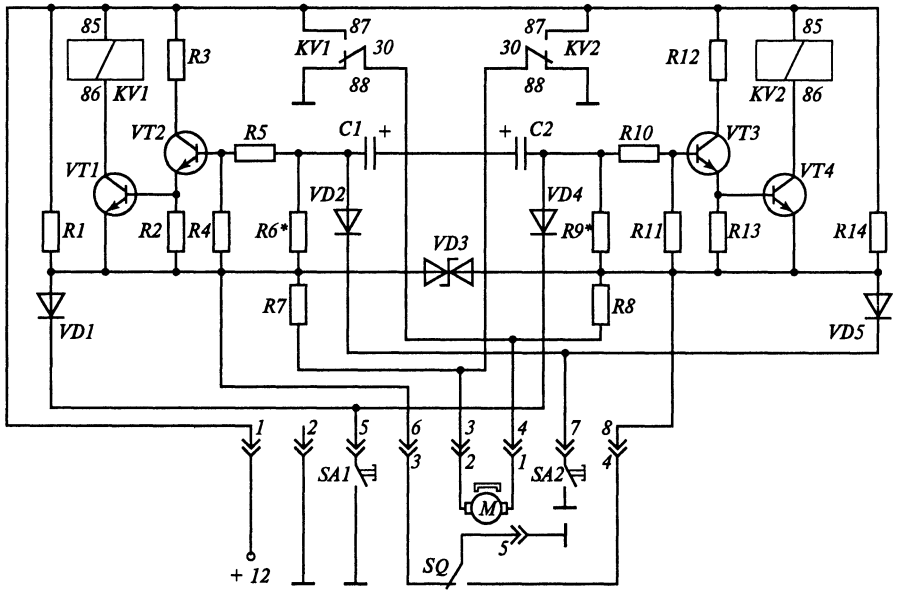


Рис. 63.47. Схема управления системой блокировки замков дверей

кнопки *SA1* аналогично срабатывает реле *KV1*, на вывод *2* подается «минус», на вывод *1* — «плюс» и двигатель *M*, вращаясь в обратную сторону, разблокирует двери. Концевой выключатель *SQ* блокирует кнопки *SA1* и *SA2*.

На рис. 63.48 представлена схема блока управления стеклоподъемником типа 1903.3763, где сигнал на подъем или опускание стекла изменяет полярность электропитания электродвигателя моторедуктора и заставляет его вращаться в ту или иную сторону. Остановку двигателя моторедуктора производит система, реагирующая на значение тока электродвигателя. При установке стекла в крайнее положение или попадании в щель над закрываемым стеклом руки водителя или пассажира геркон *SF1* выдает сигнал на остановку двигателя. В современ-

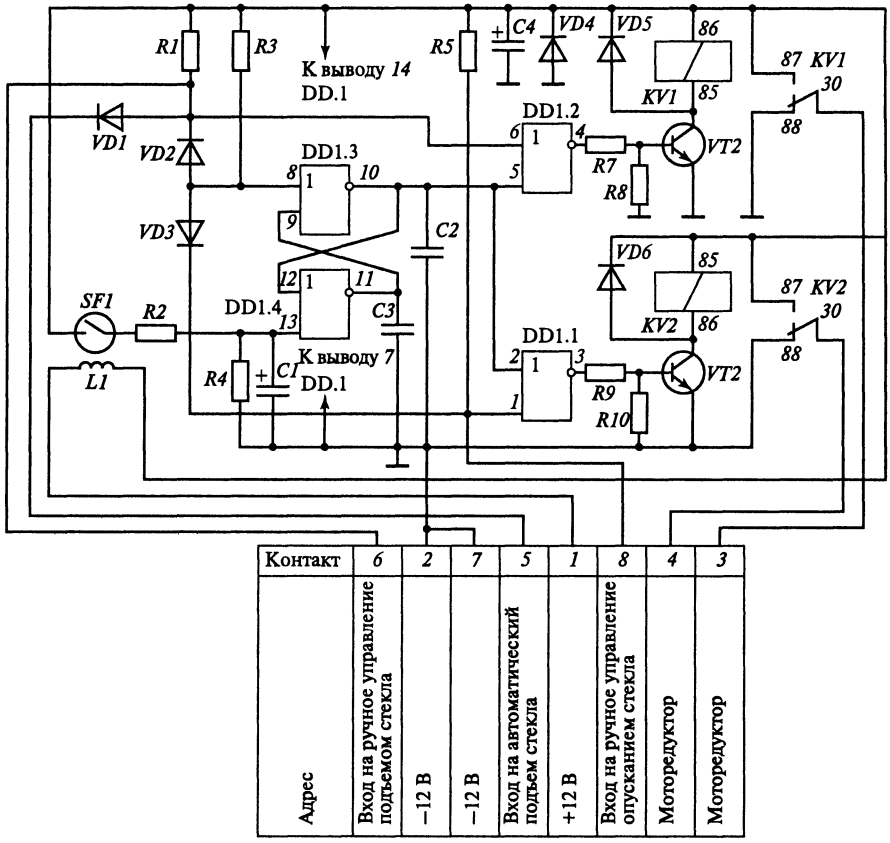


Рис. 63.48. Схема блока управления стеклоподъемником

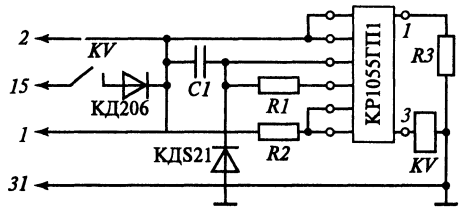


Рис. 63.49. Схема управления реле стеклоомывателя на микросхеме КР1055ГП1

ных схемах управления электроприводом все чаще применяются специализированные микросхемы. На рис. 63.49 приведена схема реле стеклоомывателя, выполненных на микросхеме КР1055ГП1.

63.5. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА АВТОМОБИЛЯ

Основной задачей информационно-измерительной системы является снабжение водителя информацией о режиме работы двигателя и автомобиля в целом их работоспособности или состоянии.

По способу отображения информации приборы информационно-измерительной системы делятся на указывающие и сигнализирующие. Указывающие приборы имеют шкалу, на которой высвечиваются, указываются стрелкой, световым индикаторным столбиком или другим способом значения измеряемой величины; сигнализирующие приборы снабжают водителя информацией обычно об одном, как правило, аварийном значении измеряемого параметра, причем информируют об этом звуковым или световым сигналом.

По конструктивному исполнению приборы делятся на механические и электрические. Отдельный класс составляют электронные измерительные системы. В механических приборах используют для передачи воздействия на стрелку от места измерения сложные механические, пневматические или иные передачи. В настоящее время приборы такого типа мало применяются, в основном в качестве шинных манометров.

По назначению приборы информационно-измерительной системы делятся на термометры, измерители давления, измерители уровня топлива, измерители зарядного режима аккумуляторной батареи (амперметры, вольтметры), измерители скорости автомобиля и пройденного пути (спидомет-

ры, одометры), измерители частоты вращения двигателя (тахометры). К приборам информационно-измерительной системы относятся также тахографы, вычерчивающие на контрольном диске условия движения, и экономеры, позволяющие подобрать оптимальный по расходу топлива режим движения.

Конструктивно информационно-измерительные приборы могут изготавливаться отдельными изделиями, а также в виде объединений приборов в щитки или комбинации.

ДАТЧИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Реостатные датчики. Ранее реостатные датчики выполнялись исключительно намоткой провода с высоким удельным сопротивлением (нихром, константан) на каркас (рис. 63.50, *а*). Однако такое исполнение датчика приводит к появлению на его выходе зоны нечувствительности при перемещении ползунка в пределах диаметра провода. Поэтому в настоящее время реостатные датчики выполняются из проводящих паст, намазанных на подложку (рис. 63.50, *б*).

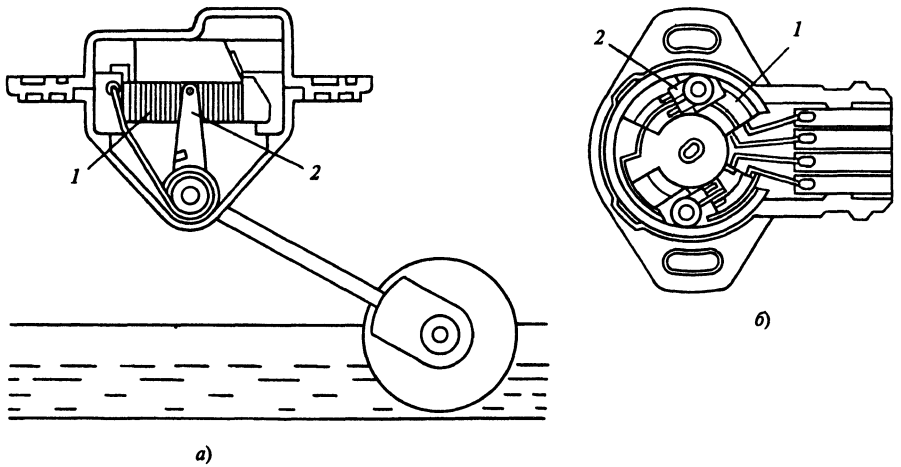
Обычно реостатный датчик совмещают с датчиком, превращающим измеряемую величину в перемещение ползунка. Например, мембрана датчика давления перемещает ползунок, и на выходе совмещенного датчика возникает электрический сигнал в соответствии с измеряемым давлением.

Терморезистивные датчики. Чувствительный элемент терморезистивного датчика — это полупроводниковый терморезистор, особенностью которого является то, что изменение температуры вызывает значительное изменение его сопротивления. Терморезистивный датчик выполняется в виде латунного баллона с резьбой и шестигранником под ключ для вворачивания в место измерения. Таблетку терморезистора прижимает к основанию баллона пружина, осуществляющая одновременно подвод тока к таблетке. Пружина изолируется от стенок баллона изоляционной втулкой, конец ее соединен с выводом датчика. Внутренняя полость баллона герметизирована, что делает конструкцию датчика неразборной.

Термобиметаллические датчики. Термобиметаллические датчики применяются как в сигнализирующих, так и в указывающих приборах импульсной системы. Основной частью термобиметаллического датчика является тонкая двухслойная пластинка, выполненная из двух металлов с разными значениями температурного коэффициента линейного расширения, соединенных методом плакирования. При нагреве биметаллическая пластинка прогибается в сторону слоя с меньшим коэффициентом линейного расширения тем сильнее, чем больше температура окружающей ее среды. При этом может замыкаться или размыкаться контактная пара, подвижный контакт которой закреплен на конце пластины.

Термобиметаллический датчик указывающих приборов снабжен нагревательной спиралью, включенной последовательно с контактами датчика. Срабатывание датчика зависит от суммарной температуры окружающей среды и создаваемой нагреваемой спиралью, т.е. от значения силы тока, протекающего в спирали. Такие датчики применяются только с указателями импульсной системы.

Датчики давления. Непременным элементом датчика давления является мембрана (плоская или гофрированная пластина), выполненная из бронзы или какого-либо иного эластичного материала,



а) *б*)

Рис. 63.50. Реостатный датчик:

а — с проволочной навивкой; *б* — из проводящих паст; *1* — резистор реостата; *2* — ползунок

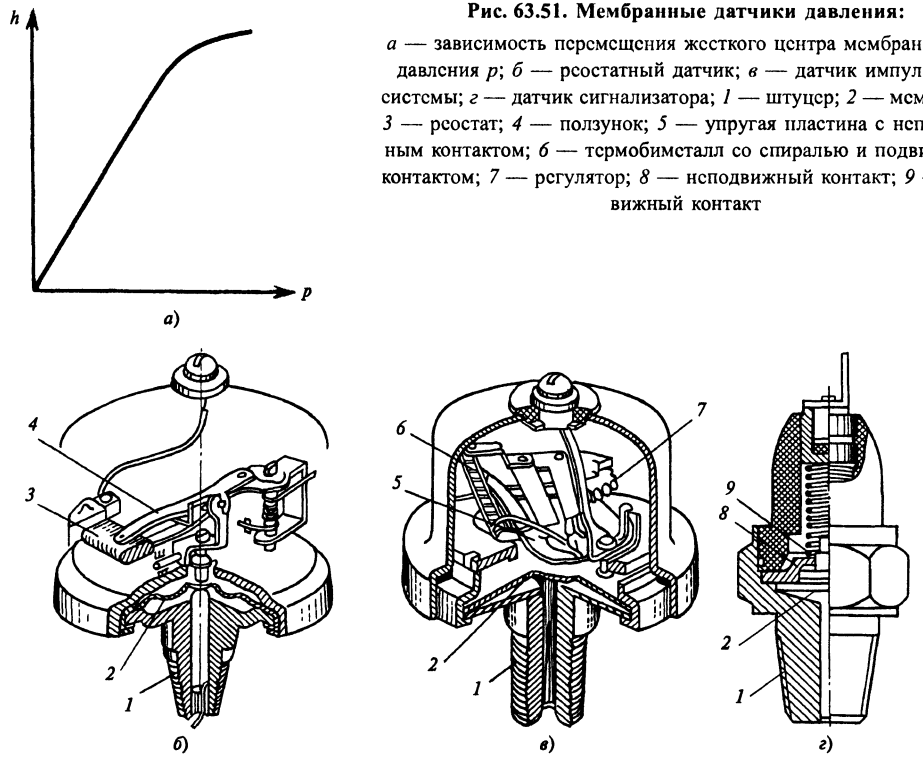


Рис. 63.51. Мембранные датчики давления:

а — зависимость перемещения жесткого центра мембраны *h* от давления *p*; *б* — реостатный датчик; *в* — датчик импульсной системы; *г* — датчик сигнализатора; *1* — штуцер; *2* — мембрана; *3* — реостат; *4* — ползунок; *5* — упругая пластина с неподвижным контактом; *6* — термобиметалл со спиралью и подвижным контактом; *7* — регулятор; *8* — неподвижный контакт; *9* — подвижный контакт

жестко зажатая по краям. Герметичная полость, расположенная под мембраной должна соединяться через штуцер с местом измерения давления. В большинстве случаев мембрану снабжают жестким центром, на котором укрепляют устройство, связывающее ее с передающим механизмом. Различие датчиков давления в основном состоит в механизме преобразования перемещений жесткого центра в электрический сигнал. Это зависит от системы измерения, в которой используется датчик. На рис. 63.51 изображены датчики давления.

Датчики электронных информационных систем. Применение электроники позволяет расширить класс датчиков, применяемых в информационных системах. Для измерения температуры нашли применение термопары, которые представляют собой соединение двух разнородных металлических проводов, главным образом из меди и константана, хромель-алюмеля, хромель-копеля. Поскольку термопара является маломощным источником ЭДС, точность ее показаний может быть обеспечена только в комплекте с высокоомным приемником, практически не потребляющим тока из входной цепи. Для измерения температуры применяются также интегральные датчики, в которых в качестве измеряемой величины используется напряжение перехода база—эмиттер кремниевого транзистора, которое в значительной мере зависит от температуры. Для измерения давления применяются тензометрические датчики.

Для информации об уровне топлива в баках применяется терморезистивный датчик. Похожим способом измеряется уровень топлива по значению емкости между двумя электродами, помещенными в бак. Емкость изменяется по мере выработки топлива, так как диэлектрическая проницаемость воздуха и топлива различны. Однако при таком способе измерения требуется подвод к датчику переменного напряжения.

Датчиком частоты вращения в электронных системах служит обычно система зажигания, частота следования импульсов которой связана с частотой вращения коленчатого вала двигателя. В информационных системах используются также индуктивные датчики или датчики Холла, подобные применяемым в системе зажигания.

УКАЗАТЕЛИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Обычно на автомобилях применяются указатели трех систем: магнитоэлектрические, электромагнитные и импульсные.

Магнитоэлектрические указатели. В качестве магнитоэлектрических указателей на автомоби-

лях применяются трехобмоточные логометры. Логометр имеет две обмотки L_1 и L_2, расположенные соосно, но намотанные встречно. Третья обмотка L_3 перпендикулярна первым двум (рис. 63.52). Применение трех обмоток позволяет повысить точность логометра, так как расширяет его шкалу до 120—160 °С. Рядом с обмотками располагается постоянный магнит, способный поворачиваться на своей оси и устанавливаться в направлении действия суммарной магнитодвижущей силы (МДС) всех трех обмоток. Магнит соединен со стрелкой прибора.

К достоинствам логометра следует отнести независимость его показаний от напряжения питания, так как с изменением напряжения токи всех обмоток и их МДС изменяются пропорционально и суммарная МДС не изменяется.

Кроме логометров на автомобилях, особенно в качестве вольтметров и амперметров, используются общепромышленные конструкции магнитоэлектрических указателей с неподвижной катушкой, воздействующей на поворотный магнит, соединенный со стрелкой или неподвижным магнитом и поворотной катушкой.

Электромагнитные указатели. В электромагнитных указателях поворотный якорек из магнитомягкого материала, соединенный со стрелкой, притягивается двумя расположенными под углом обмотками (рис. 63.53). При изменении сопротивления датчика $R_д$ соотношение токов в обмотках изменяется и якорек со стрелкой поворачивается в сторону большей силы притяжения. Уравновешивание действия магнитных сил на якорек и возврат стрелки в нулевое положение осуществляются под действием противовеса, которым снабжен якорек. Это накладывает определенные требования по ориентации электромагнитных указателей на приборном щитке.

Импульсные указатели. Импульсные указатели могут использоваться только с термобиметаллическими датчиками и составляют в комплекте с ними единую импульсную систему. Спирали указателя и термобиметаллического датчика включены последовательно (рис. 63.54). До включения прибора стрелка указателя находится вне пределов градуированной шкалы. Это является отличительным признаком импульсной системы. После включения прибора ток начинает протекать в общей цепи спиралей датчика и указателя, нагревая биметаллические элементы. Биметалл датчика изгибается, при этом размыкаются и его контакты, ток в общей цепи исчезает. Время нахождения контактов датчика в разомкнутом состоянии $T_р$ зависит от температуры окружающей среды, на которую и призван реагировать датчик термометра, и от давления на контакты, оказываемое извне, что характерно для измерителей давления. После остывания биметаллической пластины контакты замыкаются на время $T_з$ и ток вновь начинает протекать в общей цепи датчика и указателя, нагревая биметаллические элементы.

Таким образом, действующее значение тока $I_д$ в спирали, нагревающей биметалл указателя, зависит от относительного времени нахождения контактов датчика в замкнутом состоянии:

$$I_д = I_0\sqrt{T_з/(T_з + T_р)},$$

где I_0 — ток, устанавливающийся в цепи при замкнутых контактах.

Чем больше температура измеряемой среды или меньше давление на контакты, тем меньше время нахождения контактов в замкнутом состоянии

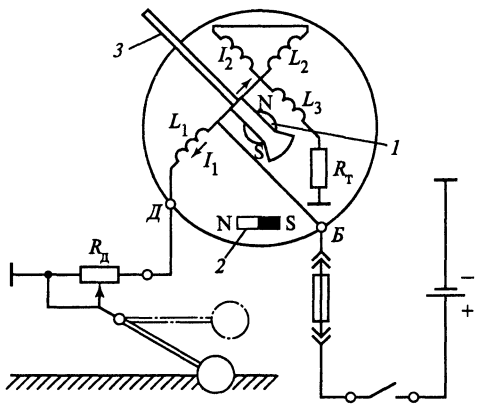


Рис. 63.52. Логометрический указатель:

1 — подвижный магнит; *2* — неподвижный магнит; *3* — стрелка; $R_д$ — датчик; $R_т$ — резистор термокомпенсации; *Б*, *Д* — обозначения выводов

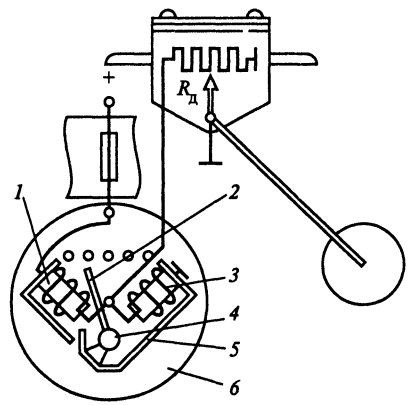


Рис. 63.53. Электромагнитный указатель:

1, *3* — катушки; *2* — стрелка; *4* — якорек; *5* — полюсные наконечники; *6* — корпус

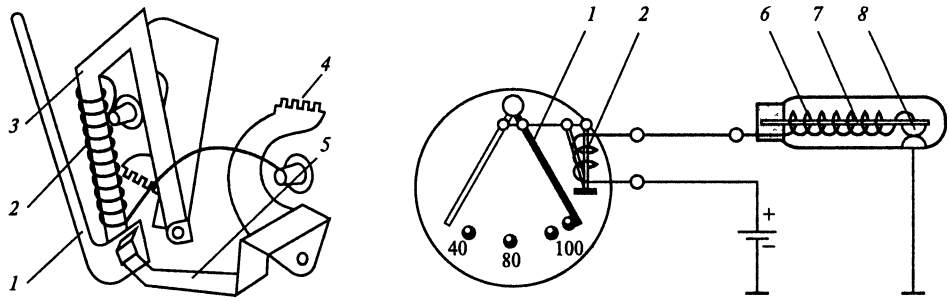


Рис. 63.54. Импульсная система:

а — устройство указателя; *б* — схема импульсного измерителя температуры; *1* — стрелка; *2* — спираль указателя; *3* — П-образная термобиметаллическая пластина; *4* — регулировочный сектор; *5* — упругая пластина; *6* — спираль датчика; *7* — биметалл датчика; *8* — контакты

и меньше ток, обтекающий спираль указателя. Следовательно, биметалл указателя меньше нагревается и деформируется, а также меньше отклонение стрелки от положения ее при выключенном приборе. Соответствующим образом градуируется шкала указателя.

ТЕРМОМЕТРЫ

Термометры применяются для контроля теплового режима двигателя, а также на некоторых автомобилях для контроля теплового состояния аккумуляторной батареи, смазочной системы, гидравлической трансмиссии, отопителя и т.п. В настоящее время для измерения температуры на автомобилях устанавливаются системы с магнитоэлектрическим логометром и терморезистивным датчиком. Приборы указывают температуру охлаждающей двигатель жидкости, температуру масла и температуру электролита аккумуляторной батареи. Схемы термометров, применяемых на автомобиле, представлены на рис. 63.55, *а* и *б*, а их параметры и применение — в табл. 63.18.

На автомобилях ВАЗ 21083, 21093, оборудованных микропроцессорной системой, в качестве датчика температуры установлена интегральная микросхема типа 19.3828 с диапазоном измерения температуры – 40— +125 °С и потреблением тока 0,001 А. Термобиметаллические датчики используются в системе аварийных сигнализаторов температуры. Схема их включения представлена на рис. 63.55, *в*. Параметры некоторых термобиметаллических датчиков температуры представлены в табл. 63.19.

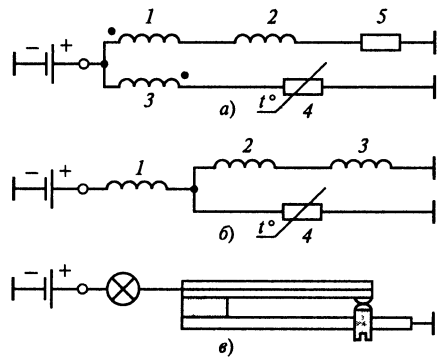


Рис. 63.55. Электрические схемы термометров:

а — с термокомпенсационным сопротивлением; *б* — без термокомпенсационного сопротивления; *в* — термосигнализатор; *1*, *2*, *3* — обмотки указателя; *4* — датчик; *5* — резистор термокомпенсации

ИЗМЕРИТЕЛИ ДАВЛЕНИЯ

Измерители давления применяются для определения давления в системе смазки, пневмосистеме тормозов, системе централизованной подкачки шин. В них используются магнитоэлектрические логометрические указатели давления с мембранными датчиками и реостатным выходом. Схема манометра с реостатным датчиком представлена на рис. 63.56, *а*. Добавочный резистор включается в системах напряжением 24 В для гашения напряжения. Технические данные некоторых типов измерителей давления приведены в табл. 63.20.

Датчики сигнализаторов аварийного давления мембранного типа включаются последовательно в цепь контрольной лампы или звукового сигнала (рис. 63.56, *б*). Основные параметры датчиков сведены в табл. 63.21.

Таблица 63.18

Тип термометра	Тип датчика	Пределы измерений температуры, °С	Напряжение, В	Применение
УК143 А	ТМ 100, А,В	40—120	24	КрАЗ, МоАЗ, БелАЗ
УК145 А	ТМ 100, А,В	40—120	12	Щитки КП 116, КП 120 Б2, КП 121 Г; УАЗ 469, ГАЗ 53-12, ГАЗ 66-11 и др.
УК 151	ТМ 100 А	40—120	12	Щиток КП 125 А; ГАЗ 31029, 3102, 4106
УК 193	ТМ 106	45—140	12	Щиток КП 128; ВАЗ 21021-01, 21212, 2106
20.3807	ТМ 106	45—140	12	Комбинация приборов типа 224.3801, 225.3801; ВАЗ 2108, 2109, 21086
23.3807	ТМ 106	45—140	12	Комбинация приборов типа 155.3801, 156.3801; ВАЗ 2107, 21076
30.3807	ТМ 106	45—140	12	Комбинация приборов типа 31.3801; ГАЗ 3105
33.3807	ТМ 106	45—140	12	Комбинация приборов типа 34.3801; ВАЗ 2110
34.3807	ТМ 106-10, 19.3828	45—140	12	Комбинация приборов типа 35.3801; ГАЗ 3302, 33021
36.3807	ТМ 100 А	40—120	24	КамАЗ 5320; ЛиАЗ 677
УК 173*	11.3842	–40—+40	24	ГАЗ 3301, МАЗ 5335, КамАЗ 4310
15.3807*	11.3842	–40—+40	12	ЗИЛ 431411

* Указатели температуры электролита аккумуляторной батареи.

Таблица 63.19

Тип датчика	Температура замыкания контактов, °С	Номинальное напряжение, В	Ток, А	Применение
ТМ 104	91—98	12; 24	0,2; 0,1	УАЗ, ГАЗ, МАЗ, ЗИЛ
ТМ 104-Т	102—109	12; 24	0,2; 0,1	ГАЗ, ВАЗ 2121
ТМ 111, ТМ 111-01	98—104	12; 24	0,25; 0,15	КамАЗ, ЗИЛ 4331, 4421, 4945, МАЗ 74103, БелАЗ 7519
ТМ 111-02, ТМ 111-03	102—109	12; 24	0,25; 0,15	ГАЗ 3102, 33015, 3402, 33021, МАЗ 5048, 5429 и др.
ТМ 111-04, ТМ 111-05	110—118	12; 24	0,25; 0,15	ГАЗ 31011, ЗИЛ 4906, 4104, 4105, МАЗ 7902, 7905 и др.
ТМ 111-06, ТМ 111-07	117—124	12; 24	0,25; 0,15	Специальные случаи применения
ТМ 111-08, ТМ 111-09	91—98	12; 24	0,25; 0,15	УАЗ 469, ГАЗ 2410 МАЗ, ЗИЛ

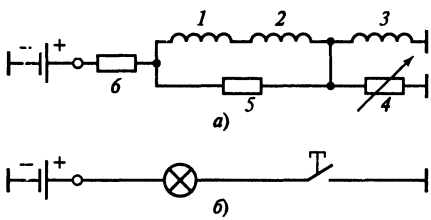


Рис. 63.56. Электрические измерители давления:
а — с реостатным датчиком и логометрическим указателем; *б* — сигнализатор аварийного давления; *1, 2, 3* — обмотки указателя; *4* — датчик; *5* — резистор термокомпенсации; *6* — добавочный резистор

ИЗМЕРИТЕЛИ УРОВНЯ ТОПЛИВА

В указателях уровня топлива используются магнитоэлектрические приборы (логометры) или, реже, электромагнитные указатели. Электромагнитные указатели соединяются с датчиком по схеме на рис. 63.53, магнитоэлектрические — по схемам на рис. 63.57, *а*, *б*. Схема на рис. 63.57, *б* характерна для системы напряжением 24 В и имеет добавочный резистор, гасящий напряжение. Параметры некоторых измерителей уровня топлива сведены в табл. 63.22.

Таблица 63.20

Тип прибора	Предел измерения давления, кгс/см^2	Тип датчика	Назначение	Применение
УК 130А	0—6	ММ358	Система смазки	Щиток КП116, КП120Б и др.; УАЗ 469, ГАЗ 66-0.1, ЗИЛ 431610 и др.
УК 140А	0—6	ММ358	Система смазки, пневмосистема	ГАЗ 4905, 5903, 3402
УК 168	0—10	ММ355	Пневмосистема	МАЗ 6422, 5432; БелАЗ 7421, 7548; МоАЗ 6007, 7914
УК 194	0—8	ММ393А	Система смазки	ВАЗ 21212, 2106
28.3810	0—6	23.2829	То же	Комбинация приборов 35.33801; ГАЗ 3302, 33021
11.3810	0—20	11.3829	»	БелАЗ, МоАЗ
15.3810	0—6	ММ358, 19.3829	»	УАЗ 315, 3741; ГАЗ 66-01, 3307; ПАЗ 3205
16.3810	0—20	16.3820	Гидросистема	БелАЗ 7521, 5496, 7508
33.3810	0—10	ММ370, 18.3829	Система смазки, пневмосистема	ГАЗ 3301, 4310; КамАЗ 5320

Таблица 63.21

Тип датчика	Предел срабатывания, кгс/см^2	Назначение	Напряжение, В	Применение
2602.3829	0,4—0,8	Датчик аварийного давления масла	12; 24	АЗЛК, ЗИЛ 433420; КамАЗ
2702.3829	4,5—5,5	Датчик аварийного давления воздуха	12; 24	ЗИЛ 43331, 433360; ГАЗ 6611; КамАЗ
30.3829	0,4—0,8	Датчик аварийного давления масла	12	ГАЗ 33021
31.3829	0,2—0,5	Датчик сигнализатора вакуума	12	ГАЗ 3307, 3306

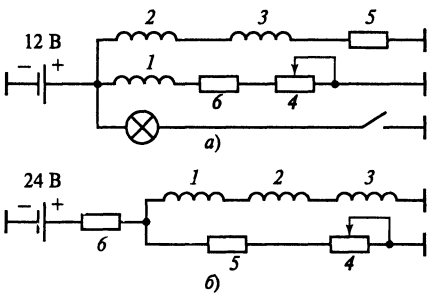


Рис. 63.57. Схемы магнитоэлектрических указателей:

а — для системы напряжением 12 В; *б* — для системы напряжением 24 В; *1*, *2*, *3* — обмотки указателя; *4* — датчик; *5* — резистор термокомпенсации; *6* — добавочный резистор

ИЗМЕРИТЕЛИ ЗАРЯДНОГО РЕЖИМА АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

В качестве измерителей зарядного режима аккумуляторной батареи используются амперметры, вольтметры и индикаторы заряда аккумуляторной батареи, причем амперметры на последних моделях отечественных и зарубежных автомобилей не устанавливаются.

Амперметры и вольтметры — приборы магнитоэлектрической системы. Основное отличие амперметра от вольтметра состоит в том, что измерительная катушка амперметра подключена к шунту, установленному в приборе или вне его, по которому протекает измеряемый ток, измерительная же цепь вольтметра включается непосредственно в место измерения напряжения. Шкала вольтметра в системе электрооборудования напряжением 12 В

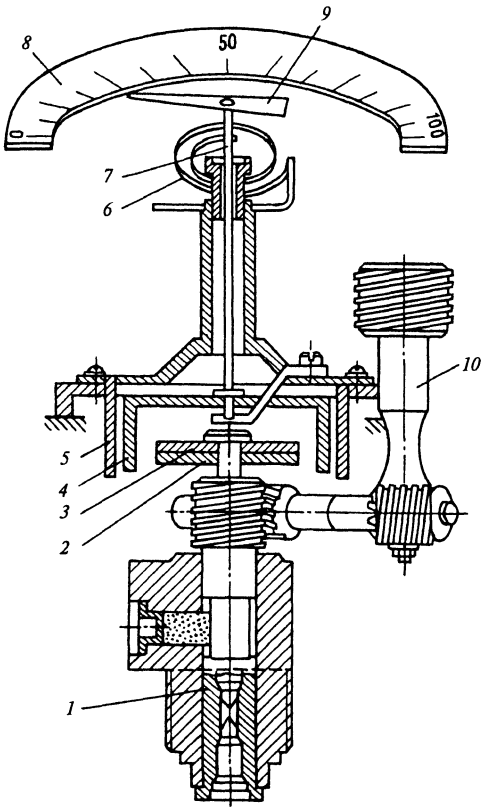


Рис. 63.58. Устройство спидометра:

1 — приводной вал; *2* — постоянный магнит; *3* — термомагнитный шунт; *4* — картушка; *5* — магнитопровод; *6* — пружина; *7* — вал стрелки; *8* — шкала; *9* — стрелка; *10* — привод счетчика пройденного пути

имеет пределы от 8 до 16 (16—32) В и снабжена разноцветными секторами.

СПИДОМЕТРЫ И ТАХОМЕТРЫ

Спидометры снабжают информацией водителя о скорости движения автомобиля и о пройденном пути. Соответственно спидометр состоит из двух узлов — скоростного, собственно спидометра, и счетного (одометра), указывающего пробег автомобиля.

Привод спидометра осуществляется гибким валом от коробки передач, если длина приводного троса не превышает 3,55 м, или с помощью электрического синхронного привода. Скоростной узел спидометра, преобразующий частоту вращения его входного вала в перемещение стрелки, принципиально устроен одинаково у всех типов спидометров (рис. 63.58) и работает по принципу заторможенного асинхронного электродвигателя: постоянный магнит увлекает за собой заторможенную пружиной и соединенную со стрелкой картушку на угол, пропорциональный скорости движения автомобиля. Счетный узел спидометра приводится во вращение от входного вала через червячную передачу, промежуточный вал и его червячные передачи. Счетный узел состоит из набора цилиндрических барабанчиков, свободно установленных на общей оси. На их цилиндрическую поверхность нанесены цифры от 0 до 9.

Приводной вал спидометра с электроприводом вращается электродвигателем, получающим питание от датчика, выполненного в виде синхронного генератора, возбуждаемого постоянным магнитом. Соединение между датчиком и электродвигателем происходит через электронный усилитель. Электронные спидометры типа 45.3802 автомобилей ВАЗ 2110 и 56.3802 автомобилей ГАЗ 3110 получают сигналы от датчика Холла, расположенного на коробке передач. Электронная схема преобразует сигналы в напряжение, пропорциональное скорости движения автомобиля. В соответствии с международными стандартами датчик вырабатывает 6 тыс. импульсов за 1 км пути. Основные параметры некоторых типов спидометров представлены в табл. 63.23.

Электрические тахометры имеют скоростной узел, аналогичный узлу спидометра. Тахометры с электроприводом используют те же датчики, что и спидометры, и ту же схему управления. Однако в последнее время более широкое распространение получили электронные тахометры. Шкала тахометра имеет цветовые секторы: зеленый — допустимая частота, красный — опасный скоростной режим.

Датчиком для электронного тахометра является первичная цепь системы зажигания, откуда на тахометр поступают импульсы, частота следования которых пропорциональна частоте вращения двигателя. Схема электронного тахометра представлена на рис. 63.59. Технические данные некоторых типов тахометров приведены в табл. 63.24.

ЭКОНОМЕТР

Эконометр позволяет рационально расходовать топливо, особенно при движении по прямой или на ускоряющих передачах. Фактически эконометр представляет собой манометр, измеряющий давление во впускном коллекторе двигателя, для чего его вход снабжен шлангом с впускным трубопроводом за дроссельной заслонкой. Устройство эконометра непосредственного действия представлено на рис. 63.60.

Таблица 63.22

Тип указателя	Тип датчика	Система указателя	Номинальное напряжение, В	Применение
УБ 125А	БМ-127Д	Электромагнитная	24	МАЗ 5335, 5429, МоАЗ 6401
УБ 283	22.3827	»	12	Комбинация приборов типа 20.3801; ЗАЗ 1102
УБ 285	11.3827	»	12	Комбинация приборов типа 211.3801; АЗЛК 2141
УБ 170-01	БМ158-Д	Магнитоэлектрическая	24	КамАЗ, МоАЗ
УБ 116 А	20.3827	»	12	Комбинация приборов типа КП 125 А; ГАЗ 2410, 3102, 2429
13.3806	БМ 150Д	»	12	Комбинация приборов типа КП 128; щиток типа 17.3805; ВАЗ 2103, 2106, 1212, ЗИЛ 431410
УБ 191 Б	34.3827	»	12	Комбинация приборов типа КП-191А2; ВАЗ 2101, 1111 «Ока»
161.3806	24.3827	»	12	Комбинация приборов типа 225.3801, 226.3801; ВАЗ 21086, 21096
31.3806	—	»	12	Комбинация приборов типа 34.3801; ВАЗ 2110
24.3806	—	»	12	Комбинация приборов типа 31.3801; ГАЗ 3105
32.3806	571.3827	»	12	Комбинация приборов типа 35.3801; ГАЗ 3302, 33027
УБ 285	11.3827	»	12	Комбинация приборов типа 211.3801; АЗЛК 2141

Таблица 63.23

Тип спидометра	Привод	Диапазон показаний, км/ч	Передаточное отношение к счетному устройству	Применение
СП193А	Гибкий вал	0—180	1000	ВАЗ 2106, 2121
26.3802		0—180	1000	Комбинация приборов типа 313801; ВАЗ 2108, 2109
43.3802		0—180	624	Комбинация приборов типа 31.3801; ГАЗ 3105
16.3802		0—120	624	Щиток 17.3805; ЗИЛ 431410
35.3802		0—180	624	Комбинация приборов типа 35.3801; ГАЗ 3302, 33021
36.3802		0—180	1000	Комбинация приборов типа 224.3801; ВАЗ 2108, 2109
37.3802		0—180	624	ГАЗ 3102, 31029
СП 152		0—120	624	МАЗ 5432, 54321; КрАЗ 65101, 6510
СП 153		0—100	624	БелАЗ 548А, 6411; МоАЗ 54617, 7914
11.3802		0—120	624	ЗИЛ 133Г3; ЛАЗ 6951
121.3802		0—120	624	КамАЗ 4310, 5510
15.3802		0—120	624	ЛиАЗ; ЛАЗ
СП 270-А		0—180	1000	«Москвич 2141», ИЖ 126
59.3802		0—180	1000	ВАЗ 21099
56.3802	Электронный	0—200	—	ГАЗ 3110
45.802		0—200	—	Комбинация приборов типа 34.3801; ВАЗ 2110

Таблица 63.24

Тахометр	Диапазон измерения, об/мин	Напряжение питания, В	Датчик	Применение
ТХ193	1000—8000	12	Система зажигания	ВАЗ 2106, 2121
ТХ200	1000—8000	12	Система зажигания	Москвич 2141, ИЖ 2126
252.3813	1000—3000	24	Фаза генератора	МАЗ 54321, 64221
254.3813	1000—3000	12	Фаза генератора	ЗИЛ 4331
35.3813	500—4500	12	Система зажигания	ГАЗ 3302
33.3813	1000—8000	12	Система зажигания	ВАЗ 2110

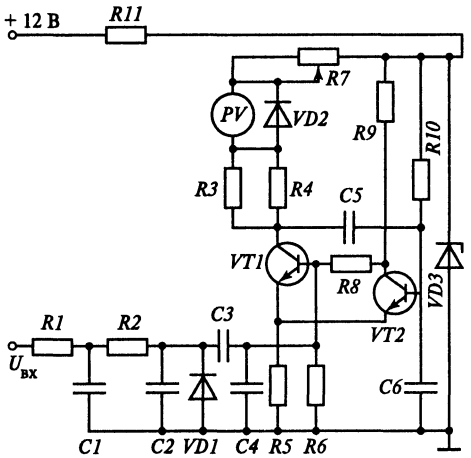


Рис. 63.59. Схема электронного тахометра

ТАХОГРАФЫ

Тахографы устанавливаются на автомобилях, совершающих дальние междугородние и международные рейсы в соответствие с рекомендациями Европейской экономической комиссии. Цель установки тахометра — контроль за режимом работы автомобиля и его водителя, объективное расследование обстоятельств в случае возникновения дорожно-транспортного происшествия.

Тахограф позволяет регистрировать на диаграмме скорость движения, пройденный путь, время стоянки и работы двигателя, текущее время, расход топлива. Часовой механизм поворачивает круглую диаграмму. В применяющихся на отечественных автомобилях тахографах ТЭМС-1 перемещение диаграммы осуществляется шаговым двигателем этого механизма. Перемещение пера самописца скорости осуществляется двигателем постоянного тока. Для записи расхода топлива используется также шаговый двигатель. В тахографе регистрируются случаи его вскрытия и вскрытия электронного блока. В последнее время на зарубежных

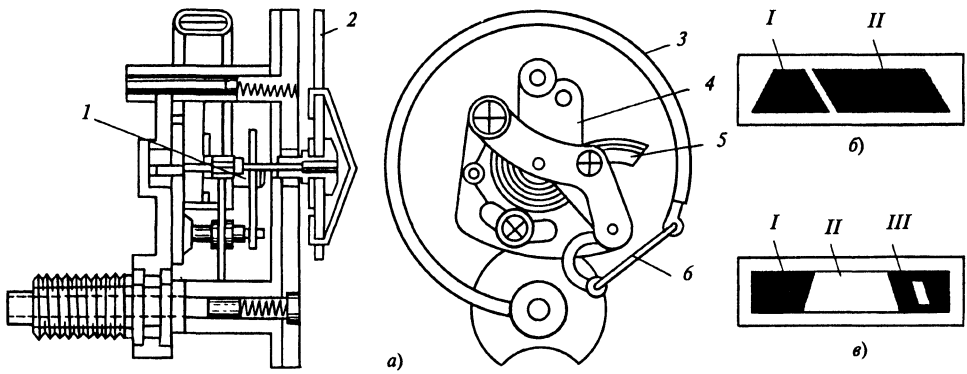


Рис. 63.60. Эконометр:

а — устройство; *б* и *в* — шкалы с двумя и тремя зонами; *1* — трубка; *2* — стрелка; *3* — упругая трубка; *4* — пружина; *5* — зубчатый сектор; *6* — тяга; *I*, *II*, *III* — зоны шкалы

автомобилях появляются тахографы с записью показаний в память электронных устройств.

ЭЛЕКТРОННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Электронные информационные системы значительно расширяют возможности получения информации при малом объеме приборной панели. Электронная панель приборов способна по желанию водителя выдавать на экран несколько вариантов информации, в том числе с дублированием ее голосовым сообщением.

Управление электронной информационной системой осуществляет бортовой компьютер, в который стекается информация с датчиков. Аварийная информация передается водителю без его воли, другая же поступает по его запросу или непрерывно.

Для электронной индикации применяются электронно-лучевые трубки, жидкокристаллические индикаторы и т.п. Панели с электронно-лучевой трубкой позволяют во время стоянки принимать телепрограммы, а также вызывать на панель карту местности с ориентировкой на ней автомобиля. Компьютер способен не только оценить аварийную ситуацию, но и выявить тенденцию, направленную к появлению такой ситуации, заранее предупредив водителя о возможных последствиях.

Электронная информационная система предоставляет возможность через спутниковую связь или через связь с местными станциями информировать водителя об оптимальном маршруте движения.

К недостаткам таких систем следует отнести высокую стоимость и высокую сложность, необходимость квалифицированного обслуживания и ремонта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

63.1. **Чижков Ю.П., Акимов С.В.** Электрооборудование автомобилей. М.: За рулем, 1999.

63.2. **Справочник** по электрооборудованию автомобилей / С.В. Акимов, А.М. Здановский и др. М.: Машиностроение, 1994.

63.3. **Электрооборудование** автомобилей: Справочник / А.В. Акимов, О.А. Акимов и др.; Под ред. Ю.П. Чижкова. М.: Транспорт, 1993.

63.4. **Акимов С.В., Акимов А.В.** Автомобильные генераторные установки. М.: Транспорт, 1995.

63.5. **Акимов А.В., Акимов С.В., Лейкин Л.П.** Генераторы зарубежных автомобилей М.: За рулем, 1997.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Автомат для дуговой сварки 443
Автономный инвертор напряжения (АИН) 606—608
— — тока (АИТ) 608
Агрегат комплексной обработки стали 312
— тяговый 581
Активная составляющая тока плеча 534

Б

Батарея аккумуляторная 589, 646

В

Ввод 557
Вентилятор градирни 68
— установок кондиционирования 68
Вибропогружатель свайный 69
Виды защит системы и механизма ТРН—АД 21, 64
— индикации и диагностики 64
Включение регулируемой и нерегулируемой частей обмотки трансформатора 597—600
Возбуждение смешанное 611, 612
Время переходного процесса 13
Выпрямитель сварочный 439

Г

Газотурбовозы 577
График движения 533
Генератор 633
— бесщеточный 642
— коротких импульсов 394
— ламповый для нагрева диэлектриков 340
— постоянного тока тяговый 580
— развертки 346
— синхронный тяговый 581
— ультразвуковой 397

Д

Датчик давления 118, 681
— дискретный 119
— крутящего момента 117
— линейного перемещения 117
— магнитного потока 109
— напряжения 108
— положения 115
— -распределитель 670
— реостатный 681
— скорости 109
— термобиметаллический 681
— терморезистивный 681
— тока 108
— усилия 117
— Холла 682
— частоты вращения 682
Двигатель асинхронный 46
— вентильный 48
— постоянного тока последовательного возбуждения 25, 44
— — — с возбуждением от постоянного магнита 44
— — — с независимым возбуждением 44
— — — со смешанным возбуждением 25, 44
— — — специальный 46
— синхронный 48
— тяговый 520
Движение ЭП неустановившееся 11
— — установившееся 11
Действующее значение тока проводов контактной сети 531
Диаграмма нагрузочная 225
— пусковая 21
— скорости 225
Длина пролета 542

З

Защита максимально токовая 180
— нулевая 180
— тепловая 180

И

Измеритель давления 684
— зарядного режима аккумуляторной батареи 686
Изолятор 553
Индекс помещения 503
— цветопередачи 497
Индуктивность — индуктивный шунт (ИШ) 611

К

Каскад вентильный 33
Катод плазмотрона 349
Катушка зажигания 668
Классификация ЭП 6, 7
Командоконтроллер 184
Коммутация тока принудительная 604, 605
Компенсатор реактивной мощности 602, 603
Компенсация мощности реактивная 562
Компьютер промышленный 123, 127, 143
Консоль 545
Контраст яркостный 489
Контроллер программируемый логический 123, 128
— — специализированный 124, 159
Контроллер промышленный 123, 127, 149
— технологический 123, 125
— управления движением 150, 154
Коэффициент динамичности 241
— запаса 492
— мощности асинхронного двигателя 28
— неравномерности по силе тяги 616
— — — току 616
— — — ускорению 616
— ослабленности 492
— полезного действия 20

— пульсации освещенности 492
— сцепления 527, 588
Кривая намагничивания 22
Кривая равных значений относительной освещенности 514

Л

Лазер 353, 356
Лазерное оборудование 353
Лампа люминесцентная высокого давления 466
— — низкого давления 464
— накаливания 462
— — галогенная 464

М

Материалы электропечей специальные 379
Машина рабочая 6
Мачта прожекторная 513
Мельница шаровая 68
Метод коэффициента использования 503
— отрезков 21
— пропорций 21
— расчета точечный 505
— средних потерь 227
— удельной мощности 503
— эквивалентного момента 227
— — тока 227
Механизм перемещения электродов 310
Механотрон 115
Микроконтроллер «Motor Control» 124, 159, 160
Момент динамический 9
— критический 27
— нагрузки 11
Мотонасос 675
Моторедуктор 673

Н

Нагрев электронно-лучевой 341
Нагрузка ветровая 549
— динамическая 242
— от гололедных образований 549
— районная 537
— тяговая загруженного плеча питания 537
Надежность бытовой техники 273
Нанесение порошковых покрытий 421
Независимое возбуждение тяговых машин 609, 610
Неравномерность освещения 492
— освещенности 510
Нормы освещенности 489

О

Обработка электрохимическая 386
— электроэрозионная 382
Ограничение по межламельному напряжению 590
— сил тяги и торможения по мощности электрооборудования 590
— тяговой и тормозной областей 588
— — машины по реактивной ЭДС 590
— условиями сцепления 588
Опора железобетонная 544
— металлическая 545
Опрокидывание инвертора 629
Орган исполнительный рабочей машины 6
Освещение аварийное 489, 507, 510
— искусственное 489
— комбинированное 489
— наружное 510, 512
— общее 489
— охранное 489, 510
— прожекторное 513
— рабочее 489
— улиц, дорог и площадей 511
Освещенность 459
— рабочих мест 492

П

Падение напряжения в рельсах максимальное 542
Пакет математический MatCad 230
— — MatLab 230
— — Simnon 230
Перегруппировка тяговых машин 592, 615, 616
Передача механическая 5
— — в электроприводе 48
— электрическая 526
Переходные процессы 12
Печь дуговая вакуумная 320
— — постоянного тока 312
— — сталеплавильная переменного тока 305
— индукционная канальная 331
— — — тигельная 334
— непрерывного действия 287
— периодического действия 284
— электрошлакового переплава 326
Питание двустороннее 533
— одностороннее 533
Плазмотрон 346
— высокочастотный индукционный 351
— струйный 348
Плазмохимический процесс 352
— реактор 352
Плотность тока экономическая 531
Подвеска контактная рессорная 551
— — цепная 551
Подстанция тяговая 555
Подъемник 237—239
Подъемный кран 237
Показатели способов регулирования скорости 14
— технические электроприводов бытовых устройств 274
Показатель дискомфорта 492
— ослепленности 492
Поперечина гибкая 545
— жесткая 547
Постоянная времени двигателя электромагнитная 34
— — электромеханическая 12

Построение пусковой диаграммы 613—619
Потери мощности 38
— — в трансформаторе 536
— энергии 39
Поток световой 459
Преобразователь выпрямительно-инверторный полупроводниковый 569
— инверторный 569
— линейных перемещений 119
— тиристорный 51, 53
— угла кодирующий 119
— частоты 69—72, 86
— — двухзвенный с автономным инвертором напряжения 74
— — и числа фаз 606—609
— четырехквадрантный 605, 606
— электроэнергии 5
Прерыватель-распределитель 668
Пресс штамповочный 69
Прибор осветительный 471
Приведение коэффициента жесткости 8
— моментов инерции и масс 8
— — — — — сил 8
— переменных и параметров цепи ротора 26
Проверка по нагреву 225
— — перегрузке 225
— — условиям пуска 225
Провод комбинированный 549
— контактный 542
Прожектор 485
Проектирование осветительных установок 489
Пульсация светового потока 492
Пускатель магнитный 180
— «мягкий» 30
Пускорегулирующий аппарат 469
Пушка электронная 345

Р

Размер движения заданный 533
Размещение светильников 499
Распылитель электромеханический 421
Расход энергии удельный 529
Расчет выпрямителя 81
— горизонтальной освещенности 505, 506
— инвертора 80
— параметров охладителя 82
— регулировочных резисторов 21
— снаббера 85
— тяговый 526
— фильтра 83
Реактивная составляющая тока плеча 534
Реактор переходный 598
Регулирование возбуждения импульсное 612
— импульсное 24
— момента и тока 15
— напряжения 595
— — плавное 600, 601
— — ступенчатое 596
— положения 15
— потока возбуждения тяговых машин 609—613
— силы тяги 591
— скорости 14
— — асинхронного двигателя в каскадных схемах 32
— сопротивления пусковых резисторов плавное 594
— тормозной силы электрического тормоза 619—631
Регулятор автоматический ДСП 365
— мощности тиристорный 368
— напряжения 643
— — импульсный 593
— — тиристорный 60, 64
— — ЭПС переменного тока 595
— — — постоянного тока 592
— — — с бесколлекторными тяговыми машинами 606—609
— температуры 361
Режим короткого замыкания 19
— двигательный 20
— работы ТРН—АД 64
— — холостого хода 20
— электродвигателя генераторный 70
Резистор пусковой 592
Рекуперация импульсная 627, 628
Реле тяговое 653

С

Сварка дуговая плавящимся электродом 433
— электрическая контактная 444
— электрошлаковая 444
Светильник 474, 492
Светимость 459
Светораспределение 497
Свеча зажигания 670
Сельсин 115
Сепаратор электрический 424
Сертификат соответствия 235
Сертификация 235
Сеть контактная 542
Сила конвейера тяговая 253
— света 459
— тяги удельная 527
Симметрирование нагрузки контактной сети питания тяговых машин 598—600
Система зажигания 662, 664—666
— информационно-измерительная 680
— источник тока—двигатель 23
— освещения 492
— преобразователь—двигатель 22
— сертификации 235
— ТРН—АД 60, 61
— управления автоматическая дуговыми сталеплавильными печами 374
— — — плазменными установками постоянного тока 374

— — движением 150
— — индукционными печами 379
— — печами электрошлакового переплава 376
— — рудовосстановительными печами 371
— — ЭП 6
— электронная информационная 690
— электроснабжения автомобилей и тракторов 633
— электростартерного пуска 646
Скольжение двигателя 26
— критическое 27
Скорость идеального холостого хода 19
Снаббер 85
Сопротивление движению удельное 527
— рельсов активное 538
— тяговой сети 534
Состав подвижной теплоэлектрический 526
— — электрический 519
Спидометр 687
Способ повышения коэффициента мощности 602—605
Среднее значение падения напряжения 531
— — потерь мощности 532
— напряжение на токоприемнике 532
Стрела провеса провода 550
Структуры электропривода 15
Схема замещения 38
— звезда—двойная звезда 31
— расчетная многомассовая 9
— — одномассовая 9
— с общим усилителем 16
— — подчиненным регулированием 16
— секционированного моста 601, 602
— сертификации 236
— треугольник—двойная звезда 31
— управления электроприводом 675
— циклической стабилизации 625, 626
— электрическая системы электроснабжения 635

Т

Тахограф 689
Температура цветовая 497
Тепловозы 577
Термометр 684
Ток средний подвижной единицы 530
Ток эквивалентный 532
Торможение генераторное частотное 70
— динамическое 20
— противопереключением 20
— рекуперативное 520, 625—629
— — выпрямительного ЭПС переменного тока 628, 629
— — классическое 625—627
— рекуперативно-реостатное ЭПС постоянного тока 629—633
— реостатное 521, 620—624
— с рекуперацией энергии в сеть 20
Трамваи 521
Транзистор биполярный с изолированным затвором IGBT 78
Транспорт электрический 519
Трансформатор вращающийся 115
— печной 307
— понижающий 561
— преобразовательный 566
— сварочный 434
— трехфазный тяговый 537
Троллейбусы 521

У

Угловой размер объекта различения 489
Угол защитный 474, 510
Указатель импульсный 683
— магнитоэлектрический 683
— уровня топлива 685
— электромагнитный 683
Управление микропроцессорное 63
— автоматическое электротермической установкой 359
— амплитудное 607
— движения ЭП 7
— микропроцессорное 63
— работой АИН 180-градусное 607
— — — 150-градусное 607
— релейное 365
— фазоимпульсное тиристорами 364
— широтно-импульсное 365
Уравнение движения поезда 526
— состояния провода 551
Установка диэлектрического нагрева 330, 340
— индукционная для поверхностной закалки 338
— — — сквозного нагрева 337
— индукционного нагрева 330
— пламенного нагрева 346
— электрогидравлическая 399
Устойчивость движения 11
Устройство информационное 6
— распределительное 557
— — открытое 558
— сопряжения 6
— управляющее 6
— электрокаплеструйное 430
— электронное автоматического отключения и блокировки включения стартера 661
Участок контактной сети эквивалентный 540

Ф

Фаззи-логика 216
Фаззи-множество 217

Х

Характеристика выпрямителя внешняя 618
— двигателя механическая 10, 11
— жесткая механическая для механизмов 244, 245
— исполнительного органа механическая 10

— синхронного двигателя U-образная 35
— — — угловая 35
— тормозная идеальная 623
— электромеханическая 19
Характеристики универсальные 25

Ц

Цветопередача 497

Ш

Широтно-импульсная модуляция 607
Шунтирование обмотки возбуждения 610
— якоря 24

Э

Эконометр 687
Экскаватор 237
Экспозиция световая 459
Электровозы 519
Электродвигатель 5
— с возбуждением от постоянного магнита 671
— — электромагнитным возбуждением 671
— тяговый 584
Электромобили 526
Электропечи рудовосстановительные 307
— сопротивления 283
Электропоезда 521
Электропривод вентильно-индукторный 37
— вспомогательного оборудования 671
— с вентильным двигателем 36
— — шаговым двигателем 36
— тяговый 521
— частотно-управляемый асинхронный 213
Электроснабжение внешнее 556
— децентрализованное 571
— централизованное 571
Электростартер 653
Электротехнология комбинированная 390
— светолучевая 389
— ультразвуковая 389
— электрокаплеструйная 426
— электрофизико-химическая 379
Электрофотография 426
Энергия световая 459
Энергосбережение 42
Эффективность энергетическая 279

Я

Яркость 459

Справочное издание

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК. Т. 4
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Редакторы *Н.Л. Пароева, Л.А. Решмина, М.П. Соколова*
Художник *А.Ю. Землеруб*
Технический редактор *З.Н. Ратникова*
Корректоры *Р.М. Ваничкина, В.В. Сомова*
Оригинал-макет подготовлен Издательством МЭИ

ЛР № 020528 от 05.06.97

Подписано в печать с оригинала-макета 15.11.02 Формат 70×100 1/16
Бумага офсетная Гарнитура «Таймс» Печать офсетная
Усл. печ. л. 56,1 Усл. кр.-отт. 56.1 Уч.-изд. л. 74,3
Тираж 1000 экз. Заказ 5098 С-024
Издательство МЭИ, 111250, Москва, Красноказарменная ул., 14.
Отпечатано в ОАО «Типография «НОВОСТИ», 107005, Москва, ул. Фридриха Энгельса, д. 46.