



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Институт повышения квалификации
и переподготовки

Кафедра «Электроснабжение»

В. Д. Елкин

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИЙ

ПОСОБИЕ

**для слушателей специальности
переподготовки 1-43 01 78 «Диагностика
и техническое обслуживание
энергооборудования организаций»
заочной формы обучения**

Гомель 2021

УДК 621.313.1(075.8)
ББК 31.281.1я73
Е51

*Рекомендовано кафедрой «Электроснабжение»
ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 5 от 02.12.2020 г.)*

Рецензент: доц. каф. «Автоматизированный электропривод» ГГТУ им. П. О. Сухого
канд. техн. наук, доц. *Л. В. Веннер*

Елкин, В. Д.
Е51 Электротехническое оборудование организаций : пособие для слушателей специальности переподготовки 1-43 01 78 «Диагностика и техническое обслуживание энергооборудования организаций» заоч. формы обучения / В. Д. Елкин. – Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2021. – 138 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Пособие состоит из одиннадцати разделов теоретической части, составленных по программе дисциплины.

Теоретический материал имеет и основывается на современных нормативных документах в области электротехнического оборудования.

Может быть рекомендовано для слушателей специальности 1-43 01 78 «Диагностика и техническое обслуживание энергооборудования организаций» ИПКиП Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого.

**УДК 621.313.1(075.8)
ББК 31.281.1я73**

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Классификация электрического оборудования и электрических аппаратов	5
2 Характеристика машин постоянного тока	9
3 Силовые трансформаторы и трансформаторные подстанции	14
4 Характеристика асинхронных электродвигателей	21
5 Пуск и регулирование частоты вращения электродвигателей	25
6 Синхронные электродвигатели и компенсаторы	31
7 Расчет мощности и выбор типа двигателя	33
8 Термическая стойкость и динамическая устойчивость электрических установок	53
9 Схемы электрических соединений электрических станций и подстанций	59
10 Электрооборудование электротехнологических установок	63
11 Электрические осветительные установки	124
Литература	140

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития энергетической отрасли эксплуатация электротехнического оборудования требует глубоких и разносторонних знаний. Современное производство характеризуется большим многообразием технологических процессов. Для их осуществления созданы тысячи самых разнообразных машин и механизмов.

Обработка материалов и изделий осуществляется на станках, прокатных станах, прессах. Перемещение материалов, изделий, жидкостей, газов производится с помощью конвейеров, подъемных кранов, лифтов, насосов, вентиляторов, компрессоров и т.д.

Задачи создания нового или модернизация существующего электротехнического оборудования технологических установок, станков, механизмов, машин решается совместными усилиями высококвалифицированных специалистов различных направлений.

Требования к электрооборудованию вытекают из технологических данных и условий. Электротехническое оборудование нельзя рассматривать в отрыве от конструктивных и технологических особенностей работы электрифицированных агрегатов, механизмов. Поэтому специалисты в области электротехнического оборудования промышленных предприятий, организаций должны быть хорошо знакомы как с электрической частью, так и с основами технологических процессов, конструкцией станков металлообработки, деревообработки, установок электрического нагрева, электросварки, грузоподъемных установок и т.д.

Электротехническое оборудование промышленных предприятий и других организаций проектируется, монтируется и эксплуатируется в соответствии с нормативными документами в области устройства и эксплуатации электроустановок.

Учебное пособие курс лекций «Электротехническое оборудование организаций» может быть рекомендовано в качестве учебного пособия для слушателей специальности 1-43 01 78 «Диагностика и техническое обслуживание энергооборудования организаций» института повышения квалификации и переподготовки Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого с последующим применением в учебном процессе.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Электрооборудование промышленных предприятий классифицируется и характеризуется по ряду признаков:

- по назначению – основной функции выполняемой оборудованием;
- по степени защиты от факторов окружающей среды (IP00);
- по характеру преобразования электрической энергии в другой вид энергии (механическую, тепловую, световую или другой вид энергии);
- по роду тока (переменный или постоянный);
- по величине тока;
- по величине напряжения (до 1 кВ и свыше 1 кВ);
- по режиму работы;
- по исполнению.

По характеру действия на обрабатываемое вещество все электротехнические установки подразделяются на:

- электромеханические;
- электрофизические;
- электрохимические,
- электротермические,
- электрокинематические

Классификация электротехнологических установок представлена на рисунке 1.1.

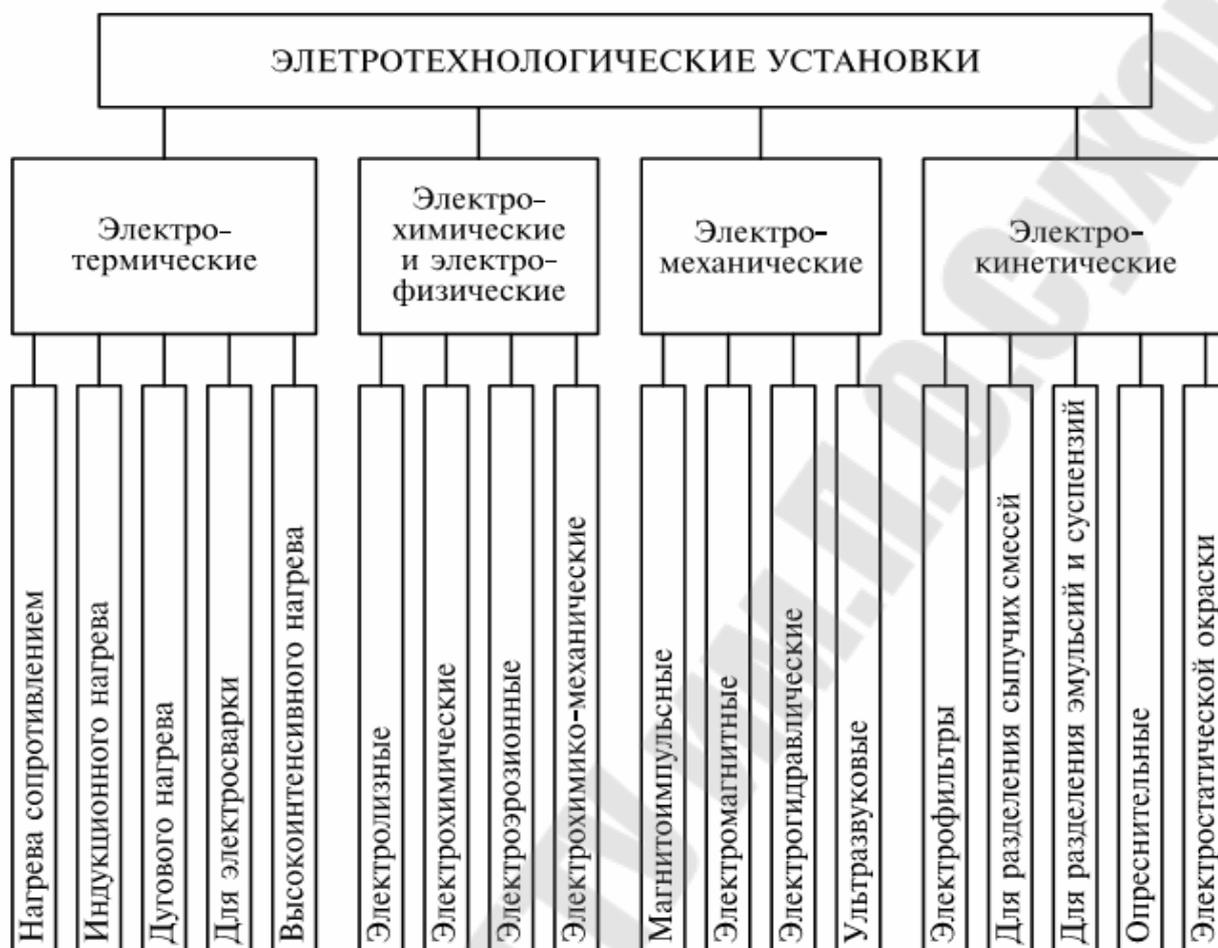


Рис. 1.1. Классификация электротехнологических установок

Тип классификации по исполнению – можно проанализировать на примере электродвигателей рис. 1.2.

Классификация электродвигателей по режиму работы

Для обеспечения нормальной работы станка при подобной переменной нагрузке двигатель должен удовлетворять двум условиям: развивать наибольшую мощность, требуемую в процессе обработки, и не перегреваться свыше нормы при работе с переменной нагрузкой.



Рис. 1.2. Классификация электродвигателей

В продолжительном режиме с постоянной нагрузкой (S1) работают главные приводы крупных токарных, карусельных, шлифовальных, зубофрезерных и других станков. Номинальная мощность двигателя в этом случае должна быть выбрана равной или немного большей номинальной мощности станка, определяемой по наибольшей мощности резания.

Перемежающийся режим работы с частыми реверсами (S7) характерен, например, для главного привода продольно-строгальных станков. Мощность двигателя здесь выбирается по нагрузочной диаграмме методом средних потерь или эквивалентных величин.

В повторно-кратковременном режиме (S3 или S4) работают электроприводы многих металлорежущих станков (например, сверлильных, заточных, автоматов и др.). Мощность двигателя в этом случае определяется также методом средних потерь или эквивалентных величин.

В повторно-кратковременном режиме (S2) работают вспомогательные приводы станков (например, приводы быстрых перемещений суппортов и поперечин, приводы зажимных устройств и др.). Время работы вспомогательных приводов обычно незначительно и составляет 5...15 с для небольших станков и 1...1,5 мин для крупных станков.

Номинальная мощность двигателя вспомогательных приводов определяется условиями перегрузки.

Машиностроительные предприятия имеют большой парк металлорежущих станков с асинхронными двигателями. Недогрузка этих двигателей приводит к увеличению непроизводительного расхода электроэнергии из-за снижения КПД двигателей и к уменьшению общего $\cos \varphi$ предприятия, так как в его электрической нагрузке возрастает доля реактивной мощности. В результате ухудшается использование мощности питающих предприятие трансформаторов и линий электропередачи, увеличиваются потери энергии в системе электроснабжения. Поэтому приходится устанавливать компенсирующие устройства, повышающие коэффициент мощности до нормы. С этой же целью следует стремиться к более полной загрузке двигателей и к сокращению или исключению холосто хода.

Классификация электрических аппаратов

Электрический аппарат – это электротехническое устройство, предназначенное для управления, регулирования и защиты электрических цепей, а также для контроля и регулирования различных неэлектрических процессов.

Выпускаются электрические аппараты общепромышленного назначения напряжением до 1 кВ, высоковольтные свыше 1 кВ и электробытовые аппараты и устройства.

Электрические аппараты напряжением до 1 кВ подразделяются на электрические аппараты ручного управления, дистанционного управления, аппараты защиты и датчики.

Классифицируются электрические аппараты по ряду признаков:

- по назначению, т.е. основной функции выполняемой аппаратом;
- по принципу действия;
- по роду тока (переменный или постоянный);
- по величине тока;
- по величине напряжения (до 1 кВ и свыше 1 кВ);
- по исполнению;
- по степени защиты (*IP*) и категории размещения;
- по конструктивным особенностям и области применения.

В зависимости от назначения аппараты можно подразделить на следующие группы: аппараты управления; аппараты защиты; контролируемые аппараты (датчики).

Классификация электрических аппаратов представлена на рис. 1.3.



Рис. 1.3. Классификация электрических аппаратов

2. ХАРАКТЕРИСТИКА МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Механические характеристики производственных машин и электродвигателей

Чтобы охарактеризовать работу электродвигателей с различными производственных технологических установок, необходимо прежде рассмотреть механические характеристики производственных машин, механизмов.

К одному из основных понятий в теории электропривода относится понятие механической характеристики производственных машин и механизмов, приводного двигателя.

Механической характеристикой производственной машины (механизма) называют зависимость между частотой вращения n и моментом сопротивления

$$M_c - n = f(M_c).$$

В зависимости от характера технологических процессов производственные механизмы имеют разнообразные механические

характеристики. Для классификации производственных механизмов по типам механических характеристик предложена формула

$$M_c = M_0 + (M_{сн} - M_0) \left(\frac{n}{n_H} \right)^x, \quad (2.1)$$

где M_c - момент сопротивления механизма при частоте вращения n ;
 M_0 - момент сопротивления трения;
 $M_{сн}$ - момент сопротивления при номинальной частоте вращения n_H ;
 x - коэффициент, определяющий характер изменения момента сопротивления M_c при изменении частоты вращения n .

В соответствии с формулой (1.1) производственные механизмы можно классифицировать следующим образом.

1. Механизмы с постоянным моментом сопротивления (прямая 1, рис. 2.1, а), не зависящим от частоты вращения, т.е. когда $x=0$, $M_c = M_{сн} = \text{const}$, у которых основным моментом сопротивления является момент трения (конвейеры с постоянной массой перемещаемого груза, механизмы подачи деревообрабатывающих машин и станков и др).

$$M_c = M_0.$$

2. Механизмы с моментом сопротивления пропорциональным частоте вращения n (прямая 2, рис. 2.1, а), т.е. когда $x=1$ (ленточнопильные и круглопильные станки).

$$M_c = M_0 + \left(\frac{M_{сн} - M_0}{n_H} \right) n.$$

3. Механизмы с моментом сопротивления, пропорциональным квадрату частоты вращения n (рис. 2.1, а, кривая 3), т.е. при $x=2$ (механическая характеристика имеет вид параболы):

$$M_c = M_0 + \left(\frac{M_{сн} - M_0}{n_H^2} \right) n^2.$$

Такие характеристики имеют вентиляторы, компрессоры, эксгаустерные установки.

4. Механизмы с моментом сопротивления, обратно пропорциональным частоте вращения n (кривая 4, рис. 2.1, а), т.е. при $x=-1$ (механическая характеристика гиперболического типа).

$$M_c = M_0 + \frac{M_{сн} - M_0 n_H}{n}.$$

Здесь с ростом частоты вращения момент M_c уменьшается так, что мощность $P = M \cdot n \approx \text{const}$ остается примерно постоянной. Такую характеристику имеют главные приводы лущильных, токарных и других станков.

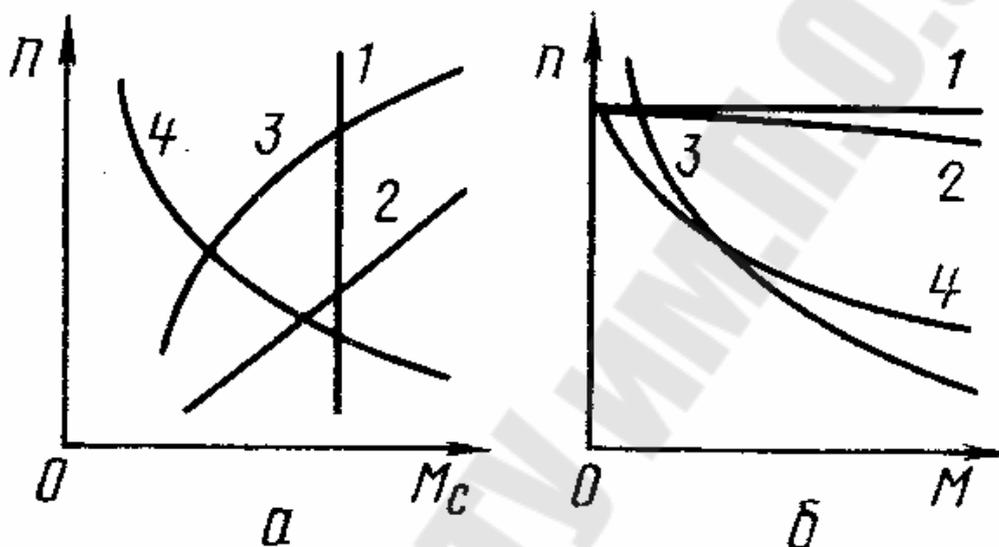


Рис. 2.1. Механические характеристики:
 а – производственных механизмов; б – электродвигателей

В отличие от производственных механизмов все электродвигатели имеют частоту вращения или *постоянную*, или *убывающую* с увеличением нагрузки ($n = f(M)$, рис. 2.1, б).

Для оценки вида механической характеристики электродвигателя введено понятие ее жесткости. Критерием жесткости характеристики является крутизна - величина, показывающая относительное изменение частоты вращения ($\Delta n / n_H$) при изменении момента двигателя в определенном диапазоне ($\Delta M / M_H$).

$$\beta = \frac{\Delta n}{n_H} / \frac{\Delta M}{M_H} \quad \text{или} \quad \beta = dn / dM.$$

Если момент и частота вращения выражены в процентах от своих номинальных значений, то коэффициент жесткости будет также

выражен в процентах. Механические характеристики подразделяют по степени жесткости.

Абсолютно жесткая характеристика соответствует коэффициенту $\beta=0$, частота вращения строго постоянна или меняется не более 1 % (прямая 1, рис. 2.1, б). Такую характеристику имеют синхронные двигатели.

Жесткой характеристике соответствует крутизна $\beta=1-10$ %; ею обладают двигатели постоянного тока параллельного возбуждения и асинхронные двигатели (на участке от $M = 0$ до $M = M_{\text{н}}$, кривая 2, рис. 2.1, б).

Мягкая характеристика имеет коэффициент жесткости более 10%. Такую характеристику имеют двигатели постоянного тока последовательного возбуждения (кривая 3, рис. 2.1, б). При такой характеристике ($\beta < 0$) двигатель нельзя полностью разгрузить из-за недопустимого увеличения частоты вращения. Поэтому двигатели постоянного тока последовательного возбуждения можно применять лишь в механизмах, в которых исключен холостой ход. Мягкой характеристикой обладают двигатели постоянного тока смешанного возбуждения, а также асинхронные двигатели с фазным ротором и большим сопротивлением в его цепи (кривая 4, рис. 2.1, б).

Для подавляющего большинства машин и механизмов промышленных и предприятий необходимы приводные электродвигатели, обладающие жесткой характеристикой (рис. 2.1, б, кривая 2). Такую характеристику имеют (в линейной части) асинхронные двигатели, которые и составляют основу электропривода промышленных предприятий.

При проектировании и выборе электропривода необходимо сравнивать различные варианты электроприводов с двигателями, имеющими различные параметры (частоту вращения, напряжение, ток и т.д.), поэтому объективная оценка приводов затруднена. Для исключения неопределенности при сопоставлении используют не абсолютные величины, а их отношение к номинальным величинам (относительные).

В зависимости от схемы подключения обмотки возбуждения к источнику питания различают двигатели постоянного тока с независимым (параллельным) возбуждением, когда обмотка возбуждения не соединена электрически с обмоткой якоря и получает питание от постороннего источника постоянного тока или включается параллельно обмотке якоря, а также с последовательным возбуждением,

когда обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря.

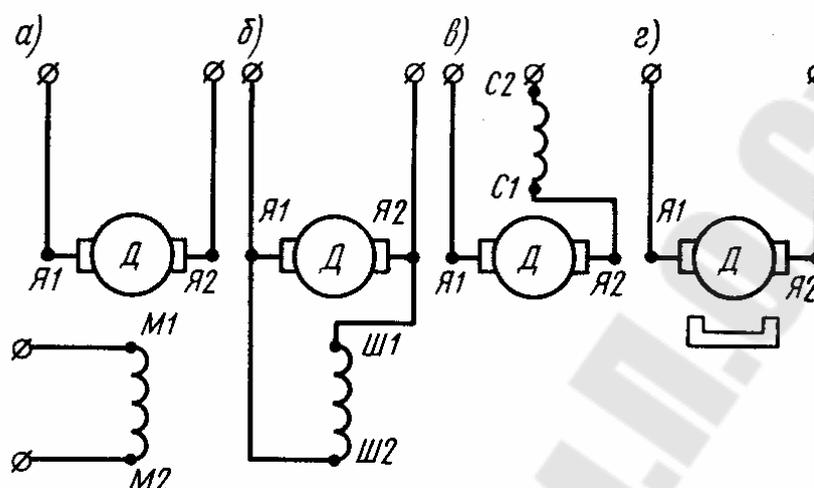


Рис. 2.2. Схемы подключения обмоток возбуждения двигателей

Из курса электротехники известно, что уравнение механической характеристики $[n = f(M)]$ можно записать в виде

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_M \Phi^2} M = n_0 - \Delta n, \quad (2.2)$$

где коэффициенты C_e и C_M зависят от конструктивных данных двигателя; U - напряжение сети; Φ - магнитный поток двигателя; R - сопротивление цепи якоря; n_0 - частота вращения двигателя при идеальном холостом ходе ($M = 0, I_a = 0$); Δn - изменение частоты вращения якоря под действием нагрузки двигателя M .

Выражение (2.2) показывает, что если U , R и Φ постоянны, механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения представляет прямую линию, наклоненную к оси абсцисс (рис. 2.3). Если в цепи якоря нет сопротивлений, то механическая характеристика называется естественной (прямая 1, рис. 2.3, а). Точка А соответствует номинальной частоте вращения n_n , а n_0 называют частотой идеального холостого хода.

Формула (2.2) позволяет оценить влияние напряжения U и потока Φ . При изменении U механическая характеристика двигателя с *независимым возбуждением* смещается параллельно естественной (рис. 2.3, б); частота вращения холостого хода при постоянных R и U изменяется обратно пропорционально потоку Φ .

Из выражения (2.2) при $n = 0$ имеем $0 = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_M \Phi^2} M$, а $M_{\Pi} = \frac{UC_M \Phi}{R}$, т. е. пусковой момент пропорционален потоку Φ . Таким образом, частота вращения двигателя может регулироваться:

- изменением сопротивления в цепи обмотки якоря.
- изменением магнитного потока,
- изменением напряжения, подводимого к обмотке якоря.

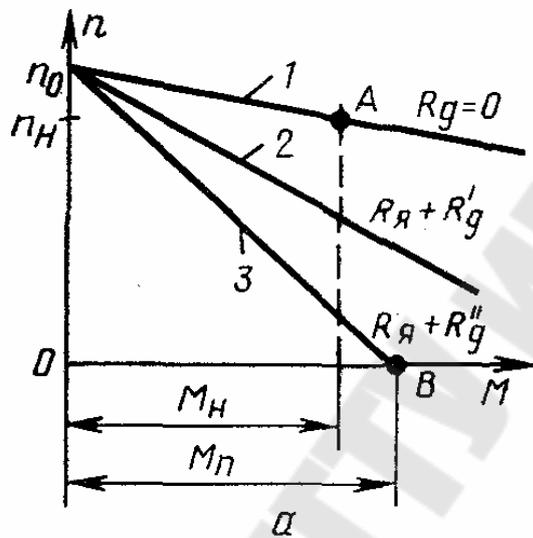


Рис. 2.3. Механические характеристики двигателей постоянного тока при изменении сопротивления в цепи ротора

3. СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ И ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ПОДСТАНЦИИ

В системах электроснабжения промышленных предприятий и организаций применяются масляные, совтоловые и сухие трансформаторы на напряжении 6...10 кВ. Но преимущественное применение находят масляные трансформаторы.

Совтоловые трансформаторы (совтол – негорючий диэлектрик) мощностью до 1000... 1600 кВ · А целесообразны в тех случаях, когда по условиям среды нельзя устанавливать масляные трансформаторы и недопустима установка сухих трансформаторов. Недостаток – токсичность при наличии течи совтола, так как при этом выделяются вредные пары, длительное вдыхание которых вызывает раздражение слизистых оболочек глаз и носа.

Сухие трансформаторы мощностью не более 630...1000 кВ·А имеют ограниченное применение, так как они дороже масляных и имеют следующие недостатки:

боятся грозových перенапряжений;

создают при работе повышенный шум по сравнению с масляными;

требуют установки в сухих непыльных помещениях с относительной влажностью не более 65 %.

Применение сухих трансформаторов целесообразно при их мощности от 10 до 400 кВ·А и там, где недопустима установка масляных трансформаторов из-за пожарной опасности, а трансформаторов с негорючей жидкостью из-за их токсичности.

Для наружной установки применяют только масляные трансформаторы, а для внутренней – не всегда они рекомендуются (ограничения ТКП).

Для внутрицеховых ТП рекомендуется преимущественно применение сухих трансформаторов, для встроенных и пристроенных - масляных при условии выкатки их на улицу.

Основные технические характеристики двухобмоточных трансформаторов:

$S_{ном}$ – номинальная мощность, кВА;

$U_{вн}$, $U_{нн}$ – номинальные напряжения обмоток высокого и низкого напряжения, кВ;

ΔP_{xx} – потери активной мощности XX, кВт;

ΔQ_{xx} – потери реактивной мощности XX, кВт;

$I_{хх}$ – ток холостого хода, %;

$\Delta P_{кз}$ – потери активной мощности КЗ, кВт;

$U_{кз}$ – напряжение КЗ, %.

Трансформаторы могут быть присоединены в различных пунктах электрических сетей. Режим напряжения в этих пунктах зависит от местных условий: удаленности от источника питания, изменения нагрузок и т. д., поэтому трансформаторы снабжают специальными регулировочными ответвлениями. Изменяя их, можно изменять коэффициент трансформации. В зависимости от способа переключений регулировочных ответвлений различают:

1. Силовые трансформаторы, не имеющие устройств для переключения под нагрузкой. Это трансформаторы с ПБВ – переключением без возбуждения. Для переключения регулировочного ответвления такого трансформатора необходимо отключить его от сети. Эти переключения производят редко, как правило, при сезонном изменении нагрузки.

2. Трансформаторы, снабженные встроенными устройствами для регулирования под нагрузкой (РПН).

Техническая характеристика силовых трансформаторов и основные сведения о регулировании напряжения даны в справочниках.

При наличии на подстанции нескольких трансформаторов они могут быть включены на параллельную работу.

Параллельная работа трансформаторов

Параллельная работа трансформаторов допускается при:

- равенстве номинальных величин первичных и вторичных напряжений (допускается разность коэффициентов трансформации не более $\pm 0,5\%$);
- одинаковых схемах соединения обмоток (т. е. при одинаковых группах соединений);
- при равенстве напряжений короткого замыкания (допускается отклонение не более чем на $\pm 10\%$ от средней величины).

Рекомендуется, чтобы разница номинальных мощностей параллельно работающих трансформаторов не превышала 1:3. Невыполнение указанных условий приводит к значительным ток КЗ уменьшается в 2 раза и облегчаются условия работы коммутационно-защитной аппаратуры напряжением до 1000 В.

В цеховых ТП, как правило, применяются трансформаторы мощностью до 2500 кВА с первичным напряжением 6...10 кВ и естественным охлаждением, заполненные маслом или негорючим жидким диэлектриком (совтолом), естественным воздушным охлаждением и сухой изоляцией, а также с литой изоляцией. При установке в специальных камерах применяются трансформаторы с открытыми изоляторами и расширителем для масла. В КТП устанавливаются трансформаторы без расширителя в защищенном исполнении, у которых изоляторы закрыты кожухом и в баке под небольшим избыточным давлением имеется азотная подушка для защиты жидкого диэлектрика (масла, совтола и т.п.) от воздействия окружающей среды. Такие трансформаторы допускается устанавливать как внутри, так и вне зданий.

Приведем примеры расшифровки обозначений типов трансформаторов:

ТМ-1000/6 – трехфазный масляный трансформатор открытого исполнения мощностью 1000 кВА и первичным напряжением 6 кВ;

ТМВМЗ-630/10 – трехфазный масляный трансформатор с витым пространственным магнитопроводом, в защищенном исполнении с $S=630$ кВА и первичным напряжением 10 кВ;

ТМЗ-1600/10 – трехфазный масляный трансформатор в защищенном исполнении мощностью 1600 кВА и первичным напряжением 10 кВ;

ТНЗ-1600/10 – то же, но с негорючим диэлектриком;

ТСЗЛ-1600/10 – то же, но с естественным воздушным охлаждением и литой изоляцией.

Трансформаторы цеховых подстанций допускают регулирование вторичного напряжения в диапазоне $\pm 5\%$ относительного номинального значения с помощью переключателя без возбуждения (ПБ).

Для внутрицеховых ТП рекомендуется преимущественно применение сухих трансформаторов, для встроенных и пристроенных – масляных при условии выкатки их на улицу. Применение совтоловых трансформаторов не рекомендуется по экологическим соображениям.

Питание однофазных электроприемников на напряжении до 1 кВ на промышленных предприятиях осуществляется от трехфазных трансформаторов. При этом следует учитывать, что при однофазной нагрузке величина тока в любой фазе не должна превышать номинального значения, а нейтраль может иметь нагрузку не более 25% номинальной мощности фазы при схеме соединения обмоток $Y/Y-0$. Например, трансформатор с номинальной мощностью 1000 кВА при включении однофазной нагрузки между двумя фазами (на одно из линейных напряжений) может быть загружен на мощность $21000/3 = 667$ кВА, а при включении однофазной нагрузки между одной из фаз и нулем (на одно из фазных напряжений) на величину $0,25 \cdot 1000/3 = 83$ кВА при схеме $Y/Y-0$ и $0,75 \cdot 1000/3 = 250$ кВА.

Выбор мощности трансформаторов осуществляется на основе технико-экономических расчетов, исходя из полной расчетной нагрузки объекта, удельной плотности нагрузки, затрат на питающую сеть до 1 кВ, стоимости потерь электроэнергии в трансформаторах и питающей сети до 1 кВ, а также других факторов.

Трансформаторные подстанции

Трансформаторные подстанции являются основным звеном «системы централизованного электроснабжения промышленных предприятий (от энергосистем). Трансформаторная подстанция представляет собой устройство, служащее для преобразования электрической энергии одного напряжения в энергию другого напряжения.

Различают понижающие подстанции – головные и цеховые.

Головные подстанции понижают величину напряжения от значения, принятого в энергосистеме (в точке подключения) до значения, при котором происходит распределение энергии между цехами предприятий – до напряжения внутривародской распределительной сети.

Цеховые подстанции понижают напряжение до значения, при котором работают электроприемники (как правило, 0,4 кВ).

По месту расположения на территории объекта различают следующие подстанции:

- отдельно стоящие на расстоянии от зданий;
- пристроенные, непосредственно примыкающие к основному зданию снаружи;
- встроенные, находящиеся в отдельных помещениях внутри здания, но с выкаткой трансформаторов наружу;
- внутрицеховые, расположенные внутри производственных зданий с размещением электрооборудования непосредственно в производственном или отдельном закрытом помещении с выкаткой электрооборудования в цехи.

Применение внутренних, встроенных в здания или пристроенных к ним подстанций в промышленных сетях напряжением 6... 10 кВ позволяет максимально приблизить высокое напряжение к электроприемникам и сократить протяженность внутрицеховых сетей 0,4 кВ.

Отдельно стоящие ТП применяются, например, при питании от одной подстанции нескольких цехов, при невозможности размещения подстанций внутри цехов или у наружных их стен по соображениям производственного или архитектурного характера при наличии в цехах пожароопасных или взрывоопасных производств.

По выполнению трансформаторные подстанции могут быть:

- стационарные закрытые в кирпичных или железобетонных зданиях; монтаж их оборудования выполняется на месте установки из отдельных узлов, изготавливаемых на заводе;
- стационарные открытые;
- комплектные трансформаторные подстанции с комплектным распределительным устройством (КРУ). Они полностью собираются на заводе, монтируются на месте установки и подключаются к питающим электрическим сетям.

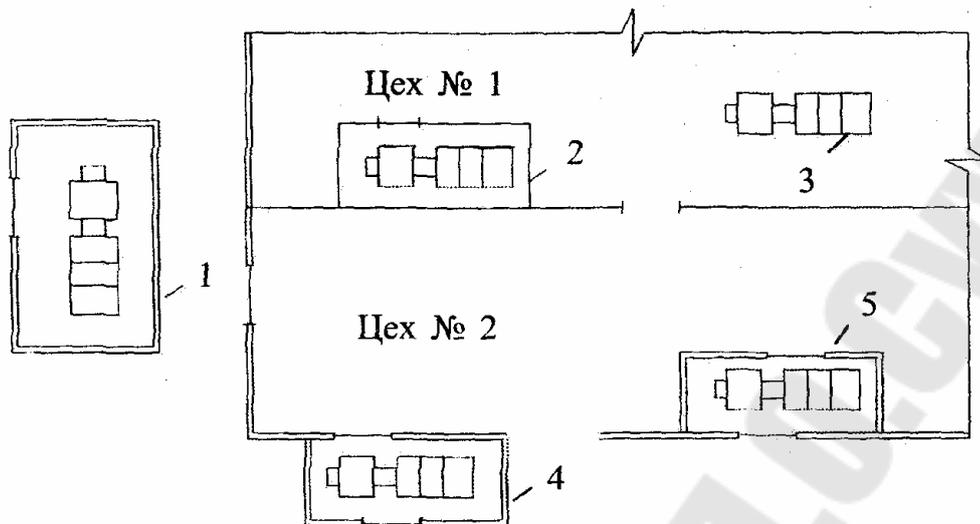


Рис. 3.1. План размещения трансформаторных подстанций

Мощность и число подстанций определяется мощностью потребителей электроэнергии, а также требуемым уровнем надежности и бесперебойности электроснабжения. Для питания электродвигателей, технологических и осветительных установок на подстанциях применяют силовые трансформаторы с первичным напряжением 10 (6), реже 35 кВ.

Выбор числа и мощности трансформаторов

На промышленных предприятиях применяются одно- и двухтрансформаторные цеховые подстанции, что позволяет создавать и рассматривать различные варианты схемы электроснабжения. Число трансформаторов в цеху определяется его нагрузкой и требованиями к надежности электроснабжения.

Сооружение одното трансформаторных цеховых подстанций является наиболее простым и дешевым решением. На крупных предприятиях, имеющих складской резерв трансформаторов, их можно применять для питания электроприемников не только III, но и II категории. Одното трансформаторные подстанции могут использоваться и для питания электроприемников I категории, если мощность последних не превышает 15–20 % от мощности трансформатора и возможно резервирование подстанций на вторичном напряжении перемычками с АВР.

Двухтрансформаторные цеховые подстанции применяются при преобладании электроприемников I и II категорий, бесперебойное электроснабжение которых необходимо по требованиям технологического процесса производства или для устранения опасностей для

жизни людей, а также в энергоемких цехах предприятий при большой удельной плотности нагрузки $S_{уд}$ (достигающей $4 \text{ кВ} \cdot \text{А}/\text{м}^2$ и более).

Число и мощность трансформаторов цеховых подстанций взаимно связаны между собой, поскольку при заданной расчетной нагрузке цеха S_p число трансформаторов будет меняться в зависимости от принятой единичной мощности КТП. При выборе цеховых трансформаторов для промышленных предприятий обычно приходится сравнивать трансформаторы (КТП) единичной мощностью 630; 1000; 1600 и 2500 кВА. Число и мощность трансформаторов зависят от распределения нагрузок по площади цеха, наличия места для расположения цеховых подстанций, характера и режима работы электроприемников. Выбор КТП часто осуществляется одновременно с решением задачи компенсации реактивной мощности цеховых потребителей электроэнергии.

Выбор мощности трансформаторов осуществляется на основе технико-экономических расчетов, исходя из полной расчетной нагрузки объекта, удельной плотности нагрузки, затрат на питающую сеть до 1 кВ, стоимости потерь электроэнергии в трансформаторах и питающей сети до 1 кВ, а также других факторов.

В проектной практике цеховые трансформаторы часто выбирают без технико-экономических расчетов, пользуясь коэффициентом загрузки трансформаторов и расчетной нагрузки цеха:

для двухтрансформаторных цеховых подстанций при преобладании нагрузок I категории коэффициент загрузки трансформаторов $k_{з,тр}$ принимается в пределах 0,65–0,7.

для однострансформаторных подстанций при наличии взаимного резервирования по переключкам с другими подстанциями на вторичном напряжении мощность трансформаторов выбирается с учетом степени резервирования. Коэффициент загрузки цеховых трансформаторов может быть принят: при преобладании нагрузок II категории – 0,7...0,8, а при нагрузках III категории – 0,9...0,95.

Практика проектирования и эксплуатации показала, что число типов и исполнений трансформаторов, применяемых на одном предприятии, необходимо ограничивать, так как разнообразие их создает неудобства в обслуживании и вызывает дополнительные затраты на ремонт, а также осложняет резервирование и взаимозаменяемость

4. ХАРАКТЕРИСТИКА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Асинхронные двигатели составляют основу электропривода в промышленности. Они отличаются простотой конструкции и технического обслуживания, экономичностью, надежностью.

Синхронная частота вращающегося магнитного поля статора n_0 ,

$$n_0 = 60f_1 / p, \quad (4.1)$$

где f_1 – частота тока питающей сети, Гц;

p – число пар полюсов асинхронного двигателя.

Скольжение двигателя определяется отношением

$$s = (n_0 - n_1) / n_0, \quad (4.2)$$

n_1 – частота вращения ротора двигателя, об/мин.

Вращающий момент двигателя

$$M = \frac{m_1 U_\phi^2 \frac{R_2'}{s}}{\pm \omega \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}, \quad (4.3)$$

где m_1 и U_ϕ – число фаз и фазное напряжение статора;

R_1 и x_1 – активное и реактивное сопротивления статора;

R_2 и x_2 – приведенные активное и реактивное сопротивления ротора.

Вращающий момент двигателя M при данном скольжении s пропорционален квадрату напряжения U_ϕ^2 , подведенного к обмоткам статора.

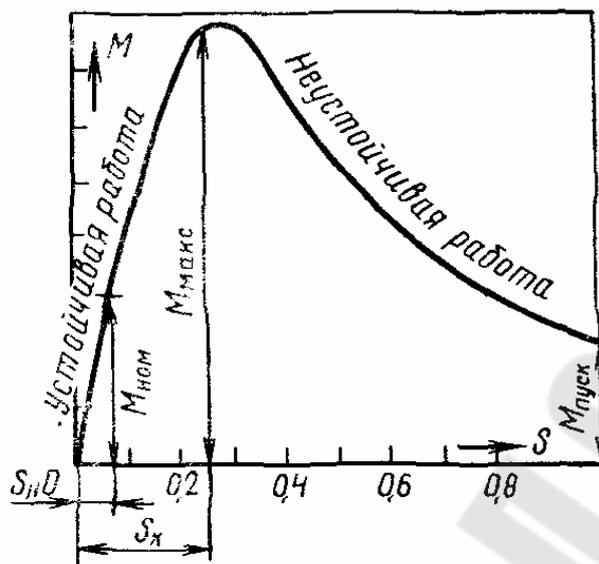


Рис 4.1. Механическая характеристика двигателя

Если подставить значение s , то можно рассчитать и построить механическую характеристику двигателя $n=f(M)$.

Взяв первую производную момента по скольжению и приравняв ее к нулю, найдем критическое скольжение

$$s_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}. \quad (4.4)$$

Подставляя s_k в (4.4), получим формулу для максимального или критического момента

$$M_k = \frac{m_1 U_{\phi}^2}{2\omega \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \right]}. \quad (4.5)$$

В выражениях (4.3) и (4.5) знак плюс соответствует двигательному режиму, минус - генераторному.

Формулы (4.3), (4.4), (4.5) позволяют оценить влияние на механическую характеристику асинхронного двигателя различных факторов. Из (4.4), (4.5) видно, что изменение напряжения питающей сети не влияет на скольжение s_k , но сильно влияет на M_k .

Разделив выражение (4.3) на (4.5) и произведя соответствующие преобразования с учетом $a = R_1 / R_2'$, получим

$$M = \frac{2M_k(1 - as_k)}{s_0/s_k + s_k/s + 2as_k}. \quad (4.6)$$

Выражения (4.4), (4.6) можно упростить, учитывая, что $R_1 \ll x_1 + x_2'$. Тогда при $R_1 = 0$ получим

$$M = \frac{2M_k}{s/s_k + s_k/s}; \quad (4.7)$$

$$s_k = \frac{R_2'}{x_1 + x_2'}. \quad (4.8)$$

Решив выражение (4.8) относительно s_k , имеем

$$s_k = s_n \left(K_m \pm \sqrt{K_m^2 - 1} \right), \quad (4.9)$$

где отношение $K_m = M_m / M_n$ - перегрузочная способность двигателя; s_n - скольжение при номинальном моменте.

На основе формулы (4.7) построена механическая характеристика асинхронного двигателя (рис. 4.2, а). При построении таких характеристик значения K_m и s_k берут по данным каталогов (или справочников) для асинхронных двигателей. При $n_1 = n_0$ момент $M=0$, так как вращающий момент асинхронного двигателя образуется лишь при разности n_1 и n_0 . В момент пуска ротор неподвижен ($s=1$), двигатель потребляет пусковой ток, до 7,5 раз превышающий номинальный, и развивает пусковой момент M_n . При изменениях скольжения s от нуля до s_k работа двигателя устойчива. Увеличение нагрузки ведет к снижению частоты вращения ротора; вращающееся с синхронной частотой поле статора с большей скоростью пересекает ротор, увеличение скольжения приводит к росту тока статора и увеличению энергии, передаваемой электрифицированному оборудованию. При $M=M_c$ устанавливается определенная частота вращения. При $s=s_n$ момент двигателя равен номинальному M_n , а при $s=s_k$ он достигает максимального (критического) значения M_k .

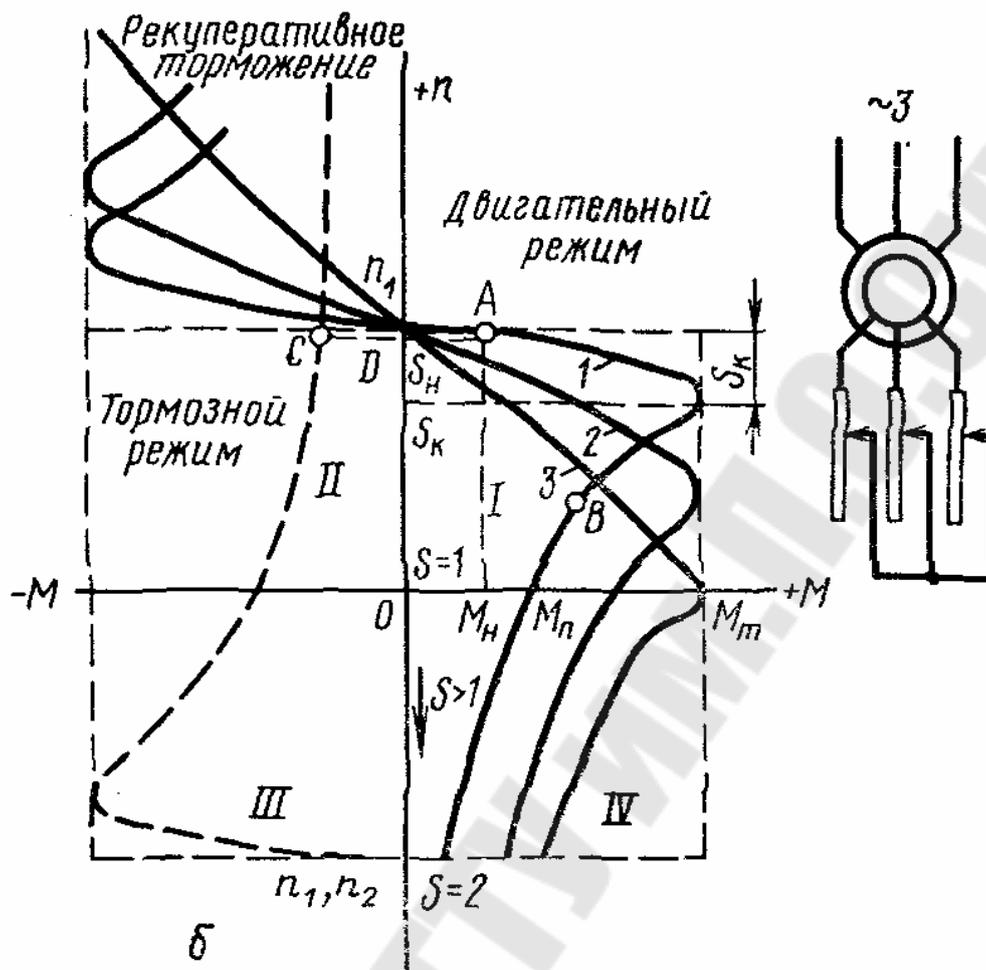


Рис. 4.2. Характеристика асинхронного двигателя:
a – механическая; *б* – при работе в двигательном и тормозном режимах

На участке $s_k < s < 1$ работа двигателя неустойчива, так как здесь положительному приращению нагрузки соответствует отрицательное приращение момента. Если, например, в точке *B* (рис. 4.2, *б*) момент сопротивления не уменьшится, двигатель остановится (опрокинется). При $s < 0$ ротор двигателя с фазной обмоткой вращается с частотой большей частоты вращающегося поля статора, двигатель переходит в режим рекуперативного (генераторного) торможения, отдавая энергию в сеть. Частота вращения при этом положительная, а момент вращения тормозит приводной механизм (тормозной момент определен отрезком *CD*). Более полно переход от двигательного режима к генераторному и режим противовключения даны в работе.

У двигателя с фазным ротором (контактными кольцами) активное сопротивление в цепи ротора можно изменять. Это позволяет изменять s_k в соответствии с формулой (4.9). Вводя различные сопротивления в цепь ротора, получим ряд искусственных характеристик (кривые 2 и 3, рис. 4.2, *б*). Момент M_m остается неизменным, так как

он не зависит от активного сопротивления в цепи ротора, характеристики 2 и 3 имеют больший наклон, чем характеристика 1, соответствующая работе двигателя без сопротивления в цепи ротора. Эту характеристику называют естественной.

5. ПУСК И РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ

Асинхронные электродвигатели

Частота вращения ротора n_1 определяется частотой вращающегося магнитного поля статора n_0 , скольжением s , числом пар полюсов обмотки статора p и частотой тока в цепи статора (питающей сети)

$$n_1 = n_0(1 - s) = \frac{60f_1}{p}(1 - s). \quad (5.1)$$

Согласно формуле (5.1) частоту вращения n_1 можно регулировать:

- введением сопротивления в цепь ротора (изменением s),
- переключением числа пар полюсов,
- изменением частоты питающего тока.

Регулирование частоты вращения изменением активного сопротивления в цепи ротора. Этот способ используется в асинхронных двигателях с фазным ротором и основан на изменении скольжения путем введения в цепь ротора регулировочного реостата.

Из выражений (4.4), (4.5) следует, что с изменением сопротивления ротора меняется скольжение s_k , а максимальный момент M_m остается постоянным. С увеличением активного сопротивления скольжение возрастает и соответствует заданному нагрузочному моменту M_2 , а частота вращения – уменьшается.

Зависимость скольжения (частоты вращения ротора) от активного сопротивления цепи ротора

$$s = m_2 \cdot I_2^2 \cdot (R_2 - R_{\text{доб}}) / \omega_0 M,$$

где $R_{\text{доб}}$ – сопротивление регулировочного реостата.

Достоинства способа:

- плавность регулирования частоты вращения в широком диапазоне;

- увеличение пускового момента.
Недостатки способа:
- снижение жесткости механической характеристики и связанное с ним ограничение диапазона регулирования,
- снижение экономичности работы за счет увеличения потерь мощности в добавочном сопротивлении;
- увеличение потерь энергии в обмотке ротора, вызванное повышением скольжения s ;
- возможность регулирования частоты вращения ротора только в сторону уменьшения от номинальной;
- необходимость громоздкого реостата.

Несмотря на отмеченные, указанный метод регулирования находит применение в приводах машин и оборудования, работающих в повторно-кратковременном режиме.

Регулирование частоты вращения изменением числа пар полюсов обмотки статора

При определенной частоте питающей сети частоту вращения двигателя можно регулировать изменением числа пар полюсов. Этот способ регулирования дает ступенчатое изменение частоты вращения и применяется в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором. Обмотка статора этих двигателей имеет конструкцию, позволяющую путем переключения изменять в ней число полюсов $2p$. Такие двигатели называются многоскоростными, они могут изготавливаться на две, три или четыре синхронные частоты вращения. Например, четырехскоростной двигатель имеет такую конструкцию обмотки статора, при которой можно путем переключений получить восемь, шесть, четыре, два полюса. При 50 Гц в двигателе можно получить синхронные частоты вращения соответственно 750, 1000, 1500 и 3000 об/мин.

Так как полезная мощность асинхронного двигателя пропорциональна частоте вращения ротора,

$$P_2 = \omega_2 M_2 = (\pi/30)n_2 M_2,$$

то при переключении обмотки статора с большего числа полюсов на меньшее, т.е. при переходе с меньшей частоты вращения на большую, номинальная мощность двигателя возрастает.

Многоскоростные асинхронные двигатели по сравнению с обычными (односкоростными) имеют большие габаритные размеры, массу и стоимость.

Достоинствами этого способа регулирования являются относительная простота, высокая жесткость, экономичность, а недостатком – наличие только ступенчатого регулирования.

Регулирование частоты вращения изменением частоты тока питающей сети. Возможность этого способа регулирования также вытекает из формулы (5.1). Для сохранения перегрузочной способности и достаточной жесткости характеристики необходимо поддерживать магнитный поток примерно постоянным ($\Phi = U/f_1 = \text{const}$). На рис. 5.1 дан вид механической характеристики двигателя при изменении частоты тока f . Метод в принципе представляется перспективным в связи с разработкой в последние годы на базе транзисторной техники статических преобразователей частоты с плавным регулированием.

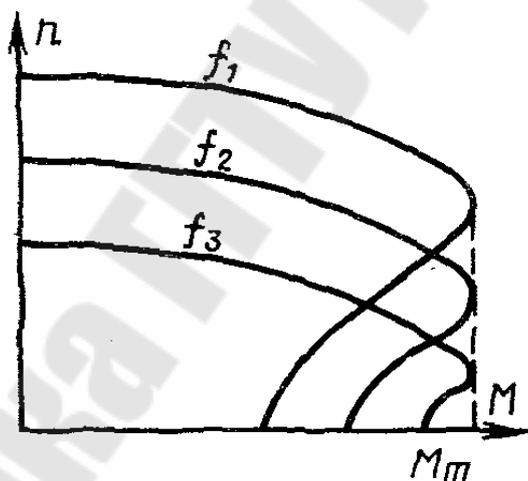


Рис. 5.1. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении частоты тока

Сравнивая коллекторные силовые двигатели постоянного тока с бесколлекторными (асинхронными и синхронными), следует отметить их преимущества:

- возможность получения различных частот вращения, в том числе и свыше 3000 об/мин;
- простота регулирования частоты вращения в широком диапазоне;
- возможность создавать значительные пусковые и рабочие моменты.

Недостатки двигателей постоянного тока:

- наличие щеточно-коллекторного узла, т.е. скользящих контактов, являющихся источником искрообразования;
- помехи радиоприему, требующие специальных мер для их подавления;
- износ, подгорание и загрязнение щеток и коллектора, приводящие к снижению надежности и сокращению срока службы двигателя;
- недопустимость применения этих двигателей в пожароопасных и взрывоопасных средах.

Двигатели постоянного тока

В зависимости от схемы подключения обмотки возбуждения к источнику питания различают двигатели постоянного тока с независимым (параллельным) возбуждением, когда обмотка возбуждения ОВ не соединена электрически с обмоткой якоря и получает питание от постороннего источника постоянного тока или включается параллельно обмотке якоря, а также с последовательным возбуждением, когда обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря.

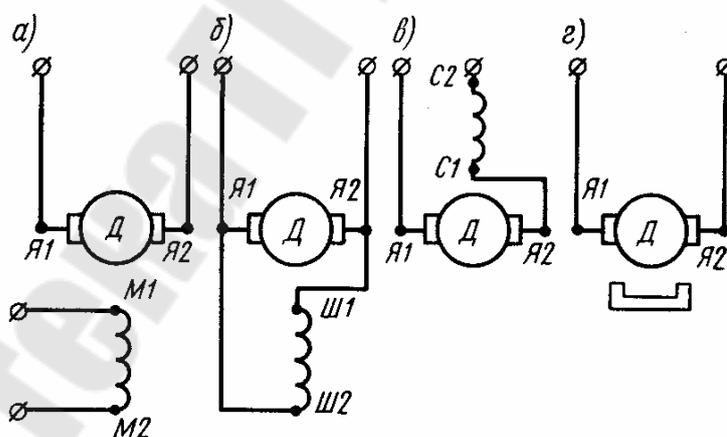


Рис. 5.2. Схемы подключения обмоток возбуждения двигателей

Из курса электротехники известно, что уравнение механической характеристики $[n = f(M)]$ можно записать в виде

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_M \Phi^2} M = n_0 - \Delta n, \quad (5.2)$$

где коэффициенты C_e и C_m зависят от конструктивных данных двигателя; U – напряжение сети; Φ – магнитный поток двигателя; R – сопротивление цепи якоря; n_0 – частота вращения двигателя при идеальном холостом ходе ($M = 0, I_a = 0$); Δn – изменение частоты вращения якоря под действием нагрузки двигателя M .

Формула (5.2) показывает, что если U , R и Φ постоянны, механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения представляет прямую линию, наклоненную к оси абсцисс (рис. 5.1).

Формула (5.2) позволяет оценить влияние напряжения U и потока Φ . При изменении U механическая характеристика двигателя с независимым возбуждением смещается параллельно естественной (рис. 5.3); частота вращения холостого хода при постоянных R и U изменяется обратно пропорционально потоку Φ . Из выражения (5.1) при

$$n = 0 \text{ имеем } n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_m \Phi^2} M, \text{ а } M_{\text{п}} = \frac{U C_m \Phi}{R}, \text{ т. е. пусковой момент}$$

пропорционален потоку Φ . Таким образом, частота вращения двигателя может регулироваться:

- изменением сопротивления в цепи обмотки якоря.
- изменением магнитного потока,
- изменением напряжения, подводимого к обмотке якоря.

Механическая характеристика двигателя последовательно-го возбуждения может быть описана уравнением

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e \Phi} I = \frac{U}{C_e' I} - \frac{R}{C_e'} \quad (5.3)$$

В отличие от двигателя независимого возбуждения поток Φ является функцией тока I .

Из выражения (5.2) следует, что механическая характеристика имеет вид гиперболы, постепенно переходящей (при нагрузке, близкой к номинальной и превышающей ее) в прямую линию.

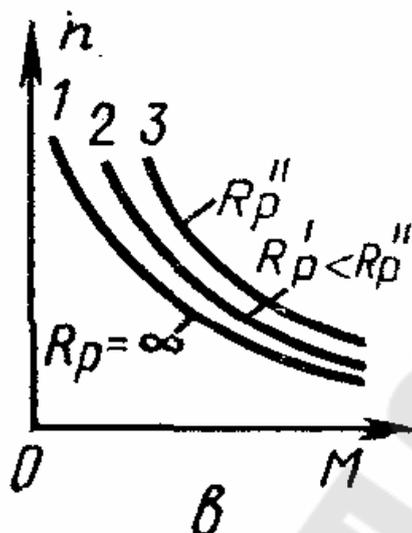


Рис. 5.3. Механические характеристики двигателей постоянного тока при регулировании частоты вращения шунтированием обмотки возбуждения двигателя с последовательным возбуждением

Особенностью двигателей последовательного возбуждения является отсутствие частоты вращения идеального холостого хода, момент нагрузки двигателя не может быть менее $(0,15 \dots 0,2) M_n$, а частота вращения во избежание нарушения механической прочности якоря, коллектора и подшипников не допускается более $(3 \dots 3,5) n_n$.

Механическая характеристика двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при неизменном напряжении U представлена на рис. При введении в цепь якоря добавочного сопротивления R_p механическая характеристика становится более мягкой.

Способность двигателей последовательного возбуждения развивать большой электромагнитный момент обеспечивает им хорошие пусковые свойства.

Регулирование частоты вращения двигателей последовательного возбуждения изменением напряжения U и включением добавочного сопротивления выполняется так же, как и в двигателях независимого (параллельного) возбуждения.

Регулирование частоты вращения изменением магнитного потока возбуждения Φ может выполняться шунтированием (параллельным включением) обмотки возбуждения реостатом. Механические характеристики при таком регулировании показаны на рис. 5.4, в (1 - естественная характеристика; 2 и 3 - характеристики при сопротивлениях реостата $R_p' < R_p''$). Недостатками такого способа регулирования

является неэкономичность, обусловленная большими потерями в рее-стате и неширокий диапазон регулирования.

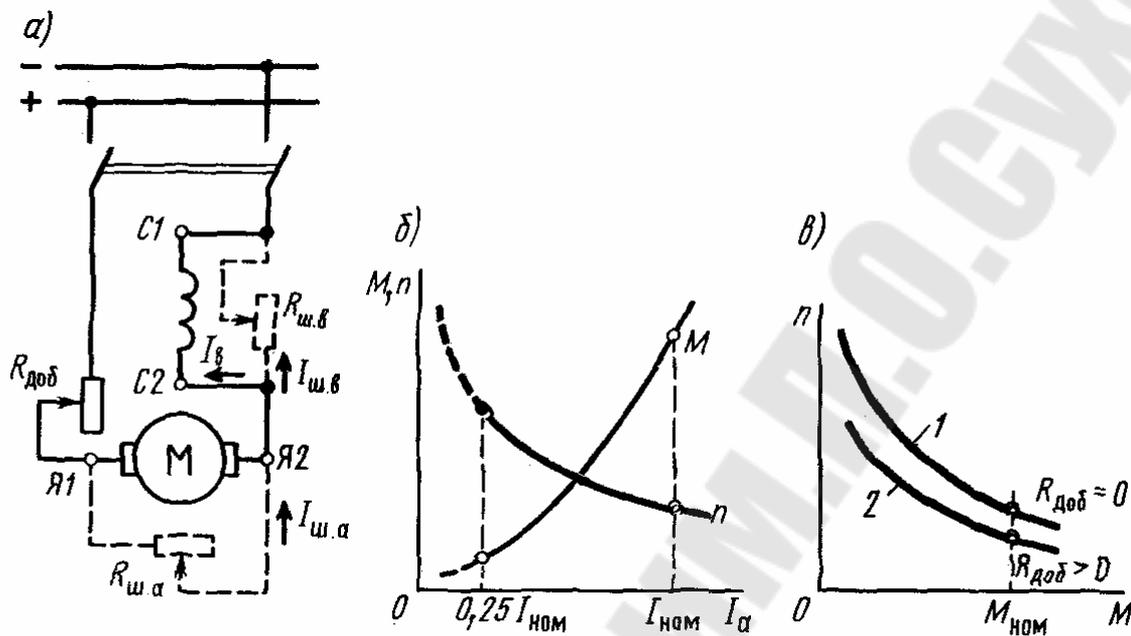


Рис. 5.4. Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения:
 а – принципиальная схема; б – рабочие характеристики;
 в – механические характеристики

Двигатель смешанного возбуждения имеет независимую (параллельную) и последовательную обмотки возбуждения, причем разные типы двигателей имеют различное соотношение ампер-витков обмоток. Этот двигатель сочетает свойства двигателя последовательного и независимого возбуждения, его механическая характеристика занимает промежуточное положение между характеристиками указанных двигателей. Двигатели смешанного возбуждения имеют малую жесткость характеристики при небольших нагрузках и прямолинейный ее характер в области больших нагрузок (насыщение магнитной цепи двигателя).

6 СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ И КОМПЕНСАТОРЫ

Синхронные двигатели на промышленных предприятиях используют для привода компрессорных и вентиляторных установок и др. механизмов, когда требуется строго постоянная частота вращения. Механическая характеристика синхронного двигателя абсолютно жесткая.

Вращающий момент синхронного двигателя зависит от угла Θ между осями полюсов ротора и полем статора и выражается формулой $M = M_m \sin\Theta$, где M_m максимальное значение момента.

Зависимость $M = f(\Theta)$ называется угловой характеристикой синхронной машины (рис. 6.1). Работа двигателя устойчива на начальном участке угловой характеристики, он работает обычно при Θ не более $30...35^\circ$. При увеличении Θ устойчивость уменьшается, в предельной точке B характеристики ($\Theta=90^\circ$) стабильная работа становится невозможной; момент, соответствующий пределу устойчивости называют максимальным (опрокидывающим) моментом.

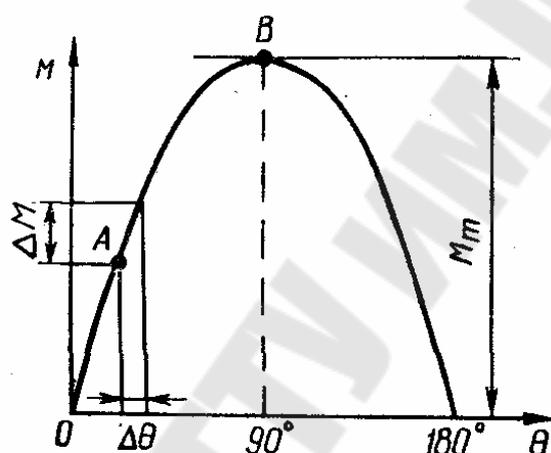


Рис. 6.1. Угловая характеристика синхронного двигателя

Если синхронный двигатель нагрузить выше M_m , то ротор двигателя выпадет из синхронизма и произойдет его останов, что является для машины аварийным режимом. Номинальный момент двигателя в 2...3 раза меньше опрокидывающего. Вращающий момент двигателя пропорционален напряжению. Синхронные двигатели менее чувствительны к колебаниям напряжения, чем асинхронные.

Пусковые свойства синхронного двигателя характеризуются не только кратностью пускового момента, но и величиной входного момента $M_{вх}$, развиваемого двигателем при скольжении 5% от включения постоянного тока в обмотку возбуждения двигателя. Кратность пускового момента $0,8...1,25$, а входной момент близок по величине к пусковому моменту синхронного двигателя.

Если синхронная машина работает вхолостую (угол $\theta=0$), то векторы напряжения сети U и ЭДС E_0 в обмотке якоря равны и противоположны по фазе. Увеличением тока в обмотке возбуждения полю-

сов можно создать перевозбуждение в машине. При этом ЭДС E_0 превышает напряжение сети U , в обмотке якоря возникает ток

$$I = \frac{E_0 - U}{x_c} = \frac{\Delta E}{x_c}, \quad (6.1)$$

где E – результирующая ЭДС; x_c – индуктивное сопротивление обмотки якоря (активным сопротивлением обмотки при качественной оценке режима работы машины обычно пренебрегают).

Ток якоря $I_{\text{я}}$ отстает от результирующей ЭДС E на угол 90° , а по отношению к вектору напряжения сети он является опережающим на 90° (таким же, как при включении в сеть конденсаторов). Машину, работающую с перевозбуждением, можно использовать для компенсации реактивной мощности, такую машину называют синхронным компенсатором.

На основе синхронных двигателей разработаны синхронные компенсаторы для регулирования реактивной мощности в электрических сетях.

Синхронные компенсаторы устанавливаются на высоковольтных подстанциях и централизованно регулируют реактивную мощность в сетях. Конструктивно имеют отличия от синхронного двигателя тем, что имеют облегченный ротор, так как они не выполняют преобразование электрической энергии в механическую, а являются регуляторами реактивной мощности.

7. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ И ВЫБОР ТИПА ДВИГАТЕЛЕЙ

Тепловой режим и номинальная мощность двигателя

Преобразование электрической энергии в механическую сопровождается потерями в электродвигателе.

В асинхронном двигателе эти потери разделяются на:

переменные: электрические, добавочные;

постоянные: магнитные (потери в стали), механические, потери в обмотках, где ток постоянен.

Электрические потери $P_{\text{э}}$ складываются из потерь в обмотках статора $P_{\text{э}1}$ и ротора $P_{\text{э}2}$. Эти потери пропорциональны квадрату тока в соответствующей обмотке:

$$P_{\text{э}1} = m_1 I_1^2 r_1, \quad (7.1)$$

$$P_{\text{э}2} = m_2 I_2^2 r_2, \quad (7.2)$$

Так как токи I_1 и I_2 в обмотках зависят от механической нагрузки на валу двигателя, то электрические потери $P_{\varepsilon 1}$ и $P_{\varepsilon 2}$ также зависят от нагрузки.

Электрические потери в обмотке ротора прямо пропорциональны скольжению:

$$P_{\varepsilon 2} = sP_{\varepsilon м}, \quad (7.3)$$

где электромагнитная мощность, т. е. мощность, передаваемая через воздушный зазор δ , между статором и ротором в ротор двигателя,

$$P_{\varepsilon м} = P_1 - (P_m + P_{\varepsilon 1}), \quad (7.4)$$

$P_{\varepsilon 1}$ - активная мощность, потребляемая двигателем из сети,

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1, \quad (7.5)$$

где $\cos \varphi_1$ —коэффициент мощности асинхронного двигателя.

Работа асинхронного двигателя наиболее экономична при малых скольжениях s , соответствующих минимальным электрическим потерям в обмотке ротора.

Добавочные потери $P_{\text{доб}}$ включают все виды трудно учитываемых потерь. Эти потери принимают равными 0,5% от подводимой к двигателю мощности и зависят от нагрузки двигателя.

$$P_{\text{доб}} = 0,005 P_1. \quad (7.6)$$

Магнитные потери P_m обусловлены перемагничиванием сердечников вращающимся магнитным полем. Сердечник статора перемагничивается с частотой сети f_1 , при этом учитывают потери на гистерезис P_{Γ} и вихревые токи $P_{\text{вх}}$, т. е. $P_m = P_{\Gamma} + P_{\text{вх}}$.

Для ослабления этих потерь сердечник статора выполняют шихтованным из тонких (0,5 или 0,35 мм) штампованных листов электротехнической стали, изолированных друг от друга тонким слоем изоляционного лака. Магнитные потери происходят также в сердечнике ротора, но они невелики и ими пренебрегают. Объясняется это тем, что частота перемагничивания сердечника ротора небольшая. Так, при час-

тоте тока в сети $f_1 = 50$ Гц частота перемагничивания ротора $f_2 = sf_1$ даже при номинальной нагрузке двигателя не превышает 2...4 Гц.

Механические потери $P_{\text{мех}}$ – это потери на трение в подшипниках и на вентиляцию (при искусственном охлаждении двигателя). Они пропорциональны квадрату частоты вращения ротора двигателя.

На рис. 7.1 представлена энергетическая диаграмма асинхронного двигателя, на которой все виды потерь условно показаны отводами от потока мощности P_1 , поступающей в двигатель из сети. Ширина диаграммы в верхней части эквивалентна мощности P_1 , в средней части – электромагнитной мощности $P_{\text{эм}}$ и в нижней части – полезной механической мощности на валу двигателя:

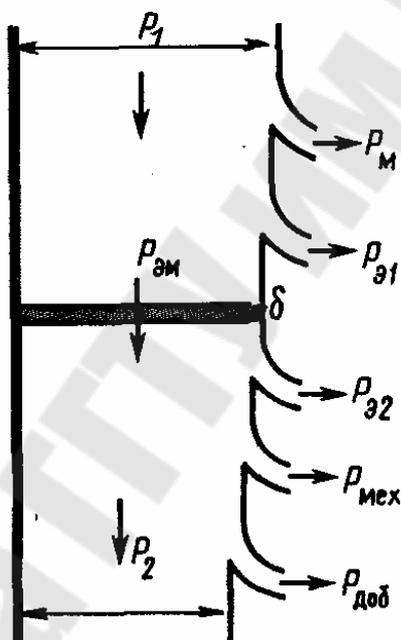


Рис. 7.1 Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

$$P_2 = P_1 - \Sigma P, \quad (7.7)$$

где суммарные потери асинхронного двигателя, Вт,

$$\Sigma P = P_{\text{м}} + P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}. \quad (7.8)$$

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя

$$\eta = P_2 / P_1 = (P_1 - \Sigma P) / P_1. \quad (7.9)$$

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя зависит от нагрузки. При номинальной или близкой к ней нагрузке КПД достигает наибольшего значения, при нагрузках меньших номинальных или перегрузках двигателя КПД уменьшается. Коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке зависит от мощности двигателей: у двигателей средней и большой мощности $\eta_{\text{ном}} = 0,88 \dots 0,92$, у двигателей малой мощности табл. 7.1 $\eta_{\text{ном}} = 0,5 \dots 0,85$, у двигателей мощностью в несколько ватт $\eta_{\text{ном}} = 0,204 \div 0,30$.

В конечном итоге вся энергия потерь превращается в тепловую энергию, идущую на нагрев двигателя и рассеивающуюся в окружающей среде.

В начальный период после включения большая часть выделяющегося в двигателе тепла идет на повышение его температуры, а меньшая поступает в окружающую среду. Затем по мере увеличения температуры двигателя все большее количество тепла передается в окружающую среду, и наступает момент, когда все выделяемое тепло рассеивается в пространстве. Тогда наступает тепловое равновесие и дальнейшее повышение температуры двигателя прекращается. Такая температура нагрева двигателя называется установившейся; она с течением времени остается постоянной, если нагрузка двигателя не изменяется.

Количество тепла Q , которое выделяется в двигателе за 1 с, можно определить по формуле

$$Q = P_2 / \eta - P_2 = P_2(1/\eta - 1), \quad (7.10)$$

где η - КПД двигателя; P_2 - мощность на валу двигателя.

Из формулы (7.1) следует, что чем больше нагрузки двигателя, тем больше тепла в нем выделяется и тем выше его установившаяся температура.

Опыт эксплуатации электродвигателей показывает, что основной причиной их выхода из строя является перегрев обмотки. Пока температура изоляции не превышает допустимого значения, тепловой износ изоляции нарастает очень медленно. Но по мере превышения температуры износ изоляции резко возрастает. Практически считают, что перегрев изоляции на каждые 8°C снижает срок ее службы вдвое. Так, двигатель с хлопчатобумажной изоляцией обмоток при номинальной нагрузке и температуре нагрева до 105°C может работать около 15 лет, при перегрузке и повышении

температуры до 145 °С двигатель выйдет из строя уже через 1,5 месяца.

На основании стандарта изоляционные материалы, используемые в электромашиностроении, по нагревостойкости делятся на семь классов, для каждого из которых устанавливается максимально допустимая температура (табл. 7.1).

Допустимое превышение температуры обмотки двигателя над температурой окружающей среды (принято +35 °С) для класса нагревостойкости *Y* составляет 55 °С, для класса *A* - 70°, для класса *B* - 95°, для класса *H* - 145°, для класса *G* - более 155 °С. Превышение температуры данного двигателя зависит от величины его нагрузки и режима работы. При температуре окружающей среды ниже 35 °С двигатель можно нагрузить выше его номинальной мощности, но так, чтобы при этом температура нагрева изоляции не превышала допустимые нормы.

Таблица 7.1

Допустимые нормы температуры нагрева изоляции

Характеристика материала	Класс нагревостойкости	Предельно допустимая температура, °С
Непропитанные хлопчатобумажные ткани, пряжа, бумага и волокнистые материалы из целлюлозы и шелка	<i>Y</i>	90
Те же материалы, но пропитанные связующими	<i>A</i>	105
Некоторые синтетические органические пленки	<i>E</i>	120
Материалы из слюды, асбеста и стекловолокна, содержащие органические связующие вещества	<i>B</i>	130
Те же материалы в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими веществами	<i>F</i>	155
Те же материалы, но в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами	<i>H</i>	180
Слюда, керамические материалы, стекло, кварц, асбест, применяемые без связующих составов или с неорганическими связующими составами	<i>G</i>	Более 180

Исходя из известного количества тепла Q , выделенного при работе двигателя, можно подсчитать превышение температуры двигателя τ °С над температурой окружающей среды, т. е. температуру перегрева:

$$\tau = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-\frac{A}{C}t} \right) + \tau_0 e^{-\frac{A}{C}t}, \quad (7.11)$$

где A - теплоотдача двигателя, Дж/град·с; e - основание натуральных логарифмов ($e = 2,718$); C - теплоемкость двигателя, Дж/град; τ_0 — начальное превышение температуры двигателя при $t = 0$.

Установившаяся температура τ_y двигателя может быть получена из предыдущего выражения, если принять $t = \infty$. Тогда $\tau_y = Q/A$. При $\tau_0 = 0$ равенство (7.11) примет вид

$$\tau = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{A}{C}t} \right). \quad (7.12)$$

Обозначим отношение C/A через T , тогда

$$\tau = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (7.13)$$

где T - постоянная времени нагрева, с.

Постоянная нагрева – это время, в течение которого двигатель нагрелся бы до установившейся температуры при отсутствии теплоотдачи в окружающую среду. При наличии теплоотдачи температура нагрева будет меньше и равна $\tau = 0,632\tau_y$. Постоянная времени может быть найдена графически (рис. 7.2, а). Для этого из начала координат проводят касательную OC до пересечения с горизонтальной прямой, проходящей через точку a , соответствующую температуре установившегося нагрева. Отрезок bc будет равен T , а отрезок ab - времени t_y , в течение которого двигатель достигнет установившейся температуры τ_y . Обычно τ_y принимают равным $4T$.

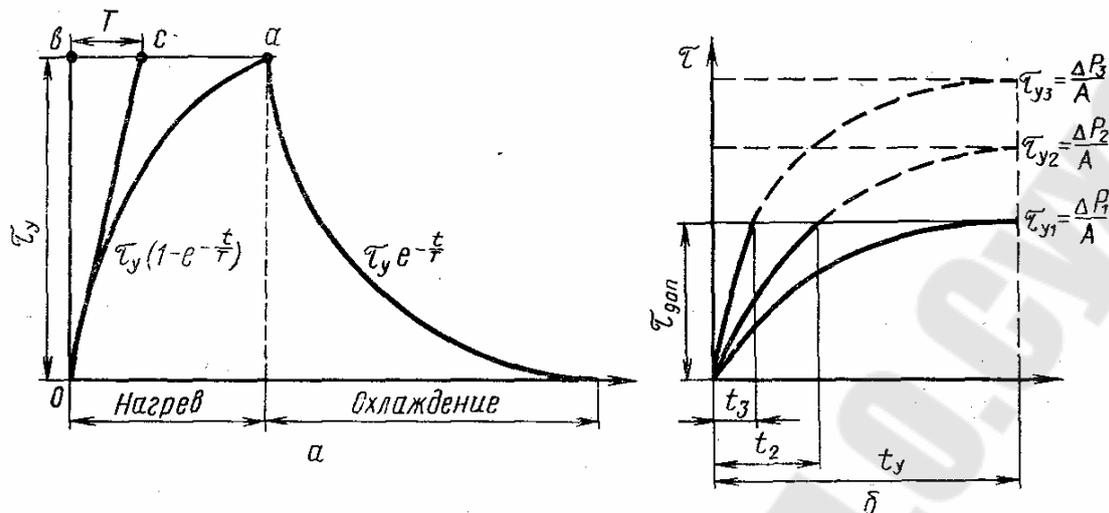


Рис. 7.2. Кривые нагрева и охлаждения двигателя:
 а – графическое определение постоянной нагрева; б – кривые нагрева при различных нагрузках

Постоянная нагрева зависит от:
 номинальной мощности двигателя;
 частоты его вращения;
 конструкции и способа охлаждения, но не зависит от величины его нагрузки.

Если двигатель, после того как он нагреется, отключить от сети, то, начиная с этого момента, он уже не выделяет тепла, а накопленное тепло продолжает рассеиваться в окружающей среде и двигатель охлаждается.

Уравнение охлаждения имеет вид

$$\tau = \tau_y e^{-\frac{t}{T_0}}, \quad (7.14)$$

а кривая показана на рис. 6.3, а. В выражении (7.14) T_0 – постоянная времени охлаждения. Она отличается от постоянной времени нагрева T , так как теплоотдача двигателя, находящегося в покое, отличается от теплоотдачи работающего двигателя. Равенство $T_0 = T$ возможно в том случае, когда двигатель, отключенный от сети, имеет постороннюю вентиляцию. Обычно кривая охлаждения идет более полого, чем кривая нагрева. У двигателей с внешним обдувом T_0 больше T примерно в 2 раза. Практически можно считать, что через промежуток времени от $3T_0$ до $5T_0$ температура двигателя становится равной температуре окружающей среды.

При правильном выборе номинальной мощности двигателя установившаяся температура перегрева τ должна быть равна допусти-

тому превышению температуры $\tau_{\text{доп}}$, соответствующему классу изоляции обмоточного провода. Различным нагрузкам $P_1 < P_2 < P_3$ одного и того же двигателя соответствуют определенные потери $\Delta P_1 < \Delta P_2 < \Delta P_3$ и значения установившейся температуры перегрева $\tau_{y1} < \tau_{y2} < \tau_{y3}$ (рис. 7.2, б). При номинальной нагрузке $P_1 = P_n$ двигатель может работать длительное время без опасного перегрева, тогда как при увеличении нагрузки до P_2 допустимое время его включения составит не более t_2 , а при мощности P_3 не более t_3 .

Исходя из изложенного можно дать следующее определение номинальной мощности двигателя. Номинальная мощность двигателя представляет собой мощность на валу, при которой температура его обмотки превышает температуру окружающей среды на величину, соответствующую принятым нормам перегрева.

Режимы работы электропривода

Если имеется график нагрузки двигателя и известны постоянная нагрева T и величина теплоотдачи A , то можно расчетным путем построить кривую нагрева машины, определить его максимальное значение и проверить, соответствует ли нагрев машины требованиям стандарта.

Однако опыт показывает, что постоянная T и теплоотдача, A не могут быть найдены с достоверной степенью точности. Поэтому пользуются более простыми и вместе с тем надежными методами выбора мощности двигателя по условиям нагрева. В соответствии с этим разнообразные графики нагрузок приводных электродвигателей разбиты на три основных режима:

- продолжительный;
- кратковременный;
- повторно-кратковременный.

Для каждого из которых разработаны методы расчета мощности электродвигателей.

При продолжительном режиме работа двигателя происходит без перерыва, причем рабочий период настолько велик, что нагрев двигателя достигает установившейся температуры. В этом режиме механизм может работать как с постоянной нагрузкой (рис. 7.3, а), так и с переменной (рис. 7.3, б).

При кратковременном режиме рабочие периоды чередуются с паузами (рис. 6.4, в). Во время пауз двигатель не обязательно отключается от сети, а может работать вхолостую. Паузы в этом режиме настолько длительны, что двигатель успевает охладиться до температу-

ры окружающей среды, а за кратковременные рабочие периоды его нагрев не достигает установившегося значения.

При повторно-кратковременном режиме (рис. 7.3, *г*) рабочие периоды чередуются с периодами останова или холостого хода, как и при кратковременном режиме, но так как длительность пауз здесь меньше, двигатель не успевает охладиться до температуры окружающей среды. Поэтому к концу следующего рабочего цикла температура двигателя постепенно повышается, пока не достигнет установившейся величины.

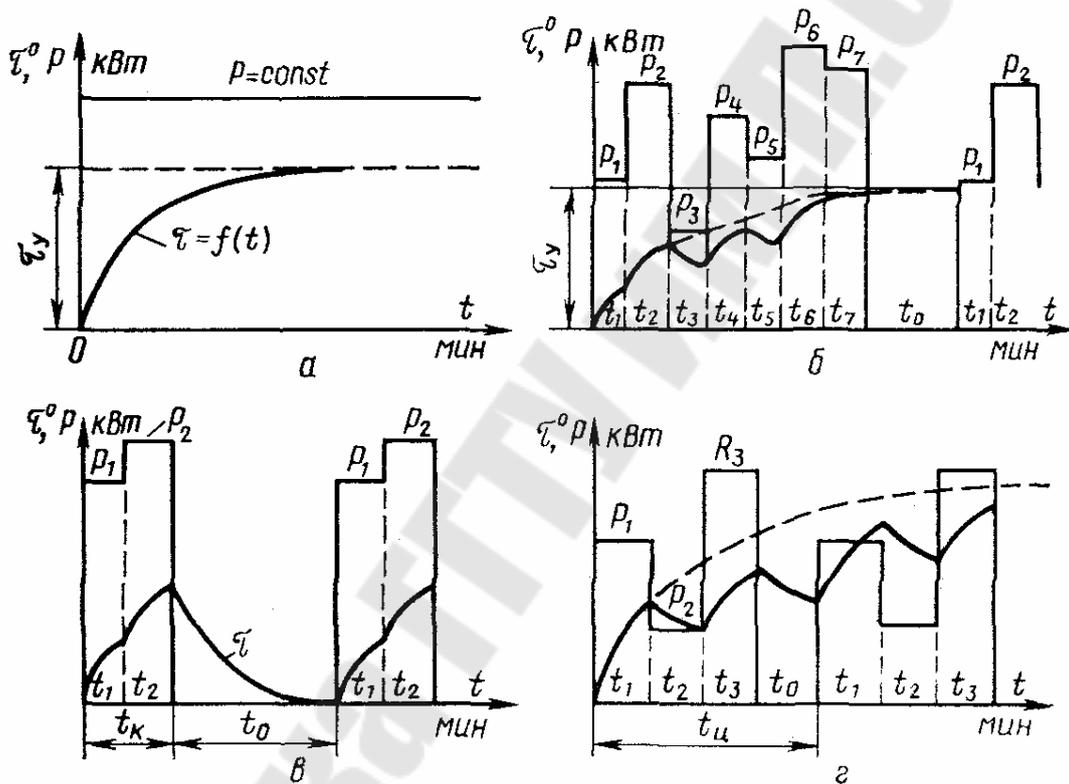


Рис. 7.3. Графики нагрузки и кривые нагрева двигателей:
а — при длительной постоянной нагрузке;
б — при длительной переменной нагрузке;
в — при кратковременной нагрузке;
г — при повторно-кратковременной нагрузке

Повторно-кратковременный режим характеризуется продолжительностью включения ПВ, т. е. отношением продолжительности рабочего периода t_p к продолжительности всего цикла $t_{ц}$, включая и паузы:

$$ПВ = t_p / t_{ц} = t_p / (t_p + t_o) \quad (7.15)$$

Обычно ПВ выражают в процентах.

Если двигатель работает с переменными циклами, то относительную продолжительность включения определяют по полному периоду, в который входит ряд неодинаковых циклов:

$$\text{ПВ} = \left[\Sigma t_p / (\Sigma t_p + \Sigma t_o) \right] \cdot 100 \% , \quad (6.16)$$

где Σt_p - продолжительность рабочих периодов; $\Sigma t_p + \Sigma t_o$ - продолжительность всех циклов, входящих в период работы двигателя.

Приняты следующие стандартные значения ПВ: 15; 25; 40; 60 и 100 %, причем ПВ = 25 % или 40 % принимают за номинальное значение.

Обычно при значении ПВ больше 60 % режим работы двигателя считается длительным, при ПВ меньше 10 % - кратковременным, а в пределах от 10 до 60 % - повторно-кратковременным. Продолжительность цикла при этом не должна превышать 10 мин.

Выбор мощности двигателя при продолжительной нагрузке

При постоянной нагрузке нужно выбирать двигатель с номинальной мощностью P_n , равной или несколько большей мощности P , полученной расчетом:

$$P_n \geq P \quad (7.17)$$

Мощность машины при длительной нагрузке определяют по формулам, которые имеются в литературе, описывающей конструкции машин и механизмов. Статическую нагрузку можно также определять из графика механической нагрузки. Тогда номинальную мощность двигателя при продолжительной постоянной нагрузке P выбирают непосредственно из каталога так, чтобы она была равна или несколько превышала расчетную P ($P_n \geq P$).

Если нагрузка, представленная графиком, зарегистрирована ваттметром, то номинальную мощность двигателя выбирают с учетом его КПД:

$$P_n \geq P \eta. \quad (7.18)$$

Если нагрузка продолжительная, но меняющаяся по величине, то выбор необходимой мощности двигателя производится, сущность которого заключается в следующем.

При работе двигателя с нагрузкой, меняющейся в отдельные промежутки времени t_1, t_2, \dots, t_n , выделяется соответствующее количество тепла Q_1, Q_2, \dots, Q_n , пропорциональное квадрату тока, сопротивлению обмотки и времени. Тогда количество тепла, выделившееся в обмотке двигателя за время одного цикла $t_{\text{ц}}=t_1+t_2+ t_3 \dots t_n$, составит:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n = R(I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3 + \dots + I_n^2 t_n), \quad (7.19)$$

где R - активное сопротивление обмотки двигателя.

То же количество тепла в той же обмотке двигателя за то же время может быть выделено некоторым постоянным током $I_{\text{ЭКВ}}$:

$$Q = I_{\text{ЭКВ}}^2 R(t_1 + t_2 + \dots + t_n) = I_{\text{ЭКВ}}^2 R t_{\text{ц}}. \quad (7.20)$$

Так как этот ток производит то же тепловое действие, что и меняющиеся токи переменной нагрузки, он получил название эквивалентного.

$$R(I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n) = R I_{\text{ЭКВ}}^2 t_{\text{ц}},$$

откуда

$$I_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{(I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n) / t_{\text{ц}}}. \quad (7.21)$$

По найденной величине $I_{\text{ЭКВ}}$ в каталоге выбирают электродвигатель исходя из условия

$$I_{\text{н}} \geq I_{\text{ЭКВ}}, \quad (7.22)$$

где $I_{\text{н}}$ - номинальный ток нагрузки выбранного двигателя.

Выбранный двигатель проверяют на перегрузочную способность так, чтобы

$$I_{\text{м}} \geq I_{\text{м}}', \quad (7.23)$$

где $I_{\text{м}}$ и $I_{\text{м}}'$ - максимальный ток выбранного двигателя и максимальный ток по графику нагрузки.

Если известен эквивалентный ток, то можно подсчитать и соответствующую ему эквивалентную мощность двигателя

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{3} U_{\text{н}} I_{\text{экв}} \eta_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{н}} 10^{-3}, \quad (7.24)$$

где $U_{\text{н}}$, $\eta_{\text{н}}$ и $\cos \varphi_{\text{н}}$ - номинальные значения напряжения, КПД и коэффициента мощности.

При незначительном изменении частоты вращения двигателя во время работы под нагрузкой мощность изменяется пропорционально току нагрузки. Кроме того, в современных двигателях при изменении нагрузки в пределах от 50 % до номинальной, КПД и коэффициент мощности изменяются незначительно. Поэтому можно считать, что в указанных пределах между мощностью и силой тока сохраняется прямая пропорциональная зависимость. Это дает возможность подсчитать эквивалентную мощность двигателя, если в расчетную формулу (7.24) вместо значения токов подставить значения мощностей

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{(P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n) / (t_1 + t_2 + \dots + t_n)}. \quad (7.25)$$

В этом случае двигатель выбирают по каталогу, исходя из условия, что

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{экв}}. \quad (7.26)$$

Когда график мощности составлен по данным ваттметра, то при выборе мощности двигателя необходимо учесть также его КПД:

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{экв}} \eta_{\text{дв}}. \quad (7.27)$$

Если в графике переменной нагрузки имеются пуск, торможение и останов двигателя, то для двигателей с самовентиляцией подсчет эквивалентной мощности ведется с учетом поправочных коэффициентов α и β , учитывающих ухудшение теплоотдачи при снижении частоты вращения или останове двигателя. Тогда уравнение (7.25) примет вид

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{(P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n) / (\alpha t_1 + t_2 + \dots + t_n + \beta t_0)}, \quad (7.28)$$

где t_1 - время разгона или торможения двигателя; t_0 - время паузы.

Коэффициенты α и β определяют экспериментально. Ориентировочно их можно принять равными $\alpha = 0,75 \div 0,5$ и $\beta = 0,5 \div 0,25$. Большие значения этих коэффициентов соответствуют двигателям постоянного тока, а меньшие - асинхронным двигателям.

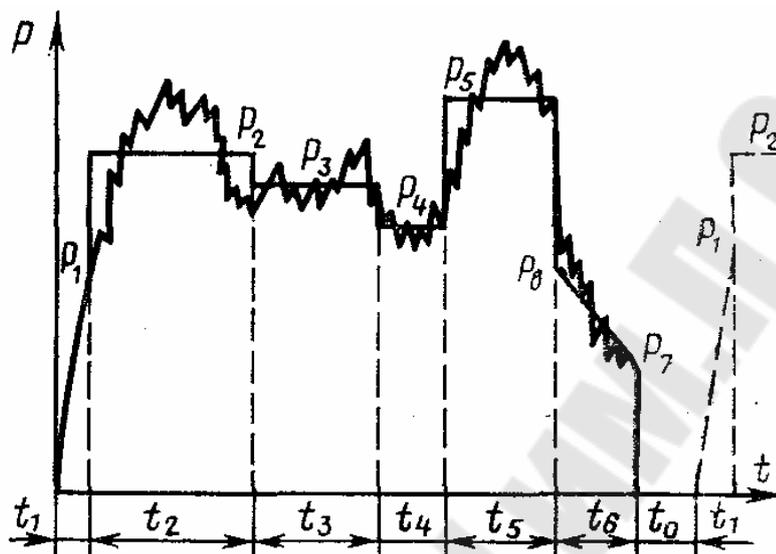


Рис. 7.4. Спрявление графика фактической нагрузки

Если график нагрузки имеет наклонные участки (рис. 7.4), эквивалентную мощность определяют по формуле

$$P_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{P_1^2 \frac{t_1}{3} + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3 + P_4^2 t_4 + P_5^2 t_5 + (P_6^2 + P_6 P_7 + P_7^2) \frac{t_6}{2}}{\alpha t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + \beta t_0}}. \quad (7.29)$$

Если график нагрузки задан в виде $M=f(t)$, то эквивалентный момент подсчитывают по формуле

$$M_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{(M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n) / (t_1 + t_2 + \dots + t_n)}, \quad (7.30)$$

а мощность двигателя определяют из выражения

$$P_{\text{H}} = \frac{M_{\text{ЭКВ}} n_{\text{H}}}{9550}, \quad (7.31)$$

где n_{H} - номинальная частота вращения двигателя.

Выбранный по методу эквивалентной мощности или эквивалентного момента двигатель проверяют на перегрузочную способность по формулам

$$P_M / P_H \geq P'_M / P_H; \quad M_M / M_H \geq M'_M / M_H,$$

где M_M / M_H и P_M / P_H - кратности максимальных момента и мощности двигателя, выбранного по каталогу; M'_M и P'_M - максимальные момент и мощность из графиков нагрузки.

Асинхронные двигатели целесообразно проверять на перегрузку с учетом возможного падения напряжения в сети из условия

$$0,8 \frac{P_M}{P_H} \geq \frac{P'_M}{P_H}; \quad 0,8 \frac{M_M}{M_H} \geq \frac{M'_M}{M_H}.$$

Для определения P_M находим критическое скольжение s_k , равное

$$s_k = s_H \left[\frac{M_M}{M_H} + \sqrt{\left(\frac{M_M}{M_H} \right)^2 - 1} \right].$$

Отсюда критическая частота вращения $n_k = n_1(1 - s_k)$.

$$\text{Тогда } P_M = \frac{M_M n_k}{9550}.$$

Выбор мощности двигателя при кратковременной нагрузке

Кратковременный режим работы характеризуется чередующимися периодами работы и паузами, причем за период работы $t_k \leq 3T$ двигатель не успевает нагреться до установившегося превышения температуры τ_y , а за период пауз, равный $t_0 \leq 4T$ он охлаждается до температуры окружающей среды.

Выбор мощности двигателя при кратковременном режиме работы производится с условием, что предельно допустимое превышение температуры $\tau_{доп}$ двигателя через определенный конечный промежуток времени будет равно установившемуся превышению температуры τ_y , которое достигается за бесконечно большое время работы двигателя при номинальной нагрузке P_H . В этих условиях мощность двигате-

ля P_k при кратковременной работе в течение времени t_k всегда будет значительно больше номинальной мощности P_n при длительном режиме работы.

Исходя из изложенного можно ввести коэффициент, показывающий, во сколько раз тепло Q_k , выделяемое двигателем при кратковременной нагрузке, больше тепла Q , выделяемого двигателем при работе с длительной номинальной нагрузкой. Этот коэффициент обычно называют коэффициентом тепловой перегрузки

$$\alpha = Q_k / Q = I_k^2 / I_n^2, \quad (7.32)$$

или, допуская, что мощность пропорциональна току,

$$\alpha = P_k^2 / P_n^2. \quad (7.33)$$

Коэффициент α может быть определен из уравнений нагрева двигателя при условии, что температура перегрева в обоих режимах работы должна достигнуть предельно допустимого значения $\tau_{м.дл} = \tau_{м.к}$. При длительном режиме работы температура будет достигнута за время $t = \infty$, а при кратковременном - за время t_k . Следовательно:

$$\tau_{м.дл} = Q / A \left(1 - e^{-\frac{\infty}{T}} \right) = \frac{Q}{A}$$

и

$$\tau_{м.к} = \frac{Q_k}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_k}{T}} \right).$$

Приравнивая эти выражения, находим коэффициент тепловой перегрузки

$$\alpha = Q_k / Q = 1 / \left(1 - e^{-\frac{t_k}{T}} \right). \quad (7.34)$$

Таким образом, зная постоянную T и время кратковременной работы двигателя t_k , можно определить коэффициент тепловой перегрузки α и мощность двигателя P_k , обеспечиваемую за время t_k при кратковременном режиме работы.

Время, в течение которого двигатель мощностью P_n может развить мощность P_k , подсчитывают по формуле

$$t_k = T \ln[\alpha / (\alpha - 1)]. \quad (7.35)$$

При выборе мощности двигателя для кратковременного режима работы следует помнить, что его предельно допустимая мощность ограничивается как электрической, так и механической перегрузочной способностью. Если задан график кратковременной нагрузки в виде зависимости $M = f(t)$ или $P = f(t)$ (см рис. 7.3, в), то выбор двигателя можно проводить, определяя эквивалентный момент или эквивалентную мощность.

Пусть спрямленный график нагрузки имеет два участка мощностью P_1 и P_2 , время $t_k = t_1 + t_2$. Тогда эквивалентная мощность за период работы будет равна

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{(P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2) / (t_1 + t_2)}, \quad (7.36)$$

а аналогично

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{(M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2) / (t_1 + t_2)}. \quad (7.37)$$

Особенность этих формул состоит в том, что в знаменатель входит не время цикла, а время t_k . Двигатель после такого расчета выбирают по специальным каталогам по двум параметрам: эквивалентной мощности $P_{\text{экв}}$ и длительности работы t_k . В этих каталогах для данного типа двигателя приведены несколько значений номинальной мощности при соответствующей длительности рабочего периода. Двигатель должен быть проверен по каталогу на перегрузку, а при включении под нагрузкой – по величине пускового момента.

Для работы в кратковременном режиме промышленностью, выпускаются специальные двигатели с повышенным пусковым моментом и перегрузочной способностью.

Следовательно, нецелесообразно применять для этих целей двигатели, предназначенные для работы в продолжительном режиме, так как они обычно имеют худшие пусковые и перегрузочные свойства, вследствие чего их не удастся использовать с полной нагрузкой.

Выбор мощности двигателя при повторно-кратковременной нагрузке

В повторно-кратковременном режиме работают такие машины и механизмы как лебедки, электрифицированные краны и др.

Выбор мощности двигателя для этого режима производится по эквивалентной мощности и продолжительности включения. Эквивалентную мощность для заданного графика нагрузки (рис. 7.3, з) определяют по формуле

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{(P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3) / (t_1 + t_2 + t_3 + t_0)}. \quad (7.38)$$

Продолжительность включения подсчитывают по формуле (6.39) или (7.40). Затем определяют мощность $P_{\text{ПВ}}$ при повторно-кратковременном режиме, соответствующую данному значению ПВ:

$$P_{\text{ПВ}} = P_{\text{экв}} / \sqrt{\text{ПВ} / 100}. \quad (7.39)$$

После этого по специальным каталогам выбирают двигатель по расчетной мощности $P_{\text{ПВ}}$ и значению ПВ в процентах. При этом выбранная мощность $P_{\text{н}}$ должна быть равна или несколько больше $P_{\text{ПВ}}$. Следует отметить, что мощность одного и того же двигателя возрастает при уменьшении продолжительности включения $P_{\text{н15}} > P_{\text{н25}} > P_{\text{н40}}$.

Кроме того,

$$P_{\text{экв}} = P_{\text{ПВ1}} \sqrt{\text{ПВ}_1 / 100} = P_{\text{ПВ2}} \sqrt{\text{ПВ}_2 / 100} = \dots \quad (7.40)$$

Если расчетная продолжительность включения существенно отличается от стандартных значений, то расчетная мощность для значения ПВ может быть определена по формулам:

$$P_{\text{р}} = P_{\text{н15}} \sqrt{15 / \text{ПВ}_{\text{р}}},$$

$$P_{\text{р}} = P_{\text{н25}} \sqrt{25 / \text{ПВ}_{\text{р}}} \quad \text{или} \quad P_{\text{р}} = P_{\text{н40}} \sqrt{40 / 100}.$$

После чего выбранный двигатель проверяют на перегрузку по максимальному моменту.

Выбор типа электродвигателя

В большинстве случаев выбор двигателя по роду тока, напряжению, частоте питающей сети предопределен схемой электроснабжения предприятий. Самым распространенным в современных производственных условиях является применение электропривода с двигателями трехфазного тока частотой 50 Гц. Наиболее массовым, простым и экономичным является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, используемый в лесопромышленных и деревообрабатывающих предприятиях, как правило, при мощностях до 100 кВт. Условия эксплуатации асинхронных двигателей серии 4А следующие: температура окружающего воздуха до +40 °С (исполнение У3) и от – 50 до +45 °С (исполнение У2), окружающая среда невзрывоопасна, не содержит токопроводящей пыли, агрессивных газов и паров в концентрациях, разрушающих металл и изоляцию (кроме химостойкого исполнения).

Двигатели с высотами оси вращения 50...152 мм имеют изоляционную систему класса нагревостойкости *B*, с высотами 100...355 мм – класса *F*. Расчетный срок службы двигателей не менее 15 лет (при наработке около 40 тыс. ч), средний срок службы обмоток статора до капитального ремонта – не менее 20 тыс. ч.

Двигатели одинаковой мощности выпускаются промышленностью на разные частоты вращения. Чем больше частота при данной мощности, тем меньше размеры и масса машины, а так как стоимость определяется в основном массой, то с повышением частоты вращения стоимость машины снижается. Машины с большей частотой вращения потребляют и меньшую реактивную мощность, имеют более высокий КПД. Поэтому для быстроходных машин и механизмов следует выбирать быстроходные двигатели, а для тихоходных – тихоходные или быстроходные, соединяя их с механизмами соответствующей передачи.

Для привода механизмов, имеющих большие статические и инерционные нагрузки в момент пуска целесообразно использовать двигатели с повышенным пусковым моментом, а для двигателей механизмов, работающих в повторно-кратковременных режимах и повторно-кратковременных с частыми пусками (например, лебедки), предназначены двигатели с повышенным скольжением. Номинальным режимом для двигателей с повышенным скольжением является режим с $PВ = 40 \%$.

Для привода механизмов, допускающих ступенчатое регулирование частоты вращения, используют многоскоростные

двигатели серии 4А, они имеют две, три и четыре частоты вращения. Для привода механизмов, работающих обычно с перегрузками, а также частыми пусками, целесообразно применять двигатели серии 4А с встроенной температурной защитой. Такая защита позволяет наиболее полно использовать перегрузочные способности электродвигателя, обладает достаточным быстродействием, минимальным временем возврата. Двигатели со встроенной температурной защитой поставляются в основном исполнениях, модификациях и специализированных исполнениях с учетом условий окружающей среды. Для приводов с тяжелыми условиями пуска, требующих плавного регулирования частоты вращения, предназначены асинхронные двигатели с фазным ротором, двигатели специализированных исполнений (крановые).

Для механизмов, требующих непрерывного и плавного регулирования частоты вращения в широких пределах, приходится применять двигатели постоянного тока, несмотря на относительную сложность их устройства и высокие эксплуатационные расходы.

Двигатели параллельного возбуждения выбирают, когда требуется устойчивость работы привода при изменении нагрузки, простота регулирования частоты вращения и плавность торможения, а двигатели с последовательным возбуждением незаменимы в случаях, когда привод должен развивать большой пусковой момент.

При выборе величины напряжения учитывают экономичность и безопасность обслуживания. Двигатели малой и средней мощности изготавливают на напряжения 230, 420 и 690 В. Наиболее распространено напряжение в электрических сетях промышленных предприятий 380 В, позволяющее осуществить питание силовых и осветительных объектов от общего источника. В условиях повышенной опасности поражения электрическим током применяют напряжение 42 В. Сети постоянного тока выполняются на напряжение 230 В, а для мощных приводов с выпрямителями – 400 В. Применяют и специальные двигатели напряжением до 10 кВ.

Конструктивное исполнение двигателя выбирают с учетом окружающей среды и способа сочленения с электрифицируемым механизмом. Защищенность частей двигателя от попадания твердых посторонних тел и воды, а также защиту обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями характеризует степень защиты. Условное обозначение степени защиты содержит:

– буквенную часть (IP),

- условное цифровое обозначение степени защиты персонала,
- условное цифровое обозначение степени защиты от проникновения воды внутрь двигателя.

Для двигателей серии 4А предусмотрены следующие степени защиты:

IP23 – защита от возможности соприкосновения пальцев человека с токоведущими или движущимися частями внутри машины, защита от попадания внутрь твердых посторонних тел диаметром не менее 12,5 мм (цифра 2); защита от дождя, падающего на машину под углом не более 60° к вертикали (цифра 3).

IP44 – защита от возможности соприкосновения инструмента, проволоки или других подобных предметов (толщина которых не превышает 1 мм) с токоведущими или движущимися частями внутри машины (первая цифра 4), защита от водяных брызг любого направления, попадающих на оболочку (вторая цифра).

IP54 – полная защита персонала от соприкосновения с вращающимися и токоведущими частями внутри машины, а также защита от вредных отложений пыли внутри машины.

Охлаждение двигателей со степенью IP44 и IP54 осуществляется центробежным вентилятором, расположенным на валу двигателя со стороны, противоположной рабочему концу. Он прогоняет воздух вдоль ребер станины. Двигатель со степенью защиты IP23 имеет систему охлаждения в виде двусторонней симметричной радиальной вентиляции.

На некоторых промышленных предприятиях распространены двигатели с горизонтальным расположением вала, укрепляемые при помощи четырех лап. В дереворежущих станках часто применяют фланцевые двигатели, соединяемые со станиной станка при помощи фланца, представляющего одну из крышек двигателя. Конструктивным развитием фланцевого двигателя является встраиваемый двигатель, у которого корпусом служит станина станка, а сердечник ротора и вентилятор установлены на его рабочем валу, где закреплен и режущий инструмент.

На производственных предприятиях применяют в основном двигатели закрытого исполнения. Во взрывоопасных помещениях (например, цехах химической переработки древесины, там, где применяют нитролаки) используют взрывобезопасные двигатели, имеющие закрытый и прочный корпус. При взрыве пламя не прорывается наружу, что исключает распространение взрыва в помещении.

8 ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Проверка на термическую стойкость и динамическую устойчивость производится после расчета сечения токоведущих частей электроустановок. Определяется ток короткого замыкания.

Кабели и шины выбирают по номинальным параметрам (напряжению, току) и проверяют на термическую и динамическую стойкость токам короткого замыкания.

Так как процесс короткого замыкания кратковременный, то можно считать, что все тепло, выделяемое в проводнике кабеля, идет на нагрев. Температура нагрева кабеля определяется его удельным сопротивлением, теплоемкость, рабочей температурой.

Основными аппаратами в системе электроснабжения предприятия являются разъединители предохранители и выключатели нагрузки. При эксплуатации электрические аппараты работают в трех основных режимах: длительном режиме, в режиме перегрузки и режиме КЗ.

В длительном режиме работа аппаратов обеспечивается правильным выбором их параметров по номинальному напряжению и номинальному току. Надежная работа аппаратов в режиме перегрузки обеспечивается за счет запаса прочности и ограничения величины и длительности повышения напряжения или тока.

Термической и электродинамической устойчивостью обеспечивается надежная работа аппаратов в режиме КЗ.

Факторы, учитываемые при выборе аппаратов, приведены в таблице 8.1.

Таблица 8.1

Факторы, учитываемые при выборе аппаратов

Тип электрического аппарата	Номинальное напряжение	Номинальный ток	Динамическая устойчивость	Термическая стойкость Терм	Коммутационная способность	Нагрузка вторичных цепей
Выключатель	+	+	+	+	+	-
Разъединитель	+	+	+	+	-	-
Предохранитель	+	+	+	+	-	-
Трансформатор тока	+	+	+	+	-	-
Трансформатор напряжения	+	-	-	-	-	+

К высоковольтному оборудованию трансформаторных подстан-

ций относят разъединители, короткозамкатели, отделители, высоковольтные предохранители, выключатели и т. д.

Разъединители в установках напряжением выше 1000 В используют для включений — отключений (переключений) участков высоковольтной сети, находящихся под напряжением, но не нагруженных рабочим током. Разъединители создают необходимый видимый разрыв электрической сети, требуемый по правилам техники безопасности, не имеют устройств для гашения дуги, возникающей при отключении больших токов. Поэтому их часто снабжают блокировкой, предохраняющей от отключения тока нагрузки. Разъединителями допускается отключать ток холостого хода трансформаторов мощностью до 750 кВ·А (на напряжении 10 кВ), мощностью до 20 тыс. кВ·А (при напряжении 35 кВ), а также ток заземления нейтралей трансформаторов и дугогасящих катушек, уравнительный ток линий при разности напряжений не более 2 % номинального и небольшие зарядные токи кабельных линий.

Разъединители изготавливают для внутренней (рис. 8.1) и наружной установки. Для внутренней установки их делают однополюсными и трехполюсными; для наружной – повышенной механической прочности с отдельными полюсами горизонтально-поворотного типа.

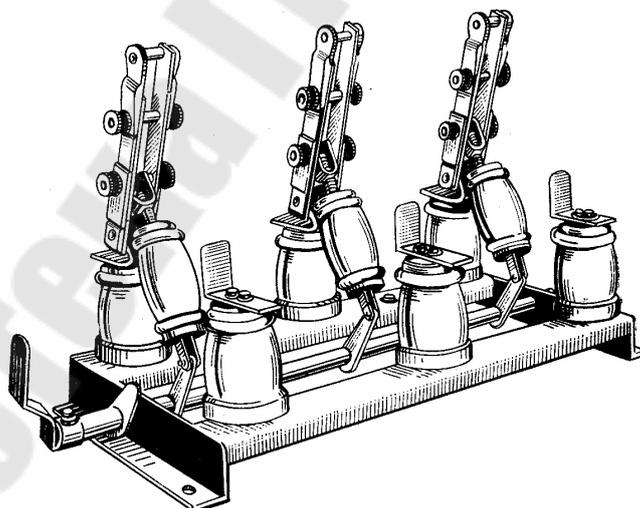


Рис.8.1. Разъединитель трехполюсный типа PB-10/600

Короткозамкатели предназначены для создания искусственного короткого замыкания в тех случаях, когда ток при повреждении в трансформаторе может оказаться недостаточным для срабаты-

вания релейной защиты, а также когда ремонтируемую часть высоковольтной установки или линии надо обезопасить от случайного появления на ней высокого напряжения. Короткозамыкатели применяются на подстанциях, не имеющих выключателей со стороны высшего напряжения. Они предназначены для наружной установки.

Короткозамыкатели типа КЗ-35 (рис. 8.2) на напряжение 35 кВ выполняются в виде двух отдельных полюсов, соединяемых при монтаже в один двухполюсный аппарат. При включении короткозамыкателя происходит двухфазное короткое замыкание на землю, и в случае появления случайного напряжения срабатывают соответствующие элементы защиты. Включается короткозамыкатель автоматически под действием пружинного механизма при срабатывании привода от релейной защиты. Отключается короткозамыкатель вручную.

Отделители вводятся в схему при питании от одной линии нескольких трансформаторных подстанций. Отделители автоматически отсоединяют от линии поврежденный трансформатор после отключения головного выключателя линии. Отключение отделителя производится под действием пружин при срабатывании блокирующего реле или отключающего электромагнита; включение осуществляется вручную. Отделители выпускаются с ножами заземления типа ОДЗ-35 (рис. 8.2) и без ножей заземления типа ОД. Они могут отключать токи намагничивания трансформаторов мощностью до 16000 кВ·А при напряжении 35 кВ и до 63000 кВ·А при напряжении 110 кВ.

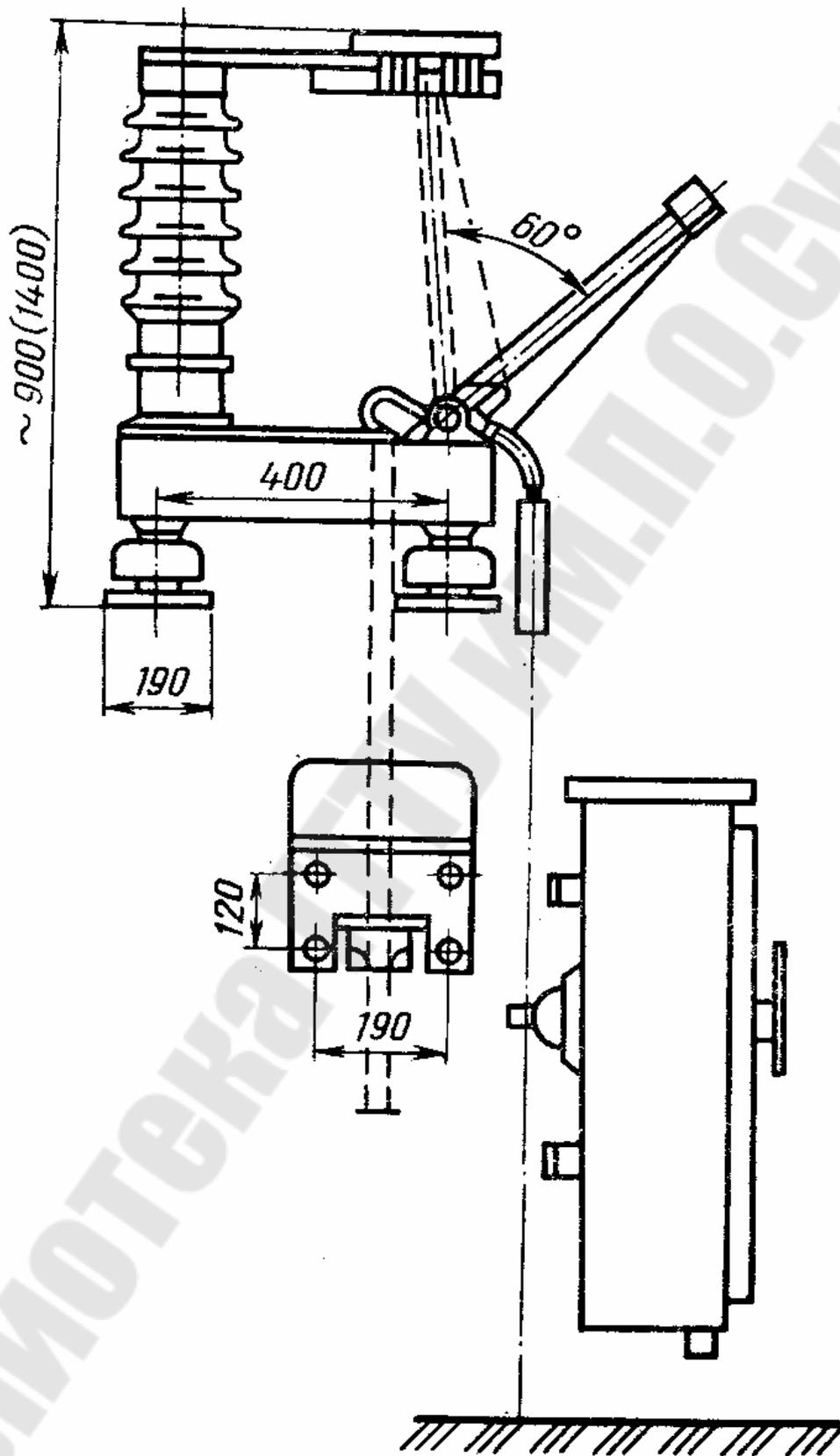


Рис. 8.2. Короткозамыкатель с приводом

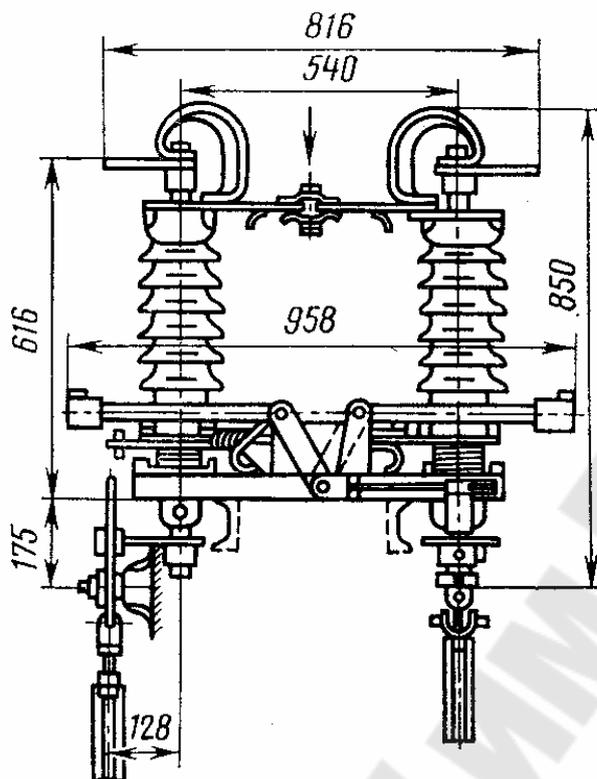


Рис. 8.3. Отделитель типа ОДЗ-35 с заземляющими ножами

Высоковольтные предохранители

Предохранители производят автоматическое отключение того или иного устройства, когда ток в цепи превысит установленную величину. При срабатывании плавкой предохранитель выходит из строя, и, чтобы подготовить его для дальнейшей работы, необходимо сменить находящуюся в нем плавкую вставку. Ценными свойствами плавких предохранителей являются простота устройства, малая стоимость, быстрое отключение цепи при коротком замыкании, а в предохранителях типа ПК (кварцевых) – способность ограничивать ток в цепи при коротком замыкании. К недостаткам следует отнести срабатывание при токе, значительно превышающем номинальный ток плавкой вставки; отключение цепи плавким предохранителем вызывает перенапряжение на отключаемом участке; возможно однофазное отключение и последующая неполнофазная работа установки или участка цепи.

Предохранители высокого напряжения выпускают для наружной и внутренней установки на напряжение 6; 10 и 35 кВ. Они имеют следующие условные обозначения: ПК – предохранитель кварцевый; ПКН – то же для наружной установки; ПКЭ – то же для установок,

подверженных тряске и вибрации; ПКТ – то же для защиты трансформаторов напряжения. Если в условном обозначении типа предохранителя имеется число, то оно указывает на номинальное напряжение, при котором должен работать данный предохранитель.

Выключатели. При распределении электрической энергии напряжением выше 1000 В включение и отключение электрических цепей производится под нагрузкой, что осуществляется при помощи специальных высоковольтных выключателей. Такой выключатель является наиболее ответственным элементом высоковольтного устройства.

При разрыве электрической цепи между контактами выключателя возникает электрическая дуга. В момент расхождения контактов у их поверхности образуется большая напряженность электрического поля, что приводит к ионизации воздушного промежутка. Под действием ионизации воздух, окружающий контакты выключателя, перестает быть изолятором, что может привести к замыканию между фазами, поэтому предусматриваются деионизирующие устройства.

В зависимости от применяемой дугогасительной среды выключатели бывают жидкостные (масляные) и газовые (воздушные). В масляных выключателях дугогасительной средой является трансформаторное масло, в воздушных – сжатый воздух.

В газогенерирующих выключателях для гашения электрической дуги используется дутье газов, которые выделяются из твердых диэлектриков при воздействии на них дуги. В качестве такого материала используется органическое стекло, им выкладывают внутренние стенки дугогасительной камеры. Такой выключатель нагрузки на напряжение 6 и 10 кВ показан на рис. 8.4, при этом в комплект выключателя входят высоковольтные плавкие предохранители типа ПК, рассчитанные на номинальные токи 30-50 А.

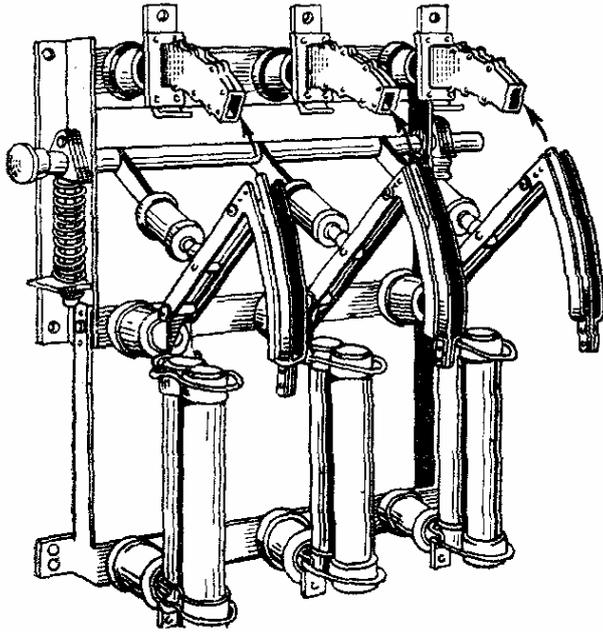


Рис. 8.4. Выключатель нагрузки с предохранителями

9. СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Схемы питающих и распределительных сетей

Для большинства промышленных объектов источниками питания являются электрические сети энергосистем. Отдельные крупные предприятия со значительным потреблением теплоты могут иметь собственные ТЭЦ, связанные линиями электропередачи с энергосистемой. Рассмотрим характерные схемы систем внешнего электроснабжения при питании от энергосистемы.

На рис. 9.1, *a* показана принципиальная схема радиального питания предприятий малой и средней мощности. При такой схеме в качестве пункта приема электроэнергии используется РП, и в этом случае напряжения внешнего и внутреннего электроснабжения совпадают.

Радиальные схемы с одним или несколькими РП получили широкое распространение в системах внешнего электроснабжения промышленных объектов.

При значительных мощностях электрических нагрузок следует максимально приближать источники высокого напряжения к электроустановкам потребителей, сокращая число ступеней промежуточных

трансформаций. Этому способствует применение схем с ГПП (рис.9.1, б) и глубоких вводов.

При глубоком вводе происходит разукрупнение ГПП и прием электроэнергии децентрализуется. Максимальный эффект разукрупнение подстанций дает при нагрузках, размещенных в нескольких пунктах на значительной территории (карьеры, горно-обогатительные комбинаты и т.п.). При этом ПГВ выполняются по простейшим схемам (бевыключателей на стороне первичного напряжения). В системе глубокого ввода не требуются промежуточные РП, функции которых выполняют РУ 6—10 кВ ПГВ.

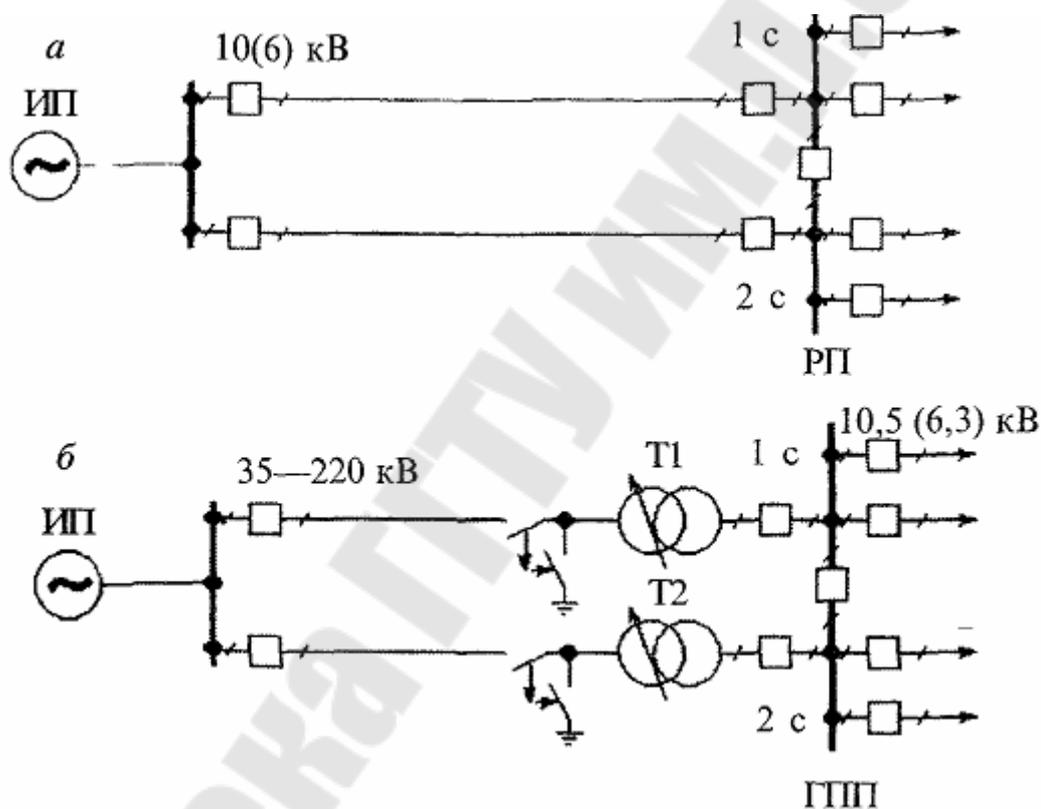


Рис. 9.1. Характерные схемы внешнего электроснабжения: а – радиальная с РП; б – с понижающей подстанцией

Глубокие вводы могут выполняться по двум схемам (рис. 9.2):

в виде магистральных воздушных линий электропередачи, проходящих в зонах основных нагрузок и питающих несколько (до пяти) ПГВ 35–220 кВ (рис. 9.2, а);

в виде радиальных воздушных или кабельных линий, питающих ПГВ от узловой распределительной подстанции (УРП) 330—750 кВ (рис. 9.2, б).

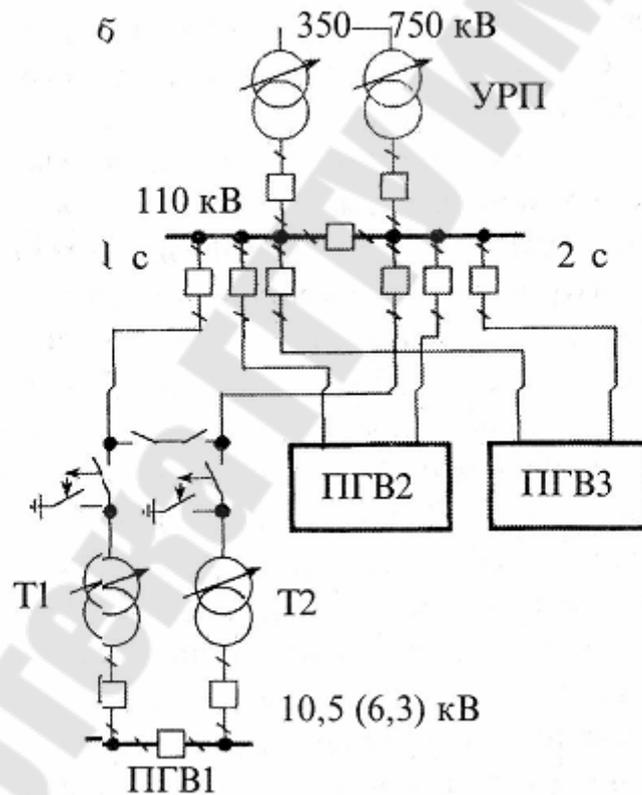
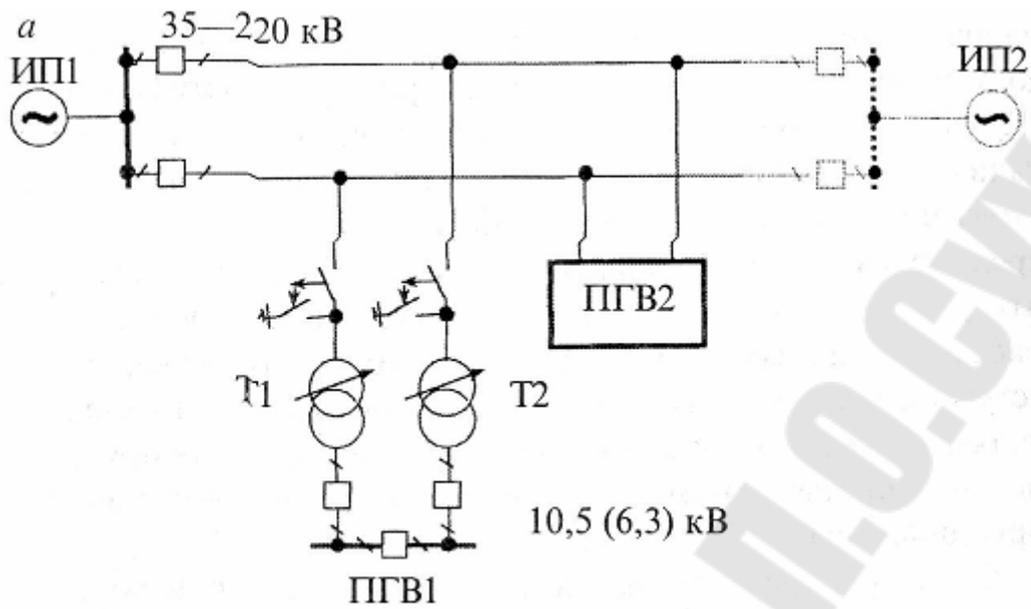


Рис. 9.2. Принципиальная схема глубокого ввода;
 а – магистральная; б – радиальная

Магистральные глубокие вводы возможны и целесообразны при малозагрязненной окружающей среде, когда по условиям генплана допустимо прохождение ВЛ по территории предприятия и размещение ПГВ 35...220 кВ возле соответствующих групп электроприемников. Радиальные глубокие вводы обычно применяются при загрязненной окружающей

среде. Они могут быть целесообразны и при нормальной среде, так как имеют определенные преимущества вследствие того, что отказ линии или трансформатора одной ПГВ не отражается на работе остальных ПГВ. Схемы глубоких вводов по надежности не уступают громоздким схемам централизованного электроснабжения, являясь при этом более простыми и дешевыми. Они пригодны для питания промышленных объектов, имеющих в своем составе электроприемники любых категорий.

Схемы распределительных сетей 6—10 кВ системы внутривозводского электроснабжения предназначены для питания приемников и потребителей электроэнергии, расположенных на территории промышленного объекта. Они могут быть радиальными, магистральными и смешанными (комбинированными).

Радиальные схемы, как правило, применяются, когда ТП размещены в различных направлениях от ИП. Они могут быть одно- и двухступенчатыми (рис. 9.3). Двухступенчатые схемы имеют промежуточные РП, что позволяет уменьшить число дорогостоящих ячеек РУ ИП (ГПП или ТЭЦ) и увеличить их загрузку. Такие схемы могут быть целесообразны на больших и средних промышленных предприятиях. Одноступенчатые радиальные схемы обычно применяются в СЭС небольших промышленных объектов. От РП осуществляется питание цеховых ТП, отдельных мощных электрических печей и электродвигателей напряжением 6...10 кВ. РП и ТП, обеспечивающие электроэнергией приемники первой и второй категорий, питаются обычно по двум радиальным линиям, каждая из которых работает отдельно на свою секцию. При отключении одной из секций ее нагрузка автоматически переводится на другую.

Как видно из рис. 9.3, радиальные схемы содержат большое количество коммутационных аппаратов и линий 6...10 кВ. Поэтому применять их нужно при надлежащем обосновании, для питания достаточно мощных и ответственных потребителей. Достоинствами радиальных схем являются удобство эксплуатации, высокая надежность работы, возможность применения простой и надежной защиты и автоматики.

Магистральные схемы распределительных сетей позволяют уменьшить число звеньев коммутации, что является их основным преимуществом по сравнению с радиальными. Данные схемы целесообразны при распределенных нагрузках, при упорядоченном, приближающемся к линейному расположении ТП на территории промышленного объекта. При формировании магистральной схемы следует стремиться к тому, чтобы линии от ИП до потребителей прокладывались без значительных обратных направлений. Недостатками магистральных схем являются усложнение конструктивного исполнения высоковольтного вводного устройства цеховых ТП по сравнению с радиальными схемами, в которых трансформаторы в большинстве случаев присоединяются наглухо, а также одновременное отключение нескольких трансформаторов, присоединенных к магистрали,

при ее повреждении. Число трансформаторов, подключаемых к одной магистрали, обычно не превышает 2...3 при мощности трансформаторов 1000...2500 кВ А и 4...5 при мощности 250...630 кВА. В схемах электропитания предприятий наибольшее распространение получили одиночные и двойные сквозные магистрали.

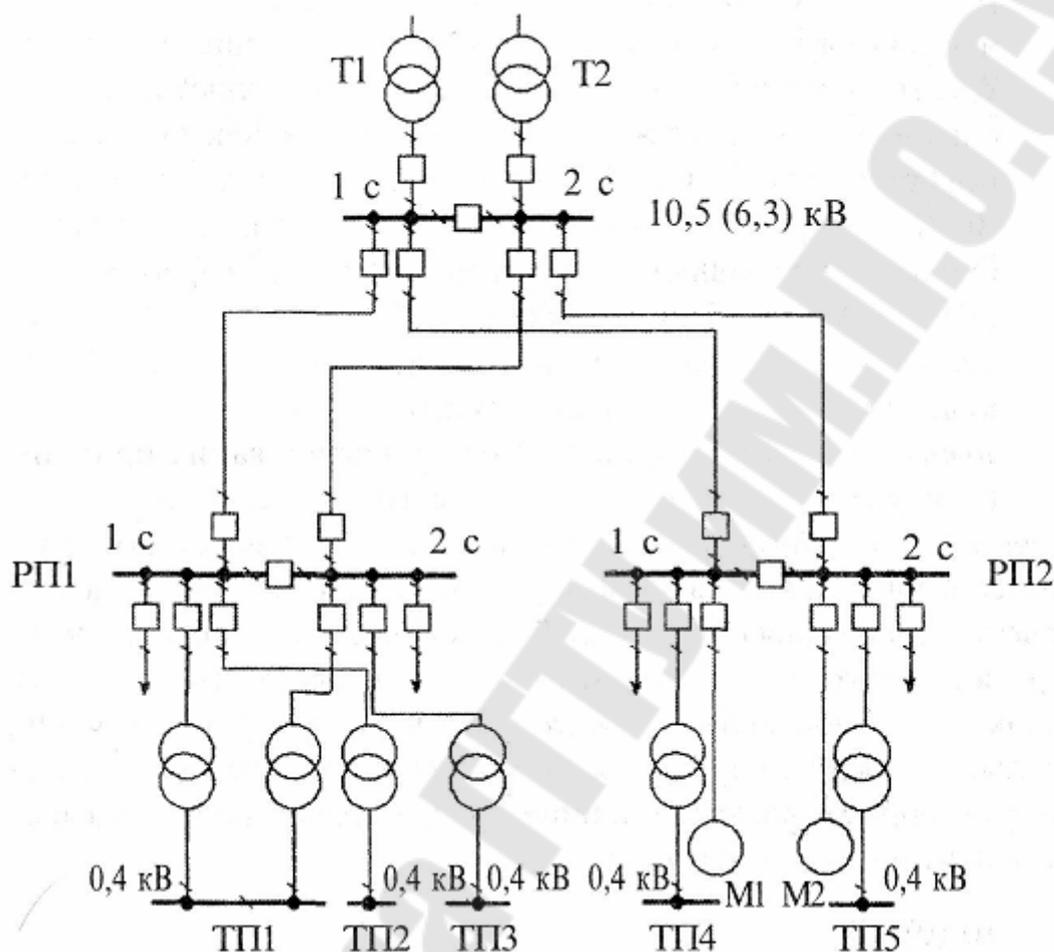


Рис. 9.3. Двухступенчатая радиальная схема

10. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Общие сведения об электротермических установках

Электронагрев широко применяется на предприятиях электромашиностроения при производстве фасонного литья из металлов и сплавов, нагрева заготовок перед обработкой давлением, термической обработки деталей и узлов электрических машин, сушки изоляционных материалов и т. д.

Электротермической установкой (ЭТУ) называют комплекс, состоящий из электротермического оборудования (электрической печи или электротермического устройства, в которых электрическая энергия преобразуется в тепловую), и электрического, механического и другого оборудования, обеспечивающего осуществление рабочего процесса в установке.

Электротермическое оборудование весьма разнообразно по принципу действия, конструкции и назначению. В наиболее общей форме все электрические печи и электротермические устройства можно разделить по назначению на плавильные печи для выплавки или перегрева расплавленных металлов и сплавов и термические (нагревательные) печи и устройства для термообработки изделий из металла, нагрева материалов под пластическую деформацию, сушки изделий и т. д. По способу преобразования электрической энергии в тепловую различают, в частности, печи и устройства сопротивления, дуговые печи, индукционные печи и устройства.

В электропечах и электротермических устройствах сопротивления используется выделение тепла электрическим током при прохождении его через твердые и жидкие тела. Электропечи этого вида преимущественно выполняются как печи косвенного нагрева. Превращение электроэнергии в тепло в них происходит в твердых нагревательных элементах, от которых тепло путем излучения, конвекции и теплопроводности передается нагреваемому телу, либо в жидком теплоносителе - расплавленной соли, в которую погружается нагреваемое тело, и тепло передается ему путем конвекции и теплопроводности. Печи сопротивления - самый распространенный и многообразный вид электропечей.

Плавильные печи сопротивления применяют преимущественно при производстве литья из легкоплавких металлов и сплавов. Термические печи используются для термообработки металлов и сушки материалов и изделий. Электротермические устройства сопротивления работают по принципу прямого нагрева: подлежащее нагреву тело непосредственно служит проводником тела и в нем выделяется тепло.

Работа плавильных дуговых электропечей основана на выделении тепла в дуговом разряде. В электрической дуге концентрируется большая мощность и развивается температура свыше 3500 °С. В дуговых печах косвенного нагрева дуга горит между электродами, а тепло передается расплавляемому телу в основном излучением. Печи такого рода используют при производстве фасонного литья из цветных металлов, их сплавов и чугуна. В дуговых печах прямого нагрева

одним из электродов служит само расплавляемое тело. Эти печи предназначены для выплавки стали, тугоплавких металлов и сплавов. В дуговых печах прямого нагрева, в частности, выплавляют большую часть стали для фасонного литья.

В индукционных печах и устройствах тепло в электропроводном нагреваемом теле выделяется токами, индуктированными в нем переменным электромагнитным полем. Таким образом, здесь осуществляется прямой нагрев. Индукционную печь или устройство можно рассматривать как своего рода трансформатор, в котором первичная обмотка (индуктор) подключена к источнику переменного тока, а вторичной обмоткой служит само нагреваемое тело. Индукционные плавильные печи применяют при производстве литья, в том числе фасонного, из стали, чугуна, цветных металлов и сплавов. Нагревательные индукционные печи используют для нагрева заготовок под пластическую деформацию и для проведения разного рода термообработки. Индукционные термические устройства применяют для поверхностной закалки и других специализированных операций.

Электротермические установки, как правило, питаются переменным током (кроме установок вакуумных дуговых печей, для которых необходим постоянный ток). В отношении обеспечения надежности электроснабжения ЭТУ согласно ПУЭ преимущественно принадлежат к электроприемникам 2-й или 3-й категории.

К комплектующему электрооборудованию ЭТУ относятся: печные трансформаторы и автотрансформаторы; преобразовательные агрегаты (для установок печей и электротермических устройств, в которых преобразование электрической энергии в тепловую происходит при частоте, отличной от 50 Гц); коммутационные и защитные аппараты на вводе ЭТУ; токопроводы ЭТУ – силовые электрические цепи, соединяющие печи (электротермические устройства) с другим электрооборудованием; автоматические регуляторы теплового режима печи (устройства); электроприводы вспомогательных механизмов ЭТУ; щиты, пульты и станции управления.

Установки печей сопротивления

Конструктивное исполнение печей сопротивления. На конструкцию печей сопротивления существенно влияют характер работы и особенности загрузки и выгрузки нагреваемых материалов, а также температурные условия, наличие или отсутствие искусственной атмосферы в рабочем пространстве печи.

По способу загрузки и характеру работы во времени различают печи периодического (садочные) и непрерывного (методические) действия. В печи периодического действия после загрузки нагреваемое тело не изменяет своего положения в течение всего времени тепловой обработки, т. е. до момента выгрузки. В печи непрерывного действия нагреваемые изделия загружаются с одного конца печи, постепенно перемещаются по ее длине, прогреваясь до заданной температуры, и выдаются с другого конца печи. Такие печи используются, в частности, в автоматических технологических линиях.

На рисунке 10.1 схематично показаны некоторые основные типы конструкций термических печей сопротивления: садочных (рис. 9.1, *a–d*) и методических (рис. 10.1, *e–u*).

Камерная печь (рис. 10.1, *a*) среди печей периодического действия является простейшей и в то же время универсальной. Ее корпус 2 прямоугольной формы выполнен в виде камеры с огнеупорной и теплозащитной футеровкой, помещенной в металлический кожух. Печь загружается и выгружается через отверстие в передней стенке, закрываемое дверцей 1. Малые печи для удобства загрузки устанавливаются на ножках, большие печи — непосредственно на полу. Нагревательные элементы 3 располагаются в поду и на боковых стенках печи, реже на ее своде (у очень крупных печей и на задней стенке печи и на дверце). Подовые нагревательные элементы перекрываются жароупорными плитами, на которых укладываются изделия. Дверцы печей обычно выполняются подъемными, у малых печей — с ручным или ножным приводом, у более крупных — с электроприводом,

Шахтная печь (рис. 10.1, *б*) представляет собой круглую, квадратную или прямоугольную шахту. Корпус печи 2 заглублен в землю и перекрывается сверху крышкой 4 с затвором и электроприводом. Нагревательные элементы 3 подвешиваются на боковых стенках печи. В таких печах производится термообработка, например, длинных валов. Некоторые шахтные печи имеют две — три тепловые зоны для обеспечения равномерности нагрева изделий большой длины.

В колпаковой печи (рис. 10.1, *в*) съемный корпус 2 (колпак) цилиндрической или прямоугольной формы с нагревательными элементами 3 на боковых стенках и жароупорный муфель 5 устанавливаются краном. Загрузка помещается также при помощи крана на стенд-под 6 печи (при поднятых колпаке и муфеле). Питание нагревательных элементов осуществляется при помощи гибких кабелей и электрических соединителей (штепсельных разъемов). Обычно одним колпаком обслуживаются несколько стенов. По окончании нагрева колпак от-

ключается и краном переносится на соседний стенд, где уже установлена очередная загрузка. Остывание загрузки происходит под муфелем.

Печь с выдвижным подом (рис. 10.1, *з*) является разновидностью камерной печи. Ее применяют для термообработки и отжига очень крупных изделий. Здесь камера 2 не имеет дна и стоит на колоннах, а выдвижной под 7 смонтирован на тележке с электроприводом катков или с лебедкой. Для загрузки и разгрузки открывается дверца и тележка выезжает из-под камеры. Расположение нагревательных элементов такое же, как и в обычной камерной печи.

Соляная электродная ванна (рис. 10.1, *д*) представляет собой металлическую или керамическую ванну 8, наполненную солью 10, в которую опущены электронагреватели (электроды) 11. Часть ванны, в которой находятся электронагреватели, отделена от рабочей части перегородкой. Ванна помещена в корпус 2 и прикрыта сверху зонтом 9. Для пуска ванны (разогрева соли) используется специальный погружной электронагреватель. Соляные ванны обеспечивают быстрый и равномерный разогрев изделий, помещаемых в расплавленную соль. Они применяются, в частности, для нагрева под закалку и отпуск инструментов.

Печи непрерывного действия характерны наличием транспортирующего механизма, который может быть выполнен различными способами.

В толкательной печи (рис. 10.1, *е*), которая имеет длинную прямоугольную камеру 2 с нагревателями 3, изделия на поддонах 12 или без них периодически проталкиваются по направляющим или роликам пода печи с помощью находящегося перед загрузочной дверцей 1 механизма толкателя с электро- или гидроприводом. На время проталкивания загрузочная 1 и разгрузочная 1' дверцы печи открываются; Достоинства толкательной печи в первую очередь определяются надежностью работы, поскольку механизм толкателя находится вне печи, а также возможностью обработки изделий большой массы.

Конвейерная печь (рис. 10.1, *ж*) представляет собой длинную камеру 2 с нагревателями 3 и дверцами 1 и 1'. Транспортирующий механизм печи — цепной конвейер 13, бесконечное полотно которого состоит из плетеной металлической сетки или цепных звеньев. Конвейерная цепь натянута между ведущим и ведомым барабанами и приводится в движение электроприводом через передаточный механизм и ведущий барабан. Барабаны могут располагаться внутри печи

или вне ее. В первом случае меньше потери тепла, во втором повышается надежность работы печи, упрощается ее загрузка и выгрузка.

Барабанная печь (рис. 10.1, *з*) имеет в камере 2 с нагревателями 3 жароупорный барабан (муфель) 14 с архимедовой спиралью. При вращении барабана с помощью электропривода изделия перекачиваются в барабане, постепенно перемещаясь от загрузочного устройства 15 к месту разгрузки. Такие печи применяются, например, для закалки мелких деталей, не имеющих острых кромок. Тогда из разгрузочного конца барабана детали поступают в закалочный бак 16.

Рольганговая печь (рис. 10.1, *и*) наиболее универсальна. В ее длинной камере 2 с нагревателями 3 и дверцами 1 и 1' можно обрабатывать изделия разнообразных форм и размеров. В зависимости от размеров и конфигурации изделий последние перемещаются по рольгангу 17 печи непосредственно или в поддонах. Привод рольганга — электромеханический регулируемый, весь механизм привода, кроме роликов, вынесен из печи. Рольганговые печи могут работать в непрерывном и в периодическом режиме; они используются не только для разнообразных операций термообработки, но и для нагрева заготовок перед пластической деформацией. Часто рольганговые печи выполняются с несколькими самостоятельными зонами нагрева и охлаждения (несколько температурных зон могут иметь и другие методические печи). По сравнению с толкательными печами таких же типоразмеров и мощности рольганговые имеют лучшие технико-экономические показатели: производительность их выше, а удельный расход электроэнергии меньше. Кроме того, сокращается площадь, занимаемая печью, и уменьшается расход конструкционных, жаропрочных материалов при изготовлении печи. Рольганговые печи по сравнению с конвейерными более надежны в работе.

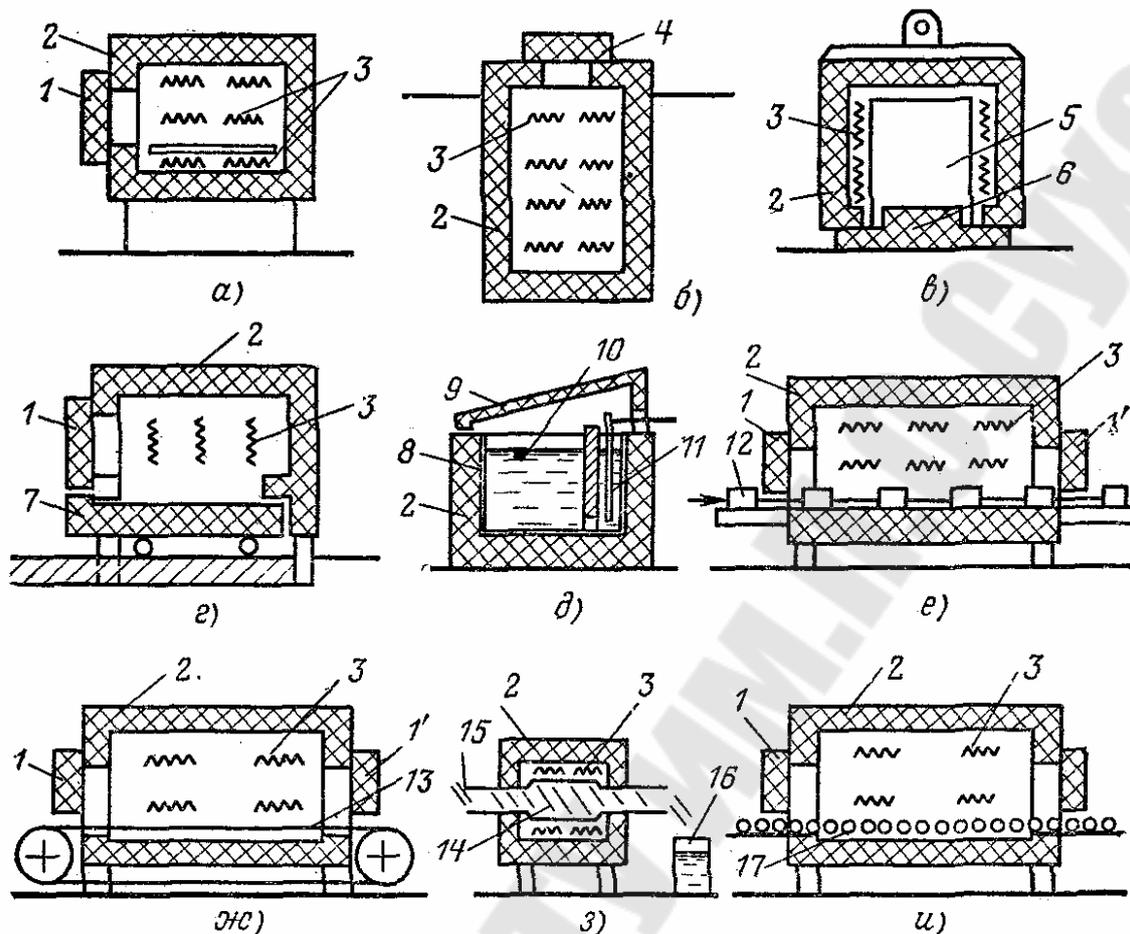


Рис. 10.1. Схемы электропечей сопротивления

Печи непрерывного действия особенно удобны для работы в точных технологических линиях с металлообрабатывающими станками и другими агрегатами и устройствами.

Плавильные электропечи сопротивления для легкоплавких металлов (олово, цинк и т. п.) представляют собой стальную литую или сварную ванну либо котелок, помещенные в футеровку. Нагревательные элементы обычно укладываются в футеровку. В некоторых случаях трубчатые нагревательные элементы опускаются непосредственно в ванну. Крупные печи снабжаются механизмом наклона для разлива металла. Для плавления алюминия при фасонном литье применяют также камерные печи емкостью до 250 кг, в которых металл расплавляется непосредственно в футеровке ванны.

По рабочей температуре печи сопротивления разделяют на низкотемпературные (до 600...700 °С), средне-температурные (от 600...700 до 1200...1250 °С) и высокотемпературные (от 1250 до 2500 °С). Температурные условия также накладывают отпечаток на конструкцию печи, нагревательных элементов, вспомогательных механиз-

мов и на применяемые для них материалы. В низко температурных печах, в которых значительная часть тепла передается конвекцией, для улучшения условий нагрева часто применяется принудительная вентиляция печной атмосферы. Некоторые конструкции термических печей сопротивления показаны на рис. 10.2...10.4.

Среднетемпературная серийная камерная печь (рис. 10.2) имеет камеру, образованную огнеупорной футеровкой 5 и теплоизоляцией в кожухе 4 из листовой и профилированной стали. На своде, боковых стенках и в поду расположены нагревательные элементы 3 в виде зигзагов или спиралей. Подовые нагревательные элементы перекрыты жароупорными плитами 6, на которые укладываются нагреваемые изделия. Дверца 1 печи имеет механизм подъема 2 с электроприводом. Печь снабжена устройством пламенной завесы 7. В камеру печи подается защитный газ.

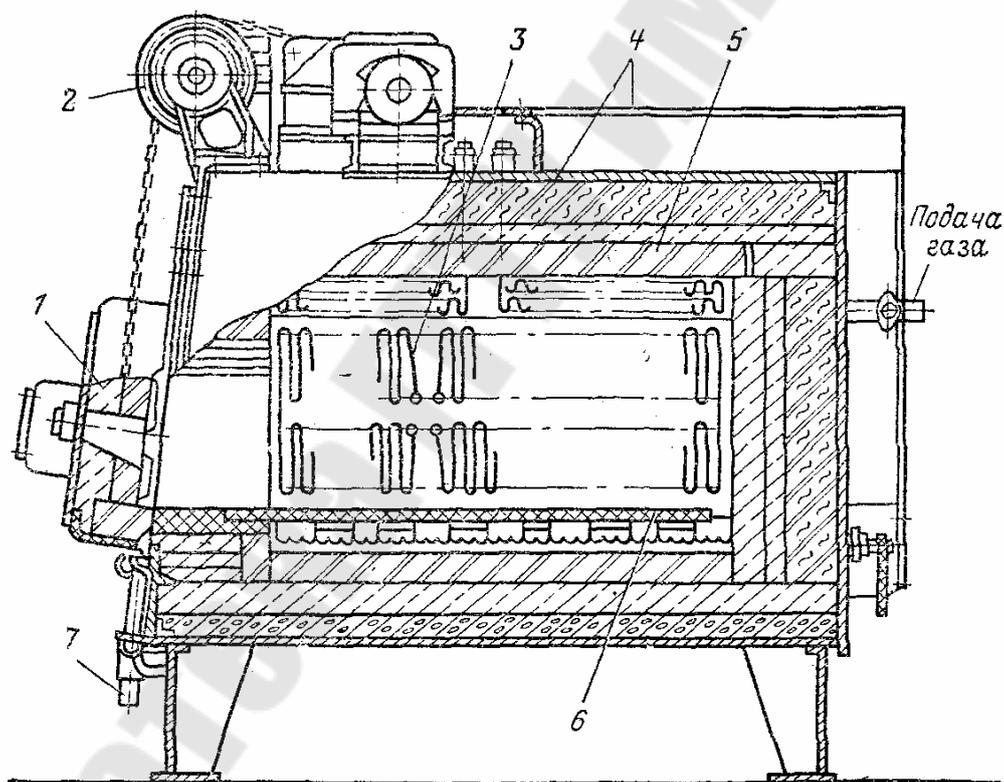


Рис. 10.2. Среднетемпературная камерная печь

На рис. 10.3 изображена рольганговая печь для совмещенного процесса отжига и оксидирования листов магнитопроводов электрических машин. Печь представляет собой крупный агрегат, состоящий из ряда камер и узлов. Листы статора и ротора набираются на оправки, установленные в поддонах 1. Поддоны передвигаются по всем камерам при помощи нескольких секций рольгангов 3 со своими элект-

тропроводами 8. В камере обжига 2 при 300...320 °С производится удаление остатков масла с поверхности листов после штамповки. Камеры нагрева 4 до 900°С (отжиг) и охлаждения 5 до 650...550 °С работают с защитной атмосферой. Охлаждение листов магнитопровода осуществляется воздушными охлаждающими трубами и за счет потерь через облегченную футеровку. Одновременно камера 5 оборудована нагревательными элементами. Камеры нагрева и охлаждения оснащены вентиляторами-мешалками, располагаемыми на секциях свода. В последующей камере охлаждения 6 в воздушной среде до 550...400 °С осуществляется окисливание листов. Камера также имеет нагревательные элементы и вентиляторы. Охлаждение листов происходит за счет потерь через футеровку. В камере ускоренного охлаждения 7 листы при помощи вентиляторов обдуваются воздухом из цеха, а стенки камеры охлаждаются водой.

Нагревательные элементы (нагреватели. Для электропечей сопротивления нагреватели изготавливаются из жаропрочных материалов, стойких к окислению кислородом воздуха при высоких температурах, с высоким удельным электросопротивлением, и малым температурным коэффициентом электросопротивления. Они не должны обладать заметным старением, т. е. изменением электрических свойств во времени.

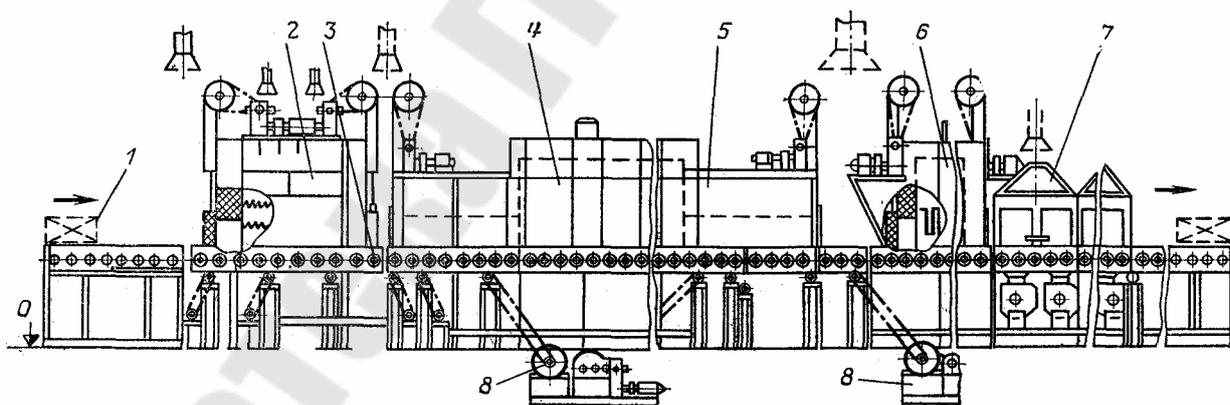


Рис.10.3. Многокамерная рольганговая печь

Наибольшее распространение получили проволочные и ленточные нагреватели из хромоникелевых и хромо-алюминиевых сплавов, изготавливаемые в виде секций. Проволочные нагреватели выполняют зигзагообразными (рис. 10.4, а) и спиральными (рис. 10.4, в-д), ленточные — зигзагообразными (рис. 10.4, б). Проволочные зигзагообразные нагреватели навешивают на стенках и своде печи на жаро-

прочных крючках, подовые нагреватели укладывают свободно на фасонные кирпичи. Спиральные нагреватели в низкотемпературных печах подвешивают на фасонных керамических втулках (рис. 10.4, в), на керамических трубках 2 (рис. 10.4, з) или на полочках футеровки. В среднетемпературных печах спиральные нагреватели укладывают также в пазах 3 футеровки (рис. 10.4, д). Ленточные нагреватели (изготовленные из ленты или литые) крепят на стенках и своде обычно на специальных керамических крючках; на поду их укладывают на керамических опорах.

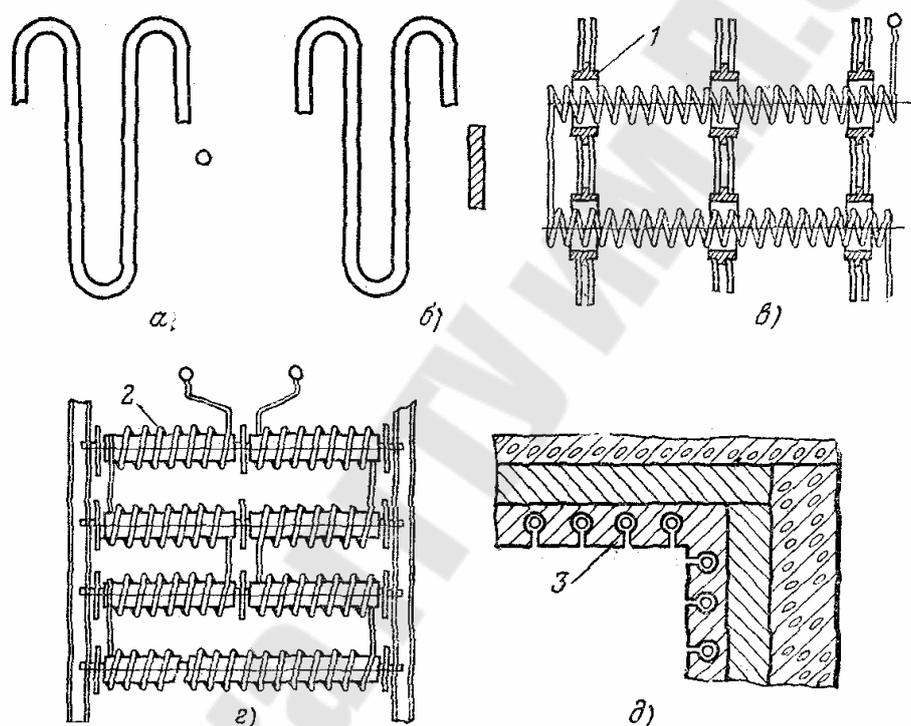


Рис. 10.4. Проволочные и ленточные нагреватели

Обычно применяют следующие сплавы для проволочных и ленточных нагревателей: железохромоалюминиевые Х13Ю4 – для низкотемпературных печей, ОХ23Ю5А и ОХ27Ю5А – для печей с температурами до 1000 °С; железохромоникелевые (нихромы): Х23Н181 Х25Н20 – для печей с температурами до 1050 °С, Х15Н60 и Х15Н80Т – для печей с температурами до 1150 °С. В табл. 10.1 приведены рекомендуемые температуры нагревателей из этих сплавов. В области, ограниченной рекомендуемыми температурами, срок службы нагревателей составляет не менее 10000 ч. Под непрерывным режимом в табл. 10.1 подразумевается круглосуточная непрерывная работа (методические печи), под прерывистым – работа с включением и отклю-

чением печи несколько раз в сутки с существенным остыванием ее в отключенном состоянии.

Таблица 10.1

Рекомендуемые температуры нагревателей

Материал нагревателя	Рекомендуемая температура, °С, для режима	
	непрерывного	прерывистого
X20H80 и X20H80T	1050	1060
X15H60	950	900
X25H20, X23H18	850	800
X13Ю4	750	650
OX23Ю5А	1050	1000
OX27Ю5А	1150	1100
Карборунд	1350	1300
Дисилицид молибдена	1550	1500

Примечание. Для металлических нагревателей данные относятся к нагревателям с диаметром проволоки $d=4$ мм или толщиной ленты $a=2$ мм. При $d=7...10$ мм и $a - 3$ мм значения температур могут быть увеличены на 50°C .

В печах с электрокалориферами и соляных ваннах (при температурах до 600°C) часто применяют трубчатые электронагреватели (ТЭН). Нагреватель (рис. 10.5) состоит из металлической трубки 1, по оси которой расположена нихромовая спираль 2, приваренная к выводным концам 5 нагревателя. Трубка заполнена кристаллической окисью магния (периклазом) 3. В концах трубки закреплены выводные изоляторы 4. Трубка легко изгибается, поэтому ТЭН выпускаются различной формы (в том числе ребристыми – для электрокалориферов).

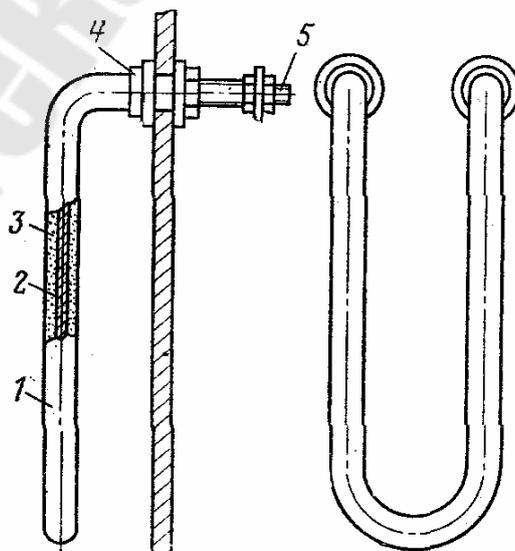


Рис. 10.5. Трубный электронагреватель (ТЭН)

Для печей с рабочими температурами выше 1100...1150 °С применяют неметаллические нагреватели в виде стержней: карборундовые, основу которых составляет карбид кремния (до 1300...1400 °С), и из дисилицида молибдена (до 1400...1500 °С). Рекомендуемые температуры таких нагревателей указаны в табл. 10.1. Применяют также графитовые и угольные нагреватели (до 2000...2500 °С). Наиболее распространены в высокотемпературных печах нагреватели из молибдена (до 2000 °С в защитной среде) и вольфрама (до 2500 °С в защитной среде).

Электрическая мощность, потребляемая нагревателями, составляет для небольших мощностей единицы киловатт, а для крупных печей может достигать тысячи киловатт и более. Для ориентировки укажем установленные (номинальные) мощности некоторых видов печей сопротивления: от 8 до 160 кВт - камерные печи общего назначения; от 25 до 160 кВт - шахтные печи; от 20 до 1000 кВт - камерные печи для сушки электротехнических изделий; от 10 до 150 кВт - барабанные печи; от 90 до 270 кВт - толкательные печи (от 750 до 1100 кВт - с камерами охлаждения); от 6 до 800кВт - конвейерные печи (до 1400 кВт - с камерами охлаждения).

Установки прямого нагрева. Электротермические устройства прямого нагрева применяются, в частности для нагрева заготовок при ковке и штамповке. Они обеспечивают быстрый и равномерный нагрев до 1100...1200 °С но потребляют очень большие токи (сотни и тысячи ампер) при относительно малых напряжениях (5...20 В) Устройство прямого нагрева питается от однофазного печного трансформатора *ТрП* (рис. 10.6). Нагреваемая заготовка 3 зажимается в контактных головках 1, к которым через токосъемники 4 и токоведущие трубошины 2 подведено напряжение вторичной обмотки трансформатора.

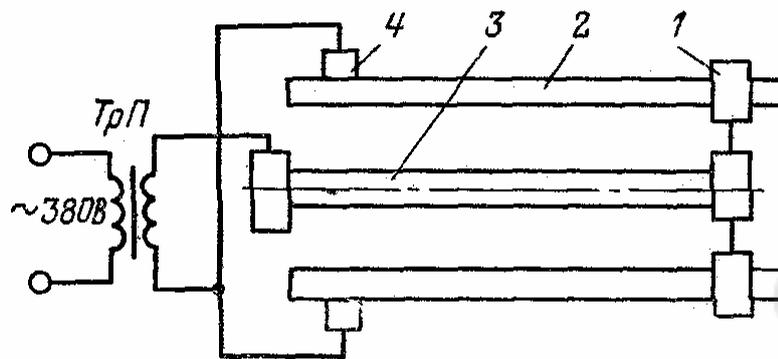


Рис. 10.6. Схемы установки прямого нагрева

Установки дуговых печей

Электродуговые печи применяются в металлургической, химической, машиностроительной и ряде других отраслей промышленности. Они могут быть классифицированы следующим образом:

Дуговые печи косвенного действия, где электродуговой разряд горит между электродами, расположенными над нагреваемым материалом, и теплообмен между электрической дугой и материалом осуществляется в основном за счет излучения.

Дуговые печи прямого действия. В них электрическая дуга горит между концами электродов и нагреваемым материалом. Нагрев материала осуществляется при выделении энергии в опорных пятнах дуги, протекании тока через расплав, а также за счет излучения плазмы дуги, конвекции и теплопроводности.

Дуговые печи сопротивления. В них дуга горит под слоем электропроводной шихты; теплота выделяется в дуговом разряде и преимущественно при прохождении тока через шихту в расплавленных материалах. Передача теплоты в объем печи осуществляется за счет теплопроводности, излучения и в меньшей мере конвекции.

Из числа дуговых печей можно выделить вакуумные дуговые печи. В них электрическая дуга горит в инертном газе или парах переплавляемого материала при низком давлении между расходуемым электродом, изготовленным из переплавляемого металла, и ванной жидкого металла, либо между нерасходуемым электродом и ванной жидкого металла.

Приведенную классификацию необходимо дополнить широко внедряемыми в настоящее время плазменными печами или плазменно-дуговыми плавильными установками. В этих установках нагрев металла осуществляется электрической дугой, совмещенной со струей плазмы инертного газа. Это позволяет исключить засорение пере-

плавляемого металла материалом электрода, увеличить интенсивность передачи энергии на ванну печи.

Основное назначение дуговой печи прямого действия (рис. 10.7) – выплавка стали, в первую очередь высоколегированных сортов, из металлического лома (скрапа), а также для фасонного литья на машиностроительных заводах.

Дуговая сталеплавильная печь (ДСП) состоит из стального кожуха, имеющего цилиндрическую, расширяющуюся или ступенчатую форму 1. Внутри кожуха располагается огнеупорная футеровка 2. Поверх футерованного кожуха печи расположен свод печи 3, через который пропущены электроды 4. Для зажигания дуги электроды вначале опускаются до соприкосновения с расплавляемым материалом, а затем немного поднимаются до возбуждения дуги 6. В процессе плавки электроды перемещаются с помощью механизма подъема электродов 5. Каждая печь имеет рабочие окна и сливное отверстие. Через рабочее окно производится загрузка печи, а через сливное отверстие – ее выгрузка. Иногда печь загружается сверху при снятом или отодвинутом своде. Слив готового металла производится путем наклона печи.

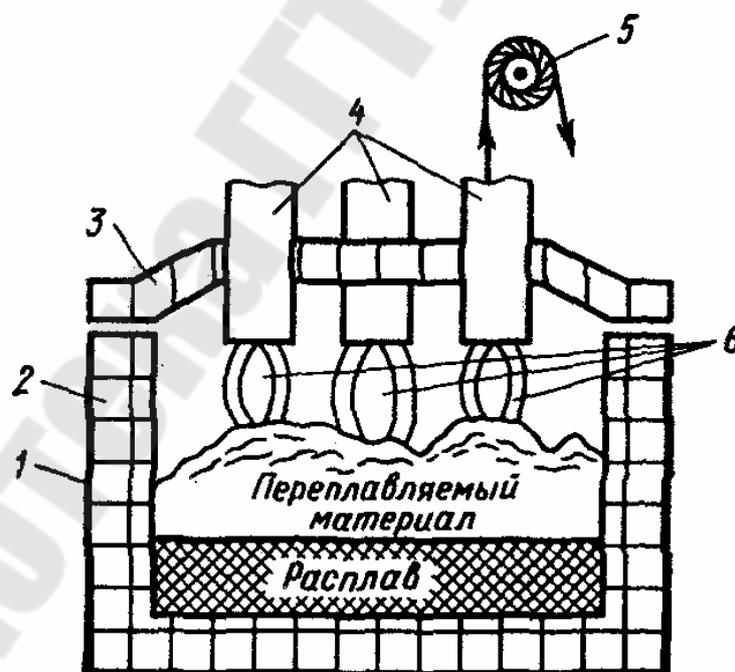


Рис. 10.7. Схема дуговой сталеплавильной печи

Для выравнивания химического состава и температуры расплаваемого металла в печах большой емкости имеются электромагнитные устройства для перемешивания расплава.

Электродуговая печная установка снабжена механизмами наклона печи для слива металла, подъема и отворота свода, перемещения электродов. Они могут иметь электромеханический или гидравлический привод. Электроды крепятся в специальных электрододержателях, которые связаны с механизмом перемещения электродов. Ток подводится к электрододержателю с помощью пакета медных шин или водоохлаждаемых труб.

Процесс выплавки электростали в дуговой печи состоит из следующих операций: расплавление скрапа, удаление содержащихся в нем вредных примесей и газов, раскисление металла, введение в него нужных легирующих компонентов, рафинирование, выливание металла в ковш для последующей разливки.

Под действием развивающейся в опорном пятне дуги температуры скрап расплавляется и жидкий металл стекает в подину. В шихте образуются колодцы, в которые углубляются опускающиеся электроды до тех пор, пока они не достигнут поверхности расплавленного металла на подине печи.

В конце периода расплавления для окончательного доведения состава металла до требуемого в него вводят легирующие добавки и приступают к разливке. Плавка в крупных печах длится 4...6 ч: из них 1,5...2,5 ч длится расплавление и 2...4 ч – окисление и ратинирование металла. В зависимости от вида скрапа, шихты, состава футеровки, применения легирующих компонентов режимы работы печи и стадии технологического процесса могут быть различными. Поэтому к конструкции дуговой печи, ее элементам и схеме электроснабжения предъявляют особые требования.

1. Возможность гибкого управления мощностью, поскольку в начальный период необходима максимальная мощность, чтобы ускорить процесс расплавления. В другие периоды нужно иметь возможность изменять мощность для управления температурами металла и шлака.

2. Поддержание в печи восстановительной атмосферы.

3. Быстрая реакция электрооборудования печи на частые короткие замыкания и обрывы дуги в период расплавления, возможность ограничивать ток короткого замыкания до безопасных значений, ликвидировать все отступления от нормального электрического режима в кратчайшее время. Нарушение нормального режима происходит, как

правило, по фазам. Поэтому каждый электрод печи должен быть оснащен механизмами подъема и опускания с автоматическим регулированием.

Дуговые сталеплавильные печи являются трехфазными и имеют подину из непроводящего материала. Ванна с металлом в такой печи образует естественную нулевую точку трехфазной цепи, и печь оказывается включенной по трехпроводной системе трехфазного тока без нулевого провода.

Печи с номинальной емкостью 12 т и более могут иметь механизм вращения ванны в пределах угла $\pm 40^\circ$ вокруг вертикальной оси. Механизм снабжен обычно электроприводом.

Дуговые сталеплавильные печи емкостью до 10 т применяют в литейных цехах предприятий при производстве фасонного стального литья. В ряде случаев для этой цели используют и более крупные печи.

Дуговая печь косвенного действия предназначена для переплава цветных металлов и их сплавов, а также для выплавки некоторых сортов чугуна и никеля (для плавки металлов с температурой плавления не выше 1300...1400 °С). Ее основное преимущество — небольшой угар металла, так как электродуговой разряд не соприкасается непосредственно с переплавляемым материалом. Однофазная дуговая печь косвенного действия (рис. 10.8) представляет собой горизонтально расположенную ванну, футерованную изнутри огнеупором 1. В противоположных боковых стенках ее установлены электроды 2, перемещаемые по мере обгорания механизмами подачи. Переплавляемый материал 3 загружают на дно ванны через отверстие в боковой поверхности корпуса 5. На электроды подается напряжение, затем они сводятся до соприкосновения и возникновения тока в цепи и затем разводятся, что приводит к возникновению электрической дуги 4. Вследствие поглощения выделяемой дугой энергии происходит нагрев и расплавление металла. После расплавления металла печь наклоняется механизмом наклона и из нее сливается расплав. Регулирование мощности печи производится с помощью источника питания за счет изменения тока дуги, а также ее длины при сближении и удалении электродов.

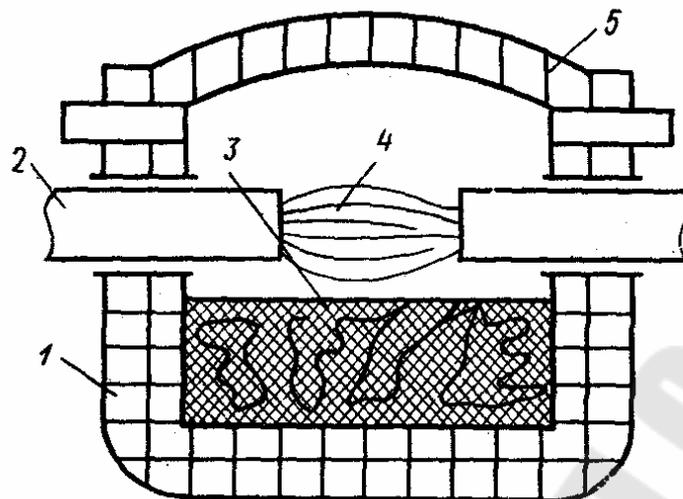


Рис. 10.8. Схема дуговой печи косвенного действия

Дуговые печи с косвенным нагревом имеют емкость не более 500 кг (например, печь типа ДМБ-0,5 - медеплавильная барабанная емкостью 0,5 т).

Электрооборудование установок дуговых печей

Основное электрооборудование дуговых печных установок рис. 10.9 включает:

- печь с электродами и ванной, в которой горят дуги и находится перерабатываемый материал;
- отдельный для каждой печи понизительный трансформатор,
- дроссели;
- короткую сеть, соединяющую вторичные выводы трансформатора с электродами печи;
- коммутационную, измерительную и защитную аппаратуру.

Установки дуговых печей – крупные потребители электроэнергии; их единичные мощности измеряются тысячами и десятками тысяч киловатт. Расход электроэнергии на расплавление тонны твердой завалки достигает 400...600 кВт·ч. Поэтому питание печей производится от сетей 6, 10 и 35 кВ через понизительные печные трансформаторы (максимальные значения вторичного линейного напряжения трансформаторов лежат обычно в пределах до 320 В у печей малой и средней емкости и до 510 В у крупных печей).

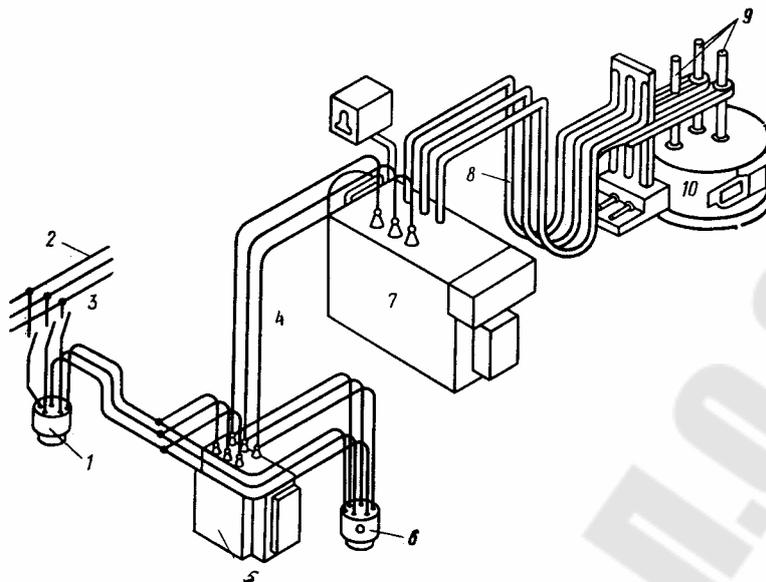


Рис. 10.9. Схема электропечной установки:

1, 6 — выключатели; 2 — высоковольтные шины; 3 — разъединитель;
4 — высоковольтная сеть; 5 — реактор; 7 — печной трансформатор;
8 — короткая сеть; 9 — электроды; 10 — электродуговая печь

В электроприводах механизмов печи применяют обычно асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором напряжением 380 В на мощности от 1...2 кВт в небольших печах до 20...30 кВт в более крупных печах. Двигатели приводов перемещения электродов — постоянного тока с питанием от электромашинных или магнитных усилителей, а также от тиристорных преобразователей. Эти приводы входят в состав самостоятельного агрегата — регулятора мощности печи.

В печах емкостью более 20 т с целью увеличения производительности и облегчения труда сталеваров предусматриваются устройства для перемешивания жидкой ванны металла, основанные на принципе бегущего магнитного поля. Под днищем печи из немагнитного материала размещается статор с двумя обмотками, токи которых сдвинуты по фазе на 90° . Создаваемое статорными обмотками бегущее поле приводит в движение слои металла. При переключении обмоток возможно изменение направления движения металла. Частота тока в статоре перемешивающего устройства от 0,3 до 1,1 Гц. Питание устройства производится от электромашинного преобразователя частоты.

Двигатели, обслуживающие механизмы дуговых печей, работают в тяжелых условиях (пыльная среда, близкое расположение сильно нагретых конструкций печи), поэтому они имеют закрытое исполнение с теплостойкой изоляцией (краново-металлургических серий).

Напряжение на печи в ходе плавки требуется изменять в довольно широких пределах. На первом этапе плавки, когда происходит расплавление скрапа, в печь должна вводиться максимальная мощность, чтобы ускорить этот процесс. Но при холодной шихте дуга неустойчива. Поэтому для увеличения мощности необходимо повышать напряжение. Продолжительность этапа расплавления составляет 50 % и более от общего времени плавки, при этом потребляется 60–80 % электроэнергии. На втором и третьем этапах – при окислении и рафинировании жидкого металла (удалении вредных примесей и выжигании лишнего углерода) дуга горит спокойнее, температура в печи выше, длина дуги увеличивается. Во избежание преждевременного выхода из строя футеровки печи дугу укорачивают, снижая напряжение. Кроме того, для печей, в которых могут выплавляться разные марки металла, соответственно изменяются условия плавки, а значит, и требуемые напряжения.

Для обеспечения возможности регулирования напряжения печей питающие их трансформаторы выполняют с несколькими ступенями низкого напряжения, обычно с переключением отпаек обмотки высокого напряжения (12 ступеней и более). Вторичное линейное напряжение для трансформаторов мощностью до 8000 кВ·А регулируется в пределах от $U_{2\max} \approx 220 \dots 320$ В до $U_{2\min} \approx 100 \dots 120$ В; для трансформаторов большей мощности - от $U_{2\max} \approx 370 \dots 510$ В до $U_{2\min} \approx 130 \dots 185$ В. Трансформаторы мощностью до 10000 кВ·А снабжены переключающим устройством ПБВ. Более мощные трансформаторы имеют переключающее устройство РПН. Для небольших печей применяют две - четыре ступени, а также простейший способ регулирования напряжения - переключение обмотки высокого напряжения (ВН) с треугольника на звезду.

Для обеспечения устойчивого горения дуги переменного тока и ограничения толчков тока при коротких замыканиях (к.з.) между электродом и шихтой 2,3-кратным значением номинального тока электрода общее относительное реактивное сопротивление установки должно составлять 30...40 %. Реактивное сопротивление печных трансформаторов равно 6–10 %, сопротивление короткой сети для малых печей 5...10 %. Поэтому со стороны ВН трансформатора для печей емкостью до 40 т предусматривают предвключенный реактор с сопротивлением около 15...25 %, входящий в комплект трансформаторного агрегата. Реактор выполнен как дроссель с ненасыщающимся сердечником.

Электрическая схема силовой цепи дуговой печи.

В дуговых электропечных установках различают главную и вспомогательные цепи тока (рис. 10.10).

Главная цепь тока включает основное электрооборудование и электрические дуги печи. К вспомогательным относятся цепи управления, измерения и защиты, автоматики и т. п.

В главной цепи различают первичную и вторичную стороны. Первичная цепь состоит из последовательно соединенных проводов и аппаратов высокого напряжения, дросселя и первичной обмотки печного трансформатора. Вторичная цепь состоит из последовательно соединенных вторичной обмотки трансформатора, токопроводов короткой сети, электродов и электрических дуг. Все части цепи, расположенные вне печи, получили общее название подводящей сети.

Короткой сетью называют токопровод от выводов вторичной стороны трансформаторов до электродов дуговой печи.

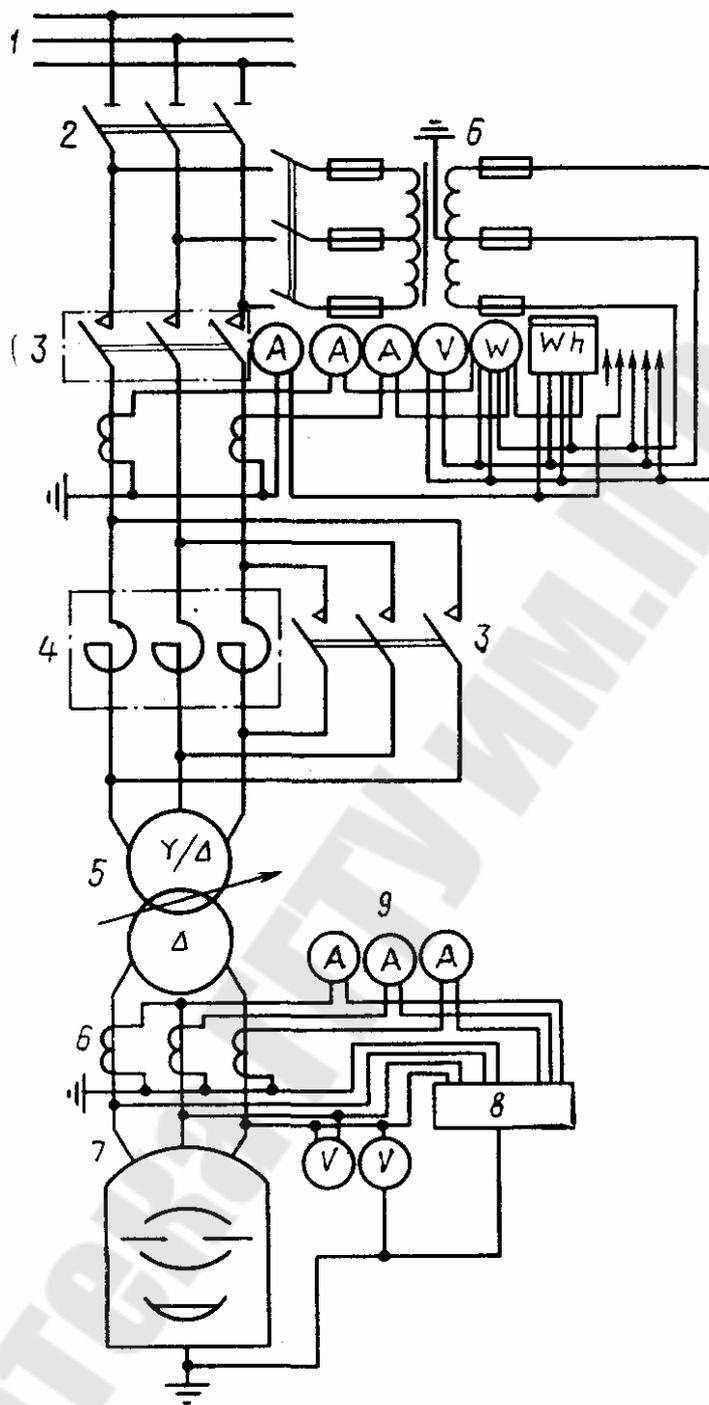


Рис. 10.10. Схема электрических соединений дуговой печной установки:
 1 – высоковольтные шины; 2 – разъединитель;
 3 – выключатели; 4 – реактор; 5 – печной трансформатор; S – измерительные трансформаторы; 7 – короткая сеть; 8 – автоматический регулятор мощности; 9 – приборы контроля

По короткой сети идут очень большие токи (до 100 кА и выше), поэтому токопроводы короткой сети имеют большое сечение и

выполнены в виде пакетов медных лент, медных шин или водоохлаждаемых труб.

Короткая сеть состоит из участков жестко закрепленных шинопроводов и гибких проводов, соединяющих концы шинопроводов с передвигающимися во время работы печи электродами.

Подвод питающей линии высокого напряжения от ввода производится через разъединители и выключатели высокого напряжения, установленные вместе с защитными аппаратами в распределительном устройстве электропечной установки.

Электроснабжение трансформаторов печной подстанции производится от сети 6, 10...35 кВ, а для мощных подстанций – 110 кВ. Присоединение измерительных и защитных приборов к проводам высокого напряжения производится через измерительные трансформаторы тока и напряжения.

Для поддержания наивыгоднейшего режима печи устанавливаются автоматические регуляторы мощности печи. Такие регуляторы воздействуют на механизм передвижения электродов, изменяют длину дуги и поддерживают заданное значение мощности дуговой печи. Для повышения точности регулирования в системы управления вводятся вычислительные машины.

Печные трансформаторы предназначены для питания электродуговых печей. Для печей небольшой и средней мощности трансформаторы выполняют трехфазными. Для печей большой мощности применяются группы однофазных трансформаторов, которые позволяют получить повышенный коэффициент мощности за счет более рациональной конструкции короткой сети и регулировать независимо мощности и напряжения каждой фазы. Печные трансформаторы имеют следующие особенности:

- высокое значение номинального тока на стороне низкого напряжения (до десятков и сотен кА);
- большой коэффициент трансформации (напряжение с 6,10, 35,0, 110 кВ трансформируется до нескольких сотен вольт);
- число ступеней напряжения и диапазон его регулирования гораздо больше, чем у силовых трансформаторов (напряжение регулируется примерно на 500% при числе ступеней до 40 и более);
- трансформаторы обладают высокой стойкостью против эксплуатационных коротких замыканий с кратностью тока (2,5...3) номинального, имеют высокую механическую прочность.

Мощные печные трансформаторы оборудованы установками принудительного охлаждения с искусственной циркуляцией масла

через теплообменник. Они снабжены регуляторами напряжения под нагрузкой, производящими 100...160 переключений в сутки.

Обмотки трехфазных трансформаторов соединяются по схеме «треугольник – треугольник» с возможностью переключения по схеме «треугольник – звезда», что позволяет регулировать вторичное напряжение.

Регулирование режимов работы печи и ее электрических характеристик осуществляется изменением напряжения за счет изменения числа включенных в сеть витков первичной обмотки трансформаторов с помощью переключателя ступеней.

Переключение ступеней напряжения печных трансформаторов малой и средней мощности осуществляется при снятой нагрузке. Для этого переключатель снабжают блокировкой с главным высоковольтным выключателем, В трансформаторах большой мощности переключение осуществляется под нагрузкой специальным переключателем, установленным на крышке трансформатора.

Разъединители в схемах электроснабжения дуговых печных установок служат для создания видимого разрыва силовой цепи электропечи. Коммутация цепи разъединителем осуществляется только при отключенном высоковольтном выключателе.

Высоковольтные выключатели совместно с аппаратурой защиты предохраняют печь от токов короткого замыкания и осуществляют оперативное отключение и выключение печи.

Предусмотрено аварийное отключение печного трансформатора, которое срабатывает при недопустимых токах в первичной обмотке трансформатора, а также при поступлении сигнала от газовой защиты трансформатора или переключателя напряжения.

Дроссель, или реактор, служит для ограничения бросков тока при эксплуатационных коротких замыканиях и стабилизации горения дуг за счет создания падающей характеристики цепи питания. У работающих непрерывно дуговых печей режим работы дросселя прерывистый, условия его работы тяжелые, поэтому он должен удовлетворять повышенным требованиям термической и механической прочности.

Дроссель включается между сетью и линейными зажимами обмотки высокого напряжения трансформатора или в «фазу»— последовательно с данной обмоткой. Чаще всего дроссель располагается в общем кожухе с печным трансформатором.

Короткая сеть дуговых печей служит для передачи электрической энергии от вторичной обмотки трансформатора в рабочее пространство печи. Несмотря на небольшую длину короткой сети, ее ак-

тивное и особенно индуктивное сопротивление является одним из определяющих составных частей общего сопротивления участков печной установки. Они оказывают существенное влияние на энергетические показатели работы печи: мощность, коэффициент мощности, энергетический КПД и т. д.

Короткая сеть должна иметь минимальную длину и наиболее рациональное расположение проводников для снижения индуктивности, равномерной загрузки фаз и проводников в фазах током (рис. 10.11, а–г).

В короткой сети выделяются четыре основных участка: шинные пакеты (от выходов низкого напряжения печного трансформатора до неподвижных башмаков), гибкая часть (участок гибких кабелей), трубошины (от подвижных башмаков до головок электрододержателя), электроды.

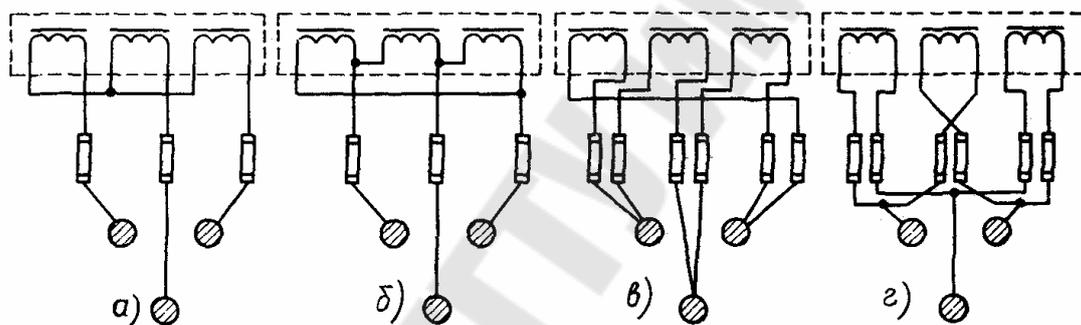


Рис. 10.11. Схемы соединения вторичных токопроводов ДСП

Индукционные электротермические установки

Индукционные ЭТУ включают в себя плавильные и нагревательные установки, а по частоте питающего тока охватывают широкую полосу от промышленной частоты (50 Гц) до средней (0,5–10 кГц) и высокой (сотни и тысячи кГц).

Конструктивное исполнение индукционных плавильных печей. Для рабочего процесса индукционных плавильных печей характерно электродинамическое и тепловое движение жидкого металла в ванне или тигле, способствующее получению однородного по составу металла и его равномерной температуры по всему объему, а также малый угар металла (в несколько раз меньше, чем в дуговых печах). Эти факторы обусловили широкое применение индукционных плавильных печей при производстве фасонного литья из черных и

цветных металлов. Рабочие температуры печей: для стали 1600 °С, чугуна 1200...1400 °С, меди 1200 °С и алюминия 750 °С.

Индукционные плавильные печи можно разделить на канальные печи промышленной частоты и тигельные печи промышленной, средней и высокой частоты.

Особенности конструкции индукционной канальной печи (печи со стальным сердечником) иллюстрирует рис. 10.12, *а*. Здесь схематически изображена однофазная печь. Она представляет собой футерованную ванну 3, заключенную в металлический кожух 2 и снабженную в данном случае одной однофазной индукционной единицей. Последняя состоит из индуктора 8, шихтованного магнитопровода 6 (сердечника) из трансформаторной стали и подового камня 7 с охватывающими индуктор плавильными каналами 4. Камень 7 заключен в металлический кожух. Индукционные единицы часто делают отъемными, чтобы можно было их заменять без охлаждения футеровки ванны.

Для слива металла 1 через сливной носок 9 печь наклоняется обычно при помощи гидропривода (в некоторых печах ванна и кожух выполнены в виде барабана по типу дуговой печи косвенного нагрева, а слив металла производится через отверстие в торцевой стенке печи при повороте барабана с помощью электропривода). Загрузку печи ведут сверху через проем, закрытый во время плавки футерованной крышкой 10. Подъем крышки производится при помощи гидро- или электропривода.

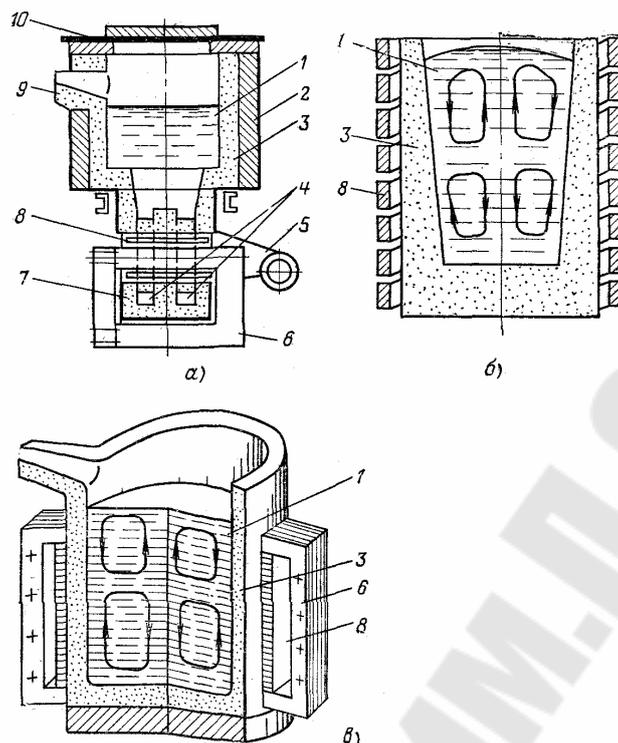


Рис. 10.12. Индукционные плавильные печи

Индуктор печи изготовляют из профилированной медной трубки с водяным охлаждением. Подовый камень охлаждается воздухом при помощи вентилятора 5 через зазор между индуктором и подовым камнем. Ток к индуктору подводится по гибким кабелям.

Замкнутый контур – вторичную «обмотку» трансформатора, первичной обмоткой которого является индуктор, образует жидкий металл в каналах. Поэтому необходимо, чтобы в них всегда оставалось некоторое количество металла, поддерживаемого в расплавленном состоянии, для чего печь должна быть постоянно подключена к питающей сети. Следовательно, каналные печи предназначены для непрерывной работы с редкими переходами с одной марки металла на другую.

В своем большинстве каналные печи выполняются однофазными с одной или несколькими индукционными единицами. Отдельные конструкции имеют трехфазное исполнение.

Канальные печи в основном применяют для плавки алюминия и его сплавов, а также меди и некоторых ее сплавов. Емкость печей от 0,4 до 16 т (печи серий ИАК и ИЛК). Другие серии печей специализированы как миксеры для выдержки и перегрева жидкого чугуна, цветных металлов и сплавов перед разливкой в литейные формы (например, серий ИЧКМ, ИЛКМ и др.).

Устройство индукционных тигельных печей (печей без сердечника) показано на рис. 10.13, б и в. Внутри индуктора δ помещен огнеупорный набивной тигель \mathcal{Z} , в котором находится расплавляемый металл l . В печах промышленной частоты и в некоторых крупных печах средней частоты устанавливается внешний магнитопровод δ , который экранирует стальной кожух печи (не показанный на рисунках) от полей рассеяния индуктора. Кожух небольших печей (до 1 т) средней частоты изготавливают из немагнитной стали, дерева, асбоцемента. Сверху печь закрывается футерованной крышкой.

Нагрев и расплавление садки происходят за счет вихревых токов, наводимых в ней при подключении индуктора к источнику питания. Плотность тока в садке неравномерна. Наименьшая плотность тока получается в центральной части тигля, наибольшая - в слое, прилегающем к стенкам.

Индуктор тигельной печи представляет собой многовитковую водоохлаждаемую катушку из медной трубки круглого, овального или прямоугольного сечения. Токопровод к индуктору выполняется гибким водоохлаждаемым кабелем или шинопроводами из медных или алюминиевых полос и разъемным соединением.

Механизмы наклона печи и подъема крышки снабжаются гидро- или электроприводом. Загрузка печей производится вручную (малые печи) либо при помощи подвесной электротележки, мостового крана и т. п.

Тигельные печи используют преимущественно для плавки металлов на фасонное литье при периодическом режиме работы, а также вне зависимости от режима работы - для плавки некоторых сплавов, например бронз, которые пагубно влияют на футеровку канальных печей.

На частоте 50 Гц работают печи емкостью от 0,4 - 1,0 до 10 т (например, печи серий ИЧТ, ИЛТ, ИАТ). Печи серий ИСТ емкостью от 0,06 до 10 т имеют рабочие частоты в пределах 500 - 2575 Гц, серии ИАТ (на 0,4 и 2,5 т) - частоту 500 Гц.

Электрооборудование индукционных плавильных установок. В индукционную плавильную установку входят электропечь с ее механизмами и приводами и комплектующее электрооборудование: печной трансформатор или преобразовательный агрегат; вводное или распределительное устройство на стороне ВН трансформатора (при первичном напряжении выше 1000 В); конденсаторные батареи; шкафы, щиты и станции управления; токопроводы короткой сети. Ком-

плектация оборудования тигельных печей возможна в нескольких вариантах: одна или две печи и один комплект электрооборудования; три печи и два комплекта электрооборудования.

Питание индукционных печей - частоты 50 Гц при мощности печного трансформатора менее 400 кВ·А производится от сети 400 В, при больших мощностях - от сети 6 или 10 кВ. Поскольку естественный коэффициент мощности таких печей весьма низок (у некоторых типов тигельных печей не выше 0,1...0,3), обязательно применяют устройства его компенсации (батарею конденсаторов, включаемую параллельно индуктору). Максимальные значения напряжения индукторов лежат в пределах от 500 до 2000 В у тигельных и от 40 до 600 В у канальных печей.

Печные трансформаторы. В индукционных установках частоты 50 Гц в качестве печных используются главным образом, специально предназначенные для этой цели одно- и трехфазные силовые масляные трансформаторы типов ЭОМП, ЭОМН, ЭТМП и другие (буква О - однофазный; расшифровка остальных букв та же, что и для трансформаторов дуговых печей). Они имеют ступенчатое регулирование напряжения с устройством дистанционного управления переключением ответвлений обмотки на стороне ВН: для мощности 400—1000 кВ·А – при отключенном трансформаторе (устройство ПБВ), для большей мощности - под нагрузкой (устройство РПН). В качестве примеров комплектации печей трансформаторами этих типов укажем: для печи ИЧТ-1 емкостью 1 т применен трансформатор ЭОМП-1000/10 мощностью 4000 кВ·А; для печи ИЛК-1,6 емкостью 1,6 т - трансформатор ЭТМН-1000/10 мощностью 1000 кВ·А. Помимо специальных трансформаторов в индукционных установках применяются и некоторые типы трансформаторов для дуговых печей и печей сопротивления. При питании печи с однофазным индуктором от трехфазного печного трансформатора устанавливают симметрирующее устройство, состоящее из реактора и батареи конденсаторов.

Для сушки печи и первой плавки необходимо понижать мощность примерно до 30% номинальной. Поэтому печи иногда снабжают вспомогательными трансформаторами или автотрансформаторами. Они могут поочередно подключаться то к одной, то к другой печи. Для канальных печей такой трансформатор обеспечивает возможность работы на холостом ходу.

Преобразователи частоты. В индукционных установках средней частоты в качестве источников питания индукторов применяют дви-

гатель-генераторные (машинные) и тиристорные (статические) преобразователи частоты.

Машинные преобразователи частоты старых серий ВПЧ, ПВ и ВГО (последние две серии уже не выпускаются) и новых серий ОПЧ и ВЭП...основной вид преобразователей, применяемых для питания всех тех действующих индукционных установок, в которых используется ток с частотой 1,0...10 кГц. Преобразователи представляют собой агрегаты из трехфазного асинхронного или синхронного двигателя частоты 50 Гц и однофазного индукторного синхронного генератора средней частоты. В таких генераторах обмотки переменного тока и возбуждения (постоянного тока) размещены в пазах статора. Ферромагнитный ротор имеет зубчатую форму, наружной поверхности и не несет на себе обмоток. При вращении ротора изменяется воздушный зазор между статором и ротором в зависимости от того, происходит ли под соответствующим полюсом статора зубец или пазротора. Это приводит к созданию пульсирующего магнитного потока, пересекающего витки обмотки переменного тока, и наведению в последней ЭДС повышенной частоты $f = z_p \omega / (2\pi)$, где z_p – число зубцов ротора; ω - его угловая скорость (рад/с).

Исполнение агрегатов ПВ и ВГО – горизонтальное, агрегатов других серий – вертикальное. Охлаждение агрегатов ВГО и ПВ защищенного исполнения – воздушное, агрегатов ПВ закрытого исполнения - водяное, агрегатов ВПЧ, ОПЧ и ВЭП - воздушно-водяное.

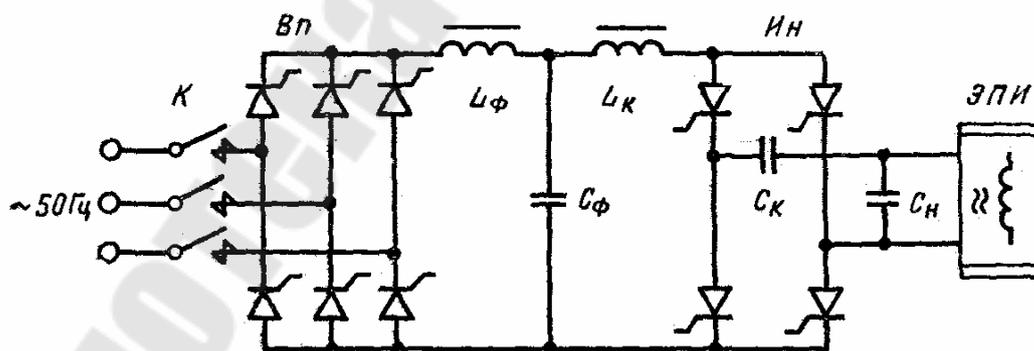


Рис. 10.13. Схема силовых цепей тиристорного преобразователя частоты

Агрегаты серии ВПЧ изготавливаются на мощности от 12 до 100 кВт, напряжения от 200 до 800 В и рабочие частоты в пределах 2400...8000 Гц; агрегаты серии; ОПЧ – на мощности 250...500 кВт, на-

пряжение 800...1600 В и частоты 1...10 кГц; агрегаты серии ВЭП - на мощности 60 и 100 кВт, напряжение 800/400 В и частоты 2,4 и 8 кГц.

Возбуждение генераторов осуществляется от электромашинных и магнитных усилителей, а также от тиристорных возбудителей - управляемых выпрямителей, встраиваемых в шкафы и станции управления печами.

Тиристорные преобразователи частоты (ТПЧ) – новый вид источников питания средней частоты, который в перспективе должен заменить машинные преобразователи. В настоящее время выпускаются преобразователи серии СЧИ на номинальные мощности 100 и 250 кВт и номинальную частоту 3,0 кГц (с регулированием ее от 67 до 100%) и серии ТПЧ на номинальные мощности от 160 до 3200 кВт и номинальные частоты 0,5; 1,0; 2,4; 8,0 кГц (с регулированием от 80 до 100 %). Номинальное напряжение преобразователей в основном равно 800 В и регулируется в пределах от 50...70 до 110...125 %.

Тиристорные преобразователи частоты серий СЧИ и ТПЧ построены по схемам с промежуточным звеном постоянного тока. На рис. 10.14 приведена схема силовой цепи такого преобразователя. Звено постоянного тока представляет собой управляемый тиристорный выпрямитель V_n , собранный по трехфазной мостовой схеме. Выпрямленный ток сглаживается фильтром, состоящим из реактора L_ϕ и конденсатора C_ϕ . Однофазный мостовой инвертор I_n - с емкостной коммутацией, совершаемой при помощи конденсатора C_k и реактора L_k , преобразует постоянный ток в переменный ток средней частоты, который питает нагрузку – электропечь индукционную ЭПИ и компенсирующие конденсаторы C_n .

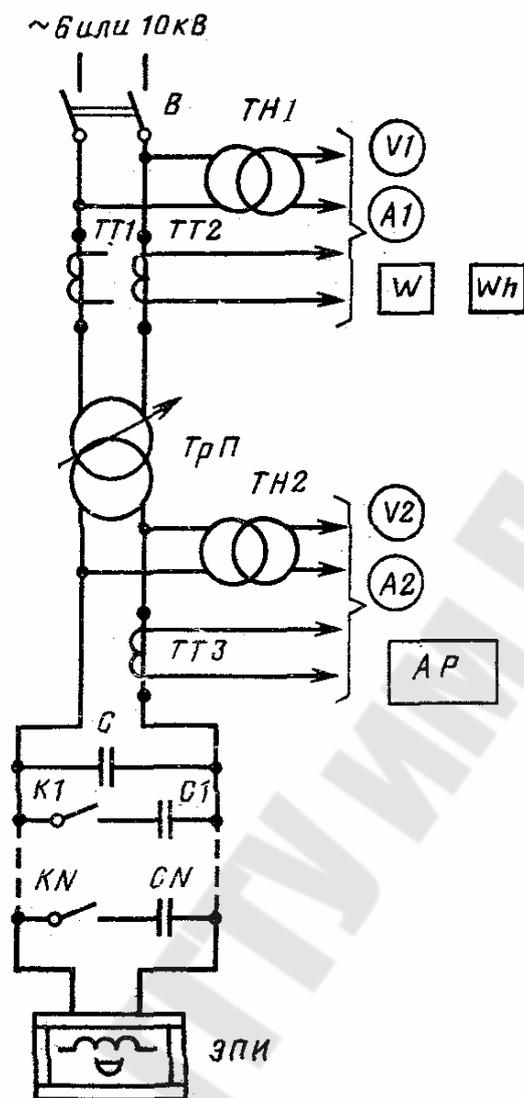


Рис. 10.14. Электрическая схема питания индукционной печи промышленной частоты

Конструктивно тиристорные преобразователи частоты выполняются в виде крупноблочного комплектного устройства, собранного из шкафов двустороннего обслуживания.

Конденсаторы. В индукционных ЭТУ промышленной частоты, как правило, используются конденсаторы общего назначения КМ, КС и другие, кроме установок с рабочими напряжениями выше 1000 В, для которых выпускаются специальные конденсаторы типа КСЭ и КСЭК. Конденсаторы должны иметь встроенные внутри их корпуса плавкие предохранители и разрядные резисторы.

В индукционных ЭТУ средней частоты применяются конденсаторы с рабочей частотой 0,8...2,0 кГц старых серий ЭМ, ЭМВ, ЭС и других, которые рекомендуется заменять на конденсаторы новой серии ЭСВ.

Электрооборудование установок электрической сварки

Электросваркой называется способ получения неразъемного соединения металлических деталей путем их местного нагрева до жидкого или пластического состояния с использованием для нагрева электрической энергии. Наиболее распространенные виды электросварки – дуговая и контактная,

При дуговой электросварке соединяемые детали обычно нагреваются вместе с присадочным материалом при помощи электрической дуги, температура в которой превышает 5000 °С. В зоне сварки создается ванночка расплавленного металла, которая при охлаждении затвердевает и образует сварной шов, прочно соединяющий свариваемые детали.

При контактной электросварке детали в месте соединения нагреваются до оглавления (иногда до пластического состояния) и сжимаются с определенным усилием. Нагрев осуществляется теплом, которое выделяется в точках контактов между деталями при прохождении через них электрического тока. Присадочный материал не добавляется.

Дуговая сварка имеет несколько разновидностей. По особенностям использования электрической дуги различают сварку открытой дугой, закрытой дугой под слоем флюса, защищенной дугой в среде защитного газа. В зависимости от степени механизации и автоматизации процесса сварки говорят о ручной, полуавтоматической и автоматической сварке. Наконец, сварка может производиться на постоянном и на переменном токе однофазной и (реже) трехфазной дугой. Сварка на постоянном токе дороже и требует более сложного оборудования, но дает более высокое качество сварного шва.

Самое широкое применение для сварки черных металлов получила ручная электросварка открытой дугой с плавящимся электродом (рис. 10.15, а). Дуга, получая питание от источника 2 переменного или постоянного тока, горит в воздухе между свариваемыми деталями 1 и электродом 3, который плавится в процессе сварки и участвует в образовании сварного шва. Электрод из проволоки, по химическому составу близкой к металлу свариваемых деталей, покрыт обмазкой. Она содержит вещества, которые образуют при расплавлении шлаки и газы, повышающие устойчивость дуги и в известной мере защищающие расплавленный металл от воздействия кислорода и азота воздуха.

Ручная сварка открытой дугой с неплавящимся электродом (рис. 10.15 б) используется обычно при сварке деталей из цветных метал-

лов и сплавов. В этом случае применяется источник постоянного тока. Дуга горит между свариваемыми деталями 1 и электродом 3 (угольным или графитовым). В зону сварки вводится присадочный пруток 4.

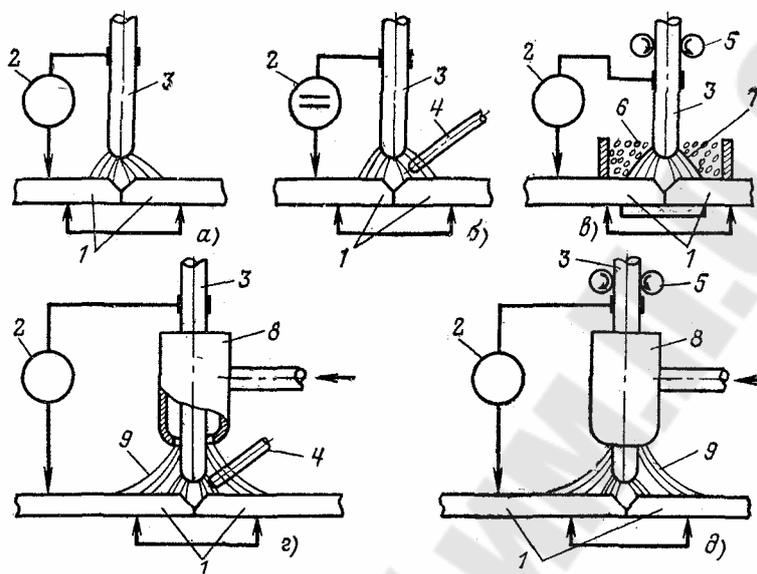


Рис. 10.15. Разновидности дуговой электросварки.

При автоматической и полуавтоматической сварке закрытой дугой под флюсом с плавящимся электродом (рис. 10.16, в) дуга горит под находящимся на свариваемых деталях 1 слоем сыпучего вещества - флюса 6. Голая электродная проволока 8 автоматически подается в зону сварки через флюс с помощью подающего механизма 5. Дуга получает питание от источника 2 переменного или постоянного тока. При сварке под флюсом в зоне сварочной дуги под действием высокой температуры флюс расплавляется и образует своеобразный газовый пузырь. Оболочка 7 последнего надежно защищает расплавленный металл от действия кислорода и азота воздуха. При автоматической сварке автоматизируется и перемещение дуги вдоль свариваемых кромок; при полуавтоматической сварке это перемещение осуществляется вручную. Автоматическая сварка под флюсом дает высокое качество сварного соединения; ее производительность в 6...12 раз выше, чем ручной дуговой сварки.

Сварка защищенной дугой в среде защитного газа характерна тем, что в зону сварки специально подают аргон или смеси его с небольшим количеством активных газов (аргонодуговая сварка) или углекислый газ. Ручная аргонодуговая сварка неплавящимся электродом (рис. 10.15, г) на постоянном и переменном токе от источника 2

применяется при изготовлении конструкций 1 из нержавеющей и жаропрочных сталей, цветных металлов и их сплавов, при сварке тонкого металла. Вольфрамовый электрод 3 помещен в газоэлектрическую горелку 8, к которой под давлением подводится газ из баллона. Вытекающая из сопла горелки струя газа 9 защищает в зоне сварки основной металл и металл присадочного прутка 4 от воздействия кислорода и азота воздуха. При автоматической и полуавтоматической сварке в среде аргона или углекислого газа используется плавящийся электрод (рис. 10.15, д). Неизолированная электродная проволока 3 при помощи механизма 5 непрерывно подается через горелку 8 в зону сварки, которая отделена от окружающего воздуха струей газа 9. Сварка в среде аргона производится как на переменном, так и на постоянном токе, сварка в среде углекислого газа (она применяется для сталей любого состава) – на постоянном токе. Сварка в среде углекислого газа для многих видов работ экономически эффективнее других способов сварки.

При питании сварочной дуги постоянным током свариваемые детали чаще всего соединяют с положительным полюсом источника, а электрод с его отрицательным полюсом. Это, так называемая, «прямая полярность» сварки. В дуге в области анода выделяется большее количество тепла, чем в области катода, поэтому при сварке с прямой полярностью большую долю тепла получают служащие анодом свариваемые детали, которые обычно массивнее электрода. Но в ряде случаев (при сварке тонких листов, некоторых цветных металлов, при сварке в среде углекислого газа и др.) применяют и «обратную полярность», когда электрод является анодом.

Оборудование для дуговой сварки используется и при резке и наплавке металлов, например при ручной дуговой резке металлическим или угольным электродом открытой дугой, аргонодуговой резке и наплавке и т. п.

Контактная электросварка имеет следующие разновидности: стыковая сварка, точечная и роликовая (шовная). Сварку производят на контактных машинах переменным однофазным током большого значения (до тысяч и десятков тысяч ампер) при малых напряжениях (единицы вольт) или мощными однополярными импульсами тока (только для точечной и роликовой сварки).

При **стыковой сварке** (рис. 10.16, а) детали сваривают по всей плоскости их касания. В зависимости от марки металла, площади сечения и требований к качеству соединения процесс стыковой сварки

осуществляют по-разному. Для сравнительно малых сечений свариваемых деталей (до 300 мм^2) применяют стыковую сварку сопротивлением. Заготовки с механически обработанными и зачищенными торцами устанавливают в стыковую машину и закрепляют усилием F_3 . После этого их прижимают одну к другой усилием осадки F_{oc} определенного значения и пропускают через них ток от трансформатора TrC . При нагреве металла в зоне сварки до пластического состояния происходит осадка. Ток выключают еще до окончания осадки. При больших сечениях применяют стыковую сварку оплавлением. Ее производят в три стадии: предварительный подогрев, оплавление и окончательная осадка или только в две последние стадии. Предварительный подогрев в зажимах машины выполняют периодическим смыканием и размыканием деталей при постоянно включенном токе. При этом происходит процесс прерывистого оплавления торцов. Затем детали непрерывно медленно сближают, заготовки прогреваются в глубину до пластического состояния, а на торцах возникает тонкий слой расплавленного металла, после чего резко увеличивают скорость сближения, осуществляя осадку небольшим усилием F_{oc} . Стыковая сварка оплавлением дает более высокую прочность шва, не требует предварительной механической обработки, позволяет сваривать детали из разнородных металлов.

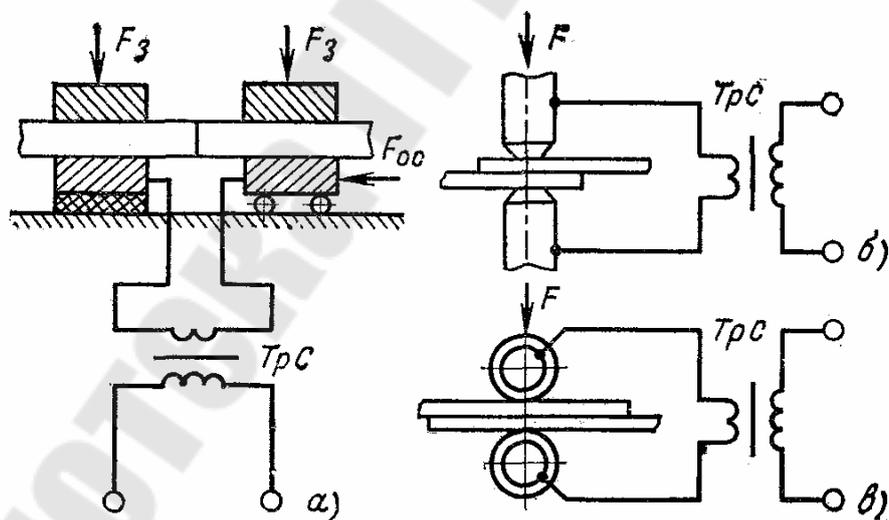


Рис. 10.16. Разновидности контактной электросварки

При точечной сварке листов (рис. 10.16, б) детали соединяют сваркой в отдельных местах, условно называемых точками. Заготовки устанавливают между электродами точечной машины и плотно сжимают усилием F . Включают ток, и заготовки быстро нагреваются,

особенно в месте контакта – чечевицеобразной «точке» под электродами, в которой металл расплавляется и образуется сварная точка, диаметр которой обычно близок к диаметру электродов. После этого ток выключают и заготовки кратковременно выдерживают между электродами под действием усилия F . Точечная сварка применяется для соединения не только листовых заготовок, но и листовых заготовок со стержнями или уголками, швеллерами и т.п. Свариваемые детали могут быть из однородных и из разнородных металлов. Толщина заготовок – от сотых долей миллиметра до 35 мм. Разновидностью точечной сварки является так называемая рельефная сварка. Она характерна тем, что на одной из заготовок предварительно изготовляют выступы (рельефы) круглой, продолговатой или иной формы. Сварку осуществляют одновременно по всем рельефам или последовательно один за другим.

Роликовая сварка (рис. 10.16, в) заключается в том, что заготовки соединяют непрерывным прочноплотным сварным швом, который состоит из ряда последовательных точек, частично перекрывающих друг друга. Заготовки устанавливают в сварочной машине между роликами, один из которых ведущий, или между одним ведущим роликом и оправкой. На ролики действует усилие F механизма давления, и к ним подведен ток. Наиболее распространены два способа роликовой сварки:

- 1) при непрерывном вращении роликов прерывистым (импульсным) включением тока;
- 2) включение тока при неподвижных роликах и вращение роликов при выключенном токе (шаговая сварка).

Источники питания сварочной дуги

Статические вольтамперные характеристики сварочной дуги, т. е. зависимости в установившемся процессе сварки напряжения дуги U_d от сварочного тока $I_{св}$ (тока дуги), показаны на рис. 10.17 для трех различных значений длины дуги. В области I , т. е. при малых токах (например до 100 А для ручной сварки открытой дугой), характеристика дуги падающая. При средних значениях тока (например от 100 до 1000 А для ручное сварки открытой дугой и автоматической сварки под флюсом тонкой проволокой) напряжение дуги практически не зависит от тока (область II). В этом случае

$$U_d = a + bI_d \quad (10.1)$$

где a и b — постоянные коэффициенты; l_d — длина дуги.

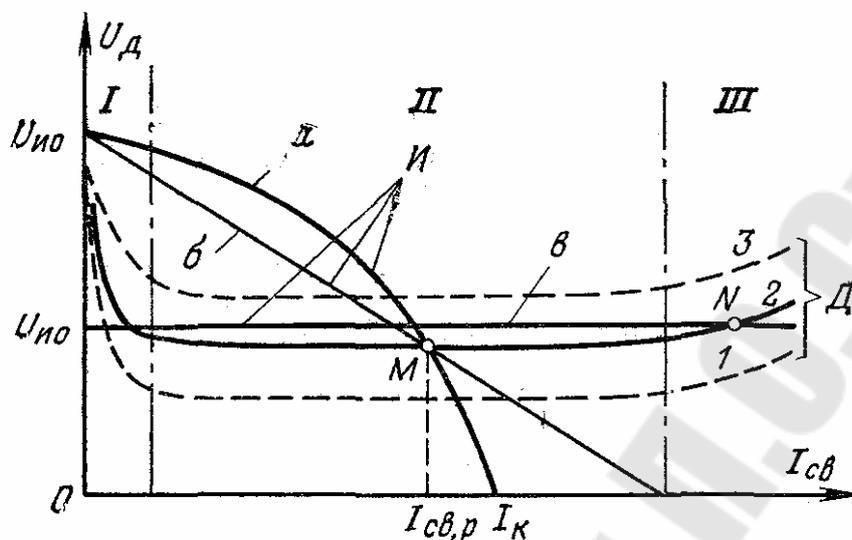


Рис. 10.17. Статические вольт-амперные характеристики сварочной дуги (Д) и внешние характеристики источника питания (II)
1 — короткая дуга; 2 — средняя дуга; 3 — длинная дуга

Значения U_d обычно лежат в пределах 25...50 В для ручной сварки открытой дугой, 30...40 В для сварки под флюсом и 20...30 В для сварки, в среде защитных газов.

При больших токах (свыше 1000 А для автоматической сварки под флюсом толстой проволокой), т.е. в области III, дуга имеет возрастающую характеристику. Для сварки в среде защитных газов эта область характеристики начинается при значительно меньших токах.

Сварочная дуга переменного тока менее устойчива, чем дуга постоянного тока. В каждый полупериод переменного тока дуга угасает и вновь зажигается (восстанавливается). Перерывы в горении дуги будут тем меньше, чем выше напряжение холостого хода источника (при прочих равных условиях). Для сварки открытой дугой напряжение зажигания U_3 связано с напряжением дуги U_d зависимостью

$$U_3 = 1,3 \div 2,5 U_d. \quad (10.2)$$

При сварке на больших токах под флюсом U_3 мало отличается от U_d .

Требования к источникам питания сварочной дуги. Устойчивость дуги в процессе сварки зависит от соответствия внешней характеристики источника $U_{и} = \varphi(I_{св})$ форме статической характеристики дуги $U_d = f(I_{св})$ в данном процессе. Внешняя характеристика И ис-

точника (рис. 10.17) может быть круто падающей (кривая *a*), полого падающей (кривая *б*) и жесткой (кривая *в*).

Для ручной дуговой сварки, ряда режимов автоматической сварки под флюсом и некоторых видов сварки в среде защитных газов внешняя характеристика источника должна быть крутопадающей. Чем круче характеристика *a* в рабочей части (точка *M* на рис. 10.18), тем меньше колебания тока при изменении длины дуги. При таких характеристиках напряжение холостого хода источника $U_{и0}$, которое по условиям техники безопасности не должно превышать 90 В, всегда больше напряжения дуги $U_{д}$, что облегчает первоначальное и повторное зажигание дуги, особенно при сварке на переменном токе. Кроме того, ограничивается ток к.з. $I_{к}$, который по отношению к рабочему току $I_{св,р}$ должен находиться в пределах $I_{к}/I_{св,р} = 1,25 \div 2,0$.

При автоматической сварке под флюсом тонкой проволокой в большинстве случаев используется пологопадающая характеристика источника *б*. При сварке в среде защитных газов на постоянном токе для режимов, когда статическая характеристика 2 дуги возрастающая (точка *N*), целесообразно применение источника с жесткой характеристикой *в*.

Источники сварочного тока должны обеспечивать возможность настройки различных режимов сварки, т.е. установления наивыгоднейшего значения рабочего тока $I_{св,р}$ при заданном напряжении дуги $U_{д}$. Поэтому источники тока выполняются регулируемыми, позволяя в определенном диапазоне изменений тока и напряжения получить семейство внешних характеристик с плавным или ступенчатым переходом с одной характеристики на другую.

Источники тока в установках ручной дуговой сварки предназначены для работы с одним сварочным постом (однопостовые) или для работы с несколькими постами (многопостовые). Источники для многопостовой сварки должны иметь жесткие внешние характеристики. Каждый пост подключается при этом через свой балластный реостат.

Источник питания должен быть рассчитан на определенную номинальную нагрузку $I_{св,ном}$, при которой он может работать, не перегреваясь выше допустимых норм. Режим работы источника для ручной сварки характеризуется продолжительностью работы ПР – отношением времени сварки $t_{св}$ к времени цикла $t_{ц} = t_{св} + t_{п}$,

где $t_{п}$ - время пауз. Обычно ПР выражают в процентах $ПР = (t_{св}/t_{ц}) \cdot 100$.

Условно за номинальный режим принимают для однопостовых источников $t_{св} = 3$ мин, $t_{ц} = 5$ мин. Тогда $ПВ_{ном} = 60\%$. Для многопостовых источников $ПВ_{ном} = 100\%$.

Номинальный режим работы источников для автоматической и полуавтоматической сварки устанавливают при продолжительности включения $ПВ_{ном} = 60$ или 100% , которая определяется так же, как и ПВ, но при $ПВ \neq 100\%$ считается, что в периоды пауз источник отключается от сети питания, и время цикла равно 10 мин.

Сварочные преобразователи постоянного тока. Питание сварочной дуги постоянным током дороже, чем переменным. Однако применение постоянного тока целесообразно, когда к качеству сварных швов предъявляются особо высокие требования, а также когда использование переменного тока затруднено, например, при сварке деталей малой толщины.

Источники питания постоянного тока можно разделить на две группы: сварочные преобразователи и полупроводниковые сварочные инверторы.

Сварочный преобразователь состоит из генератора постоянного тока и приводного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Для работы в полевых условиях выпускаются также преобразователи двигателями внутреннего сгорания. В своем большинстве преобразователи изготавливаются в однокорпусном исполнении: генератор и двигатель находятся на одном валу в одном корпусе.

Сварочные генераторы выполняются с двумя обмотками возбуждения независимой к последовательной (размагничивающей или подмагничивающей, рис. 10.18, а) либо параллельной и последовательной (размагничивающей или подмагничивающей, рис. 10.18, б).

У генераторов, выполненных по схеме на рис. 10.18, а, обмотка независимого возбуждения *ОВ1* питается от сети переменного тока через стабилизатор напряжения и селеновый выпрямитель (на схеме не показаны). Она создает магнитный поток Φ_1 . Обмотка *ОВ2* включена последовательно в сварочную цепь. При сварке по ней проходит сварочный ток и создается магнитный поток Φ_2 . Если этот поток направлен навстречу основному потоку Φ_1 , т.е. обмотка *ОВ2* размагничивающая, то внешняя характеристика генератора будет падающей. Наклон характеристики можно изменять секционированием обмотки *ОВ2*. При подключении сварочной цепи на отпайку обмотки *ОВ2* характеристика становится положе. Плавное регулирование сварочного тока производится реостатом $R_{рег}$ в цепи обмотки *ОВ1*. По такой схе-

ме работают генераторы в однопостовых сварочных преобразователях типа ПСО на токи от 120 до 800 А и нового типа ПД на 500 А, предназначенных для ручной дуговой и автоматической сварки под флюсом. Например, преобразователь ПСО-300 с номинальным током 300 А при ПР (ПВ)=65% и номинальным напряжением 30 В позволяет регулировать сварочный ток от 75 до 300 А.

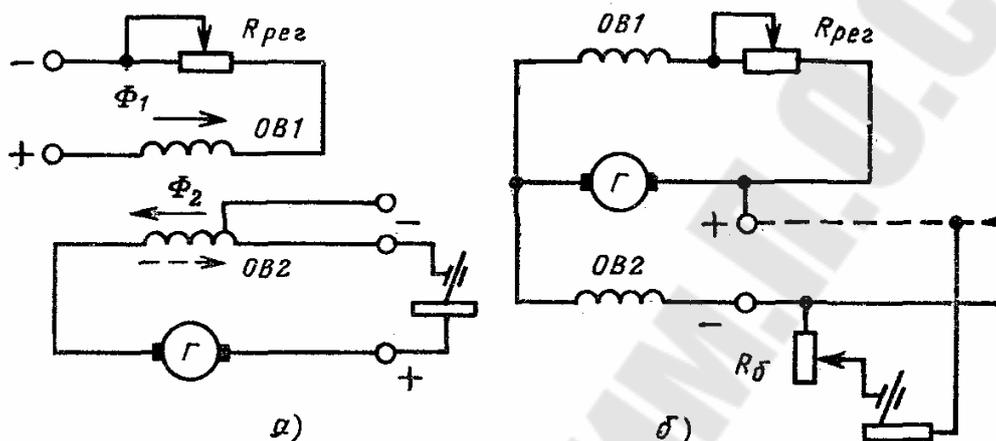


Рис. 10.18. Принципиальные электрические схемы сварочных генераторов постоянного тока

Если обмотка $OB2$ генератора имеет небольшое число витков и включена так, что является подмагничивающей, т. е. поток Φ_2 направлен согласно с потоком Φ_1 и компенсирует поток реакции якоря, то напряжение генератора мало изменяется при изменении сварочного тока. Режим сварки регулируют реостатом $R_{рег}$ в цепи обмотки $OB1$. По такой схеме выполнены однопостовые преобразователи типа ПСГ на токи 350 и 500 А с жесткими характеристиками, предназначенные для сварки в защитных газах. Например, пределы регулирования напряжения и тока у преобразователя ПСГ-300 составляют от 15 до 35 В и от 50 до 350 А.

У некоторых типов преобразователей возможно переключение полярности обмотки $OB2$ генератора (например, у однопостового универсального преобразователя ПСУ-500 на ток 500 А). Такой преобразователь дает как падающие, так и жесткие внешние характеристики, он пригоден для ручной дуговой сварки и для сварки в защитных газах.

Генератор с самовозбуждением (рис. 10.18, б), выполненный с размагничивающей обмоткой $OB2$, имеет падающие характеристики (например, генератор однопостового преобразователя ПС-1000 на 1000 А для автоматической сварки под флюсом). Сварочный ток ре-

гулируется реостатом $R_{\text{рег}}$ в цепи параллельной обмотки возбуждения *ОВ1*. Пределы регулирования тока – от 300 до 1200 А. Номинальное напряжение 45 В.

По схеме на рис. 10.18, б с подмагничивающей обмоткой *ОВ2* выполняют генераторы многопостовых преобразователей. Такой генератор имеет очень жесткую внешнюю характеристику: его напряжение практически не изменяется при изменении тока. Так, например, преобразователь ПСМ-1000 рассчитан на одновременное питание девяти или шести постов с максимальным током поста 200 или 300 А. Преобразователь снабжается комплектом из девяти или шести балластных реостатов R_6 . Приводной асинхронный двигатель имеет мощность 75 кВт.

В настоящее время машинные сварочные преобразователи постоянного тока вытесняются полупроводниковыми сварочными выпрямителями, обладающим следующими достоинствами:

- равномерная нагрузка силовой сети переменного тока;
- лучшее использование трансформатора, питающего выпрямитель;
- лучшие динамические свойства из-за меньшей электромагнитной инерции по сравнению с генераторами постоянного тока (ток и напряжение изменяются при переходных процессах практически мгновенно).
- более высокий КПД, чем у сварочных преобразователей с генераторами постоянного тока.

Сварочные генераторы и инверторы весьма многообразны по конструкциям, электрическим схемам и назначению. Можно выделить две основные разновидности сварочных выпрямителей: с неуправляемыми вентилями и с тиристорами. Независимо от конкретных особенностей типов выпрямителей каждый из них имеет следующие основные узлы: понижающий сухой трехфазный трансформатор; выпрямительный блок; пускорегулирующую и защитную аппаратуру; принудительную воздушную вентиляцию (в большинстве случаев). Все выпрямители подключаются к сети 230 или 400 В.

Сварочные выпрямители с неуправляемыми вентилями делятся на однопостовые и многопостовые, причем однопостовые выпрямители изготавливаются с селеновыми или кремниевыми вентилями, многопостовые — с кремниевыми. Большинство однопостовых выпрямителей имеет крутопадающие внешние характеристики; отдельные типы выполнены с пологопадающими и жесткими характеристиками.

Упрощенная принципиальная электрическая схема сварочного выпрямителя ВСС-300-3 на номинальный сварочный ток 300 А при $PR_{\text{ном}} = 65\%$ приведена на рис. 10.19. Вентильный (выпрямительный) блок *ВВ* собран из селеновых вентилей. Силовой трансформатор с повышенным рассеянием *ТрС* выполнен с подвижными катушками вторичных обмоток. Это позволяет плавно регулировать сварочный ток в общих пределах от 35 до 330 А при двух диапазонах ступенчатого регулирования. Последнее осуществляется переключением первичных и вторичных обмоток от схемы звезда — звезда на схему треугольник — треугольник. Напряжение холостого хода выпрямителя $U_{\text{в0}} = 58—65$ В, номинальное напряжение $U_{\text{в,ном}} = 25$ В. Выпрямитель предназначен для однопостовой ручной дуговой сварки и имеет крутопадающую характеристику.

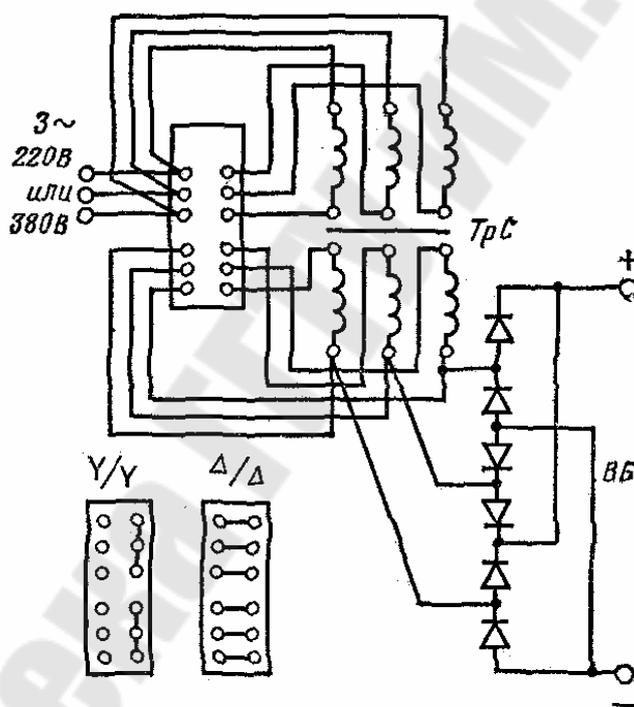


Рис. 10.19. Электрическая схема выпрямителя ВСС-300-3

Аналогичные схемы, назначение и характеристики имеют выпрямители типа ВСС на ток 120 А, типа ВКС на токи 120 и 300 А с кремниевыми диодами, а также нового типа ВД на 300 А. Эти выпрямители оснащены переключателями диапазонов.

На рис. 10.20 приведены в качестве примера внешние характеристики выпрямителя ВД-303. Рабочее напряжение $U_{\text{в}}$ на зажимах выпрямителя определяется в зависимости от тока $I_{\text{св}}$ соотношением $U_{\text{в}} = 20 + 0,04I_{\text{св}}$.

Однопостовые сварочные выпрямители с пологопадающими и жесткими внешними характеристиками (например, типа ВС) предназначены для сварки плавящимся электродом в среде защитных газов, а выпрямители на токи 500 и 1000 А - также для автоматической сварки под флюсом. Принцип построения схемы выпрямителя типа ВС иллюстрируется рис. 10.20. Выпрямитель состоит из силового трехфазного трансформатора *ТрС* и вентильного блока *ВБ*, собранного на селеновых вентилях. Для ограничения скорости нарастания тока при к.з. электрода включен дроссель *Др*. Регулирование выпрямленного напряжения осуществляется путем ступенчатого переключения отпаек первичной обмотки каждой фазы трансформатора *ТрС*.

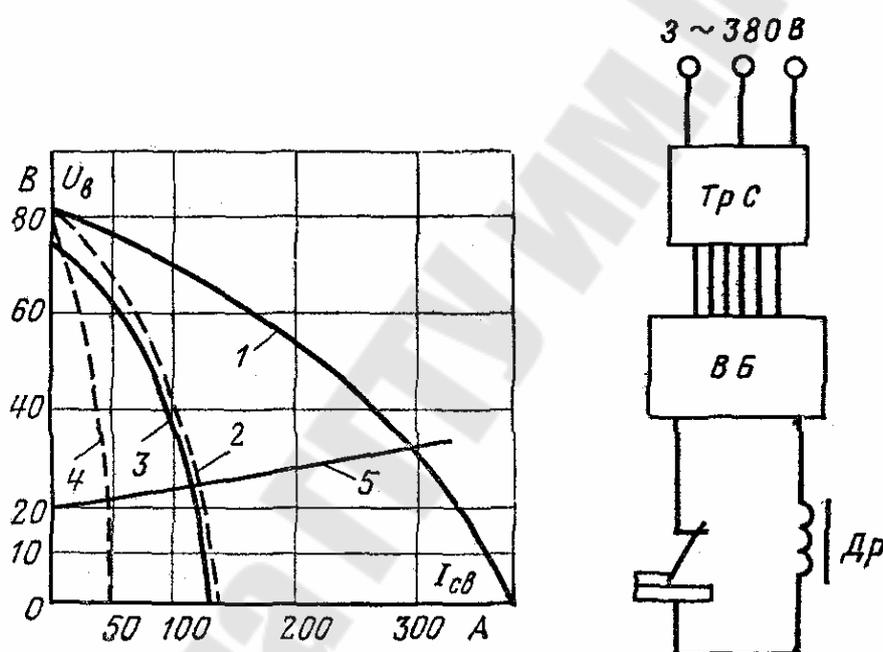


Рис. 10.20. Внешние характеристики выпрямителя ВД-303

1 и 2 - при сдвинутых катушках; 3 и 4 - при раздвинутых катушках; 1 и 3 - диапазон больших токов; 2 и 4 - диапазон малых токов; 5 - рабочие напряжения в общем диапазоне 45—300 А.

Многопостовые сварочные выпрямители для ручной дуговой сварки типов ВКСМ-1000 на 1000 А и ВДМ-1600 на 1600 А с кремниевыми вентилями имеют жесткие внешние характеристики. Электрическая схема силовых блоков выпрямителя ВКСМ приведена на рис. 10.21.

Вентильный блок *ВБ* собран по так называемой кольцевой шестифазной схеме. Трансформатор *ТрС* имеет два трехфазных комплекта вторичных обмоток. Первичные обмотки *ТрС* соединены в тре-

угольник. Переключателем *П* можно переключать отпайки обмоток, что дает возможность повышать вторичное напряжение на 5% для получения номинального выпрямленного напряжения при пониженном напряжении сети. Выпрямители ВКСМ-1000 и ВДМ-1600 мало отличаются друг от друга. Большой ток ВДМ-1600 обусловлен параллельным соединением трех вентилях в каждой фазе. Получение падающих характеристик и регулирование тока сварочных постов обеспечивается балластными реостатами, поставляемыми комплектно с выпрямителем.

Сварочные тиристорные выпрямители являются наиболее совершенными источниками сварочного тока.

Однопостовые универсальные выпрямители типов ВДУ-504, ВДУ-1001 и ВДУ-1601 обеспечивают разнообразные сварочные операции. Выпрямители обладают и крутопадающими, и жесткими характеристиками.

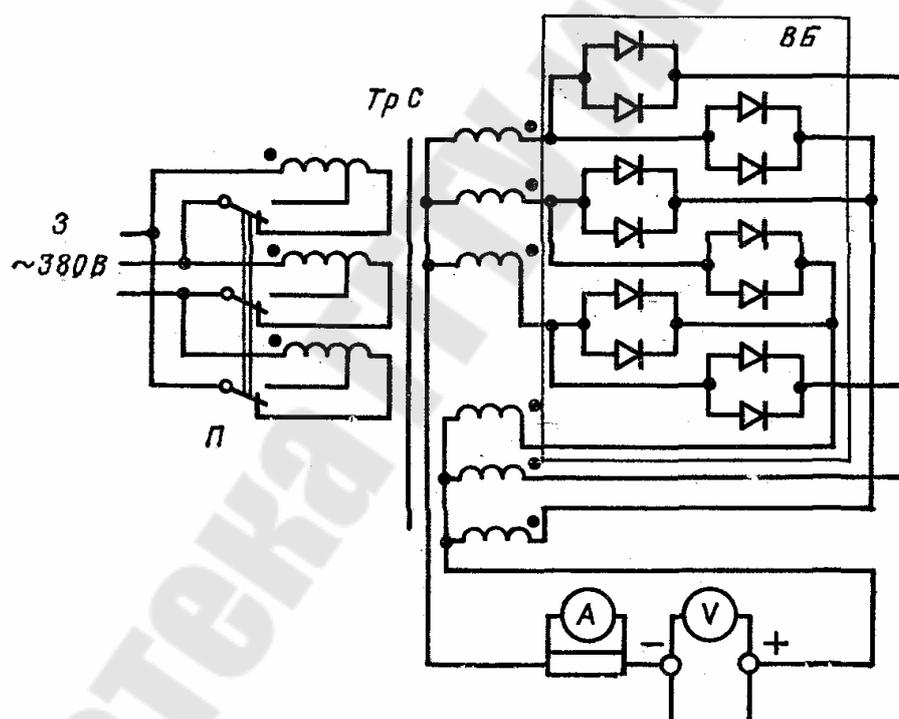


Рис. 10.21. Электрическая схема силовых блоков сварочного выпрямителя ВКСМ-1000.

Полуавтоматическая сварка в углекислом газе

Схема поста с полуавтоматом А-547Р для сварки тонкого металла (толщиной до 3 мм) электродной проволокой с $d_s = 0,8 \dots 1,0$ мм постоянным током обратной полярности приведена на рис. 10.22. На рабочем месте сварщика располагается газэлектрическая горелка 1 с гибким шлангом, подающий механизм 2, щиток 4 сварщика с пуско-

вой кнопкой 3. Газ в горелку 1 поступает из баллона 10 с жидкой углекислотой через подогреватель газа 9, осушитель газа 8, редуктор 7 и переходный штуцер 6 с манометром 5. На корпусе источника сварочного тока 11 размещен пульт управления 12. В качестве источника тока с жесткой характеристикой используются генераторы типов ПСТ, ПС или ПСУ, выпрямители типов ВДУ и ВС (на рис. 10.22 показан выпрямитель типа ВС).

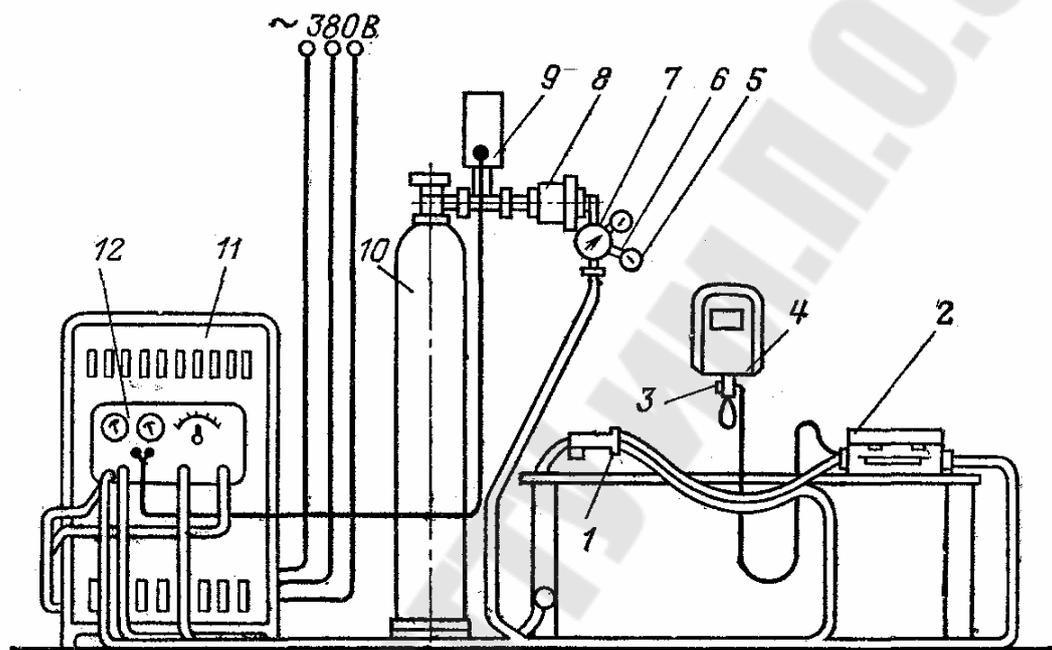


Рис. 10.22. Схема поста А-547Р для полуавтоматической сварки в среде углекислого газа

Механизм подачи электродной проволоки конструктивно оформлен в виде чемодана, в котором находятся основные узлы механизма: двигатель постоянного тока, редуктор, катушка для проволоки, направляющие ролики для подачи проволоки. Скорость подачи регулируется двумя способами: плавно изменением частоты вращения двигателя и ступенчато сменой подающих роликов. Гибкий шланг присоединен к механизму подачи через специальный токо-съемник и имеет внутри направляющий проволоку канал со стальной спиралью. На другом конце шланга укреплена горелка.

Принципиальная электрическая схема полуавтомата А-547Р показана на рис. 10.23. Двигатель Д смешанного возбуждения (обмотки $OB1$ и $OB2$) и последовательная обмотка электромагнитной муфты сцепления ЭМ подключаются к источнику питания ИСТ контактором

КС. Двигатель работает с постоянно введенным в цепь якоря резистором R . Регулирование частоты вращения двигателя производится реостатом $R_{рег}$ в цепи параллельной обмотки возбуждения $ОВ1$. Напряжение на схему, в том числе и на подогреватель газа $ПГ$, подается выключателем B . Контроль за режимом сварки осуществляется по вольтметру V и амперметру A , установленным вместе с реостатом $R_{рег}$ и выключателем B на пульте управления.

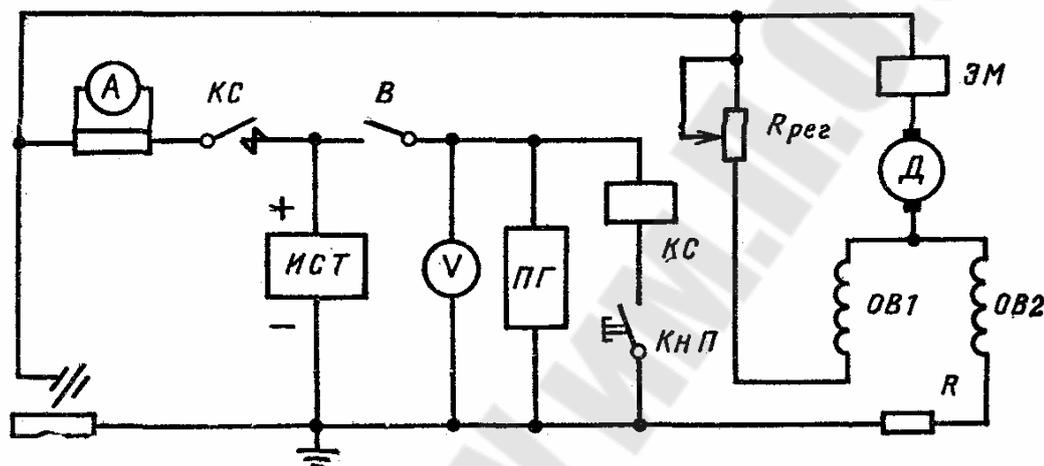


Рис. 10.23. Электрическая схема полуавтомата А-547Р

После замыкания электродной проволоки на изделие и нажатия на кнопку $КнП$ включается контактор $КС$. Сварочная цепь замыкается, включаются электродвигатель $Д$ и электромагнитная муфта $ЭМ$, сцепляющая валы двигателя и редуктора. Начинается подача электродной проволоки с постоянной скоростью в зону дуги и устойчивый процесс сварки. При отпускании кнопки $КнП$ контакт $КС$ размыкается, протекание сварочного тока прекращается, отключаются муфта $ЭМ$ и двигатель $Д$.

Применяют также полуавтоматы других типов, в том числе ранцевый полуавтомат ПДГ-302 из новой унифицированной серии ПДГ, у которого подающий механизм расположен в ранце сварщика. Масса ранца около 5 кг.

Полуавтоматы серии ПДГ изготавливаются с подающим механизмом, регулируемый электропривод постоянного тока которого выполнен по системе тиристорный преобразователь – двигатель. Подающий механизм может быть установлен на тележке или на турели с поворотом на 360° , что позволяет вести сварку на расстоянии до 3 м от места расположения автомата.

Электролизные установки

Электролиз – это явление выделения вещества на электродах при прохождении через электролит тока, процессы окисления и восстановления на электродах, сопровождающиеся приобретением или потерей частицами вещества электронов.

Электролизер – это ванна, в которой процесс идет с поглощением электрической энергии.

Принцип действия можно рассмотреть на схеме электролизера с анодным растворением и катодным осаждением (рис. 10.24).

Основными элементами установки являются: электролит (1), электроды (2) и источник питания (3).

Напряжение на электролизной ванне (U) состоит из трех составляющих:

$$U = U_1 + U_{ак} + U_3,$$

где U_1 — напряжение электрохимического разложения вещества, $U_{ак}$ - приэлектродное напряжение (на аноде и катоде), U_3 — напряжение в электролите.

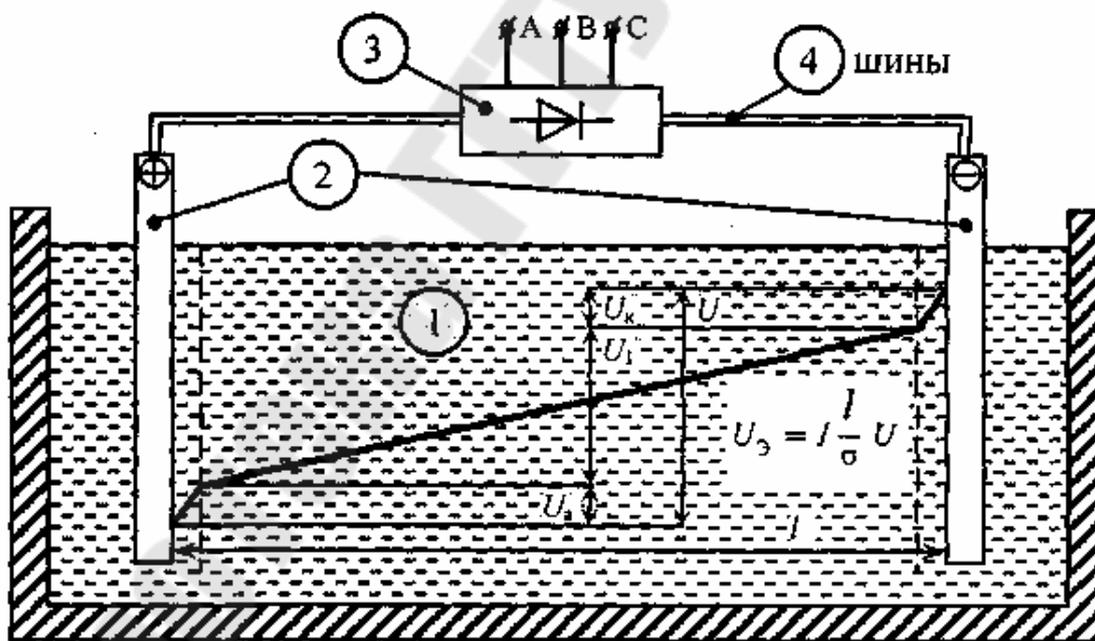


Рис. 10.24. Схема электролизной установки

Мощность, выделяющаяся в электролизной ванне ($P_{эв}$), определяется выражением

$$P_{эв} = I(U_1 + U_a + U_k + \frac{l}{\sigma}),$$

где I – ток в ванне, А, U_a , U_k – падение напряжения на аноде и катоде, В; l – расстояние между электродами, м; σ – удельная проводимость электролита, 1/(Ом·м).

Только часть этой мощности (IU_1) расходуется на разложение вещества. Остальная мощность идет на нагрев электролита и транспортировку ионов через раствор.

Эффективность электролизного процесса оценивается выходом по энергии ($A_э$, %):

$$A_э = \alpha \frac{A_T}{U} 10^2,$$

где α – электрохимический эквивалент вещества; A_T — выход металла по току, г/Дж; U – напряжение на электролизере, В.

Выход металла по току — это количество металла (г), выделяемое на единицу затраченной энергии (Дж).

Интенсивность процесса определяется электродной плотностью тока ($j_э$, А/м²):

$$j_э = \frac{I}{S},$$

где I – ток, А; S – площадь погруженной в электролит части электрода, м².

Около поверхности электродов образуется двойной электрический слой, который противодействует подходу и выходу ионов. Для ослабления противодействия применяются:

- циркуляция электролита, для выравнивания температуры;
- вибрация электродов;
- импульсный источник питания.

В промышленности электролиз металлов и исходная среда определяются электрическим потенциалом выделяемого металла.

Металлы с положительным потенциалом выделяют из твердой черновой основы путем ее растворения (например, медь с потенциалом «+0,34 В»).

Металлы с отрицательным потенциалом больше (-1) выделяют из растворов их солей (например, цинк с потенциалом (-0,76 В)).

Металлы с отрицательным потенциалом меньше (-1) выделяют из расплавов их солей (например, алюминий с потенциалом (-1,43)).

Электролиз меди применяется для получения чистой электролитической меди из черновой (полученной после плавки в печах) и для извлечения ценных металлов, находящихся в ней.

Процесс ведется в электролизных ваннах.

Анодом является литая черновая медь в виде плит толщиной 35...45 мм и массой около 300 кг.

Катодом является электролитическая (чистая) медь в виде пластин толщиной 0,6...0,7 мм, подвешенных на ушках между анодами. Расстояние между соседними анодами и катодами 35...40 мм.

Электролитом, которым заполняется ванна, является водный раствор медного купороса (CuSO_4 подкисленный серной кислотой (H_2SO_4)) для уменьшения сопротивления.

При пропускании через ванну электрического тока черновая медь анодов растворяется, чистая медь осаждается на катодах, а благородные металлы (некоторые примеси тоже) выпадают в осадок или переходят в раствор (например, никель).

Процесс характеризуется следующими показателями:

- начальное напряжение $U_0 = 0,3...0,35$ В;
- плотность тока электродная $j_e = 180...270$ А/м²;
- выход по току фактический $A_T = 92...98$ %;
- удельный расход электроэнергии $W_{уд} = 200...379$ кВт·ч/т;
- температура электролита поддерживается $T = 60$ °С.

В целях выравнивания концентрации ионов меди у электродов и обеспечения необходимой температуры применяется прямая циркуляция электролита, который подается снизу и сливается сверху ванны.

Электролиз цинка применяется для получения высококачественного цинка (Zn) из водных растворов его солей.

Катодом являются алюминиевые пластины толщиной 4 мм. Анодом являются свинцовые пластины толщиной 5...8 мм, с добавкой 1 % серебра для снижения коррозии.

Электролитом является 5...6 % водный раствор сернокислого цинка (ZnSO_4) и серной кислоты (H_2SO_4). Во время электролиза на катоде осаждается металлический цинк (Zn), который периодически снимают.

На аноде выделяется газообразный водород (H), а в растворе образуется серная кислота (H₂SO₄).

Процесс характеризуется следующими показателями:

- плотность тока электродная $j_э = 400...600 \text{ А/м}^2$;
- выход по току фактический $A_T = 88...94 \%$;
- удельный расход электроэнергии $W_{уд} = 3500 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ чистого цинка;
- температура электролита $T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Снятие цинка с катодов производится до 2 раз в сутки, затем его промывают, формуют в пакеты и переплавляют в печах.

В процессе электролиза износ катодов составляет около 1,5 кг/т цинка, а анодов – 0,8... 1,5 кг/т цинка.

Резкое повышение падения напряжения на ванне (до 3,3...3,6 В) указывает на необходимость очистки анодов от шлама.

Такая необходимость очистки анодов - один раз в 20...25 дней, а катодов - один раз в 10 дней.

Шлам удаляется через отверстие в дне ванны.

В электролизном цехе ванны устанавливаются рядом длинными бортами по 20...30 штук и соединяют в один блок.

Для поддержания заданной температуры ванны охлаждаются водой, подаваемой по алюминиевым или углеродистым змеевикам.

Для снижения выделения водорода на катоде в раствор добавляют поверхностно-активные вещества.

Электролиз алюминия применяется для получения качественного алюминия (Al) из расплавленных солей путем электролиза.

Анодом является угольный электрод, который расходуется в процессе электролиза, так как находится в сильно агрессивной среде.

Анод подвешивается на подвижной раме, которая автоматически перемещается по металлоконструкциям печи. Управляющим сигналом является потеря напряжения в электролите.

Электролитом является раствор оксида алюминия (Al₂O₃) в расплавленном криолите (Na₃AlF₆). Присутствие фтора (F₆) придает среде высокую агрессивность.

Катодом являются подовые блоки печи.

Ток к ванне подводится с двух сторон.

К аноду – по пакетам алюминиевых шин, по гибким медным токопроводам, по стальным штырям.

К катоду – по специальным токопроводам (блумсам).

Размеры анода определяются заданной мощностью ванны и допустимой плотностью тока.

Процесс характеризуется следующими показателями:

- плотность тока электродная $j_э = 0,65... 1 \text{ А/см}^2$;
- удельный расход электроэнергии $W_{уд} = 16\ 000 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$;
- нормальное напряжение одной ванны $U = 4,2... 4,5 \text{ В}$;
- сила тока при работе $I = 40...250 \text{ кА}$ в зависимости от мощности.

Электролизеры объединяют в серию из 160...170 шт., причем 4...5 из них являются резервными.

Выливают металл из ванны вакуум-ковшами.

Вылитый из ванн алюминий поступает в миксеры литейного корпуса, где он после усреднения и отстаивания разливается в слитки.

Схема выпрямительного тиристорного агрегата

Основные элементы схемы

T1...T3 – однофазные трансформаторы. Первичные обмотки их соединены в «звезду» через тиристоры, которые предназначены для плавного регулирования переменного тока. Вторичные обмотки трансформаторов соединены по схеме двойной трехфазной «звезды».

БВ – блок вентилях неуправляемых, анодных, подключенных к вторичным обмоткам трансформаторов.

ДТ и ДН – датчики тока и напряжения.

РТ и РН – регуляторы тока и напряжения.

СИФУ – система импульсно-фазового управления тиристорами.

В агрегате применена двухконтурная система регулирования:

- внутренний контур – токовый,
- внешний контур – напряжения.

Регулятор тока (РТ) подключен к входу СИФУ тиристорами, а регулятор напряжения (РН) – к нагрузке.

колоннах или на технологическом производственном оборудовании, на тросах и т.д.

Местное освещение предусматривается на отдельных рабочих местах (станках, верстаках, столах, разметочных плитах и т.д.) и выполняется светильниками, установленными непосредственно у рабочих мест.

Устройство в помещениях только местного освещения нормами запрещено. Местное ремонтное освещение выполняется ручными светильниками, которые подключаются через понижающий трансформатор на безопасном напряжении 12, 24, 42 В в зависимости от категории помещения в отношении безопасности обслуживающего персонала.

Система комбинированного освещения уменьшает установленную мощность и расход электроэнергии, так как лампы местного освещения включаются только на время выполнения работ непосредственно на рабочем месте.

Виды освещения. Искусственное освещение подразделяется на рабочее, аварийное, охранное и дежурное. Аварийное освещение может быть освещением безопасности и эвакуационным.

Рабочим называется освещение, которое обеспечивает нормируемые осветительные условия (освещенность, качество освещения) в помещениях и в местах производства работ вне зданий.

Рабочее освещение выполняется для всех помещений зданий, а также участков открытых пространств, предназначенных для работы, прохода людей и движения транспорта.

Освещением безопасности называется освещение для продолжения работы при аварийном отключении рабочего освещения. Такой вид освещения предусматривается в случаях, если отключение рабочего освещения и связанное с этим нарушение обслуживания оборудования и механизмов может вызвать: взрыв, пожар, отравление людей; длительное нарушение технологического процесса; нарушение работы ответственных объектов, таких как электрические станции, узлы радио- и телевизионных передач и связи, диспетчерские пункты, насосные установки водоснабжения, канализации и теплофикации, в которых недопустимо прекращение работ и т.п. Это освещение должно создавать на поверхностях, требующих обслуживания, освещенность не менее 5 % нормированной для рабочего освещения при системе общего освещения, но не менее 2 лк.

Эвакуационным называется освещение для эвакуации людей из помещений при аварийном отключении рабочего освещения. Эвакуационное освещение предусматривается в помещениях или в местах производства работ вне зданий в основном в следующих случаях: в местах, опасных для прохода людей; в проходах и на лестницах, служащих для эвакуации людей, при числе эвакуируемых более 50 чел; по основным проходам производственных помещений, в которых работают более 50 чел; в помещениях общественных зданий, административных и бытовых зданий промышленных предприятий, если в помещениях могут одновременно находиться более 100 чел; в производственных помещениях без естественного света и др.

Эвакуационное освещение должно обеспечивать наименьшую освещенность на полу основных проходов (или на земле) в помещениях 0,5 лк, на открытых территориях 0,2 лк.

Эвакуационное освещение должно обеспечивать освещенность в проходах, проездах, а также выходы и выезды из помещений.

Охранное освещение, при отсутствии специальных технических средств охраны, должно предусматриваться вдоль границ территорий, охраняемых в ночное время и должно создавать освещенность не менее 0,5 лк на уровне земли.

Рекомендации по выбору уровней освещенности и коэффициента запаса

Правильное определение уровня нормированной освещенности в значительной степени обуславливает эффективность осветительной установки.

Под нормированной освещенностью понимается минимальная освещенность, которая должна иметь место в "наихудших" точках освещаемой поверхности. Установлена следующая шкала нормируемых значений освещенности: 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 20; 30; 50; 75; 100; 150; 200; 300; 400; 500; 600; 750; 1000; 1250; 1500; 2000; 3000; 4000; 5000; 6000; 7500 лк.

Нормы освещенности искусственного освещения промышленных помещений, общественных и жилых зданий, территорий предприятий и организаций, улиц, площадей регламентированы нормативными документами. Основным нормативным документом для выбора минимальных норм освещенности является ТКП 2.04.153 – 2009 «Естественное и искусственное освещение».

Нормированные значения освещенности должны быть обеспечены в течение всего времени эксплуатации осветительной установки.

Однако из-за старения и загрязнения ламп и светильников и поверхностей помещений уровень освещенности со временем снижается. Поэтому начальная освещенность должна увеличиваться на стадии проектирования осветительной установки, что достигается введением коэффициента запаса, который зависит от количества и характера пыли в воздухе, степени старения данного типа источников света, светильников, и конечно периодичности очистки ламп и светильников.

В зависимости от указанных обстоятельств значение коэффициента запаса принимается в пределах 1,3...2,0 для помещений, территорий при количестве чисток светильников в год и эксплуатационной группы светильников.

Значение коэффициентов запаса для некоторых помещений и зон:

кабинеты и рабочие помещения, жилые комнаты, учебные классы, читальные и торговые залы – 1,4;

цеха инструментальные, сборочные, механические, механосборочные, пошивочные – 1,4;

цеха кузнечные, литейные, мартеновские, сборного железобетона, цеха химических заводов по выработке кислот, щелочей, удобрений, цеха гальванических покрытий и электролиза – 1,6;

горячие цеха предприятий общественного питания, помещения прачечных, душевые – 1,6;

цементные заводы, обрубные отделения литейных цехов, агломерационные фабрики – 1,7.

Источники света

Источники света (ИС) подразделяются:

тепловые – лампы накаливания общего назначения (ЛОН), вакуумные, газонаполненные, одно- и биспиральные, галогенные лампы (КГ);

разрядные ИС низкого давления – трубчатые люминесцентные лампы (ЛЛ), компактные люминесцентные энергосберегающие (КЛЭ);

разрядные ИС высокого давления – дуговые ртутные лампы (ДРЛ), металлогалогенные лампы (ДРИ), натриевые – (ДНаТ);

индукционные лампы;

светодиодные источники света и др.

Классификация основных источников света представлена на рис. 11.1.



Рис. 11.1. Источники света

При выборе источников света учитываются следующие основные факторы:

- электрические характеристики (напряжение, мощность, род тока);
- светотехнические параметры (световой поток, сила света, цвето-передача, цветовая температура, спектральный состав излучения);
- конструктивные параметры (форма и размеры колбы или длина трубчатых ламп);
- средняя продолжительность работы;
- стабильность светового потока;
- экономичность (стоимость, световая отдача).

Необходимо предпочтение отдавать разрядным источникам света как наиболее экономичным, имеющим световую отдачу более 50 лм/Вт, и в связи с этим обеспечивающие минимальное потребление электроэнергии.

Применение ламп накаливания допускается в отдельных случаях, когда по условиям технологии, среды или требований **индукционные лампы** терьера использование разрядных источников света невозможно или нецелесообразно.

Лампы накаливания ввиду их низкой световой отдачи можно использовать в следующих случаях:

а) в помещениях с нормируемой освещенностью 50 лк и ниже, т.е. когда с помощью газоразрядных источников света невозможно обеспечить зрительный комфорт;

б) в помещениях с тяжелыми условиями среды и взрывоопасных, при отсутствии необходимых светильников с газоразрядными лампами;

в) в помещениях, где недопустимы радиопомехи;

г) для аварийного и эвакуационного освещения, когда рабочее освещение выполнено разрядными лампами высокого давления (ДРЛ, ДРИ, ДНаТ).

Люминесцентные лампы низкого давления типа Т8, Т5 рекомендуется применять в общественных и производственных помещениях:

– где работа связана с большим и длительным напряжением зрения;

– где требуется распознавание цветовых оттенков;

– где люминесцентное освещение целесообразно по архитектурно-художественным соображениям.

Широкое распространение получили компактные люминесцентные энергосберегающие лампы мощностью 7, 9, 11, 13, 15, 20, 23 с резьбовым цоколем Е14, Е27 и 40, 80, 105 Вт с цоколем Е40 позволяющие производить замену ламп накаливания без переделки светильников.

Разрядные лампы высокого давления (ДРЛ, ДРИ, ДНаТ) применяются в производственных помещениях с высокими перекрытиями ($H \geq 6$ м). Причем при наличии требований к цветопередаче применяются лампы ДРИ.

Разрядные стандартные лампы высокого давления типа ДНаТ из-за низкой цветопередачи $R_a = 20$ используются для освещения помещений с невысоким уровнем освещенности (складских помещений, открытых пространств, заводских территорий, улиц, площадей). Здесь учитываются положительные свойства ламп нормально работать в широком диапазоне температур – ± 40 °С.

Индукционные лампы применяются для освещения производственных и общественных зданий, имеющие ряд достоинств по сравнению с разрядными лампами. Индукционные лампы в своей конструкции не имеют спиралей, электродов и потому срок службы увеличивается до 100 тысяч часов. Герметичность колбы, отсутствие электродов и спиралей позволяют использовать индукционные лампы в помещениях с различной средой и наружных установках.

Светодиодные источники света постоянно улучшаются, увеличивается световая отдача, снижается слепящее действие, что делает их конкурентными с люминесцентными и разрядными источниками света.

Для эвакуационного освещения и безопасности применяются: лампы накаливания; люминесцентные; светодиодные в виду их быстрого зажигания.

Светильники

Светильники являются осветительными приборами ближнего действия и предназначены для рационального перераспределения светового потока ламп, а также защиты глаз от чрезмерной яркости, предохраняют источники света от загрязнения и механических повреждений. Конструктивно они состоят из корпуса-отражателя и (или) рассеивателя, патрона и крепящего устройства.

Каждый из светильников характеризуется одной из семи типовых кривых силы света: концентрированной (К), глубокой (Г), косинусной (Д), полуширокой (Л), широкой (Ш), равномерной (М) и синусной (С). Типовые кривые приведены на рис. 11.2.

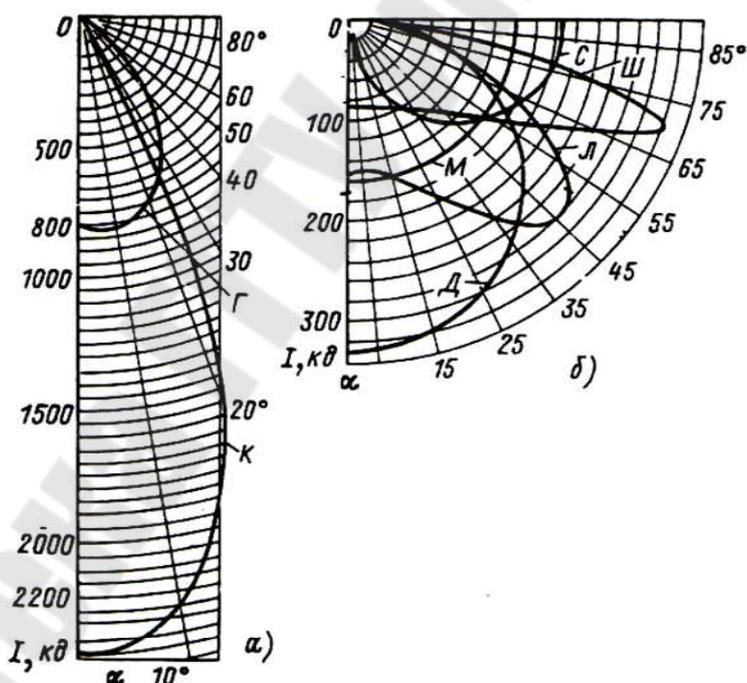


Рис. 11.2. Типовые кривые силы света светильников

Кривые светораспределения являются важнейшими светотехническими характеристиками светильника, определяющими распределение его светового потока в пространстве, окружающем светильник.

Основными характеристиками светильников являются:

– коэффициент усиления (K_y), представляющий отношение максимальной силы света светильника (I_{\max}) к средней сферической силе света ($I_{\text{ср.сф}}$):

$$K_y = \frac{I_{\max}}{I_{\text{ср.сф}}},$$

$$\text{где } I_{\text{ср.сф}} = \frac{\Phi_{\text{л}}}{4\pi}.$$

Коэффициент усиления характеризует увеличение силы света светильника в заданном направлении;

– коэффициент полезного действия (η):

$$\eta = \frac{\Phi_{\text{св}}}{\Phi_{\text{л}}},$$

где $\Phi_{\text{св}}$ – световой поток светильника;

$\Phi_{\text{л}}$ – световой поток источника света;

– защитный угол (γ) – определяет степень защиты глаза от воздействия ярких частей источника света.

Структура обозначения и маркировка светильников следующая:

1 2 3 4 5 – 6 × 7 – 8 9 10 – 11 12

1 – Тип источника света (одна буква на первом месте в шифре): Н – лампа накаливания; И – галогенные; Л – люминесцентные лампы; Р – ДРЛ; Г – металлогалогенные; Ж – натриевые; Ф – флуоресцентные; Б – бактерицидные; К – ксеноновые; Д – светодиодные.

2 – Основной способ установки светильника: С – подвесные; П – потолочные; Б – настенные; Н – настольные; Т – напольные; В – встраиваемые; К – консольные; Р – ручные.

3 – Основное назначение светильника: П – для промышленных предприятий; Р – для рудников и шахт; О – для общественных зданий; Б – для жилых (бытовых) помещений; У – для наружного освещения; Т – для телевизионных студий.

4,5 – Номер серии, к которой принадлежит светильник (две цифры).

6×7 – Количество ламп в светильнике × мощность ламп, Вт.

8, 9, 10 – Номер модификации светильника (трехзначное число).

11– Обозначение климатического исполнения (ХЛ – холодный климат, У – умеренный климат, УХЛ – умеренный, холодный климата, Т – тропический).

12 – Категории размещения. Установлено, пять категорий размещения:

1 – для установки на открытом воздухе;

2 – для установки в помещениях, где колебание температуры и влажности воздуха не существенно отличается от колебаний на открытом воздухе;

3 – для установки в закрытых помещениях с естественной вентиляцией, где колебания температуры и влажности воздуха, а также воздействия песка и пыли значительно меньше, чем на открытом воздухе;

4 – для помещений с искусственно регулируемым климатическими условиями;

5 – для помещений с повышенной влажностью, например, не отапливаемые и не вентилируемые помещения под землей).

Пример 11.1. Светильник имеет маркировку типа НСП05×100-016-УЗ.

Н – светильник с лампой накаливания;

С – подвесной;

П – для промышленных предприятий;

05 – серия;

100 – мощность 100 Вт;

016 – модификация;

У – для умеренного климата;

3 – категория размещения (для установки в закрытых помещениях с естественной вентиляцией, где колебания температуры и влажности воздуха, а также воздействия песка и пыли значительно меньше, чем на открытом воздухе).

Пример 11.2. Светильник имеет маркировку ЛПП 02-2×58-005-УЗ.

Л – светильник с люминесцентными лампами;

П – потолочный;

П – для производственных помещений;

02 – серия;

2×58 – с двумя лампами мощностью по 58 Вт,

005 – модификация,

У – для умеренного климата;

3 – для установки в закрытых помещениях с естественной вентиляцией, где колебания температуры и влажности воздуха, а также воздействия песка и пыли значительно меньше, чем на открытом воздухе.

Пример 11.3. Светильник имеет маркировку РКУ08×400-014-ХЛ1. Светильник с ртутной лампой типа ДРЛ мощностью 400 Вт, консольный, уличный, серии 08, модификации 014, ХЛ – для холодного климата, категория размещения 1 – для установки на открытом воздухе.

Пример 11.4. Светильник имеет маркировку ФСП01 2х57-У3. Светильник с флуоресцентными (люминесцентными) двумя лампами мощностью по 57 Вт, подвесной для производственных зданий, серии 01, У – для умеренного климата, категория размещения 3.

Способы размещения светильников по высоте и на плане помещений

При системе общего освещения светильники можно размещать над освещаемой поверхностью либо равномерно, либо локализовано. При равномерном освещении светильники располагают правильными симметричными рядами, создавая при этом относительно равномерную освещенность по всей площади, а при локализованном – индивидуально для каждого рабочего места или участка производственного помещения, создавая при этом требуемые освещенности только на рабочих местах.

Минимальная высота подвеса светильников ограничивается условием ослепляющего из действия (нормируемый показатель ослепленности).

Максимальная высота ограничивается размерами помещения и условиями обслуживания светильников.

При выборе высоты подвеса учитываются строительные особенности помещений – наличие ферм, технологических мостиков, размеры строительного модуля; одновременно рассматриваются способы прокладки и монтажа проводов и кабелей осветительной сети.

В помещениях ограниченной высоты светильники устанавливаются либо на свесах, либо непосредственно на потолке и обслуживаются с лестниц или стремянок. По условию доступности высота подвеса светильников не должна превышать 5 м от пола, причем светильники не должны располагаться над крупным оборудованием, приемками и в других местах, где невозможна установка лестниц или стремянок.

На рис. 10.3 показано размещение светильников общего освещения по высоте помещения. Минимальная высота подвеса светильников над освещаемой поверхностью определяется условиями ограничения ослепленности. Большинство помещений общественных зданий имеют высоту около 3 м, поэтому высота подвеса ограничивается высотой помещения.

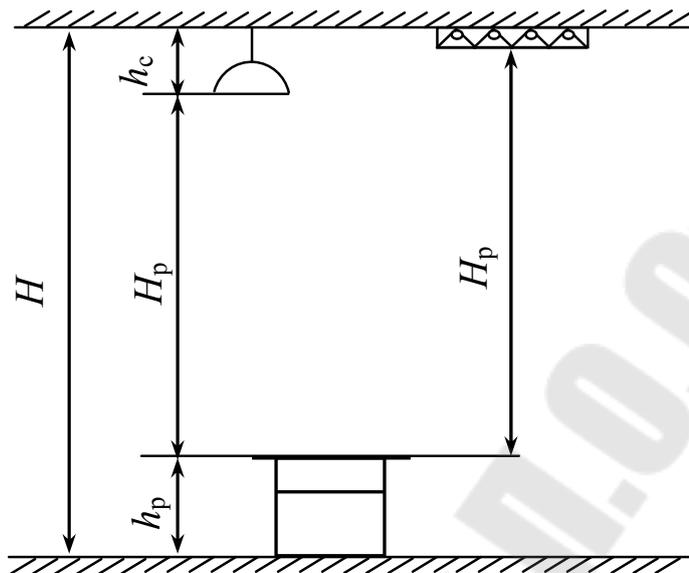


Рис. 11.3. Размещение светильников по высоте помещения

В общем случае расчетная высота подвеса светильников H_p определяется по выражению:

$$H_p = H - h_c - h_p, \quad (1.4)$$

где H – высота помещения; h_c – высота свеса светильника; h_p – высота рабочей поверхности, при отсутствии конкретной величины принимается равной 0,8 м.

Задача 11.1. Определить расчетную высоту H_p для производственного помещения.

Высота помещения до ферм перекрытия производственного цеха составляет 8,6 м, высота свеса светильника 0,6 м, Нормированный уровень освещенности 300 лк, Г - пол.

Решение: $H_p = 8,6 - 0,6 = 8,0$ м.

Задача 11.2. Определить расчетную высоту H_p для административного помещения.

Высота помещения от потолка до пола составляет 3,0 м, светильник закреплен непосредственно к перекрытию над рабочей поверхностью, освещенность 300 лк, КСС – Г-0,8.

Решение: $H_p = 3 - 0,8 = 2,2$ м.

Расположение светильников на плане помещения при общем равномерном освещении производится по углам прямоугольника или в

шахматном порядке (рис. 11.4, а, б) этим достигается наиболее равномерное распределение освещенности по всей площади помещения.

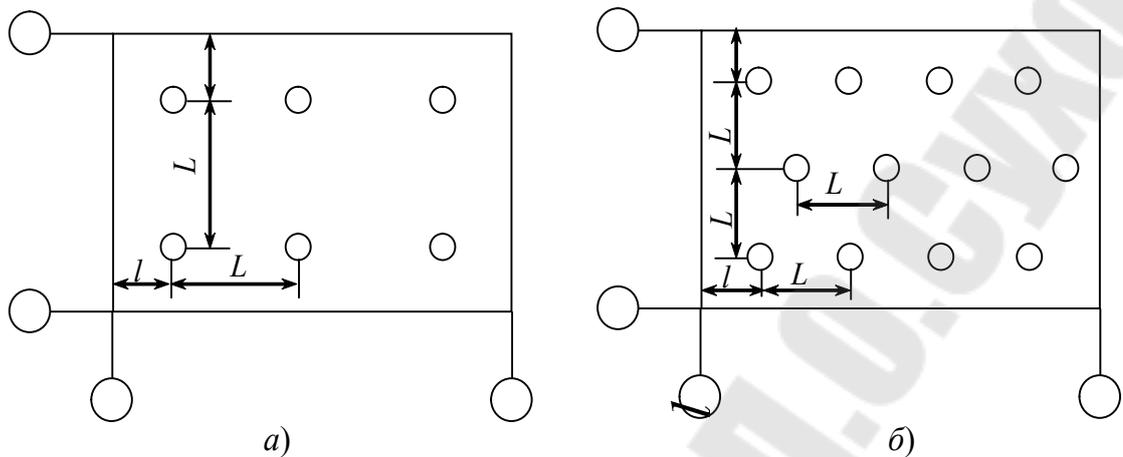


Рис. 11.4. Размещение светильников на плане помещения:
а – по углам прямоугольника; б – в шахматном порядке

Выбор расстояния между светильниками зависит от типа светильника, высоты его подвеса над рабочей поверхностью, а иногда способ расположения светильников зависит от архитектурных или строительных условий.

При расположении светильников на плане помещения необходимо выбрать такое оптимальное расстояние между светильниками, которое обеспечило бы наименьшую установленную мощность осветительной установки и достаточную для практических условий равномерность освещения.

Ряды светильников с люминесцентными лампами следует располагать параллельно длинной стороне помещения со световыми проемами. Если проемы расположены на короткой стороне, то ряды светильников можно располагать и вдоль и поперек помещения.

Для равномерного распределения светильников в помещении можно пользоваться следующей рекомендацией:

- наметить в помещении количество рядов;
- распределить ряды на плане помещения таким образом, чтобы расстояние между рядами было одинаковым (L);
- расстояние от крайних рядов светильников до стен (l) рекомендуется принимать

$$l = (0,3...0,5)L \quad (11.2)$$

Задача 11.3. Распределить равномерно 8 светильников на плане помещения, имеющего размеры: длина – 12 м, ширина – 6 м.

Решение. Намечаем два ряда по длине помещения, таким образом, чтобы расстояние между рядами и между светильниками в ряду $L = 3$ м, тогда расстояние от ряда до стены определим по выражению 911.2).

$$l = 0,5 \cdot 3 = 1,5 \text{ м.}$$

Таким образом, при таком расположении светильников будет достигнута равномерность освещенности в помещении.

Расчет освещения по методу коэффициента использования светового потока

Помещения, в которых предусматривается общее равномерное освещение горизонтальных поверхностей, освещение рассчитывают методом коэффициента использования светового потока.

По этому методу расчетную освещенность на горизонтальной поверхности определяют с учетом светового потока, падающего от светильников непосредственно на расчетную поверхность и отраженного от стен, потолка и самой поверхности.

Метод коэффициента использования применим для расчета освещения помещений светильниками с различными источниками света.

При расчете по методу коэффициента использования, световой поток ламп, необходимый для создания нормируемой минимальной освещенности определяется по формуле

$$\Phi = \frac{E \cdot k \cdot S \cdot z}{\eta} \quad (11.3)$$

При определении потребного светового потока ламп в каждом светильнике формула имеет вид

$$\Phi = \frac{E \cdot k \cdot S \cdot z}{n \cdot \eta} \quad (11.4)$$

При известной мощности и световом потоке ламп, чтобы определить количество решается обратная задача. Определяется количество ламп, предварительно выбранных по мощности и световому потоку

$$n = \frac{E \cdot k \cdot S \cdot z}{\Phi \cdot \eta} \quad (11.5)$$

где E – заданная минимальная нормируемая освещенность, лк;
 k – коэффициент запаса (принимается 1,4...1,8 в зависимости от условий окружающей среды в помещении);
 S – площадь помещения, м²;
 z – отношение E_{cp}/E_{min} (неравномерность освещения принимается 1,15 – для точечных источников света; 1,1 – для линейных источников света);
 n – количество светильников (ламп в светильнике);
 η – коэффициент использования, о.е. (для некоторых типов светильников можно определить по табл. 11.1–11.3).

Таблица 11.1

Коэффициенты использования светового потока

Тип светильника	Светильник с люминесцентными лампами ЛПО30 4x18					
	$\rho_{п},\%$	80	70	70	50	50
$\rho_{с},\%$	50	50	30	50	30	30
$\rho_{р},\%$	30	30	30	30	30	10
i	Коэффициенты использования, о.е.					
0,6	0,37	0,36	0,31	0,35	0,3	0,29
0,8	0,45	0,44	0,38	0,42	0,37	0,36
1,0	0,51	0,50	0,44	0,48	0,43	0,42
1,25	0,57	0,56	0,50	0,54	0,49	0,47
1,5	0,61	0,60	0,55	0,58	0,53	0,51
2,0	0,68	0,66	0,61	0,63	0,59	0,56
2,5	0,72	0,70	0,66	0,66	0,63	0,59
3,0	0,75	0,73	0,69	0,69	0,66	0,61
4,0	0,78	0,76	0,73	0,71	0,69	0,64
5,0	0,8	0,78	0,75	0,73	0,71	0,65

Таблица 11.2

Коэффициенты использования светового потока						
Тип светильника	Светильник с люминесцентными лампами ЛПО30 2x36					
$\rho_{п},\%$	80	70	70	50	50	50
$\rho_{с},\%$	50	50	30	50	30	30
$\rho_{р},\%$	30	30	30	30	30	10
i	Коэффициенты использования, о.е.					
0,6	0,37	0,37	0,31	0,36	0,31	0,30
0,8	0,45	0,44	0,39	0,43	0,38	0,37
1,0	0,51	0,50	0,45	0,49	0,44	0,42
1,25	0,57	0,56	0,51	0,54	0,48	0,47
1,5	0,61	0,60	0,55	0,58	0,53	0,41
2,0	0,68	0,66	0,61	0,63	0,59	0,57
2,5	0,71	0,70	0,66	0,66	0,63	0,59
3,0	0,74	0,72	0,69	0,68	0,66	0,61
4,0	0,78	0,75	0,72	0,71	0,69	0,64
5,0	0,80	0,77	0,75	0,73	0,71	0,65

Таблица 11.3

Коэффициенты использования светового потока						
Тип светильника	Светильник с лампой накаливания НСП					
$\rho_{п},\%$	70	70	50	50	0	0
$\rho_{с},\%$	50	50	30	10	0	0
$\rho_{р},\%$	30	10	10	10	0	0
i	Коэффициенты использования, о.е.					
0,6	0,36	0,34	0,28	0,25	0,24	0,24
0,8	0,44	0,42	0,36	0,33	0,31	0,31
1,0	0,50	0,47	0,42	0,39	0,38	0,38
1,25	0,57	0,52	0,47	0,44	0,43	0,43
1,5	0,61	0,57	0,51	0,47	0,46	0,46
2,0	0,68	0,62	0,58	0,54	0,52	0,52
2,5	0,73	0,65	0,61	0,58	0,57	0,57
3,0	0,77	0,67	0,64	0,61	0,59	0,59
4,0	0,81	0,70	0,67	0,64	0,62	0,62
5,0	0,82	0,72	0,69	0,66	0,64	0,64

Коэффициент использования определяется в зависимости от значений индекса помещения i и коэффициентов отражения потолка, стен, рабочей поверхности – $\rho_{п}$, $\rho_{с}$, $\rho_{р}$.

Индекс помещения можно вычислить по выражению:

$$i = \frac{AB}{h(A+B)}, \quad (11.6)$$

где A и B – длина и ширина помещения, м;

h – расчетная высота подвеса светильников над освещаемой поверхностью, м.

Приблизительные значения коэффициентов отражения можно определить по следующим рекомендациям:

- побеленный потолок и стены – 80...70 %;
- побеленный потолок, стены окрашены в светлые тона – 50 %;
- бетонный потолок, стены оклеены светлыми обоями, бетонные стены – 30 %;
- стены и потолки в помещениях оштукатуренные, темные обои – 10 %.

Для выбранного типа светильников и известного светового потока ламп, количество светильников в ряду определяется, как

$$n_{св} = \Phi / \Phi_{л}, \quad (11.7)$$

где $\Phi_{л}$ – световой поток лампы, лм.

Задача 11.4. Выполнить расчет электрического освещения производственного помещения методом коэффициента использования светового потока. Разместить светильники на плане помещения.

Помещение имеет размеры: длина – $A = 12$ м, ширина – $B = 6$ м, высота – $h = 3,6$ м. Нормируемая освещенность $E = 100$ лк, коэффициент запаса $k = 1,4$. Коэффициенты отражения: потолка, стен, расчетной поверхности соответственно $\rho_{п} = 50\%$; $\rho_{с} = 30\%$; $\rho_{р} = 10\%$. Светильники с лампами накаливания типа НСП.

Решение. Определим индекс помещения

$$i = 12 \cdot 6 / 3,6(12 + 6) = 1,1.$$

По табл. 11.1 определим коэффициент использования по заданным коэффициентам отражения потолка, стен, расчетной поверхности и индексу помещения для светильника с лампами накаливания типа НСП – $\eta = 0,44\%$.

Определим световой поток:

$$\Phi = 100 \cdot 1,4 \cdot 72 \cdot 1,15 / 0,44 = 26345,5 \text{ лм}.$$

Светильник с лампами БК 100 Вт создает световой поток равным 1500 лм.

Определим количество ламп

$$n = 26345,5 / 1500 = 17,56 \text{ шт.}$$

Округляем полученное количество светильников до 18 и распределяем равномерно на плане помещения (рис. 11.5).

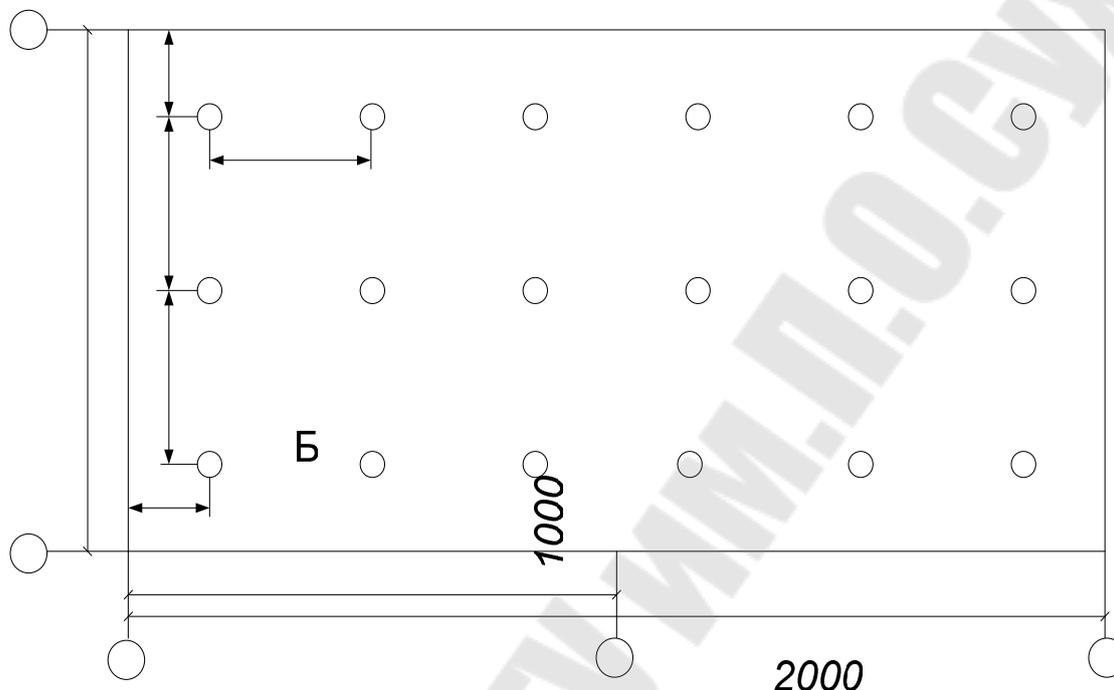


Рис. 11.5. Размещение светильников на плане помещения

Расчет электрической сети освещения

Расчет электрической сети освещения заключается в определении сечения проводов и кабелей на всех участках групповой и питающей сети и расчет защиты.

Рассчитанное сечение жил проводов и кабелей должно удовлетворять условиям механической прочности, нагрева током длительным допустимым, потерь напряжения.

По механической прочности минимальное сечение жил проводов и кабелей принимается:

медных не менее – $1,5 \text{ мм}^2$, алюминиевых – не менее $2,5 \text{ мм}^2$.

Расчет электрической сети и выбор сечений жил проводов (кабелей) производится:

1. По нагреву электрическим током нагрузки. Электрический ток нагрузки, протекая по проводнику, нагревает его. Нормами, приведенными в [3] установлены наибольшие допустимые температуры нагрева жил проводов и кабелей. Исходя, из этого определены, до-

пустимые токовые нагрузки для проводов и кабелей в зависимости от материала их изоляции, оболочки и условий прокладки.

Сечение жил проводов и кабелей для сети освещения можно определить по табл. [3, табл. 1.34–1.38], в зависимости от расчетного длительного значения токовой нагрузки при нормальных условиях прокладки по условию

$$I_{\text{дл. доп}} \geq I_p / K_{\text{п}}, \quad (11.8)$$

где $I_{\text{дл. доп}}$ – допустимый ток на стандартное сечение провода, А (длительно допустимые токовые нагрузки на провода и кабели);
 I_p – расчетное значение длительного тока нагрузки, А;
 $K_{\text{п}}$ – поправочный коэффициент на условия прокладки (при нормальных условиях прокладки $K_{\text{п}} = 1$).

Для выбора сечений проводов и кабелей по допустимому нагреву необходимо определить расчетные токовые нагрузки линий в амперах.

Расчетные максимальные токовые нагрузки определяют по формулам:

– для однофазной сети

$$I_p = \frac{P_p}{U_a \cos \varphi}; \quad (11.9)$$

– для трехфазной сети

$$I_p = \frac{P_p}{\sqrt{3} U_{\text{л}} \cos \varphi}; \quad (11.10)$$

– для двухфазной линии с нулем, при равномерной загрузке фаз

$$I_p = \frac{P_p}{2 U_a \cos \varphi}. \quad (11.11)$$

Коэффициент мощности ($\cos \varphi$) следует принимать:

1,0 – для ламп накаливания;

0,85 – для одноламповых светильников с люминесцентными лампами низкого давления с электромагнитным пускорегулирующими аппаратами (ПРА);

0,97...0,98 – для светильников с люминесцентными лампами низкого давления с электронным пускорегулирующими аппаратами (ЭПРА);

0,50 – для светильников с разрядными лампами высокого давления с ПРА без конденсатора;

0,85 – для светильников с разрядными лампами высокого давления, имеющими ПРА с конденсатором;

0,96...0,98 – для светильников с индукционными лампами;

0,96...0,98 – для светильников со светодиодными источниками света.

Задача 11.5. Рассчитать сечение жил и выбрать провод для прокладки групповой сети электроосвещения в помещении с нормальными условиями окружающей среды. Электрическая сеть однофазная трехпроводная напряжением 230 В. Провода прокладываются открыто. Групповая линия состоит из девяти светильников с лампами мощностью 9×200 Вт. Коэффициент спроса освещения – $k_c = 1,0$.

Решение: Определим расчетную мощность

$$P_p = \sum P_{л};$$

$$P_p = 9 \times 200 = 1800 \text{ Вт}.$$

Определим расчетный ток

$$I_p = 1800/230 = 7,8 \text{ А}.$$

По механической порочности определено минимальное сечение алюминиевых жил проводов и составляет $2,5 \text{ мм}^2$.

Из [3, табл. 1.35], выбираем провод с алюминиевыми жилами сечением $2,5 \text{ мм}^2$ с длительным допустимым током 20 А.

Подставим в условие 11.12.

$$20 \text{ А} > 7,8 \text{ А}.$$

Выбранное сечение удовлетворяет условию, следовательно, выбираем кабель с алюминиевыми жилами марки АВВГ $3 \times 2,5 \text{ мм}^2$, который прокладывается по строительным основаниям.

Защита осветительной сети и выбор автоматических выключателей

Осветительные сети должны иметь защиту от токов короткого замыкания (КЗ), а в некоторых случаях также от перегрузки [1].

Защите от перегрузки подлежат сети:

– внутри помещений, проложенные открыто незащищенными изолированными проводниками и с горючей оболочкой;

- внутри помещений, проложенные защищенными проводниками в трубах, в несгораемых строительных конструкциях и т. п.;
- осветительные в жилых, общественных и торговых помещениях, служебно-бытовых помещениях промышленных предприятий, включая сети для бытовых и переносных электроприемников, а также в пожароопасных производственных помещениях;
- всех видов во взрывоопасных наружных установках независимо от условий технологического процесса или режима работы сети.

Все остальные сети не требуют защиты от перегрузки и защищаются только от токов короткого замыкания.

Аппараты, установленные для защиты от коротких замыканий и перегрузки, должны быть выбраны таким образом, чтобы номинальный ток каждого из них $I_{\text{ном з.а.}}$ был не меньше расчетного, рассматриваемого участка сети:

$$I_{\text{ном з.а.}} \geq I_p, \quad (11.12)$$

где I_p – расчетный ток рассматриваемого участка сети, А.

Осуществляется защита осветительных сетей аппаратами защиты – плавкими предохранителями или автоматическими выключателями, которые отключают защищаемую электрическую сеть при ненормальных режимах.

Для защиты осветительных сетей промышленных, общественных, жилых этажных зданий наибольшее распространение получили однополюсные и трехполюсные автоматические выключатели с расцепителями имеющими, обратно зависимую от тока характеристику, у которых с возрастанием тока время отключения уменьшается.

Аппараты защиты, защищающие электрическую сеть от токов КЗ должны обеспечивать отключение аварийного участка с наименьшим временем с соблюдением требований селективности. Для обеспечения селективности защит участков электрической сети номинальные токи аппаратов защиты (ток плавких вставок предохранителей или токи уставок автоматических выключателей) каждого последующего по направлению к источнику питания следует принимать выше не менее чем на две ступени, чем предыдущего, если это не приводит к завышению проводов. Разница не менее чем на одну ступень обязательна при всех случаях.

Номинальные токи уставок автоматических выключателей и плавких вставок предохранителей следует выбирать по возможности наи-

меньшими по расчетным токам защищаемых участков сети, при этом должно соблюдаться соотношение между наибольшими допустимыми токами проводов $I_{\text{п}}$ и номинальными токами аппаратов защиты I_3 по условию.

$$I_{\text{дл.доп}} \geq K_3 \cdot I_3 / K_{\text{п}}, \quad (11.11)$$

где K_3 – кратность защиты (кратность длительно допустимого тока для проводов или кабелей по отношению к току срабатывания защитного аппарата.

$I_3 = I_{\text{НОМ ПЛ.ВСТ.}}$ если линия защищается предохранителями;

$I_3 = I_{\text{НОМ З.А.}}$ если линия защищается автоматическим выключателем.

Устанавливаются аппараты защиты плавкие предохранители и автоматические выключатели в металлических щитках, которые следует устанавливать:

- в местах присоединения сети к источнику питания (распределительные щиты КТП, вводно-распределительные устройства, распределительные пункты, магистральные шинопроводы);
- на вводах в здания;
- в местах уменьшения сечения проводов по направлению к электроприемникам;
- со стороны высшего напряжения понижающих трансформаторов;
- со стороны низшего напряжения понижающих трансформаторов;
- при защите сетей с глухозаземленной нейтралью автоматическими выключателями, то их расцепители должны устанавливаться во всех нормально незаземленных проводах.

Номинальный ток аппаратов защиты (расцепители автоматических выключателей и плавкие вставки предохранителей) для групповых линий внутреннего освещения должен быть не более 25 А, а групповые линии, питающие разрядные лампы мощностью 125 Вт и более. лампы накаливания на напряжение до 42 В любой мощности и лампы накаливания напряжение выше 42 В мощностью 500 Вт и более могут защищаться аппаратами защиты на ток до 63 А.

Задача 11.6. Для сети освещения схема, которой приведена на рисунке 11.6, рассчитать параметры и выбрать автоматические выключатели серии ВА в питающей и групповых линиях.

Рассчитать сечение и выбрать марку кабеля на каждом участке сети по допустимому нагреву. Сечение кабеля согласовать с током расцепителя аппарата защиты. Предполагается электрическую проводку осветительной сети проложить в административно-бытовом помещении предприятия. Коэффициент спроса осветительной нагрузки принять равным 0,8.

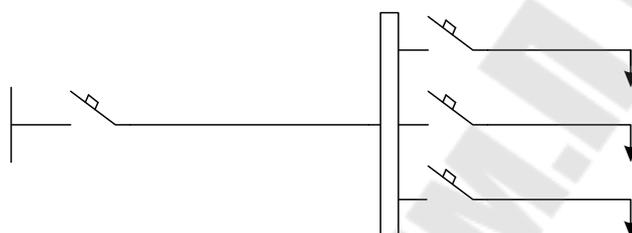


Рис. 10.6. Схема к задаче 11.6

Электрические нагрузки групповых линий представлены в табл. 11.4.

Таблица 11.4

Электрические нагрузки групповых линий освещения

Обозначение на схеме	Тип ламп	Установленная мощность, кВт	Коэффициент мощности, cosφ	Потери в ПРА, k _{ПРА}
P ₁	ЛН	1,0	1,0	-
P ₂	ЛЛ	1,44	0,98	1,05
P ₃	ДРИ	2,5	0,85	1,1

Решение. Рассчитаем ток в каждой групповой линии по формулам:

$$I_p = \frac{P_p}{U_{ном} \cos\varphi}$$

$$I_{p1} = \frac{1,0}{0,23 \cdot 1,0} = 4,3 \text{ А.}$$

Для остальных групп расчет аналогичный. Результаты расчета представлены в табл. 11.4.

Выбор сечения жил кабелей для каждого участка сети производим по условию (11.10).

$$I_{\text{дл доп}} > I_{p1}.$$

Таблица 11.5

Результаты расчета осветительной сети

Номер группы	Расчетная мощность, кВт	Расчетный ток, А	Кол-во и сечение жил, мм ²	Длительный допустимый ток, А	Тип автоматического выключателя	Ток расцепителя, А
1	1,0	4,3	3x1,5	19	ВА51-31-100	10
2	1,51	7,0	3x1,5	19	ВА51-31-100	10
3	2,75	14,7	3x1,5	19	ВА51-31-100	16
Линия ВРУ-ЩО	5,26	13,2	3x2,5	25	ВА51-31-100	20

Ток длительный допустимый $I_{\text{дл.доп}}$ для минимального сечения медных жил кабеля 1,5 мм² определим по [3], который равен 19 А, ток расчетный I_{p1} равен 4,3 А.

Подставим, полученные данные в условие 10.10 получим

$$19A > 4,3A.$$

Условие соблюдается, следовательно, выбираем для первого участка сети освещения кабель с медными жилами сечением 3x1,5мм².

Для остальных групп расчет аналогичный, результаты расчета представлены в табл. 11.5.

Для защиты осветительной сети от коротких замыканий в сети выбираем однополюсный автоматический выключатель по условию (11.10).

$$I_{\text{ном з. а}} \geq I_{p1}.$$

Для защиты сети первой группы подставим значения в условие

$$10A \geq 4,3A.$$

Выбираем автоматический выключатель серии ВА 51-29 63/6,3А с защитной характеристикой «В».

Для остальных групп расчет аналогичный, результаты расчета представлены в табл. 11.5.

Производим выбор аппарата защиты на участке от ИП до ЩО по условию (11.10):

$$16A \geq 13,2A.$$

Выбираем трехполюсный автоматический выключатель серии ВА51-31-100/20 с защитной характеристикой «В» на одну ступень выше, чем требовалось по расчетным параметрам с учетом селективности срабатывания защитных аппаратов

Выбранное сечение жил кабелей следует согласовать с током защитного аппарата по условию

$$I_{\text{дл.доп}} \geq I_{\text{ном а.з.}} \cdot K_3,$$

где K_3 – коэффициент защиты равен 1,0 для кабельных линий проложенных в общественных помещениях

Для групповой линии участка 1:

$$19A \geq 10A.$$

Условие соблюдается длительный допустимый ток жил кабеля – 19А выше тока срабатывания расцепителя автоматического выключателя, который составляет 10А.

Аналогично производим согласование для участка 2 и 3.

Произведем согласование длительного допустимого тока кабеля на участке ИП-ЩО с током защитного аппарата:

$$19A < 20A,$$

выбранный кабель на участке ИП-ЩО не удовлетворяет условию, следовательно необходимо увеличить сечение на одну ступень ($2,5 \text{ мм}^2$) и согласовать с защитным аппаратом.

Кабель сечением жил $2,5 \text{ мм}^2$ имеет ток длительный допустимый – 25 А [3, табл. 1.36].

$$25A \geq 20A.$$

Условие соблюдается, окончательно выбираем кабель с медными жилами на участке ИП-ЩО сечением $5 \times 2,5 \text{ мм}^2$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Елкин В. Д., Елкина Т. В. Электрические аппараты. – Мн.: Дизайн ПРО, 2003. – 168 с.
2. Шеховцов, В. П. Электрическое и электромеханическое оборудование. – М.: Форум-Инфра-М, 2004. – 405 с.
3. Правила устройства электроустановок / М-во топлива и энергетики РФ. – 6-е изд., перераб.и доп. – Москва : Главгосэнергоиздат России, 1998. – 608 с.
4. Электротехнология: учеб. пособие для студентов вузов по специальности «Электрификация сельского хозяйства» / В. А. Карасенко, Е.М. Заяц, А.Н. Баран и др. – Москва: Колос, 1992. – 304 с.
5. Ленивкин В.А. Электротехнические процессы и оборудование: учеб. пособие Стрижаков Е.Л. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2007. – 265 с.
6. Электроснабжение промышленных предприятий : практикум / А. Г. Ус [и др.]. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2015. – 410 с.
7. ПУЭ ТКП 339-2011. Электроустановки на напряжение до 750 кВ -Мн.: Минэнерго, 2011. – 592 с.
8. Электрооборудование промышленных предприятий и установок./ Е.Н. Зимин, В. И. Преображенский, И. И. Чувашов: учебник для техникумов. – М.: Энергоиздат, 1981.
9. Справочник по проектированию электроснабжения / под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
10. Ус А. Г., Евминов Л. И. Электроснабжение промышленных предприятий и гражданских зданий: учеб. пособие. – Мн.: Пион, 2002. – 457 с.
11. Радкевич В.Н. Проектирование систем электроснабжения: Учеб. пособие. – Мн. ПИОН, 2001. – 292 с. : ил.
12. Пижурин А.А. Электрооборудование и электроснабжение лесопромышленных и деревообрабатывающих предприятий: учебник для техникумов. – М.: Лес. пром-сть, 1987.
13. Дойников В. Б. В помощь персоналу, обслуживающему электроустановки: (в вопросах и ответах). – Изд. 3-е Ю стер. – Минск: БО-ИМ, 2005. – 242 с.

Елкин Валерий Дмитриевич

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИЙ**

**Пособие
для слушателей специальности
переподготовки 1-43 01 78 «Диагностика
и техническое обслуживание
энергооборудования организаций»
заочной формы обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 19.02.21.

Рег. № 86Е.

<http://www.gstu.by>