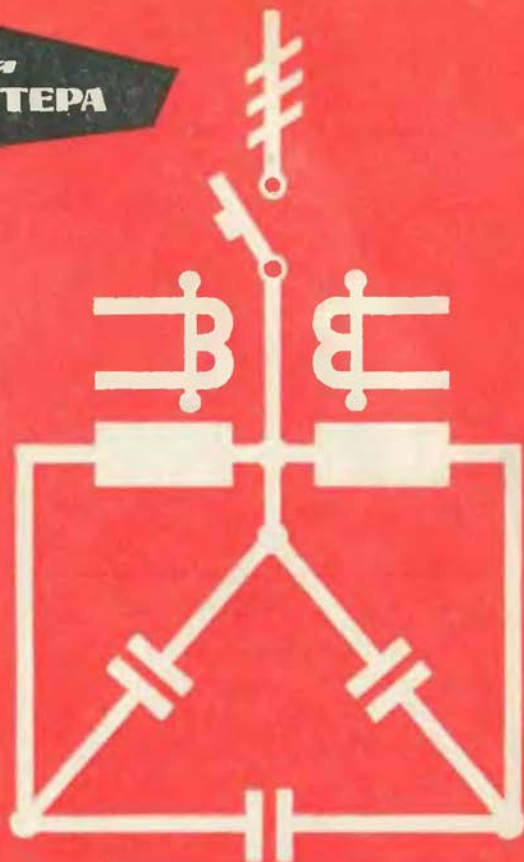


*Библиотека*  
**ЭЛЕКТРОМОНТЕРА**



**В. М. ГЛУШКОВ**

**В. П. ГРИБИН**



**КОМПЕНСАЦИЯ  
РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ  
В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ  
ПРЕДПРИЯТИЙ**

БИБЛИОТЕКА  
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

---

Выпуск 429

В. М. ГЛУШКОВ  
В. П. ГРИБИН

КОМПЕНСАЦИЯ  
РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ  
В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ  
ПРЕДПРИЯТИЙ



«ЭНЕРГИЯ» МОСКВА 1975

6П2.1.081

Г 55

УДК 621.313/316.016.25

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

*Большаков Я. М., Зевакин А. И., Каминский Е. А., Ларионов В. П.,  
Мандрыкин С. А., Мусаэлян Э. С., Розанов С. П., Сильчугов Ф. И.,  
Семенов В. А., Смирнов А. Д., Соколов Б. П., Устинов П. И.*

**Глушков В. М. и Грибин В. П.**

**Г 55** Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий. М., «Энергия», 1975.

104 с. с ил. (Б-ка электромонтера. Вып. 429).

В книге дается представление о реактивной мощности и основных ее потребителях, описаны возможности уменьшения потребления и способы компенсации реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий.

Книга предназначена для электромонтеров промышленных предприятий и может быть полезной электрикам всех отраслей народного хозяйства.

Г  $\frac{30311-595}{051(01)-75}$  107-75

6П2.1.081

© Издательство «Энергия», 1975 г.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Директивы XXIV съезда КПСС поставили перед энергетиками важные задачи по экономии материальных ресурсов, в том числе электрической энергии. Одним из источников потерь электроэнергии является нерациональное потребление реактивной мощности.

Передача больших потоков реактивной мощности по сети от электростанций к местам ее потребления ухудшает использование генераторов электрических станций, трансформаторов на подстанциях, снижает пропускную способность линий электропередачи, увеличивает потери электроэнергии в сетях и электрических машинах, неблагоприятно отражается на уровне напряжения в сетях. В этой книге кратко изложена сущность понятия реактивной мощности, рассказано об основных ее потребителях, описаны возможности уменьшения потребления и способы компенсации реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий.

Предложения и пожелания читателей по улучшению содержания книги просим направлять по адресу: 113114, Москва М-114, Шлюзовая набережная, 10, изд-во «Энергия».

*Авторы*



## ПОНЯТИЕ О РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

## 1-1. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

Электрическая энергия производится, распределяется и потребляется в основном в виде переменного тока. Постоянный ток, имеющий свои преимущества и области применения, получается обычно путем преобразования переменного тока в постоянный.

Повсеместное распространение переменного тока объясняется возможностью трансформации напряжения переменного тока и передачи его на большие расстояния, относительной простотой и надежностью всех устройств.

Как известно, переменным током называют ток, изменяющийся во времени. Значение тока в любой данный момент времени называется мгновенным значением тока  $i$ . Токи, значения которых повторяются через равные промежутки времени в той же самой последовательности, называются периодическими. Наименьший промежуток времени, через который эти повторения тока наблюдаются, называется периодом  $T$ . Величина, обратная периоду, называется частотой  $f$ . Численно она равна числу периодов в единицу времени  $f=1/T$ . Единица частоты называется герц. Частота переменного тока равна 1 Гц, если период равен 1 с.

Применяемый в электротехнике переменный ток изменяется по закону синуса. Мгновенное значение синусоидального тока определяется выражением

$$i = I_m \sin \left( \frac{2\pi}{T} t + \varphi \right),$$

где  $\frac{2\pi}{T} t + \varphi$  — аргумент синуса, определяющий стадию или фазу гармонического изменения тока, он называется фазным углом или просто фазой;  $I_m$  — амплитудное

(максимальное) значение тока;  $\varphi$  — значение фазного угла в начальный момент времени.

Величина  $2\pi/T$  измеряет скорость изменения фазного угла и обозначается буквой  $\omega$ . Так как  $f=1/T$ , то  $\omega=2\pi/T=2\pi f$ , что и послужило основанием называть  $\omega$  угловой частотой. Измеряется  $\omega$  числом радианов, на которое увеличивается фазный угол в секунду (рад/с).

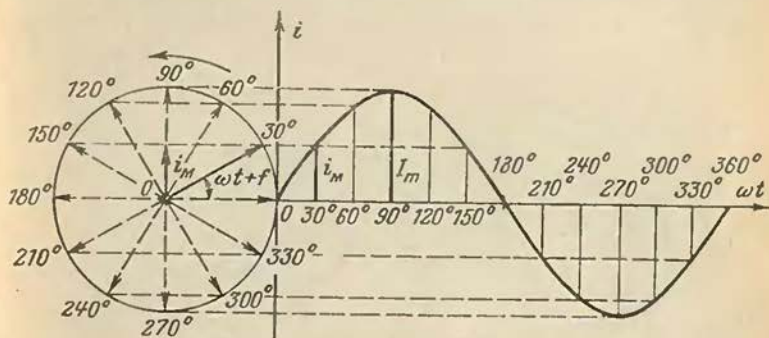


Рис. 1. Кривая и векторная диаграмма однофазного переменного тока.

Так как тепловое действие тока и механическая сила взаимодействия пропорциональны квадрату тока, введено понятие о среднем квадратичном значении тока за период, которое называется действующим значением переменного тока (рис. 2). Действующее значение численно равно такому постоянному току, который за промежуток времени, равный одному периоду, выделяет в сопротивлении такое же количество тепла, как и ток переменный.

Действующее значение тока равно:

$$I = I_m / \sqrt{2} = 0,707 I_m.$$

Электроизмерительные приборы показывают действующие значения токов.

Для удобства расчета цепей переменного тока принято изображать величины, синусоидально изменяющие-

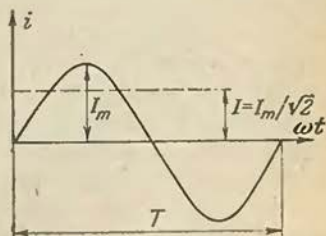


Рис. 2. Определение действующих значений однофазного переменного тока.

ся во времени, векторами, длина которых в произвольно выбранном масштабе равна амплитуде (или действующему значению), которые располагаются под углом  $\varphi$  относительно горизонтальной оси в прямоугольной системе координат (положительные углы откладываются против, отрицательные — по часовой стрелке). Если вектор, начиная с момента  $t=0$ , вращается вокруг точки 0 с постоянной угловой скоростью, равной угловой частоте  $\omega$ , то через время  $t$  вектор составит с горизон-

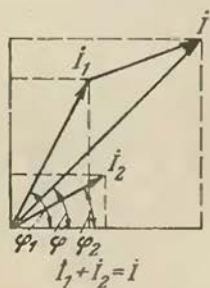


Рис. 3. Сложение векторов.

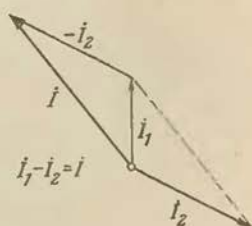


Рис. 4. Вычитание векторов.

тальной осью угол  $\omega t + \varphi$  и его проекция на вертикальную ось будет равна в выбранном масштабе мгновенному значению рассматриваемой величины. Поэтому проекции вектора изображают изменение данной электрической величины во времени (векторов напряжения, э. д. с., тока, магнитного потока).

При расчетах удобно производить геометрическое сложение и вычитание векторов. На рис. 3 представлено геометрическое сложение двух векторов переменного тока, на рис. 4 — вычитание векторов. На рис. 5 представлена векторная диаграмма трехфазного тока. Для расчетов важно взаимное расположение векторов ( $\varphi_1$  —  $\varphi_2$ ) и то, что они изображаются неподвижными, для произвольно взятого момента времени, не влияет на результат расчета.

**Электромагнитное поле.** Вокруг проводника, по которому проходит электрический ток, образуется электромагнитное поле. Влияние этого поля на другие проводники, находящиеся в нем, проявляется на значительных расстояниях от источника (например, помехи в линиях связи, проходящих вблизи от воздушных линий электропе-



редачи). Электрическое и магнитное поля всегда связаны между собой, но в электротехнике в зависимости от поставленной задачи эти составляющие электромагнитного поля могут рассматриваться отдельно.

Присутствие магнитного поля обнаруживается стрелкой магнитного компаса, которая, будучи внесена в магнитное поле, испытывает действие механических сил, устанавливающих ее в определенное положение, причем северный конец стрелки покажет направление магнитно-

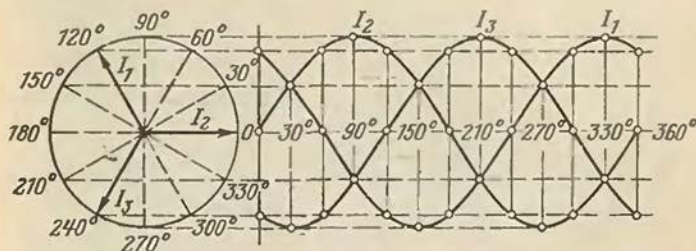


Рис. 5. Кривые и векторная диаграмма трехфазного переменного тока.

го поля. Магнитное поле связано с движением электрически заряженных частиц или тел. Проводник с током, помещенный в магнитное поле, испытывает действие электромагнитной силы, определяемой интенсивностью магнитного поля; эта сила называется магнитной индукцией  $B$ . Единица магнитной индукции численно равна электромагнитной силе, действующей на провод длиной 1 м, расположенный перпендикулярно направлению поля, при токе 1 А, и называется тесла ( $T$ ). Более мелкой единицей магнитной индукции является гаусс ( $Gc$ ), тесла равна 10 000 гауссам. Магнитный поток с магнитной индукцией, равной 1 Т, проходящей через 1 м<sup>2</sup> площади, равен веберу ( $Вб$ ). Более мелкой единицей магнитного потока является максвелл ( $Мкс$ ), причем 1  $Вб = 100\,000\,000$   $Мкс$ .

Напряженностью магнитного поля ( $H$ ) называется отношение магнитной индукции  $B$  к постоянному коэффициенту, называемому абсолютной магнитной проницаемостью:

$$H = B / \mu_a.$$

Абсолютная магнитная проницаемость равна:

$$\mu_a = \mu_0 \mu, \quad Г/м,$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная, Г/м (ом · с/м):

$$\mu_0 = 126 \cdot 10^{-8}.$$

Магнитная проницаемость материала  $\mu$  — величина, не имеющая размерности.

Магнитная проницаемость воздуха и большинства других материалов, кроме ферромагнитных, близка к единице ( $\mu \approx 1$ ). Ферромагнитные материалы, из ко-

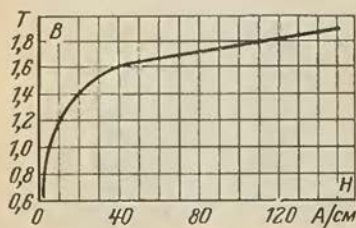


Рис. 6. Кривая намагничивания электротехнической стали.

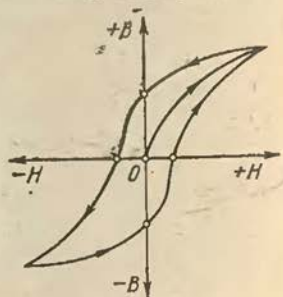


Рис. 7. Петля гистерезиса.

торых изготовлены магнитопроводы (мягкая сталь, листовая электротехническая сталь и др.), имеют высокую магнитную проницаемость  $\mu = 2200 \div 7500$  и более. Однако магнитная проницаемость ферромагнитных материалов непостоянна и зависит от напряженности поля. На рис. 6 показана кривая намагничивания стали, из которой видно, что при увеличении напряженности магнитного поля вначале магнитная индукция  $B$  быстро растет, почти пропорционально напряженности, затем рост магнитной индукции замедляется вследствие магнитного насыщения. При переменном токе в магнитопроводах происходит периодическое перемагничивание. При размагничивании сердечника каждый раз магнитная индукция не уменьшается до нуля, т. е. имеет место остаточный магнетизм. Величина магнитной индукции в течение одного периода изменяется по кривой, показанной на рис. 7 (так называемая петля гистерезиса). Магнитный гистерезис вызывает нагрев стали и потери электроэнергии на перемагничивание. Площадь петли гистерезиса пропорциональна затраченной электроэнергии. Для различных ферромагнитных материалов площади петли гистерезиса различны и характеризуют свойства этих материалов.



При прохождении тока по проводнику, например по виткам катушки, весь контур пронизывается собственным магнитным потоком, который называется потоком самоиндукции  $\Phi_L$ .

Отношение магнитного потока самоиндукции  $\Phi_L$  к току  $I$  при постоянной магнитной проницаемости называется индуктивностью  $L$ .

Индуктивность  $L$  измеряется в генри, Г. Более мелкая единица индуктивности — миллигенри ( $\Gamma = 1000$  мГ), или микрогенри,  $\Gamma = 1\,000\,000$  мкГ.

Вторая составляющая электромагнитного поля — электрическое поле — обнаруживает себя воздействием на электрические заряды, помещенные в этом поле, с определенной по величине и направлению силой. Силовые линии электрического поля проводника с током, как и магнитные силовые линии, располагаются концентрически вокруг проводника.

Интенсивность электрического поля характеризуется его напряженностью  $E$ , которая определяется как отношение силы  $F$  к величине заряда  $q$ , помещенного в электрическое поле проводника:

$$E = F/q.$$

Сила измеряется в ньютонах (Н), заряд в кулонах (Кл).

Физические тела обладают свойством накапливать и удерживать заряды — обладают емкостью. Электрическая емкость  $C$  определяется отношением электрического заряда  $q$  тела к приложенному напряжению:

$$C = q/U.$$

Емкость измеряется в фарадах (Ф). Фарада — это емкость тела, которое заряжается 1 кулоном электричества при напряжении 1 вольт. Более мелкая единица — микрофарада ( $\Phi = 1\,000\,000$  мкФ).

## 1-2. АКТИВНЫЕ, РЕАКТИВНЫЕ И ПОЛНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ, ТОКИ И МОЩНОСТИ

Наличие переменного электромагнитного поля у проводников при прохождении переменного тока создает дополнительные сопротивления по сравнению с постоянным током, когда в цепях имеются только активные сопротивления. Эти дополнительные сопротивления на-

зываются реактивными, они обусловлены индуктивностью и емкостью проводников. При наличии в цепи только индуктивности закон Ома имеет вид:

$$I = U/x_L,$$

где  $x_L$  — индуктивное сопротивление цепи,  $x_L = 2\pi fL = \omega L$ ;  $L$  — индуктивность, измеряемая в генри.

Если в цепи имеется только емкость, закон Ома принимает вид:

$$I = U/x_C,$$

где  $x_C$  — емкостное сопротивление цепи, равное:

$$x_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{\omega C},$$

$C$  — емкость, измеряемая в фарадах (Ф).

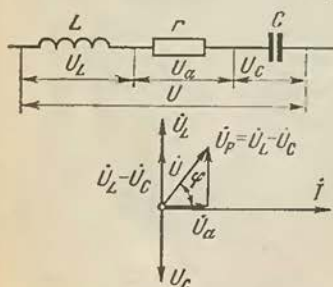


Рис. 8. Векторная диаграмма и схема цепи с последовательно включенными активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями.

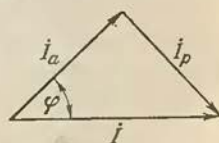


Рис. 9. Векторная диаграмма токов в цепи, обладающей активным и реактивным сопротивлениями.

Из приведенных формул следует, что индуктивное и емкостное сопротивления цепи зависят от частоты переменного тока. С увеличением частоты индуктивное сопротивление увеличивается, а емкостное — уменьшается. В реальной сети имеются активные, индуктивные и емкостные сопротивления. Для такой цепи (рис. 8) закон Ома принимает вид (для последовательного соединения активного, индуктивного и емкостного сопротивлений):

$$I = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}},$$

где  $z$  — полное сопротивление;  $r$  — активное сопротивление;  $(x_L - x_C)$  — реактивное сопротивление.

Из рассмотрения последнего выражения  $x_L - x_C$  следует, что индуктивность и емкость взаимно компенсируют друг друга. На рис. 9 представлена векторная диаграм-

ма (треугольник) токов в цепи, обладающей активным и реактивным сопротивлением. Ток  $I$  в цепи можно представить в виде двух составляющих: активной составляющей тока  $I_a$ , обусловленной активным сопротивлением, и реактивной составляющей тока  $I_p$ , обусловленной реактивным сопротивлением. При этом:

$$I_a = I \cos \varphi; \quad I_p = I \sin \varphi.$$

Поскольку реактивное сопротивление ( $x_L - x_C$ ) нами принято индуктивным, т. е.  $x_L > x_C$ , напряжение, прило-

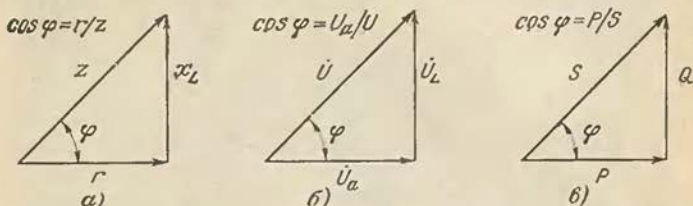


Рис. 10. Треугольники сопротивлений (а), напряжений (б) и мощностей (в).

женное к цепи, должно уравновесить активную составляющую  $U_a$  напряжения и реактивную составляющую  $U_p$ . Как показано на рис. 10, можно также построить треугольники напряжений и сопротивлений.

Мгновенное значение мощности в цепи переменного тока определяется по выражению

$$p = ui = UI \cos \varphi - UI \cos (2\omega t - \varphi),$$

где  $\varphi$  — угол сдвига фаз между  $U$  и  $I$ ;  $u$ ,  $i$  — мгновенные значения напряжения на зажимах цепи и тока в ней.

Мощность имеет постоянную составляющую  $UI \cos \varphi$  и синусоидальную, угловая частота которой в 2 раза больше угловой частоты тока. В течение каждого периода имеются промежутки времени, когда  $u$  и  $i$  имеют различное направление, и тогда мощность отрицательна, т. е. в эти промежутки времени энергия поступает не в цепь, а возвращается из цепи источнику питания. Такой возврат энергии возможен за счет того, что она запасается в магнитном и электрическом полях элементов схемы.

Активная мощность, или среднее значение мощности за период (постоянная составляющая мощности),

$$P = UI \cos \varphi.$$



Электрические машины, аппараты и установки характеризуют также полной их мощностью  $S$ , представляющей собой произведение действующих значений напряжения и тока. Эта мощность соответствует наибольшему значению активной мощности, которую можно получить при заданных напряжении и токе при  $\cos \varphi = 1$ . Мощности  $S$  и  $P$  имеют одинаковую размерность, однако единица измерения мощности  $P$  ватт (киловатт) в применении к мощности  $S$  обозначается вольт-ампер (киловольт-ампер), или сокращенно В·А (кВ·А).

Отношение активной мощности к полной называется коэффициентом мощности:

$$\frac{P}{S} = \frac{UI \cos \varphi}{UI} = \cos \varphi.$$

При расчетах электрических цепей находят применение величины

$$Q = UI \sin \varphi,$$

носящая название реактивной мощности. Она положительна при  $\varphi > 0$  и отрицательна при  $\varphi < 0$ . Единица мощности ватт (киловатт) в применении к измерению реактивной мощности получила название вар (квар).

Активная, реактивная и полная мощности связаны между собой соотношением

$$S^2 = P^2 + Q^2.$$

Графически соотношение активной, реактивной и полной мощностей показано в виде треугольника мощностей на рис. 10, в.

Величину реактивной мощности можно представить в виде

$$Q = S \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2}.$$

Например, при  $\cos \varphi = 0,8$  реактивная мощность составит  $S \sqrt{1 - 0,64} = 0,6S$ .

Величину реактивной мощности можно вычислить, зная  $\cos \varphi$  и величину активной мощности:

$$Q = P \sqrt{\frac{1}{(\cos \varphi)^2} - 1}.$$

Так, если  $\cos \varphi = 0,8$ , то  $Q = P \sqrt{\frac{1}{0,64} - 1} =$   
 $= P \sqrt{1,56 - 1} = 0,75P.$

Величину реактивной мощности, если известен  $\cos \varphi$ , находят также из выражения

$$Q = P \operatorname{tg} \varphi.$$

Данные для определения  $\operatorname{tg} \varphi$  по известному  $\cos \varphi$  приводятся в табл. I.

Таблица I

$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$
1	0	0,75	0,881	0,5	1,732	0,25	3,873
0,95	0,33	0,7	1,021	0,45	1,984	0,2	4,90
0,9	0,484	0,65	1,169	0,4	2,291	0,15	6,59
0,85	0,619	0,6	1,333	0,35	2,676	0,1	9,95
0,8	0,750	0,55	1,518	0,3	3,179	0,05	20,0

Реактивная мощность в основном соизмерима по величине с активной мощностью. При  $\cos \varphi = 0,7$  величина  $\operatorname{tg} \varphi$  равна единице (1,021), т. е. реактивная мощность приблизительно равна активной, при  $\cos \varphi$  меньше 0,7 ре-

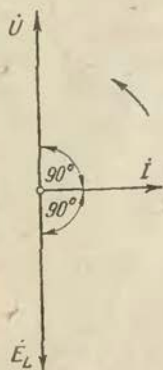


Рис. 11. Векторная диаграмма цепи с индуктивностью.

$E_L$  — э. д. с. самоиндукции.

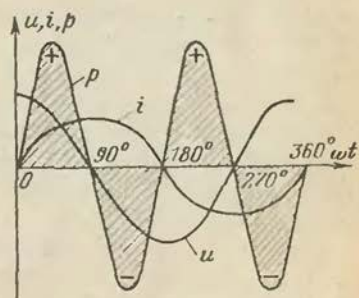


Рис. 12. Кривые тока, напряжения и мощности в цепи с индуктивностью.

активная мощность больше активной. Величина  $\operatorname{tg} \varphi$  называется коэффициентом реактивной мощности. Он характеризует соотношение активной и реактивной нагрузок в любой сети.



На рис. 11 приведена векторная диаграмма цепи при наличии в ней только индуктивности. Вектор тока отстает от вектора напряжения на  $90^\circ$ , или  $\pi/2$ , при этом мощность переменного тока будет изменяться с двойной частотой, как следует из рассмотрения рис. 12. Заштрихованные площади представляют собой энергию, которая за первую четверть периода будет передаваться из

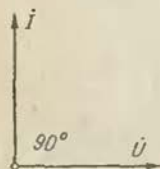


Рис. 13. Векторная диаграмма тока и напряжения в цепи с емкостью.

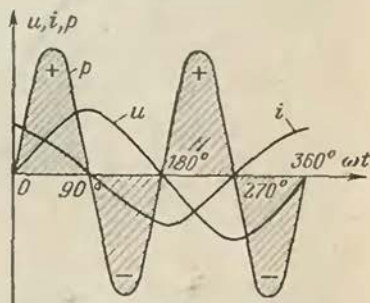


Рис. 14. Кривые тока, напряжения и мощности в цепи с емкостью.

сети в катушку индуктивности, запасаясь в магнитном поле индуктивности, а за вторую четверть периода — обратно передаваться в сеть; таким образом, будет происходить только обмен энергией между индуктивностью и сетью. Среднее значение мощности, поступающей в индуктивность за половину периода равно нулю.

В цепи, имеющей только емкость, вектор тока опережает вектор напряжения на  $90^\circ$ , или  $\pi/2$ , как показано на рис. 13. В этом случае, как следует из рис. 14, с двойной частотой будет происходить обмен энергией между емкостью и сетью.

На рис. 15 приведены кривые напряжения и мощности при наличии в цепи последовательного включения индуктивного и емкостного сопротивлений. Мощность, запасенная в течение одной четверти периода в индуктивности, частично генерируется емкостью; во второй четверти периода происходит обратное явление. В свою очередь между сетью, индуктивностью и емкостью имеет место непрерывный обмен энергией. В приведенных примерах мы видим проявление действия «реактивной» мощности.

Понятия «активной» и «реактивной» энергии, применяемые в электротехнике, условны так как в действитель-

ности можно говорить об одной электрической энергии. При наличии в электрической сети только активного сопротивления потребляемая мощность будет меняться каждый полупериод от нуля до максимальной величины

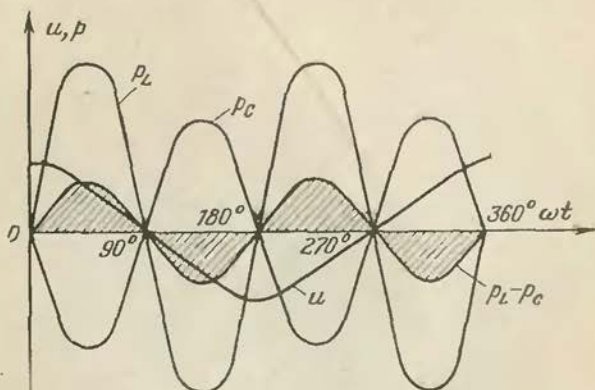


Рис. 15. Кривые напряжения и мощностей при наличии в цепи последовательно включенных индуктивного и емкостного сопротивлений.

и снова до нуля (рис. 16), но при этом она будет оставаться положительной. Таким образом, в данном случае потребление мощности всегда сопровождается потреблением энергии.

Средняя мощность, потребляемая в активном сопротивлении за период, не равна нулю, тогда как средняя мощность, потребляемая в индуктивности или в емкости, как было показано выше, равна нулю, поэтому под активной энергией понимается энергия, потребляемая активным сопротивлением сети.

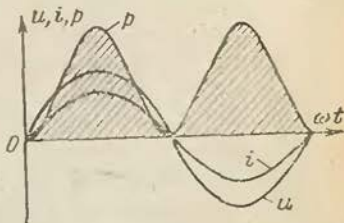


Рис. 16. Кривые напряжения, тока и активной мощности при наличии в цепи однофазного тока чисто активного сопротивления.

Активная энергия, или просто электрическая энергия,  $W_a$  представляет собой произведение средней активной мощности  $P$  за время  $t$  на величину  $t$ :

$$W_a = Pt.$$

Для трехфазной сети, как это видно из представленной на рис. 17 диаграммы, средняя активная мощность всех трех фаз с течением времени будет оставаться неизменной и потребляемая электрическая энергия будет равна произведению активной мощности  $P$  на время  $t$ . Понятие реактивная энергия введено по аналогии с актив-

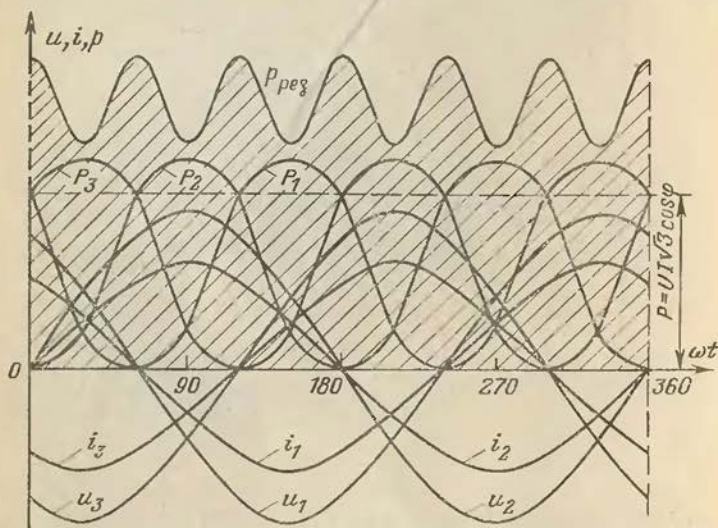


Рис. 17. Кривые напряжений, токов и активных мощностей при наличии в цепи трехфазного тока чисто активных сопротивлений.

ной, и, хотя реактивная энергия за полупериод или за целый период равна нулю, это понятие используется для целей учета, расчетов и составления балансов.

Для учета активной и реактивной энергии используются счетчики активной и реактивной энергии.

Из сказанного выше ясно, что счетчик активной энергии в действительности измеряет электрическую энергию  $Pt$ , счетчик же реактивной энергии измеряет величину произведения реактивной мощности  $Q$  на время  $t$ .

Показания реактивных счетчиков используются для расчета средней величины реактивной мощности за некоторый промежуток времени (например, для построения суточных графиков потребления реактивной мощности) и результат измерения этих счетчиков

$$W_p = Qt$$



условно принято обозначать термином реактивная энергия. Коэффициент мощности характеризует использование установленной мощности потребителя. Например, при полной нагрузке током потребителя активная мощность, переданная ему при  $\cos \varphi = 0,8$ , будет составлять 80% мощности, которая могла бы быть ему передана при том же токе и  $\cos \varphi = 1$ . Степень использования установленной мощности зависит от величины потребляемой электрическим приемником реактивной мощности.

Выше было указано отличие реактивной мощности от активной. В то же время у них много общего и по отношению к реактивной мощности применяются те же понятия, что и для активной мощности: генерация, потребление, передача, потери, компенсация, баланс, резерв, дефицит. Они используются для выяснения условий работы, планирования и регулирования деятельности электрических станций и сетей. Рассмотрим эти понятия в применении к реактивной и активной мощности.

Активная мощность генерируется только генераторами электрических станций.

Реактивная мощность генерируется наряду с активной генераторами электрических станций, а также дополнительными источниками: емкостью воздушных и кабельных линий, синхронными двигателями, синхронными компенсаторами, батареями конденсаторов, вентильными компенсаторами.

Потребителями реактивной как и активной мощности являются все без исключения электроприемники переменного тока. Однако часть электроприемников потребляет незначительную реактивную мощность, например печи сопротивления, лампы накаливания. На промышленных предприятиях основными потребителями реактивной мощности являются электроприводы машин и механизмов, в первую очередь асинхронные двигатели, трансформаторы, дуговые электропечи, индукционные установки, электросварочное оборудование, преобразовательные устройства, электроосветительные установки с газоразрядными лампами. В энергосистемах в потребление реактивной и активной мощности включается расход на собственные нужды электрических станций.

Потребление активной и реактивной мощности всегда сопровождается потерями. В масштабе, например, энергосистемы потерями считаются реактивные и активные мощности, расходуемые в элементах и электрообору-

довании электрической сети энергосистемы: воздушных и кабельных линиях, силовых трансформаторах, реакторах, дросселях и другом оборудовании повышающих, понижающих и преобразовательных подстанций. Потери в сетях потребителей, в том числе в сетях промышленных предприятий, энергосистемами включаются в их потребление.

Заметим существенную разницу в соотношении потребления и потерь активной и реактивной мощности. Основная часть активной мощности потребляется электроприемниками и лишь незначительная теряется в элементах сети и электрооборудовании. Реактивная мощность в элементах сети и электрооборудовании обычно соизмерима по величине с активной мощностью, потребляемой электроприемниками.

Потребление активной мощности всегда сопровождается потреблением электрической энергии, которая по закону сохранения энергии преобразуется в другие виды энергии: в механическую — в электроприводах рабочих машин; в тепловую — в электротермических установках, таких как печи сопротивления, дуговые печи, электросварочные процессы, и в виде тепловых потерь в проводах, обмотках электрических машин, магнитопроводах и т. п.; в химическую — при гальванических процессах, электролизе и т. п.; в световую и тепловую — в лампах накаливания и газоразрядных лампах. Некоторая доля электрической энергии рассеивается в пространстве в виде электромагнитных волн, в том числе теплового, радио, светового и других диапазонов.

### **1.3. БАЛАНС АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ**

При проектировании для любого узла электрической сети и для энергосистемы в целом должен составляться баланс активных и реактивных мощностей с тем, чтобы их потребление, включая потери в сети, было бы обеспечено генерацией активной и реактивной мощностей на электростанциях системы, передачей из соседних энергосистем и другими источниками реактивной мощности. При этом должен быть обеспечен резерв на случай работы в условиях послеаварийного режима.

В баланс реактивной мощности по промышленному предприятию обычно входит: в расходную часть — потребление реактивной мощности всеми электроприемни-



Таблица 2

2

Элемент системы	Потребность				Покрытие					Баланс
	Собственные нужды	Нагрузка	Потери в трансформаторах станций и подстанций	Рсего	Установленная мощность станции	Резерв мощности	Рабочая мощность	Компенсационные устройства	Рсего	
Электростанции:										
ГРЭС № 1	110	110	0	220	1500	150	1350	—	1350	+1130
	82	68	180	330	925	93	832	—	832	+502
ГРЭС № 2	70	250	0	320	1040	300	740	—	740	+420
	52	155	120	327	680	195	485	—	485	+158
ГРЭС № 3	25	290	0	315	280	—	280	—	280	-35
	19	180	70	268	196	—	196	—	196	-73
ТЭЦ № 1	15	110	0	125	135	—	135	—	135	+10
	11	68	23	102	110	—	110	—	110	+8
Подстанции 220 кВ:										
№ 1	15	385	0	400	140	—	140	—	140	-260
	11	240	46	297	105	—	105	—	105	-192
№ 2	—	190	0	190	—	—	—	0	0	-190
	—	120	21	141	—	—	—	50	50	-91
№ 3	—	205	0	205	—	—	—	—	—	-205
	—	125	26	151	—	—	—	—	—	-151

19

Элемент системы	Потребность				Покрытие					Баланс
	Собственные нужды	Нагрузка	Потери в трансформаторах станций и подстанций	Всего	Установленная мощность станций	Резерв мощности	Рабочая мощность	Компенсационные устройства	Всего	
№ 4	—	150	0	150	—	—	—	—	—	—150
		95	24	119						—119
№ 5	15 11	210	0	225	128	—	128	—	128	—97
		130	19	160	115		115		—45	
№ 6	15 11	145	0	160	132	—	132	—	132	—28
		90	7	108	100		100		—8	
№ 7	10 8	300	0	310	94	—	94	—	94	—216
		186	34	228	65		65		—163	
№ 8	—	100	—	100	—	—	—	0	0	—100
		62	—	73				50	50	—23
№ 9	—	20	0	20	—	—	—	—	—	—20
		12	4	16						—
Итого по энергосистеме	275 207	2465	0	2740	3449	450	2999	0	2999	+259
		1531	585	2321	2296	288	2008	100	2108	—213

Примечания: 1. В числителе приведены значения активной мощности, МЗг, в знаменателе — реактивной, Мвар.  
2. В графе „Баланс“ дефицит со знаком —, избыток со знаком +.

кам, потери в сети и электрооборудовании подстанций, в приходную часть — поступление реактивной мощности от энергосистемы, реактивная мощность, генерируемая синхронными двигателями и батареями конденсаторов. На крупных предприятиях в баланс могут входить генерация реактивной и активной мощности собственной электростанции, ее потребление на собственные нужды и потери.

Пример составления баланса активной и реактивной мощности приведен в табл. 2. Баланс составлен как перспективный на предстоящий год для одной энергосистемы.

В балансе энергосистемы указаны отдельно наиболее крупные электростанции и подстанции 220 кВ, остальные электростанции включены в балансы подстанций 220 кВ, в сети которых они работают. Баланс энергосистемы сведен с дефицитом реактивной мощности при наличии излишка активной мощности. Энергосистема входит в состав объединенной энергосистемы, в балансе которой учитываются дефициты и излишки мощностей отдельных энергосистем.

#### 1-4. ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ РАСПРЕДЕЛЕНИИ И ПОТРЕБЛЕНИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Передача и потребление реактивной мощности сопровождается потерями активной мощности. Активные потери мощности в сети трехфазного переменного тока равны, кВт:

$$\Delta P = 3I^2 r 10^3,$$

т. е. зависят от квадрата тока нагрузки, поэтому для уменьшения потерь важно снизить величину полного тока. Полный ток  $I = I_a / \cos \varphi$  увеличивается при уменьшении коэффициента мощности, причем  $I^2 = I_a^2 / \cos^2 \varphi$ , т. е. потери обратно пропорциональны квадрату коэффициента мощности.

В табл. 3 приведены данные активных потерь при различных значениях  $\cos \varphi$ . Принято, что полная мощность остается неизменной, равной 100%, а активные потери при  $\cos \varphi = 1$  составляют 10%.

С уменьшением  $\cos \varphi$  резко увеличивается величина реактивной мощности, при  $\cos \varphi = 0,1$  реактивная мощность в 10 раз больше активной. При принятом уровне потерь, при  $\cos \varphi = 0,1$  вся активная мощность расходу-

Таблица 3

cos φ	Мощность, % S			
	активная P	реактивная Q	потери активных	полезная активная
1	100	0	10	90
0,9	90	43,6	11,1	80
0,8	80	60	12,5	70
0,7	70	71,4	14,3	60
0,6	60	80	16,7	50
0,5	50	86,6	20	40
0,4	40	91,7	25	30
0,3	30	95,4	33,3	20
0,2	20	98	50	10
0,1	10	99,5	100	0

ется на покрытие потерь мощности в сети, т. е. на холостой ход сети.

Как следует из табл. 3, низкое значение  $\cos \varphi$  не экономично: при  $\cos \varphi = 0,9$  полезная активная мощность при принятом уровне потерь составляет всего 80% полной мощности и быстро уменьшается при уменьшении  $\cos \varphi$ .

Таблица 4

cos φ	Мощность, % P		Активные потери, %		Полезная активная мощность P-ΔP, % P
	реактивная Q	полная S	от S	от P	
1	0	100	10	10	90
0,9	43,4	111,1	11,1	12,3	87,7
0,8	75	125	12,5	15,6	84,4
0,7	102,1	142,9	14,3	20,4	79,6
0,6	133,3	166,7	16,7	27,8	72,2
0,5	173,2	200	20	40	60
0,4	229,1	250	25	62,5	37,5
0,316	299	316	31,6	100	0

Рассмотрим второй пример. Принято, что передается неизменная активная мощность, а потери активной мощности при  $\cos \varphi = 1$  равны 10% (табл. 4).

Из данного примера видно, что потери в сети быстро растут с понижением  $\cos \varphi$ . При  $\cos \varphi = 0,5$  они достигают 40%, а при  $\cos \varphi = 0,316$  вся активная мощность расхо-



дуются на потери. При этом величина реактивной мощности в 3 раза превышает активную.

#### 1-5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ $\cos \varphi$

Экономическое значение активных потерь электроэнергии при передаче и потреблении реактивной мощности в народном хозяйстве рассмотрим на следующем примере.

Примем средневзвешенный  $\cos \varphi$  в целом по промышленности страны равным 0,92, потери в сетях энергосистем и промышленных потребителей равными 20%, потребление электроэнергии всей промышленностью страны равными 520 млрд. кВт·ч в год [Л. 4]. Потери электроэнергии в сетях составят, кВт·ч/год:

$$\Delta W = 520 \cdot 0,2 = 104 \cdot 10^9.$$

Представим себе, что  $\cos \varphi$  повышен на 0,01, тогда потери электроэнергии уменьшаются до величины, кВт·ч/год,

$$\Delta W = 104 \cdot \frac{0,92^2}{0,93^2} = 101,8 \cdot 10^9.$$

Можно ориентировочно считать, что повышение  $\cos \varphi$  на 0,01 в масштабе всей промышленности приводит к экономии свыше 2 млрд. кВт·ч электроэнергии.

Этим не исчерпывается экономическое значение повышения коэффициента мощности. При повышении  $\cos \varphi$  на 0,01 высвобождаются мощности генераторов на электростанциях, превышающие 0,3 млн. кВт·А. Если учесть, что для производства 2,2 млрд. кВт·ч электроэнергии нужно иметь свыше 0,7 млн. т условного топлива, которое необходимо добыть из недр земли, затратить большой труд на добычу топлива и выработку электроэнергии, можно представить всю экономическую выгоду получаемую народным хозяйством от уменьшения потребления реактивной мощности.

Приведенный пример весьма условен и цифры взяты ориентировочные для среднего по промышленности за год значения  $\cos \varphi$ . В действительности  $\cos \varphi$  имеет самые различные значения на разных участках сети в пределах одного предприятия и резко меняется в течение суток. Поэтому реальные потери от пониженного значения  $\cos \varphi$  значительно выше, чем дает расчет по среднему  $\cos \varphi$ .

Повышенное потребление реактивной энергии при низких значениях  $\cos \varphi$  вызывает необходимость увели-



чения сечений проводов и кабелей в электрических сетях для уменьшения потерь. Вызываемый этим перерасход цветных металлов — меди и алюминия — выше 50% при  $\cos \varphi \leq 0,7$ .

Низкий  $\cos \varphi$  приводит к излишней нагрузке передачей реактивной мощности понижающих подстанций на промышленных предприятиях, поэтому приходится увеличивать мощность трансформаторов или их число. Повышенная нагрузка сетей реактивным током вызывает понижение напряжения, а резкие колебания значения реактивной мощности — колебания напряжения в сети.

Выше было указано, что потребителями реактивной мощности являются приемники электроэнергии, обладающие индуктивностью. Все элементы сети имеют индуктивность, а также емкость, причем соотношение между ними различно. Здесь рассматриваются только основные потребители реактивной мощности.

Потери реактивной мощности, имеющиеся во внутренних сетях промышленных предприятий, в воздушных и кабельных линиях, не рассматриваются, так как они имеют второстепенное значение, если учитывать относительно небольшую протяженность этих сетей, а также то, что эти линии обладают емкостью, частично компенсирующей их индуктивность.

## ГЛАВА 2

### ОСНОВНЫЕ ПОТРЕБИТЕЛИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

#### 2-1. СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ И РЕАКТОРЫ

Силовые трансформаторы являются вторыми по величине потребителями реактивной мощности — их доля в потреблении составляет 20—25%.

Трансформаторы — это электромагнитные аппараты, предназначенные для преобразования (трансформации) переменного тока одного напряжения в другое. Основные части трансформатора: магнитопровод, обмотки, бак с маслом, если трансформатор масляный, выводные изоляторы.

По конструкции магнитопроводов трансформаторы разделяются на броневые и стержневые. У броневых трансформаторов коэффициент электромагнитной связи несколько выше, чем у стержневых, однако их изготов-

ление представляет большие трудности и, кроме того, осмотр и ремонт обмоток бронзового трансформатора менее доступны, чем стержневого, поэтому силовые трансформаторы выпускаются в основном с магнитопроводами стержневого типа. В трансформаторостроении все более широкое применение находит холоднокатаная электротехническая сталь, которая обладает лучшими электромагнитными свойствами. В частности, применение для магнитопроводов холоднокатаной стали марки Э330А в трансформаторах на напряжение 10 кВ позволило снизить активные потери в стали в среднем на 35%. По ГОСТ потери в стали должны находиться в пределах 0,9—1,1 Вт/кг при индукции 1,5 Т и частоте 50 Гц.

Обмотки силовых трансформаторов изготавливаются из медного или алюминиевого провода круглого или прямоугольного сечения. Магнитопровод с размещенными на нем обмотками помещают в металлический защитный кожух (бак), заполненный трансформаторным маслом. Концы обмоток выводят через проходные изоляторы, размещенные на крышке бака. Трансформаторное масло выполняет роль изолятора между витками обмоток, а также между обмотками и металлическими конструкциями трансформаторов и, обладая высокой теплопроводностью, служит также для целей охлаждения обмоток, отнимая от них тепло и передавая его металлическому баку. В целях интенсивности охлаждения масла в мощных трансформаторах используется принудительная циркуляция масла через змеевик, охлаждаемый проточной водой.

Действие трансформатора основано на явлении взаимной индукции. Устройство однофазного двухобмоточного трансформатора изображено схематически на рис. 18.

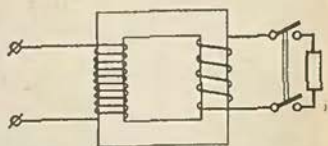


Рис. 18. Однофазный трансформатор.

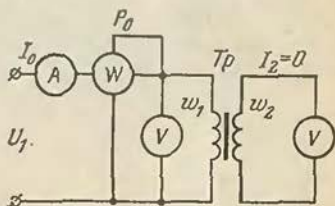


Рис. 19. Схема опыта холостого хода трансформатора.

$Tr$  — трансформатор;  $V$  — вольтметр;  $W$  — ваттметр;  $A$  — амперметр.

Реактивная мощность холостого хода определяется из опыта х. х. трансформатора. Холостой ход — это такой режим работы трансформатора, при котором первичная обмотка подключена к источнику энергии переменного тока, а вторичная обмотка разомкнута.

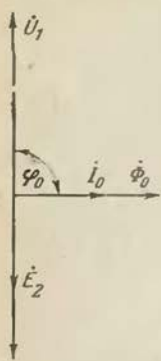


Рис. 20. Векторная диаграмма холостого хода трансформатора (упрощенная).

Схема опыта х. х. трансформатора и упрощенная векторная диаграмма представлены на рис. 19 и 20.

Опыт х. х. позволяет по показаниям вольтметров  $V_1$  и  $V_2$  определить коэффициент трансформации. Амперметр показывает величину тока х. х.  $I_0$ . Если пренебречь небольшими активными потерями,  $I_0$  является в основном реактивным током. На х. х. трансформатор потребляет из сети значительную реактивную мощность и его  $\cos \varphi_0 < 0,1$ .

Опыт х. х. трансформатора позволяет определить потери активной мощности  $P_0$  в трансформаторе по показаниям счетчика активной энергии и  $\cos \varphi_0$  по выражению

$$\cos \varphi_0 = P_0 / (U_1 I_0).$$

Ток х. х. трансформатора обычно выражается в процентах номинального тока  $I_{ном}$ , указанного на щитке трансформатора:

$$i_0 = \frac{I_0}{I_{ном}} \cdot 100.$$

Ток х. х. позволяет определить реактивную мощность, потребляемую трансформаторами на х. х., квар:

$$Q = Si_{0\%} / 100,$$

где  $S$  — полная номинальная мощность трансформатора, кВ · А.

Опыт короткого замыкания и ограничение токов короткого замыкания в сетях. Режим, когда сопротивление нагрузки трансформатора равно нулю, т. е. вторичная обмотка замкнута «накоротко», называется коротким замыканием трансформатора (рис. 21). В эксплуатационных условиях к. з. обмотки при номинальном значении первичного напряжения вызывает аварийный процесс.



при котором токи в обмотках трансформатора увеличиваются в десятки раз по сравнению с номинальными, указанными на щитке трансформатора, и возникают значительные механические силы между обмотками. Эти явления могут привести к выходу трансформатора из строя, если не принять специальных мер защиты трансформаторов при коротком замыкании.

В опыте к. з. к первичной обмотке подводится пониженное напряжение, составляющее несколько процентов номинального в зависимости от типа трансформатора. Это напряжение называется напряжением к. з. Величина подводимого напряжения выбирается таким образом, чтобы токи в обмотках трансформатора были равны номинальным. Напряжение к. з. выражается в процентах номинального, т. е.

$$u_k = \frac{U_k}{U_1} 100 \%,$$

На основе опыта к. з. определяется потребляемая трансформатором при номинальной паспортной нагрузке мощность магнитных потоков рассеяния по выражению, квар,

$$Q_p = S \frac{u_{k\%}}{100},$$

где  $S$  — номинальная паспортная мощность трансформатора, кВ·А.

На рис. 22 представлена кривая тока к. з. В начальный момент ток к. з. достигает наибольшего значения и называется ударным током, затем он уменьшается до определенной величины. Величина действующего значения установившегося тока к. з. определяется для трансформатора по выражению (для очень большой мощности энергосистемы по сравнению с мощностью трансформатора), А,

$$I_k = I_{ном} 100 / u_{k\%},$$

где  $I_{ном}$  — номинальный ток трансформатора, А;  $u_{k\%}$  — напряжение к. з.

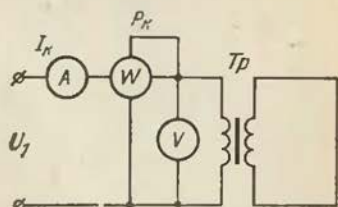


Рис. 21. Схема опыта короткого замыкания трансформатора.

$Tr$  — трансформатор;  $A$ ,  $W$ ,  $V$  — приборы.

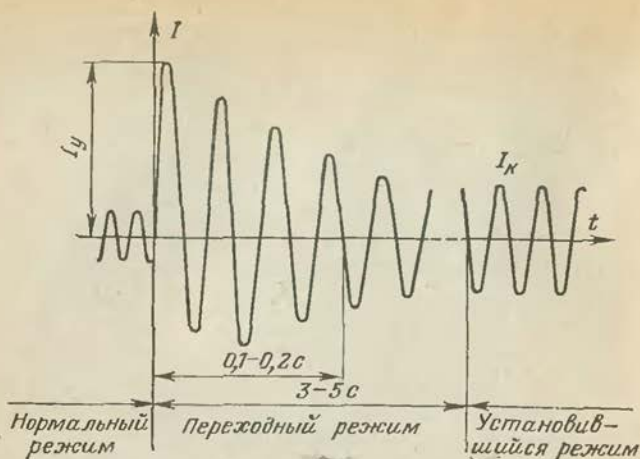


Рис. 22. Кривая тока короткого замыкания.

Уменьшить величину токов к. з. можно только за счет увеличения сопротивления элементов цепи, но это привело бы к большим потерям мощности. Поэтому все

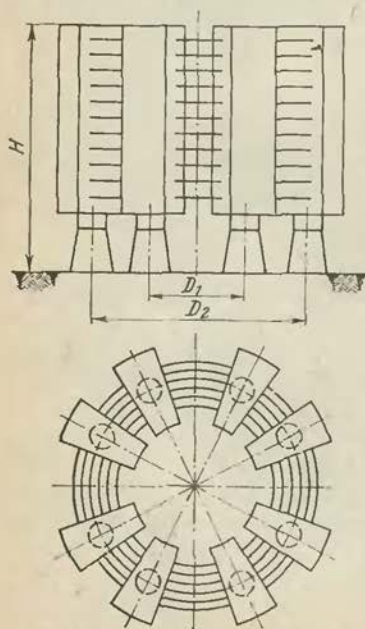


Рис. 23. Реактор бетонный.  
 $D_1$ ,  $D_2$ ,  $H$  — размеры реактора,

электрическое оборудование рассчитывается на устойчивость при к. з. Для ограничения токов к. з., возникающих на отходящих линиях распределительных устройств электростанций и крупных трансформаторных подстанций, устанавливаются дополнительные индуктивные сопротивления — катушки, обладающие большим индуктивным и малым активным сопротивлением и называемые реакторами (рис. 23). Витки катушки изолированы друг от друга, а вся катушка изолирована от земли. Катушка реактора включается в сеть последовательно. На щитке реактора указываются но-

Таблица 5

Реактор	Номинальная индуктивность $L$ , мГ	Реактивная мощность фазы $Q$ , квар	Потери мощности фазы $\Delta P$ , кВт	Прходная мощность $S_{\text{п}}$ , кв·А
РБА-6-400-4	1,10	55,2	1,99	4160
РБА-10-400-4	1,84	92,5	3,86	6930
РБА-6-600-6	1,10	125	4,6	6240
РБА-10-600-6	1,84	208	6,46	10 400
РБА-6-1000-10	1,10	346	8,3	10 390
РБА-10-1000-10	1,84	578	11,4	17 300
РБА-6-1500-10	0,735	520	9,9	15 570
РБА-10-1500-10	1,23	866	15,0	25 950
РБА-6-2000-12	0,662	835	13,5	20 760
РБА-10-2000-12	1,10	1384	18,9	34 600
РБА-6-4000-12	0,331	1664	22,0	41 520
РБА-10-4000-12	0,551	2768	33,6	69 200

Примечание. В типе реактора первая цифра означает напряжение, кв, вторая — номинальный ток, А, третья — номинальное реактивное сопротивление реактора, %.

минальное напряжение, ток и индуктивное сопротивление в %.

В табл. 5 даны технические данные некоторых реакторов типа РБА (реактор бетонный с алюминиевой обмоткой). Помимо указанных выпускаются также реакторы этого типа на другие реактивные сопротивления и токи, а также реакторы типа РБАМ (с малыми потерями), РБАС (сдвоенные реакторы) и РБАСМ (сдвоенные реакторы с малыми потерями).

Если принять мощность перед отходящей линией, на которой установлен реактор, очень большой, ток к. з. за реактором будет равен:

$$I_{\text{к}} = I_{\text{ном}} 100 / x_{\text{р}\%};$$

$$\text{при } x_{\text{р}} = 10, \text{ и } I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А,}$$

$$I_{\text{к}} = \frac{1000 \cdot 100}{10} = 10.000 \text{ А,}$$

т. е. ток увеличится в 10 раз против номинального.

Поскольку реакторы являются индуктивными катушками, они потребляют из сети при номинальной нагрузке реактивную мощность, величина которой для одной фазы определяется по формуле:

$$Q = S \frac{x_{\text{р}\%}}{100} = I_{\text{ном}} U \frac{x_{\text{р}\%}}{100\sqrt{3}},$$



где  $S$  — номинальная полная мощность реактора кВ·А;  $I_{\text{ном}}$  — номинальный ток, А;  $U$  — номинальное напряжение, кВ;  $x_{\text{p}\%}$  — реактивное сопротивление реактора, ‰.

Приведем пример определения реактивной мощности, потребляемой группой из трех реакторов на отходящей линии 10 кВ трансформаторной подстанции. Данные реакторов  $U = 10$  кВ,  $I_{\text{ном}} = 1000$  А,  $x_{\text{p}\%} = 10$ . Для одной фазы

$$Q = \frac{10 \cdot 1000 \cdot 10}{100 \cdot \sqrt{3}} = 578 \text{ квар.}$$

Для трех фаз потребление составит 1734 квар.

*Определение потребления трансформатором реактивной мощности.* Опыты х. х. и к. з. позволяют определить суммарную реактивную мощность, потребляемую трансформатором из сети при любом режиме работы, по выражению, квар,

$$Q = \left( \frac{i_{0\%}}{100} + \beta^2 \frac{u_{\text{к}\%}}{100} \right) S,$$

где  $\beta$  — коэффициент загрузки, представляющий отношение тока вторичной обмотки при данной нагрузке к номинальному току  $I_{2\text{ном}}$ , указанному на щитке трансформатора,  $\beta = I_2 / I_{2\text{ном}}$ .

В табл. 6 показаны основные характеристики и потребление реактивной мощности силовыми трансформаторами наиболее распространенных типов. Ток х. х. с ростом мощности уменьшается примерно от 2 до 0,6 ‰. Наоборот, напряжение к. з. растет с 4,5 до 10,5 ‰. Полное относительное потребление реактивной мощности трансформаторами растет с увеличением их мощности: с 6,6—8,6 квар на 100 кВ·А при мощности трансформаторов 400 кВ·А, до 9,6—11,1 квар на 100 кВ·А при мощности трансформаторов 80 000 кВ·А. Эти величины сравнительно небольшие. Если учесть, что в сетях от электростанций до потребителей приходится от двух до шести трансформаций, величины потребления реактивной мощности на 100 кВ·А нагрузки от индуктивного сопротивления трансформаторов соответственно увеличиваются в несколько раз.

Трансформатор	Мощность, кВ·А	Первичное напряжение, кВ	Ток х. х. $i_0$ , %	Напряжение к. з. $u_k$ , %	Потребление реактивной мощности, квар		
					при х. х. $Q_0$	рассеяния при полной нагрузке $Q_p$	при полной нагрузке $Q_H = Q_0 + Q_p$
ТМ	400	10—35	2,1	4,5—6,5	8,4	18,0—26,0	26,4—34,4
ТМ	630	10—35	2,0	5,5—6,5	12,6	34,7—41,0	47,3—53,6
ТМ	1 000	10—35	1,4—1,5	5,5—6,5	14,0—15,0	55,0—65,0	69,0—80,0
ТМ	1 600	10—35	1,3—1,4	5,5—6,5	20,8—22,4	88,0—104	108,8—126,4
ТМ	2 500	10—35	1,0—1,1	5,5—6,5	25,0—27,5	137,5—162,5	162,5—190,0
ТМ	4 000	10—35	0,9—1,0	6,5—7,5	36,0—40,0	260,0—300	296—340
ТМ	6 300	10—35	0,8—0,9	6,5—7,5	50,5—56,6	409,5—472,5	460—529
ТД, ТДН	10 000	35—110	0,8—0,9	7,5—10,5	80,0—90,0	750—1050	830—1140
ТД, ТДН	16 000	35—110	0,75—0,85	8,0—10,5	120—136	1280—1680	1400—1816
ТД, ТРДН	40 000	35—110	0,65—0,7	8,5—10,5	260—280	3400—4200	3660—4480
ТДЦ, ТРДЦН	80 000	35—110	0,6	9,0—10,5	480,0	7200—8400	7680—8880

Примечание. Цифры после тире относятся к трансформаторам с более высоким первичным напряжением.

В рабочем режиме трансформатора реактивная мощность равна, квар:

$$Q = Q_0 + Q_p + Q_1,$$

где  $Q$  — общая реактивная мощность;  $Q_0$  — реактивная мощность, расходуемая на создание основного магнитного поля;  $Q_p$  — реактивная мощность, потребляемая обмотками на создание магнитных полей рассеяния;  $Q_1$  — реактивная мощность, передаваемая трансформатором в сеть.

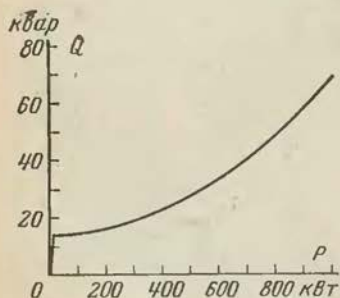


Рис. 24. График зависимости потребляемой трансформатором реактивной мощности от нагрузки.

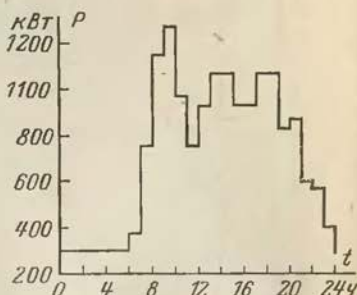


Рис. 25. Суточный график электрических нагрузок предприятия.

Таким образом, в рабочем режиме величина потребляемой мощности во многом зависит от величины нагрузки (рис. 24). При малых нагрузках и х. х. трансформатор потребляет из сети в основном реактивную мощность.

*Мероприятия по уменьшению потребления трансформаторами реактивной мощности.* На промышленных предприятиях могут быть выполнены мероприятия, позволяющие значительно сократить потребление трансформаторами реактивной мощности.

Как известно, многие предприятия имеют неравномерный график электрических нагрузок. Это объясняется режимом работы предприятия и его энергоемкого оборудования: крупных электрических машин, электротермических установок, электрических нагревательных печей и т. д. На рис. 25 представлен примерный график электрических нагрузок предприятия, из которого видно, что в часы максимума с 7 до 13 и с 14 до 17 ч потребля-



ние активной мощности увеличивается по сравнению с другими часами суток. Чтобы сократить потребление активной мощности, необходимо перевести работу энергоемкого оборудования на другие часы суток. Это позволит выравнять график электрических нагрузок и сократить потребление активной и реактивной мощности. Рассмотрение графика электрических нагрузок и мероприятия по его выравниванию позволяют также уменьшить число и единичную мощность трансформаторов, что также окажет существенное влияние на сокращение величины потребляемой реактивной мощности.

Трансформаторы передают реактивную мощность из сети к потребителям, поэтому очень важными являются мероприятия по разгрузке трансформаторов и уменьшению величины передаваемой реактивной мощности. Это осуществляется, как правило, повышением естественного  $\cos \varphi$  потребителей и установкой компенсирующих устройств на стороне низкого напряжения трансформаторных подстанций. Можно также уменьшить потребляемую трансформаторами реактивную мощность за счет рационализации режимов их работы, в частности: за счет отключения части трансформаторов в нерабочее время, раздельного электроснабжения оборудования, работающего круглые сутки, и оборудования, работающего с перерывами, осуществления раздельного питания рабочего и охранного освещения, отключения одного из трансформаторов, работающих в параллель, если нагрузка снижается до 30—50%, замены незагруженных систематически трансформаторов на меньшую мощность.

Одной из мер по уменьшению потребления трансформаторами реактивной мощности является проведение своевременного и качественного ремонта, в частности ремонта магнитопровода трансформатора. В случае если в сердечнике трансформатора нарушится межлистовая изоляция или при сборке будут допущены увеличенные зазоры в стыках между пластинами сердечника, его магнитное сопротивление увеличится и на создание магнитного потока потребуются больший ток намагничивания, и так как ток  $I_0$  является реактивным, то потребляемая трансформатором реактивная мощность возрастет.

*Автоматизация работы трансформаторов.* Повышение загрузки трансформаторов, улучшение всех показателей, в том числе  $\cos \varphi$ , и уменьшение потребления реактивной мощности достигаются автоматизацией включения и

выключения трансформаторов подстанции в зависимости от общей нагрузки.

Рассмотрим схему переключения трансформаторов двухтрансформаторной подстанции, которые широко распространены на промышленных предприятиях [Л. 6, 7]. Однолинейная схема подстанции и принципиальная схема автоматического переключения трансформаторов представлены на рис. 26 и 27. Трансформаторы могут

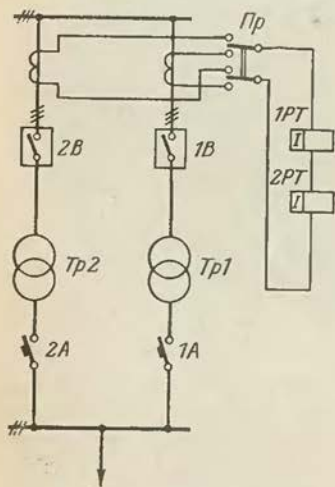


Рис. 26. Однолинейная схема двухтрансформаторной подстанции.

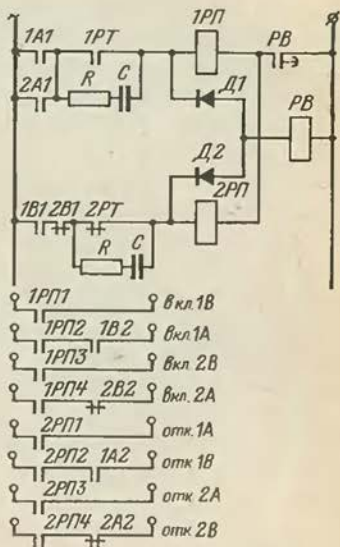


Рис. 27. Принципиальная схема автоматического переключения трансформаторов.

попеременно находиться в работе или в резерве. Рассмотрение начинаем с момента, когда трансформатор *Tr2* находится в работе, а *Tr1* в резерве. При увеличении нагрузки выше допустимой для *Tr2* реле *1РТ* срабатывает и своим контактом создает цепь питания реле *РВ*: блок-контакт *1А1*, контакт *1РТ*, диод *Д1*, катушка реле *РВ*. Реле *РВ* срабатывает и с выдержкой времени своим контактом образует цепь питания промежуточного реле *1РП*: блок-контакт *1А1*, контакт *1РТ*, катушка реле *1РП*, контакт *РВ*. Реле *1РП* своими контактами образует цепь включения выключателя *1В* и подготавливает цепь включения автомата *1А*. При включении выключателя *1В* его блок-контакт подготавливает цепь

включения реле  $PB$  (блок-контакт  $1B1$ , блок-контакт  $2B1$ , контакт  $2PT$ , диод  $D2$ , катушка реле  $PB$ ), а второй замыкает цепь включения автомата  $1A$ . Автомат  $1A$  включает  $Tr1$  в параллельную работу и своим блок-контактом разрывает цепь питания реле  $1PP$  и реле  $PB$ . Катушки реле обесточиваются, схема приходит в новое состояние: блок-контакты автоматов  $1A$  и  $2A1$  разомкнуты, блок-контакты выключателей  $1B1$  и  $2B1$  замкнуты, контакт реле  $1PT$  замкнут, контакт  $2PT$  разомкнут. При снижении нагрузки ниже номинальной для  $Tr2$  реле тока  $2PT$  срабатывает и с выдержкой времени замыкает свой контакт в цепи промежуточного реле  $2PP$ . Реле  $2PP$  своими контактами создает цепь отключения автомата  $1A$  и подготавливает цепь отключения выключателя  $1B$ . Блок-контакт автомата  $1A$  замыкает цепь отключения выключателя  $1B$ . Выключатель  $1B$  отключает  $Tr1$  с высокой стороны и размыкает свой блок-контакт  $1B1$ : схема приходит в исходное положение.

Данная схема автоматического переключения трансформаторов при переменной нагрузке является одним из вариантов схем, рекомендуемых к применению. В зависимости от условий работы трансформаторов можно воспользоваться другими схемами. Все эти схемы при частичных изменениях могут быть использованы для включения, отключения и переключения трансформаторов, используемых для освещения, в сварочном производстве, в качестве дежурных и т. д.

**Пример расчета реактивной мощности, потребляемой трансформатором.** Силовой трансформатор типа ТМ-1000/10, напряжения 10 кВ, полная номинальная мощность  $S=1000$  кВ·А, ток х. х.  $i_{0\%}=1,4$ , напряжение к. з.  $u_{к\%}=5,5$ . Требуется определить потребляемую трансформатором реактивную мощность в режиме х. х. при номинальной нагрузке и при нагрузке, составляющей 50% номинальной. Реактивная мощность, потребляемая трансформатором при х. х., определяется по формуле

$$Q_0 = S \frac{i_{0\%}}{100} = 1000 \cdot \frac{1,4}{100} = 14 \text{ квар.}$$

Реактивная мощность рассеяния, потребляемая при полной нагрузке,

$$Q_p = S \frac{u_{к\%}}{100} = 1000 \frac{5,5}{100} = 55 \text{ квар.}$$

Реактивная мощность, потребляемая при полной нагрузке ( $P=1000$  кВт),

$$Q = Q_0 + Q_p = 69 \text{ квар.}$$



При нагрузке трансформатора, составляющей 50% номинальной,  $\beta=0,5$  потребляемая реактивная мощность

$$Q = S \left( \frac{I_0\%}{100} + \beta^2 \frac{u_k\%}{100} \right) = 1000 \left( \frac{1,4}{100} + 0,25 \frac{5,5}{100} \right) = 27,7 \text{ квар.}$$

Это составляет  $\frac{27,7}{69} \cdot 100\% = 40\%$  потребления реактивной мощности при полной нагрузке трансформатора.

## 2-2. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

*Потребление реактивной мощности при х. х.* Асинхронные двигатели потребляют свыше 50% всей электроэнергии, используемой в народном хозяйстве, и 60% реактивной мощности.

Устройство асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором приведено на рис. 28. Статор 1 асинхрон-

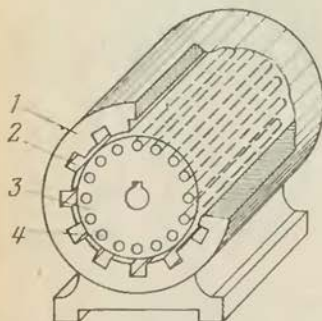


Рис. 28. Устройство асинхронного двигателя (обмотки не показаны).

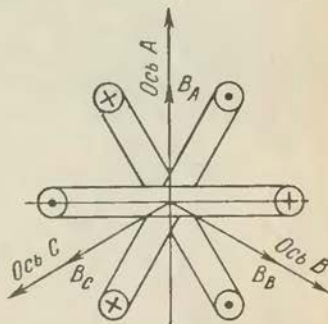


Рис. 29. Схема расположения катушек статорной обмотки асинхронного двигателя.

$B_A, B_B, B_C$  — векторы магнитной индукции.

ного двигателя, как и сердечник трансформатора, составлен из листов электротехнической стали. Листы имеют форму полуколец с штампованными пазами. В пазах 2, находящихся на внутренней поверхности статора, закладывается статорная обмотка. Эта обмотка выполняется так, что при включении ее в сеть переменного тока (обычно трехфазного) образуется вращающееся магнитное поле. Катушки статорной обмотки трехфазного тока располагаются по окружности статора симметрично, как схематично показано на рис. 29. При правильном чередова-

нии фаз тока вектор магнитной индукции будет вращаться с угловой скоростью  $\omega$ . Как известно, переключением фаз можно изменить вращение магнитного поля в обратную сторону. Ротор 3 асинхронного двигателя обычно набран из круглых листов стали. По окружности ротора расположена роторная обмотка 4, не связанная непосредственно с внешней электросетью. Для асинхронного двигателя характерна величина скольжения  $s$ :

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0},$$

где  $n_0$  — частота вращения магнитного потока;  $n$  — частота вращения ротора.

Частота вращения ротора всегда отстает от частоты вращения магнитного поля, этим объясняется название двигателя — асинхронный, приставка «а» означает отрицание (не синхронный).

Асинхронный двигатель, как и всякий двигатель, нельзя рассматривать в отрыве от машины, для привода которой он предназначен, и от условий, в которых он должен работать. Все его характеристики и конструктивные особенности приспособляются для наиболее эффективного выполнения функций привода машины. В электропривод кроме асинхронного двигателя входят передаточные механизмы (редукторы, зубчатые колеса и др.) и устройства управления, служащие для пуска, остановки и регулирования привода. Для привода каждой машины или ее отдельного механизма применяется обычно отдельный двигатель. Нередки случаи, когда в электропривод машины входят несколько единиц или даже десятков двигателей, которые работают согласованно. Одним из важнейших требований является в ряде случаев необходимость регулирования частоты вращения асинхронного двигателя.

Из выражения для скорости  $n = \frac{60(1-s)f}{p}$  следует,

что частоту вращения двигателя можно регулировать: изменением числа полюсов (многоскоростные двигатели), искусственным изменением скольжения при данной нагрузке и изменением частоты.

Первый способ применяется преимущественно для регулирования частоты вращения металлорежущих станков — для них выпускаются двух-, трех- и четырехскоростные двигатели.

Искусственное изменение скольжения применяется для электропривода грузоподъемных кранов, металлургических механизмов, привода лебедок, где применяются крановые двигатели.

Способ регулирования частоты вращения при помощи полупроводниковых преобразователей находит применение в ряде электроприводов, например электроприводах рольгангов.

В соответствии с требованиями защиты двигателя от воздействия окружающей среды применяются двигатели: защищенные от капель и проникновения каких-либо частиц, устанавливаемые в сухих и не пыльных помещениях; закрытые, устанавливаемые в сырых и пыльных помещениях, например литейных цехах, цехах химических предприятий; взрывобезопасные — на шахтах, опасных по газу и пыли, и во взрывоопасных помещениях.

Особенности конструктивного выполнения асинхронных двигателей влияют на потребление ими реактивной мощности. Закрытые и взрывобезопасные асинхронные двигатели имеют несколько больший относительный объем магнитопровода и потребляют больше реактивной мощности. Асинхронные двигатели, приспособленные для повторно-кратковременного режима работы и для регулирования частоты вращения изменением скольжения, как и крановые, имеют относительно более низкие значения  $\cos \phi$ , чем двигатели единой серии. Способ регулирования частоты вращения изменением скольжения неэкономичен, так как в сопротивлениях, включаемых в обмотку ротора, выделяется мощность, приблизительно равная изменению мощности за счет снижения частоты вращения. Однако этот способ регулирования прост, удобен и широко применяется в промышленности. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя изменением частоты переменного тока с применением полупроводникового преобразователя частоты наиболее экономичен, хотя и связан с потерями энергии в преобразователе.

Рассмотрим некоторые вопросы, относящиеся к трехфазным асинхронным двигателям. В табл. 7 показаны основные данные асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором единой серии А2 и АО2. Двигатели А2 — защищенные, изготавливаются начиная с габарита 6 мощностью 7,5—125 кВт, 750—3000 об/мин. Двигатели АО2 — закрытые, обдуваемые, изготавливаются начи-



Таблица 7

Двигатели			Мощность, кВт					cos φ <sub>ном</sub>					η <sub>ном</sub> , %				
Серия	Га тарит	Число полюсов	при частоте вращения, об/мин														
			3000	1500	1000	750	600	3000	1500	1000	750	600	3000	1500	1000	750	600
АО2	11	2, 4, 6	0,8	0,6	0,4	—	—	0,86	0,76	0,65	—	—	78,0	72,0	68,0	—	—
АО2	12	2, 4, 6	1,1	0,8	0,6	—	—	0,87	0,78	0,68	—	—	79,5	74,5	70,0	—	—
АО2	21	2, 4, 6	1,5	1,1	0,8	—	—	0,88	0,80	0,71	—	—	80,5	78,0	73,0	—	—
АО2	22	2, 4, 6	2,2	1,5	1,1	—	—	0,89	0,81	0,73	—	—	83,0	80,0	76,0	—	—
АО2	31	2, 4, 6	3,0	2,2	1,5	—	—	0,89	0,83	0,75	—	—	84,5	82,5	79,5	—	—
АО2	32	2, 4, 6	4,0	3,0	2,2	—	—	0,89	0,84	0,77	—	—	85,5	83,5	81,0	—	—
АО2	41	2, 4, 6, 8	5,5	4,0	3,0	2,2	—	0,89	0,85	0,78	0,69	—	86,0	86,0	81,5	79,5	—
АО2	42	2, 4, 6, 8	7,5	5,5	4,0	3,0	—	0,89	0,86	0,79	0,70	—	87,0	87,0	83,0	80,0	—
АО2	51	2, 4, 6, 8	10	7,5	5,5	4,0	—	0,89	0,87	0,81	0,71	—	88,0	88,5	85,5	84,0	—
АО2	52	2, 4, 6, 8	13	10	7,5	5,5	—	0,89	0,87	0,82	0,72	—	88,0	88,5	87,0	85,0	—
АО2	61	4, 6, 8	—	13	10	7,5	—	—	0,89	0,89	0,81	—	—	88,5	88,0	86,5	—
АО2	62	2, 4, 6, 8	17	17	13	10	—	0,90	0,89	0,89	0,81	—	88,0	89,0	88,0	87,5	—
АО2	71	2, 4, 6, 8	22	22	17	13	—	0,90	0,90	0,90	0,83	—	88,0	90,0	90,0	89,0	—
АО2	72	2, 4, 6, 8	30	30	22	17	—	0,90	0,91	0,90	0,83	—	89,0	91,0	90,5	89,5	—
АО2	81	2, 4, 6, 8, 10	40	40	30	22	17	0,91	0,91	0,91	0,84	0,77	89	91,5	91	90,5	88
АО2	82	2, 4, 6, 8, 10	55	55	40	30	22	0,92	0,92	0,91	0,88	0,78	90	92,5	91,5	90,0	89,5
АО2	91	2, 4, 6, 8, 10	75	75	55	40	30	0,92	0,92	0,92	0,88	0,82	90	92,5	92,5	91,5	90,0
АО2	92	2, 4, 6, 8, 10	100	100	75	55	40	0,92	0,92	0,92	0,90	0,82	91,5	93	92,5	92,5	90,5
А2	61	2, 4, 6, 8	17	13	10	7,5	—	0,88	0,88	0,86	0,78	—	88	88,5	87,0	85,0	—
А2	62	2, 4, 6, 8	22	17	13	10	—	0,88	0,88	0,86	0,79	—	89,0	89,5	88	87,0	—
А2	71	2, 4, 6, 8	30	22	17	13	—	0,90	0,88	0,87	0,82	—	90,0	90	89,0	87,5	—
А2	72	2, 4, 6, 8	40	30	22	17	—	0,90	0,88	0,87	0,82	—	90,5	90,5	89,5	88,5	—
А2	81	2, 4, 6, 8	55	40	30	22	—	0,90	0,89	0,88	0,82	—	91	91,0	90	89,0	—
А2	82	2, 4, 6, 8	75	55	40	30	—	0,90	0,89	0,89	0,84	—	92,0	92	91,0	90,0	—
А2	91	2, 4, 6, 8	100	75	55	40	—	0,90	0,89	0,89	0,84	—	93,0	93,0	92	91,5	—
А2	92	2, 4, 6, 8	125	100	75	55	—	0,90	0,90	0,89	0,87	—	94,0	93,5	92,5	92,0	—

ная с габарита 1. Защищенные двигатели первых пяти габаритов не изготавливаются. В каждом габарите два подгабарита: 1 и 2; второй подгабарит имеет несколько увеличенную длину. Единая серия асинхронных двигателей А2 и АО2 заменила единую серию А и АО; у них несколько выше к. п. д. (в среднем на 1,7%) и  $\cos \phi$  (в среднем на 0,03), меньше габариты и масса (в среднем на 30%). Улучшена изоляция двигателей, что повысило их надежность.

Реактивная мощность х. х. асинхронного двигателя равна:

$$Q_0 = 1,73 I_0 U_{\text{ном}} 10^{-3},$$

здесь  $I_0$  — ток х. х. асинхронного двигателя, приближенно равный намагничивающему току;  $U_{\text{ном}}$  — номинальное напряжение в сети.

Реактивная мощность х. х.  $Q_0$  асинхронного двигателя равна:

$$Q_0 = C \frac{U_{\text{ном}}^2}{\mu} fV,$$

где  $C$  — коэффициент, зависящий от числа пар полюсов, частоты, конструкции обмоток двигателя;  $U_{\text{ном}}$  — напряжение сети, В;  $\mu$  — магнитная проницаемость магнитопровода;  $V$  — объем магнитопровода,  $\text{см}^3$ .

Из рассмотрения этого выражения можно сделать ряд важных выводов:

$Q_0$  зависит от квадрата напряжения сети. Так, при повышении напряжения на зажимах асинхронного двигателя на 1% увеличивается потребление реактивной мощности на 3%;

$Q_0$  зависит от объема магнитопровода. Это объясняет, почему возрастает потребление реактивной мощности при уменьшении номинальных оборотов двигателя: у более тихоходных двигателей при той же мощности объем магнитопровода больше. Наконец,  $Q_0$  зависит от частоты: у двигателей повышенной частоты потребление реактивной мощности возрастает;

$Q_0$  обратно пропорционально магнитной проницаемости магнитопровода: при увеличении  $\mu$  потребление реактивной мощности снижается. Поскольку очень большое значение имеет магнитная проницаемость воздушного зазора между статором и ротором, увеличение этого зазора значительно увеличивает потребление реактивной мощности.

Магнитное сопротивление воздушного зазора асинхронного двигателя составляет 70—80% полного магнитного сопротивления его магнитной цепи  $R_M$  и, следовательно, 70—80% реактивной мощности, потребляемой асинхронным двигателем. Поскольку асинхронные двигатели потребляют свыше 60% всей реактивной мощности в стране, на долю магнитного сопротивления воздушного зазора приходится около половины расходной части баланса реактивной мощности.

Из приведенного выше выражения следует, что потребление реактивной мощности зависит от квадрата величины магнитного потока  $\Phi$  и, следовательно, от числа витков обмоток статора. Уменьшение расчетного числа витков на 10% увеличивает соответственно магнитный поток и примерно на 25% увеличивается потребление реактивной мощности  $x. x.$

Ток  $x. x.$  асинхронного двигателя измеряется при  $x. x.$  двигателя с расцепленной муфтой (или снятым ремнем). Ток  $x. x.$  в 3—4 раза меньше тока статора при номинальной нагрузке. Это значительно больше, чем в трансформаторе, где ток  $x. x.$  равен нескольким процентам номинального. Реактивная мощность  $x. x.$  асинхронного двигателя обычно составляет 50—80% реактивной мощности, потребляемой асинхронным двигателем при номинальной нагрузке.

*Потребление реактивной мощности асинхронным двигателем под нагрузкой.* Реактивная мощность  $Q$ , потребляемая асинхронным двигателем при номинальной нагрузке, равна:

$$Q = Q_0 + Q_p = P \operatorname{tg} \varphi / \eta,$$

где  $Q_p$ —реактивная мощность рассеяния, обусловленная номинальной нагрузкой двигателя;  $P$ —номинальная мощность двигателя;  $\operatorname{tg} \varphi$ —тангенс, соответствующий  $\cos \varphi$  двигателя при номинальной нагрузке;  $\eta$ —к. п. д. двигателя при номинальной нагрузке.

Величины  $P$ ,  $\eta$ ,  $\cos \varphi$  можно получить из паспорта асинхронного двигателя. Реактивная мощность, потребляемая асинхронным двигателем, зависит от числа оборотов двигателя. Частота вращения магнитного потока двигателя  $n_0$  равна, об/мин:

$$n_0 = 60 f / p,$$

где  $p$ —число пар полюсов статора, приходящихся на одну фазу.



При одной паре полюсов  $n_0=3000$  об/мин, при двух 1500, трех — 1000, четырех — 750. При уменьшении числа оборотов, при той же мощности, габариты асинхронных двигателей значительно увеличиваются. Например, при одних и тех же габаритах А2-62 при  $n_0$ , равном 3000 об/мин, мощность асинхронного двигателя 22 кВт, при 1500—17 кВт, при 1000—13 кВт, при 750—10 кВт. Соответственно  $\cos \varphi$  при номинальной нагрузке с 0,88 при  $n_0$ , равном 3000 об/мин, уменьшается до 0,79 при  $n_0$ , равном 750 об/мин. Поэтому занижение числа оборотов двигателя весьма неблагоприятно отражается на потреблении реактивной мощности. В нашем примере при уменьшении  $n_0$  с 3000 об/мин до 750 об/мин потребление реактивной мощности при том же габарите при номинальной нагрузке возрастает в 1,7 раза. Такая же тенденция сохраняется и при

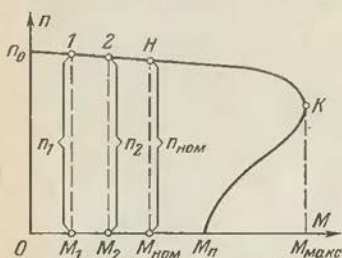


Рис. 30. Механическая характеристика асинхронного двигателя.

сравнении асинхронных двигателей одной и той же мощности при различных числах оборотов. Например,  $\cos \varphi$  двигателя мощностью 17 кВт при 3000 об/мин равен 0,9, при 1500 об/мин — 0,89, при 1000 об/мин — 0,9, при 750 об/мин — 0,83 и при 600 об/мин — 0,77.

При выборе асинхронного двигателя необходимым условием является соответствие нагрузочной характеристики машины механической характеристике двигателя. Механическая характеристика асинхронного двигателя, показанная на рис. 30, представляет зависимость вращающего момента двигателя от его частоты вращения. Из кривой на рис. 30 можно заключить, что на определенном участке увеличения момента нагрузки до  $M_{ном}$  номинального момента, соответствующего номинальной мощности двигателя, растет вращающий момент  $M_1$ ,  $M_2$  двигателя (увеличивается скольжение  $s$ ). Достигнув максимума в точке К (критической), частота вращения двигателя быстро падает до нуля, двигатель останавливается, или, как говорят, опрокидывается. Поэтому  $M_{макс}$  называют еще опрокидывающим моментом двигателя.

Максимальный момент  $M_{макс}$  обычно равен 1,8—2,5  $M_{ном}$ . Максимальный вращающий момент  $M_{макс}$  асин-

хронного двигателя приблизительно равен:

$$M_{\text{макс}} \approx CU^2 \frac{1}{2x},$$

где  $C$  — коэффициент;  $x$  — индуктивное сопротивление ротора.

Из этого выражения следует важный вывод — максимальный момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения сети. Асинхронные двигатели очень чувствительны к понижению напряжения сети: например, при его понижении на 10% вращающий момент уменьшается на 19%. Вращающий момент  $M_{\text{макс}}$  обратно пропорционален индуктивному сопротивлению ротора  $x$ . Индуктивное сопротивление ротора  $x$  зависит от частоты электродвижущей силы в обмотке ротора  $f_2$ ,  $f_2 = sf$ , т. е. частота  $f_2$  зависит от величины скольжения. Следовательно, чем больше скольжение, тем больше частота ротора, а значит, и индуктивное сопротивление ротора  $x$ , при этом максимальный вращающий момент  $M_{\text{макс}}$  уменьшается. Однако  $M_{\text{макс}}$  имеет максимальную величину при критическом скольжении  $s_k$ , равном  $s_k = r/x$ , где  $r$  — активное сопротивление ротора.

Изменяя величину  $r$ , можно изменять механическую характеристику асинхронного двигателя. Величина  $M_{\text{макс}}$  при этом не увеличивается, но при введении сопротивления она достигается при меньших оборотах двигателя. На этом основано применение пусковых реостатов и регулировочных сопротивлений для пуска и регулирования частоты вращения асинхронного двигателя с фазным ротором.

Номинальное скольжение для асинхронных двигателей средней мощности  $s$  находится в пределах 0,02—0,06, при этом число оборотов  $n$  равно:

$$n = n_0(1-s) = (0,94 \div 0,98)n_0.$$

Электродвижущая сила  $E_2$  в обмотке ротора возникает в момент пуска, когда ротор неподвижен и вращающийся магнитный поток обмоток статора пересекает обмотку ротора с максимальной скоростью. В этот момент асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором подобен силовому трансформатору с короткозамкнутой вторичной обмоткой. В результате пусковой ток у такого двигателя превышает номинальное значение тока в 5—7 раз:

$$I_{\text{п}} = (5 \div 7)I_{\text{ном.}}$$

Поэтому при пуске асинхронного двигателя потребляется значительная реактивная мощность. У асинхронных двигателей с фазным ротором путем ввода токоограничивающих сопротивлений в обмотку ротора пусковой ток равен:

$$I_{\text{п}} = (2 \div 2,5) I_{\text{ном.}}$$

На упрощенной векторной диаграмме асинхронного двигателя (рис. 31) показано, что напряжение на зажимах двигателя  $U_1$  уравнивается электродвижущей силой  $E_1$ , индуктируемой в обмотке статора вращающимся магнитным потоком  $\Phi_0$ . Ток статора  $I_1$  является намагничивающим, а ток ротора  $I_2$  размагничивающим, поэтому значение вектора вращающегося потока  $\Phi_0$  определяется величиной напряжения  $U_1$  и почти не зависит от величины нагрузки. При х. х. скольжение  $s$  очень мало и ток в роторе близок к нулю, так как ротор вращается вместе с магнитным полем, почти не пересекая магнитные линии своей обмоткой.

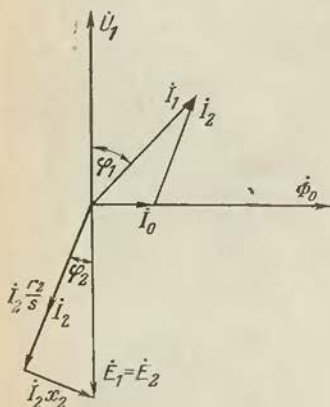


Рис. 31. Упрощенная векторная диаграмма асинхронного двигателя.

При увеличении нагрузки увеличивается скольжение, возрастает электродвижущая сила  $E_2$  ротора и, следовательно, ток  $I_2$ . Увеличение тока  $I_2$  вызывает увеличение противодействующего ему тока статора  $I_1$ , потребляемого из сети; устанавливается равновесие между электромагнитной и механической мощностями на валу двигателя. Электрическая мощность преобразуется в механическую. Вращающий момент, созданный на валу двигателя, зависит от величины тока в роторе  $I_2$  и от магнитного потока двигателя  $\Phi_0$ . Величина вращающего момента асинхронного двигателя зависит также от сдвига фаз между током  $I_2$  и электродвижущей силой  $E_2$  ротора. Сдвиг фаз получается ввиду наличия активного и реактивного сопротивлений ротора. Вращающий момент на валу двигателя зависит от активной составляющей тока ротора, т. е. от  $I_2 \cos \varphi_2$ .



Потребляемая асинхронным двигателем реактивная мощность зависит от его нагрузки:

$$Q = Q_0 + \Delta Q_p = Q_0 + \beta^2 Q_p,$$

где  $\Delta Q_p$  — реактивная мощность рассеяния при частичной нагрузке.

Магнитные потоки рассеяния асинхронного двигателя определяются в основном сопротивлением пути магнитных потоков в воздухе, изоляции и проводниках. Они совпадают по фазе с создающими их потоками, а индуктивные сопротивления обмоток, соответствующие этим потокам, практически не зависят от величины токов.

В приведенной выше формуле  $\beta$  — коэффициент загрузки двигателя, равный  $P/P_{\text{ном}}$ , где  $P$  — нагрузка двигателя в рассматриваемый момент,  $P_{\text{ном}}$  — номинальная мощность двигателя. На рис. 32 показана зависимость  $\cos \varphi$  двигателя от нагрузки. Из кривой на рис. 32 видно, что  $\cos \varphi$  двигателя, характеризующий относительное потребление реактивной мощности, достигает максимального значения при нагрузке, несколько меньшей номинальной. При дальнейшем увеличении нагрузки свыше номинальной  $\cos \varphi$  уменьшается, так как растут магнитные потоки рассеяния и потребление реактивной мощности увеличивается.

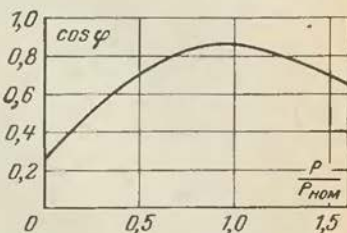


Рис. 32. Зависимость  $\cos \varphi$  асинхронного двигателя от нагрузки.

Влияние качества ремонта асинхронных двигателей на потребление реактивной мощности. Большое значение имеет увеличение воздушного зазора при обточке ротора. Нормально зазор между статором и ротором возрастает.

Таблица 8

Частота вращения, об/мин	Воздушный зазор, мм					
	при мощности двигателя, кВт					
	4,5—7	10—14	20—28	40—55	55—75	75—100
750	0,4	0,45	0,55	0,6	—	—
1000	0,4	0,4—0,45	0,45—0,55	0,55—0,6	0,6	—
1500	0,4	0,4	0,5	0,6	—	1,0

тает с увеличением мощности двигателя. Величина зазора для двигателей одной серии приведена в табл. 8.

Увеличение воздушного зазора приводит к увеличению потребления реактивной мощности. Например: при увеличении зазора асинхронного двигателя мощностью 28 кВт с частотой вращения 1500 об/мин синхронных с 0,5 до 2 мм  $\cos \varphi$  при номинальной нагрузке уменьшается примерно с 0,9 до 0,7 и потребление двигателем реактивной мощности возрастает с 13,5 квар до 28,5 квар, т. е. более чем в 2 раза.

К увеличению потребления реактивной мощности при некачественном ремонте приводят сдвиг стали ротора по оси двигателя, ухудшение изоляции стали, несвоевременная замена разработанных подшипников. Изменение обмоточных данных имеет особо большое значение. Так, уменьшение числа витков в статоре двигателя на 10% приводит к увеличению на 25% потребления реактивной мощности. Проверки показали, что у большинства отремонтированных двигателей ток х. х. превышает норму на 10—40% и более и скольжение увеличено.

*Мероприятия по уменьшению потребления асинхронными двигателями реактивной мощности.* При разработке и выполнении таких мероприятий рассматривают возможности уменьшения потребления реактивной мощности отдельными электроприводами машин и механизмов и группами их на участке, в цехе, комплексами электроприводов поточных и автоматических линий.

Одна из основных групп мероприятий заключается в повышении загрузки электропривода. Например, в механических цехах машиностроительных заводов металлорежущие станки работают с использованием 15—20% установленной мощности (в среднем по большому числу станков) при  $\cos \varphi \approx 0,5 \div 0,7$ . Повышение загрузки электропривода металлорежущих станков может быть осуществлено, например, путем передачи выполнения операции с более мощного станка на менее мощный, если мощность станка достаточна для этой цели. В механических цехах часто можно найти такую возможность. Можно сократить время между двумя операциями (межоперационный период), равномернее по времени загрузить станок, увеличить загрузку станка применением более эффективного инструмента, позволяющего увеличить подачу резца или частоту вращения шпинделя. Межоперационный период можно сократить механизировать



цией и автоматизацией вспомогательных работ, применением приспособлений, облегчающих и ускоряющих съем готовых деталей, подвод резца и т. д. Резко повышается загрузка оборудования механических цехов внедрением полуавтоматических и автоматических станков, станков с программным управлением, автоматических и поточных линий. Аналогичные возможности есть и в других производствах. Электрики не должны стоять в стороне от работы по увеличению загрузки машин, повышению их производительности. Этим достигаются повышение загрузки электропривода, уменьшение потребления реактивной мощности, экономия электрической энергии.

Такого же рода работа должна проводиться по электроприводу силовых машин: компрессоров, насосов, вентиляторов, дымососов и др. Эти электроприводы работают, как правило, с длительной равномерной или плавно изменяющейся нагрузкой. Здесь в работе должны находиться наиболее экономичные агрегаты и загрузка работающих агрегатов выбирается так, чтобы каждый из них имел наилучшие показатели по к. п. д. и  $\cos \varphi$ . Нужно при этом рассмотреть рабочие характеристики, т. е. зависимость к. п. д.,  $\cos \varphi$  и других показателей от загрузки как силовых машин, так и электропривода.

Снижение потребляемой двигателем реактивной мощности обеспечивается правильным выбором его коэффициента загрузки. Как недогрузка, так и перегрузка двигателя приводит к снижению к. п. д. и  $\cos \varphi$  двигателя и к увеличению потребления реактивной мощности (см. рис. 32).

Правильно следует выбрать и тип двигателя по исполнению. Так, асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором имеют  $\cos \varphi$  на 4—5% выше, чем двигатели такого же исполнения с фазным ротором и им следует отдать предпочтение при выборе двигателя, если не требуется регулировка частоты вращения или реостатный пуск под нагрузкой. Следует предпочесть асинхронные двигатели защищенного типа, если это допустимо по условиям окружающей среды, и устанавливать закрытые и взрывобезопасные двигатели лишь там, где это требуется правилами устройства и техники безопасности в электроустановках.

Уменьшения потребления реактивной мощности и повышения к. п. д. можно достичь путем автоматизации электропривода. Автоматизация включает все операции



по пуску и остановке двигателя, регулированию его частоты вращения изменением числа пар полюсов, включением сопротивлений в цепи фазного ротора или изменением частоты сети.

Установка ограничителей х. х. асинхронных двигателей в межоперационный период производится, если длительность этого периода превышает 10 с. Ограничитель включается в цепь управления магнитного пускателя или пускового контактора двигателя. Устанавливается ограничитель в конце рабочего хода машины или соединяется с органом управления станком. При необходимости во избежание быстрых повторных включений двигателя в цепи управления устанавливается реле времени. Реле времени выключает двигатель по истечении заданного времени после срабатывания ограничителя.

Следует сказать о замене незагруженных двигателей как о мероприятии, снижающем потребление реактивной мощности. Такая замена целесообразна, если загрузка двигателя не превышает 45%. При загрузке 70% замена считается явно нецелесообразной. В пределах загрузки двигателя 45—70% целесообразность замены двигателя должна быть обоснована технико-экономическим расчетом.

В электроприводах некоторых машин с длительной равномерной нагрузкой произвести замену двигателя повышенной мощности сравнительно легче, но и здесь замена должна быть тщательно проверена и обоснована расчетом. В электроприводах машин с переменной нагрузкой замена двигателей практикуется редко.

Если двигатель выбран по наиболее тяжелому режиму его работы, в других же режимах он работает с недогрузкой, то решение о замене такого двигателя на двигатель меньшей мощности может быть принято только на основании соответствующего расчета.

В электроприводах машин с переменной нагрузкой, когда в течение длительного времени загрузка не превышает 25—40%, целесообразно ввести в электрическую схему переключатель обмоток асинхронного двигателя с треугольника на звезду. Для выполнения этой схемы в сетях 380 В необходимо применить двигатель на напряжении 380/660 В, который при напряжении сети 380 В соединен в треугольник. Переключение обмоток статора на звезду понизит напряжение на фазу в 1,73 раза ( $\sqrt{3}$ ), т. е. до 220 В. Мощность двигателя уменьшится

при нагрузке до 40% номинальной при напряжении 380 В,  $\cos \varphi$  повысится до 0,7—0,75 вместо 0,3—0,4. При введении в схему переключателя электропривод может работать при напряжении 380 В и соединении обмоток в треугольник, если загрузка его превысит 40%. Такое переключение может быть выполнено вручную, при необходимости можно выполнить и схему с автоматическим переключением двигателя с треугольника на звезду и обратно. Наличие переключателя позволит снизить пусковой ток двигателя, если включить его через переключатель, т. е. при соединении обмоток в звезду. В сетях с напряжением трехфазной сети 220 В, когда асинхронные двигатели 220/380 В включаются в сеть при соединении обмоток в треугольник, возможно применение схемы с переключением двигателя с треугольника на звезду при малых нагрузках.

Снижение потребления реактивной мощности может быть достигнуто улучшением условий эксплуатации. Одно из них — поддержание в сети напряжения, близкого к номинальному. Отклонения напряжения от номинального отражаются на работе двигателей. Выше было показано, что снижение напряжения вызывает уменьшение вращающего момента двигателя, так как момент пропорционален квадрату напряжения; повышение напряжения сверх номинального вызывает увеличение потребления реактивной мощности. Для обеспечения нормальной работы двигателей напряжение в сети должно поддерживаться в допустимых пределах, регламентированных ГОСТ 13109-67. Это может быть обеспечено правильным выбором ответвления обмоток трансформаторов 6—10/0,4—0,69 кВ и регулированием напряжения на шинах электростанций и трансформаторных подстанций энергосистемы 6—10 кВ. Для регулирования напряжения могут также использоваться источники реактивной мощности: синхронные двигатели, конденсаторные батареи и синхронные компенсаторы.

Пример определения реактивной мощности асинхронного двигателя. Двигатель типа АО2-62-4 мощностью 17 кВт, с частотой вращения 1500 об/мин (синхронных), напряжением 380 В,  $\cos \varphi = 0,89$ , при нагрузке 100%,  $\eta = 89\%$  и  $\operatorname{tg} \varphi = 0,512$  соединен с машиной текстрипной передачей. Потребление реактивной мощности  $Q_{\text{ном}}$  при номинальной нагрузке равно:

$$Q_{\text{ном}} = \frac{P \operatorname{tg} \varphi}{\eta} = \frac{17 \cdot 0,512}{0,89} = 9,8 \text{ квар.}$$

Ток холостого хода замеряем опытным путем при снятых текстронах:

$$I_0 = 8,5 \text{ А.}$$

Потребление реактивной мощности при х. х. двигателя

$$Q_0 = 1,73 I_0 U 10^{-3} = 1,73 \cdot 8,5 \cdot 380 \cdot 10^{-3} = 5,6 \text{ квар.}$$

Реактивная мощность рассеяния

$$Q_p = 9,8 - 5,6 = 4,2 \text{ квар.}$$

Рассчитаем реактивную мощность, потребляемую двигателем при нагрузке 50%, по выражению

$$Q = Q_0 + \beta^2 Q_p; Q = 5,6 + 0,5^2 (4,2) = 5,6 + 1,05 = 6,65 \text{ квар.}$$

Потребление реактивной мощности данным асинхронным двигателем при нагрузке 50% составит, в процентах от номинального:

$$\frac{6,65}{9,8} 100 \% = 67,8.$$

Расчет произведен с некоторыми допущениями: не учтена разница между измеренным током х. х. и его реактивной составляющей, что дает погрешность в пределах 1—3%; не учтена разница в к. п. д. при 100 и 50% нагрузки, равная примерно 1%.

### 2.3. ДУГОВЫЕ ЭЛЕКТРОПЕЧИ

*Конструкции и технологический процесс дуговых электропечей.* Дуговые электропечи являются крупными потребителями реактивной мощности. Они применяются в промышленности для плавки стали, чугуна, цветных металлов, рудных материалов.

Выплавка стали в дуговых электропечах по СССР достигает 10% выплавки всей стали и непрерывно растет. Крупные дуговые сталеплавильные печи применяются для выплавки не только качественных, но и рядовых углеродистых марок стали, заменяя мартеновские печи. Проектируются электропечи емкостью 400 т.

Дуговая сталеплавильная электропечь, например, с емкостью ванны 50 т состоит из собственно печи, силового трансформатора мощностью 15 МВ·А с регулированием вторичного напряжения от 388 до 126 В, электромагнитного перемешивающего устройства, электрического распределительного устройства высокого напряжения, приводов механизмов печи, устройств управления и автоматики. Силовой трансформатор соединен с электропечью короткой сетью.

Упрощенная схема дуговой сталеплавильной электропечи показана на рис. 33. Реактивная мощность потреб-



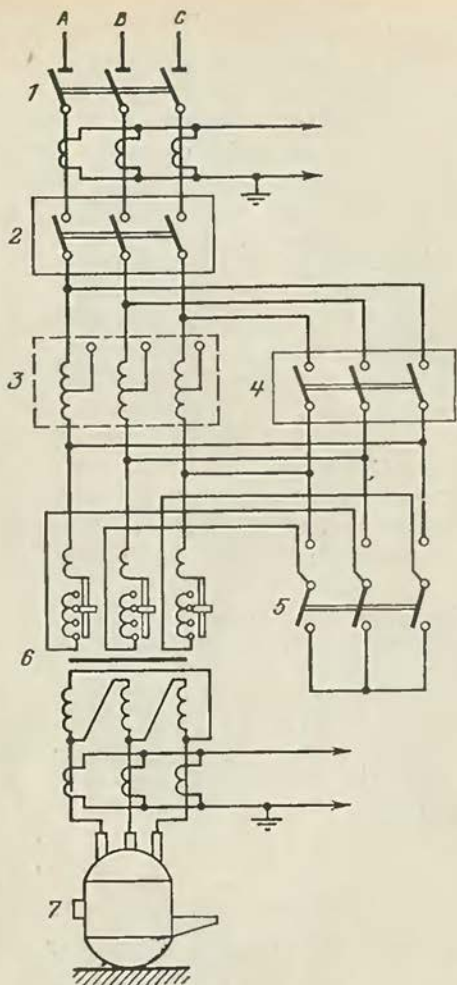


Рис. 33. Электрическая схема главной цепи сталеплавильной дуговой электропечи.

1 — разъединитель; 2 — главный выключатель; 3 — дроссель; 4 — выключатель, шунтирующий дроссель; 5 — переключатель первичных обмоток трансформатора с треугольника на звезду; 6 — печной трансформатор и автотрансформатор с переключаемым ступеней напряжения; 7 — электропечь.

ляется в основном трансформатором 6, дросселем 3, короткой сетью и самой электропечью 7. Технологический процесс дуговой сталеплавильной электропечи делится на два основных периода: расплавление и доводка. Для примера приводим электрический режим 100 т дуговой электропечи при выплавке нержавеющей стали:

	Напряжение, В	Ток, кА	Мощность, МВт
Расплавление . . . . .	417	30—34,6	18
Доводка . . . . .	365—300	30—21	15—12,5

В процессе плавки стали производится регулирование напряжения печного трансформатора и электрической мощности, подводимой к электродам дуговой электропечи. Для этой цели в цепи первичного (высокого) напряжения имеется автотрансформатор, а обмотки первичного напряжения могут переключаться с треугольника на звезду. Всего у трансформатора и автотрансформатора, обычно размещаемых в общем корпусе, имеется до 20 и более ступеней вторичного напряжения.

Электрические характеристики печных трансформаторов сталеплавильных дуговых электропечей показаны в табл. 9.

Руднотермические печи применяются в различных отраслях промышленности: для выплавки ферросплавов,

Питающий трансформатор	ДС-0,5А	ДСП-1,5	ДСП-3	ДСП-6
Мощность, кВ·А . . . . .	400	1000	1800	5000
Напряжение:				
ВН, кВ . . . . .	6—10	6—10	6—10	6—10
НН, В . . . . .	213—110	225—118	242—123,5	278—116,5
Вторичный ток, кА . . . . .	1,085	2,6	4,27	10,4
Потери х. х., кВт . . . . .	3	5,3	8,2	17,5
Ток х. х., % . . . . .	6	4,4	3,9	3,5
Напряжение к. з.:				
трансформатора, % . . . . .	7	8,2	7,4	6,4
трансформаторного агрегата, % . . . . .	34,7	33,1	25,1	16,2

Примечания: 1. Охлаждение трансформаторов 400—1800 кВ·А — естественное, 9000 кВ·А с переключением без нагрузки, 15 000—45 000 кВ·А — под нагрузкой.

2. Цифра в типе печи соответствует величине емкости печи, т.

в производстве фосфора, медно-никелевых руд, карбида кальция и др. Конструкции руднотермических печей весьма разнообразны в зависимости от назначения печей и технологического процесса. По устройству они напоминают сталеплавильные дуговые печи, но имеют существенные отличия. Руднотермические печи разделяются на две основные группы: рафинировочные, предназначенные для получения малоуглеродистых и безуглеродистых сортов ферросплавов и металлического марганца, и восстановительные печи, в которых производится процесс восстановления окислов в присутствии восстановителя, чаще всего углерода. В руднотермических печах применяются электрические схемы, сходные со схемами сталеплавильных электропечей. Печные трансформаторы руднотермических печей имеют более низкие вторичные напряжения и большие значения вторичных токов, превышающие 100 кА. Основные технические характеристики некоторых из печных трансформаторов руднотермических печей приведены в табл. 10.

Для плавки цветных металлов, главным образом меди и ее сплавов, применяются небольшие дуговые печи переменного тока.

*Потребление реактивной мощности дуговыми электропечами.* Величина индуктивного сопротивления печных

Таблица 9

ДСП-12	ДСП-25	ДСП-50	ДСП-80 (100)	ДСП-200
5000	9000	15 000	15 000 (32 000)	45 000
6—10 278—116,5	6—10 317,5—115	35 388—126	35 417—131 (480—150)	35 591,5—164,1
10,4	16,35	23,65	34,6 (38,5)	43,92
17,5 3,5	32,7 3,5	59,5 4,2	85,6 3,5	83,5 3,0
6,4	7	—	—	—
16,2	14,5	8,9	7,6	8,0

масляное, 5000—25 000 кВ·А — принудительное, масляно-водяное. Трансформаторы 400—



Трансформаторы	Печи				
	рафинировочные		восстановительные		
	мощностью кВ·А				
	2500	3500	10 500	16 500	63 000
Мощность, кВ·А . . . . .	2500	3500	10 500	3×5500	3×21 000
Число фаз . . . . .	3	3	3	1×3	1×3
Напряжение:					
первичное, кВ . . . . .	6—10	6—10	10—35	6—10	154√3
вторичное, В . . . . .	178—89	309—260	158—105	204—130	238,5—137
Вторичный ток (максимальный), кА . . . . .	13,0	8,4	48,5	60,0	111,84

трансформаторов определяется рядом условий, в том числе необходимостью ограничения токов к. з. между электродами через металл или шихту, в основном в период расплавления при обвале шихты. Токи к. з. в дуговых электропечах ограничивают до величины 2,5—3,5 номинального тока, используя индуктивное сопротивление трансформатора, короткой сети и дросселя. Повышенная индуктивность необходима в электропечах и для устойчивого горения дуг переменного тока.

Индуктивное сопротивление электропечей  $x$  обычно указывается в процентах от полного сопротивления вторичной цепи

$$x_{\%} = \frac{I_{\text{ном}} x}{U} 100.$$

Коэффициент мощности дуговой электропечи в этом случае равен:

$$\cos \varphi = \sqrt{1 - \frac{x_{\%}^2}{100}}.$$

Ток к. з.

$$I_k = I_{\text{ном}} \frac{100}{x_{\%}}.$$

В дуговых электропечах относительное индуктивное сопротивление установки должно быть не менее 30—50%.

В электропечах в начале расплавления индуктивное сопротивление оказывается иногда недостаточным для обеспечения устойчивости горения дуг. Последовательно с первичной обмоткой печного трансформатора включается тогда токоограничивающий дроссель, повышающий индуктивное сопротивление установки. На печах большой

емкости с трансформаторами более 10 000 кВ·А индуктивное сопротивление всей установки достаточно велико и дроссели не ставятся. Большая величина токов к. з. приводит к значительным толчкам нагрузки в сети и создает тяжелые условия работы эксплуатационного выключателя на стороне высокого напряжения и другой коммутационной аппаратуры.

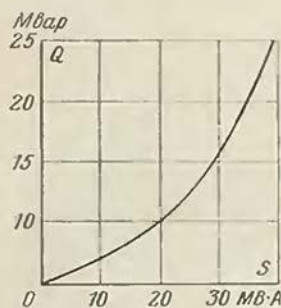


Рис. 34. Зависимость потребления реактивной мощности сталеплавильной дуговой электропечи от мощности трансформатора.

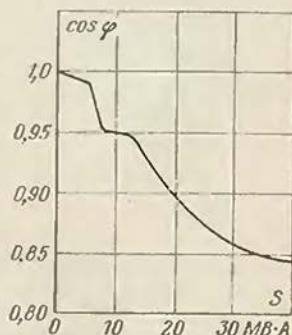


Рис. 35. Зависимость  $\cos \varphi$  сталеплавильной дуговой электропечи от мощности трансформатора.

При значительном индуктивном сопротивлении печной установки  $\cos \varphi$  оказывается невысоким. Расчетный  $\cos \varphi$  обычно принимается для сталеплавильных печей равным 0,8—0,9, в среднем 0,85. При  $\cos \varphi = 0,85$   $\operatorname{tg} \varphi = 0,62$ , т. е. реактивная мощность равна 62% активной мощности печи.

Реактивная мощность, потребляемая электропечью, увеличивается (при номинальной нагрузке) в зависимости от мощности трансформатора, как показано на рис. 34. При увеличении мощности трансформатора при номинальной нагрузке уменьшается величина  $\cos \varphi$ , как видно из рис. 35.

При увеличении тока дуги уменьшается  $\cos \varphi$ , как следует из рис. 36. Уменьшение  $\cos \varphi$ , как показано на рис. 36, при увеличении тока дуги тем меньше, чем выше вторичное напряжение трансформатора. Поэтому вторичное напряжение печных трансформаторов при увеличении их мощности повышается, как видно из табл. 9. Для нижних ступеней напряжения индуктивное сопротивление

контура печи является весьма высоким, и с точки зрения потребления реактивной мощности работа на этих ступенях является невыгодной. Особенно это сказывается на мощных печах. Поэтому снижение вторичного напряжения в периоде доводки плавки должно быть небольшим, и мощность дуги уменьшается путем уменьшения тока, как показано выше на примере электрического режима печи.

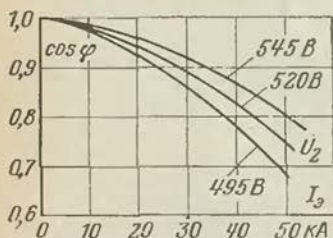


Рис. 36. Зависимость  $\cos \varphi$  сталеплавильной дуговой электропечи от вторичного напряжения трансформатора и тока дуги.

Руднотермические дуговые печи, в число которых входят ферросплавные печи, также потребляют значительную реактивную мощность. Режим работы ферросплавных и других руднотермических печей более спокойный, чем у сталеплавильных.

Как потребители реактивной мощности руднотермические печи сходны с дуговыми сталеплавильными электропечами, их  $\cos \varphi$  находится в пределах 0,7—0,9.

В дуговых сталеплавильных электропечах ориентировочно из общего индуктивного сопротивления 15—40% приходится на печной трансформатор и дроссель, 25—60% на короткую сеть и 25—35% на электроды и ванну электропечи.

В руднотермических мощных печах индуктивное сопротивление ориентировочно составляет: 15, 30—60 и 25—55% для трансформатора, короткой сети, включая контактные щетки на электродах, электродов и ванны электропечи соответственно.

Индуктивное сопротивление собственно дуговой электропечи объясняется взаимной индуктивностью фаз на электродах, наличием больших ферромагнитных масс и несимметричностью нагрузки на электродах.

*Мероприятия по уменьшению потребления дуговыми электропечами реактивной мощности.* Потребление реактивной мощности может быть снижено проведением ряда мероприятий. Прежде всего нужно учитывать, что важно сократить не только общее потребление реактивной мощности, но и удельное ее потребление на тонну продукции. С этой точки зрения целесообразно сокращение длительности плавки. Например, длительность периода расплав-



ления зависит от мощности трансформатора. По технологическим соображениям период расплавления может быть снижен до 1—1,5 ч, если мощность трансформаторов сталеплавильных электропечей довести до следующих величин:

Емкость электропечи, т	25	50	100	200
Мощность трансформатора, МВ·А . . . . .	15—20	20—28	30—40	55—80

Как видно из табл. 9, сейчас мощности трансформаторов дуговых сталеплавильных электропечей меньше. Есть еще ряд причин, ограничивающих мощность электропечей: стойкость огнеупоров, допустимые пределы колебаний напряжения в заводских сетях и сетях энерго-

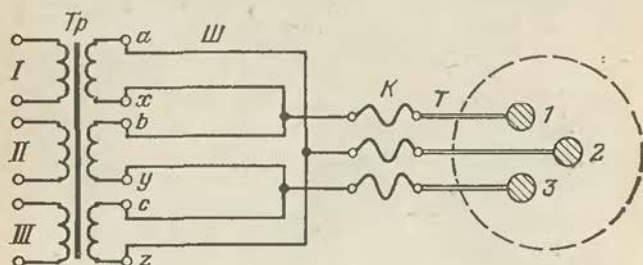


Рис. 37. Короткая сеть по схеме «треугольник на ошиновке трансформатора».

Тр — печной трансформатор; Ш — ошиновка короткой сети на трансформаторе; К — гибкие кабели; Т — трубчатая ошиновка на электродах; 1, 2, 3 — электроды.

систем. Мощность всех электропечей должна быть не выше 40% мощности заводской подстанции и не более 15—20% подстанции энергосистемы. На отдельных действующих электропечах производится замена трансформаторов или повышается их мощность путем реконструкции. Это позволяет снизить продолжительность расплавления и увеличить производительность электропечей. Нужно учитывать, что увеличение мощности трансформаторов связано с понижением  $\cos \varphi$  печной установки, как было показано на рис. 35.

Снижение удельного расхода реактивной мощности дают такие мероприятия, как повышение в допустимых пределах загрузки электропечей, сокращение продолжительности плавки применением более рациональной технологии, выравнивание графика нагрузки группы электропечей. Это означает, что периоды расплавления, напри-

мер, не должны совпадать по времени, чтобы максимумы реактивной мощности не суммировались.

Существенное уменьшение индуктивного сопротивления короткой сети и сокращение потребления реактивной мощности можно получить путем реконструкции короткой сети. Наиболее распространена схема короткой сети, приведенная на рис. 37. При этой системе шины прокладываются бифилярно (т. е. рядом проложены ши-

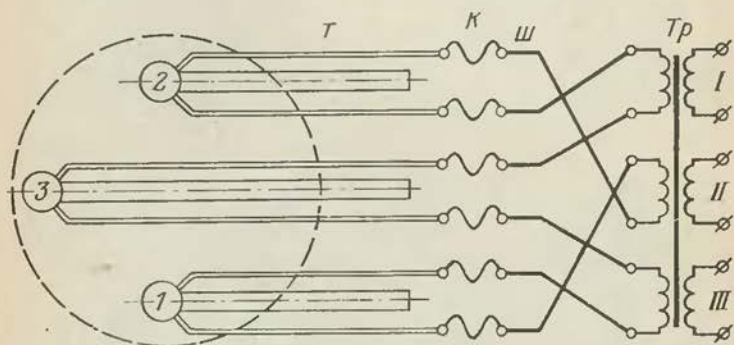


Рис. 38. Короткая сеть по схеме «несимметричный треугольник на электродах».

*Тр, Ш, К, Т, 1, 2, 3* — см. рис. 37.

ны от начала и конца обмотки трансформатора) в пределах трансформаторного помещения, до гибких кабелей, а участок гибких кабелей и ошиновка на электродах выполнены без взаимной компенсации и имеют значительную индуктивность. Были предложены и осуществлены схемы короткой сети «несимметричный треугольник» на печах 20 и 80 т (рис. 38) и схема «треугольник на электродах с четвертым рукавом» (рис. 39).

При схеме «несимметричный треугольник на электродах» на каждом рукаве электрододержателя помещаются два изолированных друг от друга фазных токоподвода (рис. 38). Токоподводы от начала и конца обмотки первой и третьей фаз трансформатора размещаются на двух смежных электродных рукавах в непосредственной близости, образуя бифилярные системы. Токоподводы от начала и конца обмотки второй фазы размещаются на крайних электродных рукавах без осуществления бифилярности. Такая схема, простая по исполнению и обслуживанию, дает существенное снижение среднего индук-

тивного сопротивления короткой сети по сравнению с обычной схемой, изображенной на рис. 37.

В схеме «треугольник на электродах с четвертым рукавом» (рис. 39), осуществлен бифилярный токоподвод от всех трех обмоток трансформатора путем введения в конструкцию электропечи четвертого рукава, несущего фазный электроподвод к первому электроду в обход

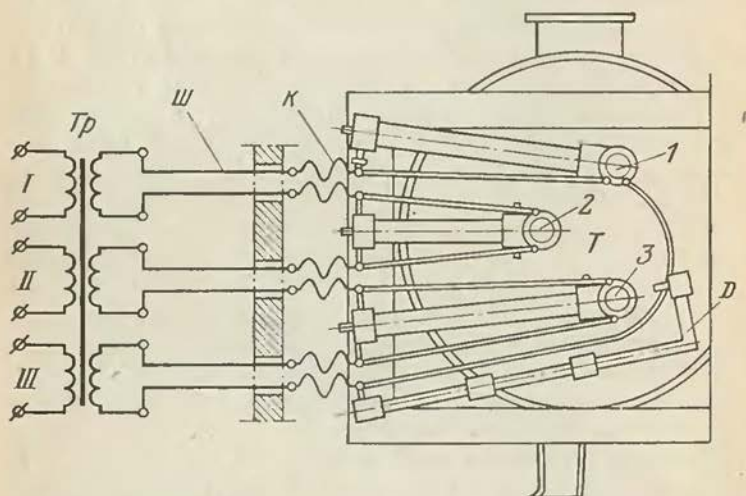


Рис. 39. Короткая сеть по схеме «треугольник на электродах с четвертым рукавом».

Tr, Ш, К, Т, 1, 2, 3 — см. рис. 37; Д — дополнительный четвертый рукав.

третьего электрода. Четвертый дополнительный рукав должен перемещаться синхронно с первым, что осуществляется механической связью этих двух рукавов. Эта схема дает некоторое дополнительное снижение индук-

Таблица 11

Индуктивное сопротивление	Схема короткой сети		
	Обычная	Несимметричный треугольник	Треугольник на электродах с четвертым рукавом
Фазы 1	0,0032	0,0026	0,0022
Фазы 2	0,0021	0,0019	0,0020
Фазы 3	0,0033	0,0026	0,0022
Среднее из трех фаз	0,0029	0,0024	0,0021



тивности короткой сети; главным ее достоинством является также меньшее различие в величинах индуктивных сопротивлений всех трех фаз. Недостатком этой схемы считается необходимость усложнения конструкции электропечи добавлением четвертого рукава.

В табл. 11 приводятся данные измерений индуктивных сопротивлений на 20-тонной дуговой электропечи короткой сети, выполненной по трем схемам (в омах).

При обычной схеме полное сопротивление первой фазы за счет взаимной индуктивности больше почти в 1,5 раза у первой фазы, чем у третьей. Поэтому ток первой фазы меньше, чем у второй и третьей, и максимален у третьей фазы. Полезная мощность в первой фазе наименьшая, а в третьей фазе — наибольшая.

Реконструкция короткой сети, особенно по схеме с четвертым рукавом, значительно уменьшает несимметрию токов. Проводится также мероприятие по переводу третьей фазы (с наибольшей нагрузкой током) на электрод, расположенный у завалочного окна (на первый). Эта фаза должна быть опережающей по отношению к фазе третьего электрода. Необходимые переключения фаз выполняются на стороне высокого напряжения (изменяется чередование фаз).

Явления перекоса фаз в большой мере имеются в руднотермических печах, в особенности на электропечах по производству карбида кальция, где электроды располагаются в одну линию.

В заключение рассчитаем величину реактивной мощности, потребляемой электропечью емкостью 25 т с трансформатором 9 МВ·А при номинальном напряжении и токе:

$$\begin{aligned} x &= 60\%; \cos \varphi = \sqrt{1 - \left(\frac{x\%}{100}\right)^2} = \\ &= \sqrt{1 - \left(\frac{60}{100}\right)^2} = \sqrt{1 - 0,36} = 0,8. \end{aligned}$$

Тогда

$$Q = S \sin \varphi = 9 \cdot 0,6 = 5,4 \text{ Мвар.}$$

Мы знаем, что при переходе на более низкую ступень напряжения  $\cos \varphi$  печной установки при той же величине тока снижается. Зависимость вторичного тока от напряжения и  $\cos \varphi$  имеет вид:

$$I_2 = U_2 \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{x^2}.$$

По этой формуле, задавшись оптимальным  $\cos \varphi$  и зная величину вторичного фазного напряжения  $U_2$ , можно вычислить оптимальную величину тока. Увеличение тока против этой величины будет сопровождаться снижением  $\cos \varphi$ . На другой ступени с напряжением  $U'_2$  максимальный действующий ток

$$I'_2 = I_2 \frac{U'_2}{U_2}.$$

Печь может работать и при токе, большем вычисленного, но, допуская это, нужно иметь в виду снижение  $\cos \varphi$ . Поддержание в печи оптимальных значений напряжения, тока и мощности является важнейшим для рационального потребления не только активной, но и реактивной мощности.

#### 2-4. ИНДУКЦИОННЫЕ ПЕЧИ

*Конструкции индукционных печей и технологические процессы их работы.* Индукционные печи широко используются в промышленности для плавки металлов и их сплавов. Они являются крупными потребителями реактивной мощности. Индукционные плавильные

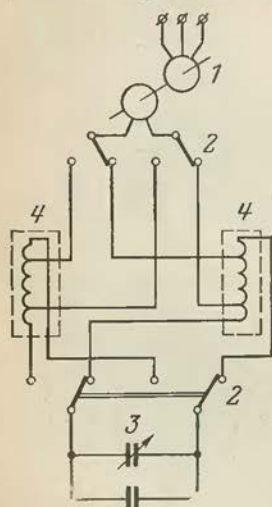


Рис. 40.

Рис. 40. Принципиальная электрическая схема силовых цепей тигельной плавильной печи повышенной частоты.

1 — машинный преобразователь; 2 — переключатели; 3 — батареи конденсаторов; 4 — индукционные печи.

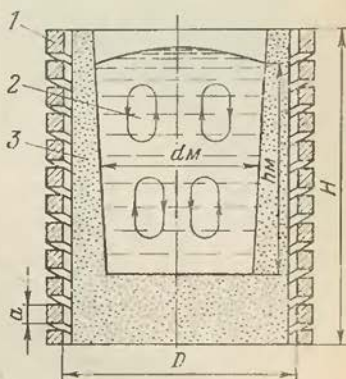


Рис. 41.

Рис. 41. Устройство тигельной индукционной плавильной печи.

1 — индуктор; 2 — металлическая садка; 3 — тигель.

печи разделяются на печи без сердечника — тигельные и печи с сердечником — каналные.

Принципиальная схема индукционной тигельной плавильной печи повышенной частоты представлена на рис. 40. В состав агрегата входит электромашинный генератор 1 и силовой колебательный контур, образуемый индуктором 4 и параллельно включенной конденсаторной батареей 3. Устройство тигельной печи показано на рис. 41. Печь состоит из тигля 3, изготовленного из огне-

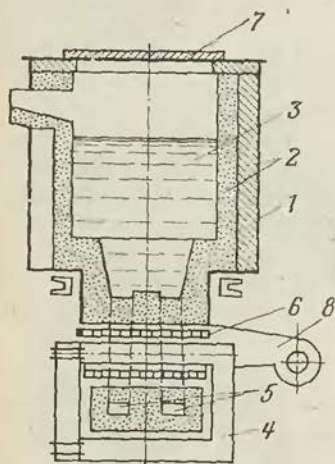


Рис. 42.

Рис. 42. Устройство каналной индукционной печи с вертикальными каналами для плавки алюминия.

1 — каркас печи; 2 — футеровка; 3 — ванна печи; 4 — магнитопровод; 5 — вертикальные каналы; 6 — индуктор; 7 — крышка; 8 — вентилятор.

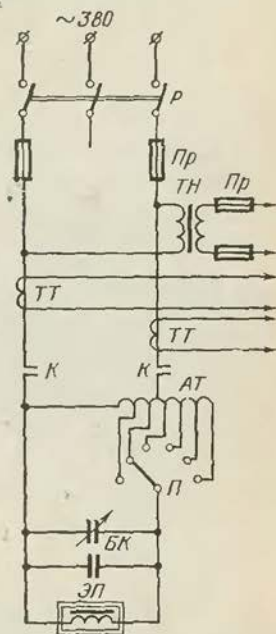


Рис. 43.

Рис. 43. Принципиальная электрическая схема силовых цепей каналной печи.

Пр — предохранители; Р — рубильник; ТН — трансформатор напряжения; ТТ — трансформаторы тока; К — контактор; АТ — автотрансформатор; П — переключатель; БК — батарея конденсаторов; ЭП — электропечь (индуктор).

упорного материала, индуктора 1 из медной трубки, охлаждаемой водой, корпуса печи, устройства, с помощью которого индуктор присоединяется к шинопроводу, питающему печь энергией, и свода. Иногда печь ограждается медным экраном для уменьшения потерь в металлических конструкциях печи. С той же целью для за-



мыкания внешнего магнитного поля индуктора печь имеет иногда внешний магнитопровод, расположенный по всему периметру окружности печи.

В канальных печах (рис. 42) один или несколько индукторов, имеющих сердечник с замкнутым магнитопроводом, расположены под печью или рядом с ней, ванна печи соединена с кольцевым каналом в кладке печи, охватывающим индуктор. Кольцевой канал создает короткозамкнутый виток из металла вокруг индуктора, в этом витке индуктируются электродвижущая сила и

Таблица 12

Данные электрооборудования	ИСТ-0,4	ИЧТ-1	ИЧТ-2,5	ИЧТ-10
Потребляемая мощность, кВт . . . . .	273	—	—	—
Мощность трансформатора, кВ·А . . . . .	—	360	1300	2500
Мощность электродвигателя, кВт . . . . .	350	—	—	—
Мощность генератора, кВт . . . . .	250	—	—	—
Напряжение питающей сети, кВ . . . . .	3—6	0,38	6—10	6—10
Напряжение повышенной частоты, В:				
генератора . . . . .	800	—	—	—
колебательного контура . . . . .	1470	500	1052	1045
Частота, Гц . . . . .	2400	50	50	50

Примечание. Цифра в типе печи соответствует величине емкости печи, т.

переменный ток, нагревающий металл. Канальные печи не имеют механизма наклона, они действуют непрерывно, выпуск расплавленного металла производится периодически. Выпускается только часть металла, остальной металл остается в ванне. Принципиальная электрическая схема однофазной канальной печи показана на рис. 43.

В табл. 12 представлены характеристики источников питания индукционных тигельных печей повышенной и промышленной частоты типов ИСТ и ИЧТ для плавки черных металлов для преобразователя ВТО 250-2500.

Технологический процесс плавки стали в индукционных тигельных печах состоит из двух периодов: периода

расплавления и периода доводки. Время межплавочного простоя занято выпуском металла, заправкой тигля и загрузкой новой порции шихты. Значения  $\cos \varphi$  для индукционных плавильных печей приведены ниже.

Тигельные печи (без сердечника) . . .	0,05—0,25
Канальные (с сердечником) при плавке:	
алюминия и его сплавов . . . . .	0,2—0,4
меди и ее сплавов с цинком . . . . .	0,4—0,5
бронзы, латуни . . . . .	0,6—0,8
никеля, чугуна . . . . .	0,7—0,8
цинка . . . . .	0,8—0,95

Тигельные печи (без сердечника) не могут из-за низкого  $\cos \varphi$  работать без конденсаторов. Параллельно с индуктором включается конденсаторная батарея, образующая с ним колебательный контур. Величина коэффициента реактивной мощности ( $\operatorname{tg} \varphi$ ) для тигельных печей обычно находится в пределах 10—20. Поэтому реактивная мощность в колебательном контуре во много раз превосходит активную мощность от источника питания — генератора или трансформатора.

Конденсаторная батарея печи регулируемая, так как индуктивность индуктора зависит от состояния металла. Обычно 40—50% всей емкости батареи конденсаторов составляет переменную часть, разбиваемую на ряд ступеней. Для большей точности регулирования  $\cos \varphi$  в пределах  $\pm 3\%$  число ступеней переменной части емкости батареи конденсаторов может составить 20—60. В новой серии регуляторов для управления конденсаторными батареями предусмотрено три исполнения на 32, 48, 64 ступени соответственно.

На индукционных печах повышенной частоты применяются специальные электротермические конденсаторы типа ЭСВ на 500, 1000, 2500 Гц с водяным охлаждением. Переход с одного напряжения на другое производится путем переключения с параллельного включения групп конденсаторов на последовательное. Батареи конденсаторов устанавливаются вблизи печи для уменьшения потерь в ошиновке. Данные некоторых печных конденсаторов приведены в табл. 13.

Для тигельных плавильных печей промышленной частоты (50 Гц) характерны меньший на 5—10% удельный расход электроэнергии и более высокий  $\cos \varphi$  (0,15—0,25). Принципиальная электрическая схема такой

Конденсатор	Номинальное напряжение, В	Частота, Гц	Номинальная мощность, квар	Емкость общая, мкФ	Число ступеней параллельного соединения
ЭСВ-750-0,5	750	500	70	39,6	2
ЭСВ-1000-0,5	1000	500	70	22,2	2
ЭСВ-500-1	500	1000	145	92,4	2
ЭСВП-500-1	500	1000	145	92,4	5
ЭСВ-750-1	750	1000	145	41,0	2
ЭСВП-750-1	750	1000	145	41,0	5
ЭСВ-375-2,5	375	2500	270	122,0	4
ЭСВП-375-2,5	375	2500	270	122,0	5
ЭСВ-500-2,5	500	2500	220	56,0	4
ЭСВП-500-2,5	500	2500	220	56,0	5
ЭСВ-750-2,5	750	2500	220	24,9	4
ЭСВП-750-2,5	750	2500	220	24,9	5

печи показана на рис. 44. В этих печах наблюдается особо интенсивное электродинамическое движение металла по сравнению с печами повышенной частоты и они рассчитываются на меньшую удельную мощность. Для

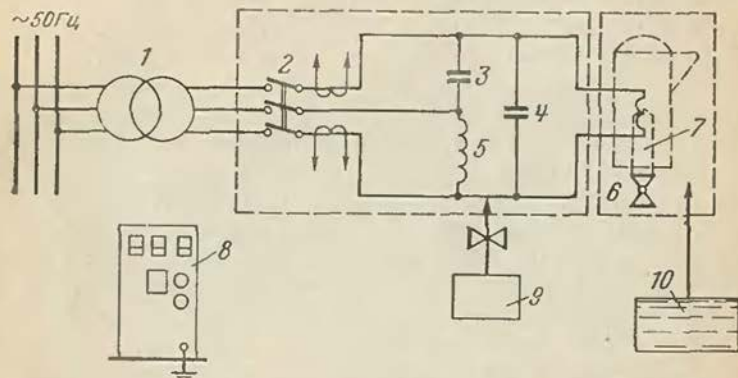


Рис. 44. Принципиальная электрическая схема тигельной плавильной печи промышленной частоты.

1 — печной трансформатор; 2 — рубильник; 3, 4 — батареи конденсаторов; 5 — дроссель; 6 — электропечь (индуктор); 7 — гидравлическая установка наклона печи; 8 — шкаф управления; 9 — вентилятор; 10 — водоохлаждающая установка.

частоты 50 Гц диаметр тигля при выплавке черных металлов не может быть меньше 600 мм, что соответствует емкости 1 т. Скорость плавки в индукционной печи зависит от соблюдения электрического режима. Необходимо поддерживать требуемую мощность в печном контуре



Таблица 14

Данные электрооборудования	ИАТ-0,4	ИАТ-1	ИАТ-2,5	ИАТ-6
Потребляемая мощность, кВт . . . . .	170	395	765	1100
Число фаз . . . . .	1	1	1	1
Частота, Гц . . . . .	50	50	50	50
Напряжение на индукторе номинальное, В . . . . .	350	475	1000	1052
Коэффициент мощности:				
без компенсации . . . . .	0,172	0,164	0,115	0,109
с компенсацией . . . . .	1	1	1	1
Питающий трансформатор:				
мощность, кВ·А . . . . .	180	400	1300	1300
первичное напряжение, кВ . . . . .	0,38	6—10	6—10	6—10
вторичное напряжение, В . . . . .	442—116	518—87	1160—290	1160—290

Примечание. Цифра в типе печи соответствует величине емкости печи, т

и высокий  $\cos \varphi$ , регулируя напряжение, ток и включая необходимую емкость конденсаторов.

В табл. 14 показаны данные электрооборудования индукционных плавильных печей промышленной частоты для плавки алюминия серии ИАТ. Эти печи имеют сравнительно простое электрооборудование промышленной частоты 50 Гц. Они также не могут работать без батарей конденсаторов ввиду крайне низкого  $\cos \varphi$ .

В табл. 15 показаны технические характеристики индукционных тигельных печей для плавки сплавов меди, в основном латуни. Эти печи также работают с батареями конденсаторов. Индукционные каналные печи серий ИЛК и ИЦК для плавки медных сплавов (латуни) и цинка имеют лучшие  $\cos \varphi$ , как видно из табл. 16. Однако и эти печи имеют низкий  $\cos \varphi$  и в схему печи включается конденсаторная батарея.

Кроме индукционных печей для плавки металлов широко применяются индукционные установки для нагрева металлов перед их обработкой, прокаткой, ковкой, штамповкой, сваркой, для термической обработки. Мощность отдельных нагревательных индукционных установок достигает 3000 кВт. Для питания этих установок используется ток промышленной частоты от сети, токи повышенной частоты от машинных преобразователей (до 8000 Гц) и токи высокой частоты (ТВЧ) до 40 МГц.

Таблица 15

Данные электрооборудования	ИЛТ-1	ИЛТ-2,5	ИЛТ-10	ИЛТ-25
Потребляемая мощность, кВт . . . . .	325	720	1290	3150
Число фаз . . . . .	1	1	1	1
Частота, Гц . . . . .	50	50	50	50
Напряжение на индукторе номинальное, В . . . . .	475	1052	1160	1710
Коэффициент мощности: без компенсации . . . . .	0,175	0,145	0,1	0,09
с компенсацией . . . . .	1	1	1	1
Температура перегрева, °С . . . . .	1200	1200	1200	1200
Питающий трансформатор:				
мощность, кВ·А . . . . .	400	1300	1300	6300
первичное напряжение, кВ . . . . .	6—10	6—10	6—10	6—10
вторичное напряжение, В . . . . .	518—87	1160—290	1160—290	2000—400

Примечание. Цифра в типе печи соответствует величине емкости печи, т.

Таблица 16

Данные электрооборудования	ИЛК-1	ИЛК-1,6	ИЛК-2,5	ИЛК-6	ИЛК-16	ИЛК-25	ИЛК-40
Потребляемая мощность, кВт . . . . .	250	750	750	316×4 1264	274×6 1644	540	700
Число фаз . . . . .	1	3	3	1	1	3	3
Частота, Гц . . . . .	50	50	50	50	50	50	50
Напряжение на индукторе номинальное, В . . . . .	340	450	470	475	475	500	500
Коэффициент мощности: без компенсации . . . . .	0,7	0,66	0,66	0,32	0,46	0,65	0,63
после компенсации . . . . .	1	0,94	0,95	1	1	0,95	1
Питающий трансформатор: мощность, кВ·А . . . . .	400	1000	1000	4×400	6×400	От сети	1000
первичное напряжение, кВ . . . . .	6—10	6—10	6—10	6—10	6—10	0,5	6—10
вторичное напряжение, В . . . . .	414—298	557—458	557—458	518—87	518—87	0,5	557—458
Вспомогательный трансформатор: мощность, кВ·А . . . . .	75	200	200	25	25	260	2×200

Примечание. Цифра в типе печи соответствует величине емкости печи, т.

*Мероприятия по уменьшению потребления реактивной мощности индукционными печами.* Коэффициент мощности индукционных печей настолько низок, что работа их без искусственной компенсации реактивной мощности невозможна. Это особенно относится к тигельным печам без сердечника. Однако достижение стабильно высокого  $\cos \phi$  в период плавки представляет собой серьезную задачу. Поэтому на некоторых установках выполняются электрические схемы автоматического регулирования режима плавки — поддержание мощности, напряжения, автоматическое подключение или переключение конденсаторов в зависимости от изменения индуктивности. В канальных печах также предусматривается иногда не только ручное, но и автоматическое управление, уменьшающее толчки реактивной нагрузки.

Индукционные печи в большинстве своем однофазные. Это создает неравномерную нагрузку фаз и, как следствие, повышенное потребление реактивной мощности. Для устранения этого недостатка применяются при питании печей токами промышленной частоты схемы с трехфазным трансформатором и симметрирующим устройством, изображенным на рис. 44. Симметрирующее устройство состоит из дросселя 5 и конденсаторной батареи 3. Задача его — балансирование нагрузки трех фаз сети от однофазной нагрузки печи.

Снижение потребления реактивной мощности индукционными печами достигается также повышением загрузки печей в допустимых пределах, улучшением укладки шихты, сокращением продолжительности плавки, применением лучшей технологии, выравниванием графика работы группы печей, равномерным распределением нагрузки от них по фазам.

## **2-5. ЭЛЕКТРОСВАРОЧНЫЕ УСТАНОВКИ**

Оборудование дуговой электросварки на переменном токе имеет очень низкий  $\cos \phi$ , при х. х. равный 0,1—0,2 и при нагрузке 0,5—0,6. Большое потребление реактивной мощности при дуговой электросварке обусловлено особенностями горения дуги на переменном токе. При частоте 50 Гц 100 раз в секунду происходит периодическое погасание и зажигание дуги при переходе значения напряжения через нуль. Повторное зажигание дуги в каждом полупериоде обеспечивается напряжением, которое называется пиком зажигания. Пик зажигания



в отдельные моменты превосходит в 2—3 раза нормальное напряжение дуги. Поэтому при рабочем (номинальном) напряжении дуги 25—30 В напряжение х. х. сварочных трансформаторов составляет 60—63 В (для ручной электросварки). Для устойчивой работы дуги требуется более высокое напряжение х. х., но оно ограничено требованиями техники безопасности — при ручной электросварке напряжение свыше 60 В опасно для сварщика. Для повышения устойчивости горения дуги применяются

специальные добавки в обмазку электродов легко ионизирующихся соединений калия, натрия и кальция, снижающие напряжение пика зажигания. Применяются также специальные аппараты, обеспечивающие импульсы напряжения — осцилляторы, импульсные генераторы, содействующие устойчивому горению. На устойчивое горение дуги на переменном токе неблагоприятно влияют колебания напряжения в цеховой сети.

Для обеспечения непрерывного горения дуги на переменном токе сварочная цепь должна иметь индуктивность, обеспечивающую угол сдвига фаз между напряжением и током, при котором  $\cos \varphi = 0,45 \div 0,55$ . Дело еще в том, что сварочные трансформаторы должны выдерживать частые к. з., при которых ток не должен превышать рабочий ток более чем в 1,5—2 раза. А для этого также нужна большая индуктивность сварочной цепи. Необходима при сварке и регулировка величины сварочного тока в зависимости от заданного режима.

Для выполнения изложенных требований сварочные трансформаторы имеют специальную конструкцию. При ручной дуговой электросварке на переменном токе трансформаторы должны иметь крутопадающую внешнюю характеристику, т. е. такую зависимость тока от напряжения, чтобы при росте тока напряжение х. х. быстро падало до величины рабочего напряжения (рис. 45). Сварочные трансформаторы с крутопадающей характеристикой делятся на две группы — на трансформаторы с нормальным магнитным рассеянием и дополнительной реактив-

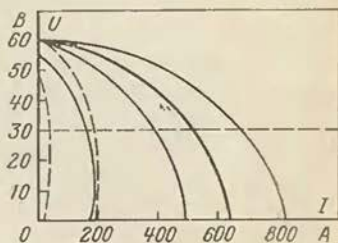


Рис. 45. Внешняя характеристика сварочного трансформатора типов ТС и ТСК.

ной катушкой (дросселем) и трансформаторы с повышенным магнитным рассеянием.

С нормальным магнитным рассеянием имеются сварочные трансформаторы типа СТЭ с отдельным дросселем РСТЭ на 300 и 500 А; типа СТН с встроенным дросселем на 350 и 500 А.

К трансформаторам второй группы с повышенным магнитным рассеянием относятся сварочные трансформаторы типа ТС на 300 и 500 А с подвижными вторичными обмотками. Регулирование тока достигается передвижением вторичной обмотки относительно первичной. Такой же трансформатор типа ТСК имеет встроенный конденсатор, повышающий  $\cos \varphi$  до величины 0,65. Сварочные трансформаторы второй группы типа СТШ на 300 и 500 А имеют подвижные магнитные шунты для регулировки. Все перечисленные сварочные трансформаторы однофазные, приспособленные для одного поста.

Изготавливаются и более мощные сварочные трансформаторы с повышенным магнитным рассеянием типа СТДН 2000 (вторичное напряжение х. х. 74,5—99,5 В, ток 200 А, мощность 200 кВ·А). Они предназначены для автоматической электросварки.

Специальные мощные сварочные трансформаторы применяются при электрошлаковой сварке, при которой электроды плавятся в шлаковой ванне.

Большие реактивные мощности потребляют машины для контактной электросварки: стыковой, точечной, шовной. Однофазные машины переменного тока имеют  $\cos \varphi < 0,5$ , а у машин с развитым вторичным контуром  $\cos \varphi < 0,2$ . В связи с этим резко увеличивается потребляемая из сети мощность, фазные напряжения в сети от неравномерной однофазной нагрузки имеют неодинаковую величину, т. е. наблюдается несимметрия фаз. Колебания напряжения на шинах 0,4 кВ подстанций, от которых питаются машины контактной сварки, достигают 25%. На предприятиях проводится ряд мероприятий, способствующих уменьшению потребления реактивной мощности при электросварке. При крупных масштабах сварочного производства большое значение имеют технологические мероприятия, имеющие целью увеличить загрузку сварочного оборудования, в том числе сварочных машин контактной сварки. К увеличению  $\cos \varphi$  ведут мероприятия по механизации и автоматизации электросварочных работ.



При ручной дуговой электросварке применяются также меры по улучшению загрузки сварочных трансформаторов. Нецелесообразно применять более мощные сварочные трансформаторы для работы на малых значениях сварочного тока. Применяются выключатели х. х. сварочного трансформатора различных конструкций и схем, в том числе встроенные в электрододержатель.

На сварочных контактных машинах принимают меры по уменьшению индуктивного сопротивления вторичного контура — избегают вводить в сварочный контур при сварке большие ферромагнитные массы.

В сварочных трансформаторах иногда применяется индивидуальная компенсация низкого  $\cos \varphi$  установкой конденсатора, например у упомянутого выше трансформатора типа ТСК.

#### **2-6. ЭЛЕКТРООСВЕТИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ С ГАЗОРАЗРЯДНЫМИ ЛАМПАМИ**

Установки с газоразрядными лампами являются существенными потребителями реактивной мощности. Как и электросварочные установки для ручной дуговой электросварки на переменном токе, газоразрядные лампы в основном обладают падающей вольтамперной характеристикой. В связи с этим включение ламп производится последовательно с балластным сопротивлением, обычно дросселем. Напряжение зажигания люминесцентной лампы (напряжение сети) обычно в 2 раза превосходит рабочее напряжение лампы и  $\cos \varphi$  для люминесцентных ламп с дросселем составляет 0,5. Широкое применение люминесцентного освещения во многих отраслях промышленности, когда общая установленная мощность ламп достигает сотен и даже тысяч киловатт, потребляемая реактивная мощность при  $\cos \varphi = 0,5$  в 1,73 раза больше активной мощности. Для ламп типа ДРЛ с дросселем коэффициент мощности равен 0,57 и реактивная мощность, потребляемая осветительными установками с лампами ДРЛ, без учета компенсации весьма велика.

В качестве балластного сопротивления реже применяются конденсаторы, выгодные с точки зрения потребления реактивной мощности. Пускорегулирующая аппаратура (ПРА) для газоразрядных ламп с конденсаторами в качестве балластного сопротивления менее долговечна, так как конденсаторы имеют меньший срок службы, чем дроссели.



Встроенные конденсаторы для индивидуальной компенсации реактивной мощности применяются в некоторых типах ПРА для газоразрядных ламп, повышают  $\cos \varphi$  до 0,92—0,95.

Выпускаемые ПРА рассчитаны на включение и регулирование одной-двух газоразрядных ламп. Однако можно рассчитывать, что найдет применение в промышленности разработанная система группового включения и регулировки люминесцентных ламп.

В промышленных осветительных электроустановках с газоразрядными лампами применяется групповая компенсация реактивной мощности. Для ламп ДРЛ мощность групповых конденсаторных батарей выбирается из расчета 1,1 квар на 1 кВт установленной мощности, для люминесцентных ламп 1,2—1,3 квар на 1 кВт с расчетом увеличения  $\cos \varphi$  до 0,95. Электротехнической промышленностью специально для осветительных установок выпускаются комплекты конденсаторные установки (ККУ) типа УК-0,38, мощностью 36, 54, 72, 108 и 144 квар, смонтированные в стальных шкафах.

## 2-7. УДЕЛЬНОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКАМИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Потребление реактивной мощности определяется, как было установлено, конструктивными особенностями и режимом работы электроприемников.

Для основных потребителей реактивной мощности удельное потребление, квар/100 кВт, изменяется при номинальной нагрузке в следующих пределах (ориентировочно):

Силовые трансформаторы (с учетом многократной трансформации) . . . . .	15—30
Асинхронные двигатели . . . . .	40—120
Дуговые электропечи . . . . .	45—100
Индукционные печи . . . . .	100—2000
Сварочные трансформаторы . . . . .	130—200
Газоразрядные лампы . . . . .	140—170

Из рассмотрения приведенных данных следует, что реактивная мощность, потребляемая большинством приемников, или приближается по величине к активной мощности, или значительно превосходит ее. Если учесть х. х. силовых трансформаторов, асинхронных двигателей, сварочных трансформаторов, при котором они потребля-

ют в основном реактивную мощность, пусковые реактивные токи асинхронных и синхронных двигателей (особенно при частых пусках), резкие колебания потребления реактивной мощности при к. з. как аварийных, так в особенности эксплуатационных (при работе сталеплавильных дуговых электропечей), станет ясной примерная картина потребления реактивной мощности.

В целом по стране можно оценить ориентировочно общее потребление, а следовательно, и генерацию реактивной мощности, равной 70—80% активной.

## ГЛАВА 3

### КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

#### 3-1. ИСТОЧНИКИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

В промышленных электроустановках при нормальных условиях у большинства потребителей преобладает активное и индуктивное сопротивление, а значительной емкостью обладают немногие электроприемники. Поэтому потребление промышленными предприятиями реактивной мощности при естественных условиях велико и приближается по своей величине к потреблению активной мощности. Средневзвешенный естественный  $\cos \varphi$  на многих предприятиях имеет значение 0,8—0,7 и ниже.

Для компенсации потребляемой в сетях промышленных предприятий реактивной мощности используются ее источники (генераторы). Источниками реактивной мощности на промышленных предприятиях являются генераторы электростанций, синхронные компенсаторы, синхронные двигатели, конденсаторные батареи, тиристорные компенсаторы.

Наиболее распространенными источниками реактивной мощности на промышленных предприятиях являются синхронные двигатели и батареи конденсаторов поперечного включения. Синхронные двигатели, являющиеся приводами механизмов и машин, одновременно могут быть использованы в качестве источников реактивной мощности. В этом состоит их основное преимущество по сравнению с другими источниками реактивной мощности, которые устанавливаются специально для целей компенсации реактивной мощности.

Самое широкое применение в качестве источников реактивной мощности на промышленных предприятиях получили конденсаторные батареи.

### 3.2. СИНХРОННЫЕ КОМПЕНСАТОРЫ

Синхронные компенсаторы являются синхронными машинами — генераторами реактивной мощности. Они работают в режиме синхронных двигателей на х. х. Отсутствие механической нагрузки позволяет выполнять синхронные компенсаторы со значительно меньшей по сравнению с синхронными двигателями величиной воздушного зазора и с облегченным валом.

На промышленных предприятиях синхронные компенсаторы имеют ограниченное применение.

Удельные затраты на установку синхронных компенсаторов значительно выше, чем косинусных конденсаторов высокого напряжения. Потери активной мощности у синхронных компенсаторов в несколько раз превышают потери в конденсаторных установках.

Преимуществом синхронных компенсаторов является возможность плавно и автоматически регулировать выработку реактивной мощности и воздействовать на уровень напряжения у потребителей. Поэтому мощные синхронные компенсаторы широко применяются на подстанциях энергосистем.

### 3.3. СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

*Конструкции и технические характеристики синхронных двигателей.* Синхронные двигатели преимущественно средней и большой мощности широко применяются в народном хозяйстве. Они используются в промышленных предприятиях как источники (генераторы) реактивной мощности.

Синхронные машины являются обратимыми, так как они могут работать в режиме генератора и в режиме двигателя. Статор синхронного двигателя по своему устройству принципиально не отличается от статора асинхронного двигателя. Он состоит из магнитопровода, на котором расположена в пазах трехфазная обмотка, создающая вращающееся магнитное поле. Ротор синхронного двигателя представляет собой электромагнит, обмотки которого питаются постоянным током от спе-



циального генератора постоянного тока или от выпрямителя. Постоянный ток подводится к ротору через неподвижные щетки, скользящие по контактным кольцам, укрепленным на валу ротора. Для более тихоходных двигателей (до 1000—1500 об/м) ротор имеет конструкцию с выступающими полюсами (явнополюсный ротор), для быстроходных двигателей с частотой вращения 1500—3000 об/м ротор имеет вид цилиндра без выступающих полюсов (неявнополюсный ротор).

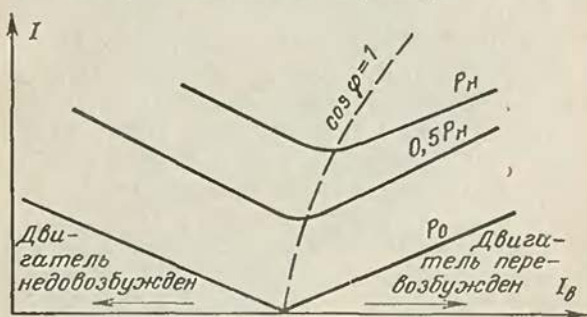


Рис. 46. U-образные характеристики синхронного двигателя.

Статор и ротор синхронного двигателя имеют одинаковое число полюсов. Обычно применяется прямой запуск синхронного двигателя от полного напряжения сети. На роторе в полюсных наконечниках имеется дополнительная короткозамкнутая обмотка типа беличьей клетки. Пуск синхронного двигателя производится так же, как асинхронного, с отключенным возбуждением ротора, пусковой ток достигает величины 5—7  $I_{ном}$ . По достижении ротором частоты вращения, близкой к синхронной, включают постоянный ток в обмотку ротора и двигатель входит в синхронизм. Вращающее магнитное поле статора ведет за собой ротор и частота вращения ротора становится равной частоте вращения магнитного поля статора. Широко применяется схема пуска с глухоприсоединенным возбудителем без промежуточного контактора. Синхронный двигатель при постоянной механической нагрузке на валу имеет примерно постоянную величину активной мощности, потребляемой из сети, при различных значениях  $\cos \varphi$ . Поэтому, используя полную мощность синхронного двигателя, увеличивая ток возбуждения, можно перевозбуждением двигателя пере-

вести его в генераторный режим, при котором он генерирует реактивную мощность. На рис. 46 показана зависимость полного тока  $I$  в обмотке статора синхронного двигателя от тока возбуждения  $I_v$  при различных нагрузках. Эта зависимость называется  $U$ -образной характеристикой синхронного двигателя. Перевозбуждение синхронного двигателя возможно до достижения полным током номинальной величины. Работа синхронного двигателя с перевозбуждением должна быть поэтому предусмотрена при конструировании двигателя. Для специальных крупных синхронных двигателей возможность работы их с перевозбуждением предусматривается при их заказе. Синхронные двигатели, нормально нагруженные, могут работать с опережающим  $\cos \varphi$ , равным 0,9. Это означает, что реактивная мощность, генерируемая синхронным двигателем, равна  $S \sin \varphi = 0,436 S$ .

Синхронные двигатели конструктивно значительно сложнее асинхронных, необходимы более сложные пусковые устройства. Считается целесообразным их применение при мощности от 50—100 кВт и более в установках, где не требуются частые пуски и возможен запуск двигателя без нагрузки, например компрессоры, машинные преобразователи, вентиляторы, воздуходувки, некоторые насосы, мельницы, дробилки, прокатные станы и другие.

Данные синхронных двигателей, изготавливаемых нашей промышленностью, приведены в табл. 17.

*Сравнение синхронных и асинхронных двигателей.* Синхронные двигатели имеют по сравнению с асинхронными ряд преимуществ [Л. 11], а именно:

возможность использования в качестве компенсирующего устройства в режиме генерации реактивной мощности, при сравнительно небольших дополнительных первоначальных затратах. Дело в том, что при работе с опережающим  $\cos \varphi$  полная мощность синхронного двигателя  $S$ , определяющая его стоимость, растет в гораздо меньшей степени, чем реактивная мощность  $Q$ , отдаваемая двигателем в сеть. При опережающем  $\cos \varphi$ , равном 0,9, реактивная мощность  $Q$  составляет около 50% активной мощности, а полная мощность  $S$  равна  $1,12P$ , т. е. возрастает всего на 12%;

возможность изготовления на низкие числа оборотов, что упрощает электропривод машин, так как отпадает необходимость в промежуточных передачах;

Таблица 17

Серия	Габарит	Число полюсов	Напряжение, В	Мощность, кВт							К. п. д., %						
				при частоте вращения, об/мин													
				1500	1000	750	600	500	375	300	1500	1000	750	600	500	375	300
ЕСД	91	4, 6	380	55	55	—	—	—	—	—	—	93	92	—	—	—	—
ЕСД	92	4	380	75	—	—	—	—	—	—	—	93	—	—	—	—	—
ДС	101	6, 8	380	—	75	55	—	—	—	—	—	92	90	—	—	—	—
ДС	102	6, 8	380	—	100	75	—	—	—	—	—	92	90	—	—	—	—
ДС	103	6, 8	380	—	125	100	—	—	—	—	—	92	91	—	—	—	—
ДС	104	6, 8	380	—	160	125	—	—	—	—	—	92	92	—	—	—	—
ДС	113	8	380	—	—	160	—	—	—	—	—	—	92	—	—	—	—
СД	12—24	6, 8, 10, 12	380	—	250	200	160	125	—	—	—	92	92	91,5	90	—	—
СД	12—29	6, 8, 10, 12	380	—	320	250	200	160	—	—	—	92,5	92,5	92	90,5	—	—
СД	12—36	6, 8, 10, 12	380	—	400	320	250	200	—	—	—	93	93	92,5	91,5	—	—
СД	12—36	6, 8	6000	—	320	250	—	—	—	—	—	92	92	—	—	—	—
СД	12—42	4	6000	500	—	—	—	—	—	—	93,5	—	—	—	—	—	—
СД	12—46	6, 8, 10, 12	380	—	500	400	320	250	—	—	—	94	93,5	93	92	—	—
СД	12—52	4	6000	630	—	—	—	—	—	—	94,5	—	—	—	—	—	—
СД	13—20	16, 20	380	—	—	—	—	—	125	100	—	—	—	—	—	—	88
СД	13—25	16	380	—	—	—	—	—	160	—	—	—	—	—	—	—	88,5
СД	13—34	16	380	—	—	—	—	—	200	—	—	—	—	—	—	—	89,5
СД	13—34	6, 8, 10	6000	—	500	400	320	—	—	—	—	93	93	92	—	—	—
СД	13—42	6, 8, 10, 12	6000	—	630	500	400	320	—	—	—	94	93	92	92	—	—
СД	13—52	6, 8, 10	6000	—	800	630	500	—	—	—	—	94,5	94	93	—	—	—
СД	13—46	4	6000	800	—	—	—	—	—	—	94,5	—	—	—	—	—	—
СД	13—55	4	6000	1000	—	—	—	—	—	—	95	—	—	—	—	—	—

Примечания: 1. Значения к. п. д. двигателей ориентировочные.  
2.  $\cos \varphi = 0,9$  опережающий для всех двигателей.



меньшая зависимость вращающего момента от колебаний напряжения. У синхронного двигателя момент пропорционален напряжению в первой степени, а у асинхронного — во второй степени;

возможность повышения напряжения в сети путем форсировки возбуждения синхронных двигателей, что способствует устойчивой работе энергосистемы;

повышение производительности машин, снабженных синхронным электроприводом, так как скорость синхронного электродвигателя не зависит от нагрузки, асинхронные двигатели снижают число оборотов при нагрузке за счет скольжения;

синхронные двигатели имеют меньшие суммарные активные потери, чем асинхронные, главным образом за счет меньших потерь в стали. Поэтому к. п. д. синхронных двигателей выше, чем асинхронных, как показывают следующие данные:

	Двигатель	
	синхронный	асинхронный
Мощность, кВт . . . . .	320	320
Напряжение, В . . . . .	6000	6000
Частота вращения, об/мин . .	1000	1000
Полные потери, кВт . . . . .	21,2	25,5
К. п. д., % . . . . .	93,8	92,6

Стоимость синхронных двигателей немногим выше асинхронных, однако при сравнении стоимостей необходимо учесть затраты на конденсаторы, установка которых требуется для повышения  $\cos \varphi$ . Подсчеты показывают, что затраты по установке синхронных двигателей ниже, чем асинхронных с конденсаторами.

*Использование синхронных двигателей в качестве дополнительных источников генераторов реактивной мощности.* Синхронные двигатели могут работать при опережающем значении  $\cos \varphi$  и отдавать в сеть реактивную мощность. При отсутствии необходимости в этом синхронные двигатели должны работать при  $\cos \varphi = 1$ , не потребляя реактивной мощности и не отдавая ее в сеть.

В табл. 17 были приведены технические характеристики выпускаемых промышленностью синхронных двигателей от 55 до 1000 кВт, которые в основном рассчитаны на работу с опережающим  $\cos \varphi$ , равным 0,9. При такой величине  $\cos \varphi$  синхронный двигатель может генерировать реактивную мощность  $Q$ , равную примерно 50% номинальной активной мощности двигателя  $P$ . При неполной нагрузке синхронного двигателя отдача реактивной

мощности может быть увеличена. При этом для расчета наибольшей компенсирующей способности двигателя можно применить выражение, выявленное Л. В. Литваком (Л. 11),

$$q_{\text{макс}} = \left[ \sin \varphi + (1 - \beta) \left( \frac{\sin \varphi}{48 \sin \varphi - 32} + 0,4 \right) \right] \cdot 100.$$

Здесь  $q_{\text{макс}}$  — максимальная компенсирующая способность двигателя, %:

$$q_{\text{макс}} = \frac{Q}{S} 100;$$

$\beta$  — коэффициент загрузки двигателя.

**Пример.** Требуется определить наибольшую компенсирующую способность синхронного двигателя при  $\cos \varphi = 0,8$  ( $\sin \varphi = 0,6$ ) и  $\beta = 0,5$ , т. е. при нагрузке 50%:

$$q_{\text{макс}} = \left[ 0,6 + (1 - 0,5) \left( \frac{0,6}{48 \cdot 0,6 - 32} + 0,4 \right) \right] 100 = 71,1 \%$$

Максимальная компенсирующая способность синхронного двигателя достигается при номинальном значении тока возбуждения. При уменьшении тока возбуждения компенсирующая способность двигателя резко падает. По опытным данным [Л. 11] при уменьшении тока всего на 20% компенсирующая способность двигателя при  $\cos \varphi = 0,8$  и  $\beta = 0,7$  падает на 45%.

Величина реактивной мощности  $Q$ , которую синхронный двигатель может генерировать в сеть при номинальной нагрузке и номинальном опережающем  $\cos \varphi$ , при номинальном значении тока возбуждения считается номинальной реактивной мощностью синхронного двигателя.

Реактивная мощность, которую синхронный двигатель может генерировать, определяется условиями нагрева статора и ротора. Эта мощность зависит от коэффициента загрузки двигателя по активной мощности и от напряжения сети, к которой он присоединен. При заданном коэффициенте загрузки двигателя реактивная мощность, которую он может генерировать, при снижении напряжения сети возрастает и при повышении снижается, если изменение напряжения сети невелико. Так, например, синхронный двигатель типа СДН на напряжение 6 и 10 кВ при  $\beta = 0,9$  и при снижении напряжения сети по сравнению с номинальным на 5% может генерировать реактивную мощность, равную 130% номинальной, без

перегрева статора и ротора. Напротив, при повышении напряжения на 5% допустимая величина генерируемой двигателем реактивной мощности уменьшается до 96%. При снижении загрузки синхронного двигателя генерируемая им реактивная мощность может быть увеличена.

Для поддержания уровня напряжения в сети применяется релейная форсировка возбуждения синхронного двигателя, которая срабатывает при кратковременных снижениях напряжения в сети до 85%, при этом продолжительность форсировки принимается обычно до 1 мин, а соотношение тока возбуждения при форсировке к номинальному току равным 2.

*Активные потери на генерацию реактивной мощности синхронными двигателями.* Коэффициент полезного действия синхронных двигателей зависит от их нагрузки, как и у асинхронных двигателей (см. рис. 32). Генерация реактивной мощности при опережающем  $\cos \varphi$  сопровождается определенными дополнительными активными потерями  $\Delta P$ . Эти потери, отнесенные к реактивной мощности  $Q_n$ , генерируемой двигателем, характеризуют экономичность синхронного двигателя как генератора реактивной мощности.

Величина дополнительных потерь активной мощности на генерацию синхронным двигателем реактивной мощности  $\Delta P$ , кВт, может быть определена по формуле

$$\Delta P = D_1 \alpha + D_2 \alpha^2,$$

где  $\alpha = Q/Q_{\text{ном}}$  — отношение генерируемой двигателем реактивной мощности  $G$  к номинальной  $Q_{\text{ном}}$ ;  $D_1$  и  $D_2$  — параметры синхронного двигателя, кВт, величина которых зависит от типа двигателя, его мощности и частоты вращения.

По проведенным во ВНИИЭ исследованиям величина указанных параметров остается практически неизменной в пределах изменения коэффициента загрузки двигателя по активной мощности от 0,5 до 1 и изменения напряжения сети от 95 до 110% номинального.

Величина удельных потерь активной мощности на генерацию  $\Delta P/Q_{\text{ном}}$ , характеризующая экономичность синхронного двигателя как средства компенсации реактивной мощности, возрастает при снижении мощности двигателя и его частоты вращения.

Для двигателей серии СДН на номинальное напряжение 6 кВ мощностью 1000 кВт зависимость удельно-



го расхода активной мощности от частоты вращения характеризуется следующими данными:

Частота вращения, об/мин . . . . .	1000	750	500	250	167
Удельные потери, кВт/Мвар . . . . .	17,8	18,2	24,5	33,7	38,4

Зависимость удельного расхода активной мощности от мощности двигателя для двигателей серии СДН на напряжение 6 кВ с частотой вращения 750 об/мин приведена ниже:

Мощность двигателя, кВт	10 000	6300	4000	2000	1000
Удельные потери, кВт/Мвар . . . . .	8,9	10,4	11,2	14,9	18,2

Значения параметров  $D_1$  и  $D_2$  для синхронных двигателей серий СДН, СТДН на напряжение 6 и 10 кВ и СД и СДЗ на напряжение 380 В определены в результате проведенных во ВНИИЭ исследований (см. приложение к утвержденным Госэнергонадзором «Указания по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях»).

*Выбор синхронных двигателей для электроприводов машин.* При конструировании новых машин важное место занимает правильный выбор типа электродвигателя; при реконструкции электропривода и замене электродвигателя также приходится решать этот вопрос. Для уменьшения потребления реактивной мощности во многих случаях могут быть применены синхронные двигатели. До мощности 50 кВт на переменном токе в подавляющем большинстве случаев выбор останавливается на асинхронных двигателях, а при мощности свыше 50 кВт с ними необходимо сравнивать синхронные двигатели. Выше говорилось о преимуществах синхронных двигателей над асинхронными и некоторых областях их применения. До настоящего времени еще редко применяют синхронные двигатели в установках, где требуется регулирование частоты вращения, однако и здесь могут быть использованы синхронные двигатели в сочетании с регулируемым электрическими и гидравлическими муфтами. При мощности 50—200 кВт во многих случаях и до 500 кВт предпочтительно применение синхронных двигателей на низкое напряжение, обычно на 380 В. Такие двигатели промышленностью изготавливаются. При мощности свыше

500 кВт выбираются двигатели на напряжение 6 кВ. Выбор синхронного двигателя на напряжение 380 В имеет целью компенсацию реактивной мощности в сети 380 В, потребляемой асинхронными двигателями и другими установками, разгрузку сети и силовых трансформаторов 6—10/0,4 кВ, уменьшение мощности трансформаторов или их числа и затрат на сооружение сети и подстанций. При выборе типа электродвигателя нужно не только учитывать общие соображения, но и произвести технико-экономический расчет и проверку соответствия технических данных двигателя требуемым.

*Синхронизированные асинхронные двигатели.* В некоторых отраслях промышленности, в особенности в нефтяной и угольной, в послевоенные годы была применена синхронизация асинхронных двигателей. При этом фазный ротор асинхронных двигателей питается выпрямленным током от силового выпрямителя через трехфазный трансформатор, понижающий напряжение сети до 20 В. Двигатель работает со щетками, постоянно наложенными на кольца. Двигатель запускается как асинхронный, обычно при помощи пускового реостата. После разворота до полной скорости и установления режима привода двигателя переводится в синхронный режим. При этом в случае резкого снижения напряжения сети или толчка нагрузки двигателя довольно часто выходили из синхронизма. Это было серьезным недостатком и препятствовало широкому распространению синхронизации асинхронных двигателей. Однако основным недостатком синхронизированных двигателей является их низкая перегрузочная способность. Кроме того, максимальный вращающий момент синхронизированного асинхронного двигателя очень мало отличается от номинального момента. Поэтому предельная загрузка таких двигателей недопустима. Синхронизация асинхронных двигателей может быть применена только в виде исключения при соответствующих технических и экономических обоснованиях.

### **3-4. КОНДЕНСАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ**

Наиболее распространенными источниками реактивной мощности в промышленных электроустановках являются косинусные конденсаторы.

Конденсаторы устанавливаются на подстанциях предприятия на стороне высокого (6—10 кВ) и низкого

(0,22—0,66 кВ) напряжения, а также у распределительных пунктов в цехах или отдельных приемников электрической энергии.

Подключение конденсаторов производится параллельно с индуктивным сопротивлением сети (поперечная компенсация) и последовательно-продольная компенсация.

*Конструкции отечественных конденсаторов и их данные.* Общий вид косинусного конденсатора представлен на рис. 47. Конденсатор состоит из герметического металлического корпуса, в котором размещаются секции. Секция кон-

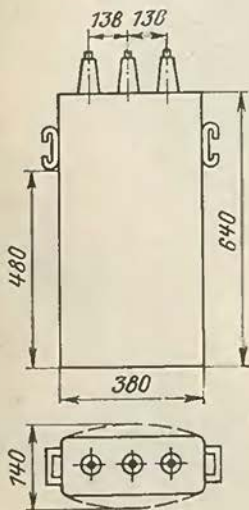


Рис. 47. Общий вид косинусного конденсатора.

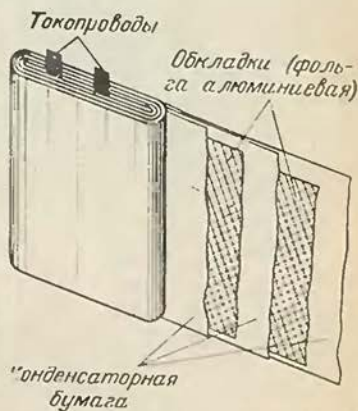


Рис. 48. Секция косинусного конденсатора.

денсатора (рис. 48) представляет собой катушку, изготовленную путем намотки двух лент алюминиевой фольги, разделенных конденсаторной бумагой, на цилиндрическую оправу. После намотки секциям придается плоская форма для удобства размещения их в корпусе. Ленты из алюминиевой фольги являются обкладками конденсатора и имеют выводы. Секции конденсатора набираются в пакет и соединяются между собой последовательно или параллельно в зависимости от типа и мощности конденсаторов. Выводы пакета через проходные изоляторы подключаются к зажимам. Конденсаторы изготавливаются однофазными или трехфазными на различные по величине напряжения и мощность.



Таблица 18

Типоразмеры конденса- тора	Номинальные			Масса, кг	Высота с изо- лято- рами, мм	Вид исполнения
	напря- жение, В	мощ- ность, кВ·А	ем- кость, мкф			
КМ-0,22-4,5	220	4,5	296	26	408	Трехфазные или однофазные
КМ-0,38-13	380	13	286		408	
КМ-0,5-13	500	13	165		408	
КМ-0,66-13	660	13	95		422	
КМ-3,15-13	3 150	13	4,17	24	445	Однофазные
КМ-6,3-13	6 300	13	1,04		475	
КМ-10,5-13	10 500	13	0,376		530	
КМ2-0,22-9	220	9	592	52	726	Трехфазные или однофазные
КМ2-0,38-26	380	26	572		726	
КМ2-0,5-26	500	26	330		726	
КМ2-0,66-26	660	26	190		740	
КМ2-3,15-26	3 150	26	8,34	48	760	Однофазные
КМ2-6,3-26	6 300	26	2,08		790	
КМ2-10,5-26	10 500	26	0,752		845	
КС-0,22-6	220	6	395	28	408	Трехфазные или однофазные
КС-0,22-8	220	8	526		408	
КС-0,38-18	380	18	397		408	
КС-0,38-25	380	25	551		408	
КС-0,5-18	500	18	229		408	
КС-0,66-20	660	20	146		422	
КС-0,66-25	660	25	183		422	
КС-1,05-25	1 050	25	72,0		27	
КС-1,05-37,5	1 050	37,5	108,3	422		
КС-3,15-25	3 150	25	8,0	445		
КС-3,15-37,5	3 150	37,5	12,0	445		
КС-6,3-25	6 300	25	2,0	475		
КС-6,3-37,5	6 300	37,5	3,0	475		
КС-10,5-25	10 500	25	0,72	530		
КС-10,5-37,5	10 500	37,5	1,08	530		
КС2-0,22-12	220	12	790	56	726	Трехфазные или однофазные
КС2-0,22-16	220	16	1052		726	
КС2-0,38-36	380	36	794		726	
КС2-0,38-50	380	50	1102		726	
КС2-0,5-36	500	36	458		726	
КС2-0,66-40	660	40	292		740	
КС2-0,66-50	660	50	366		740	
КС2-1,05-50	1 050	50	144		56	
КС2-1,05-75	1 050	75	217	740		
КС2-3,15-50	3 150	50	16	760		
КС2-3,15-75	3 150	75	24	760		
КС2-6,3-50	6 300	50	4	790		
КС2-6,3-75	6 300	75	6	790		
КС2-10,5-50	10 500	50	1,44	845		
КС2-10,5-75	10 500	75	2,16	845		

Краткие данные некоторых типов конденсаторов, применяемых в электроустановках для компенсации реактивной мощности, приведены в табл. 18. Буквы и цифры в обозначении типоразмеров конденсаторов означают: К — косинусный; М — пропитка маслом; С — пропитка синтетическими жидкостями; 2 — второй габарит корпуса; 0,22, 0,38 и 0,5 и т. д. — номинальное напряжение конденсатора в киловольтах; 4, 5, 13 и т. д. — номинальная мощность в киловольт-амперах реактивных.

В конденсаторах первого габарита количество секций в пакете равно 30. Конденсаторы второго габарита состоят из двух пакетов по 30 секций в каждом.

Таблица 19

Тип установки	Номинальная мощность, квар	Число управляемых секций	Масса, кг
ККУ-0,38-1-1Н	80	1	380
ККУ-0,38-3-2Н	165	2	925
ККУ-0,38-5-3Н	250	3	1270
ККУ-0,38-7-4Н	330	4	1615
ККУ-0,38-9-5Н	415	5	1960
ККУ-0,38-10-6Н	500	6	2300

Секции в пакете изолируются друг от друга изолирующими прокладками, затем весь пакет изолируется и помещается в металлический корпус. В корпусе пакет подвергается термической обработке для удаления из изоляционной бумаги влаги и воздуха, затем корпус заполняется маслом или синтетической жидкостью и герметически закрывается.

*Комплектные конденсаторные установки.* Нашей электропромышленностью изготавливаются комплектные конденсаторные установки низкого напряжения. Они имеют ручное и автоматическое управление. Автоматическое управление осуществляется по напряжению сети. Диапазон регулируемой уставки 100—110% величины номинального напряжения сети, погрешность не выше 1% номинального напряжения. Изменение выдержки времени 120—180 с при погрешности  $\pm 15\%$ .

Основные данные комплектных конденсаторных установок даны в табл. 19.

Принципиальная схема силовой цепи конденсаторной установки представлена на рис. 49.

*Автоматические устройства в конденсаторных установках.* На промышленных предприятиях все более широкое применение находит автоматическое устройство регулирования мощности конденсаторных батарей типа АРКОН, выпускаемое отечественной промышленностью. Устройство АРКОН позволяет включать и отключать секции конденсаторных батарей в зависимости от следующих параметров:

- величины реактивной мощности;
- величины напряжения сети;
- величины напряжения сети и тока.

Устройство состоит из командного блока, набора приставок и кнопки управления. Каждая приставка

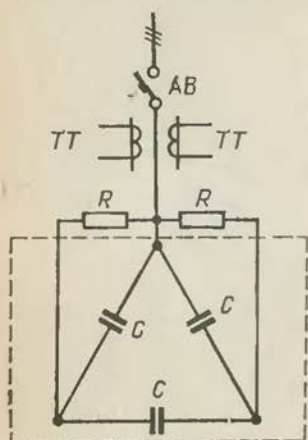


Рис. 49. Однолинейная принципиальная схема силовой цепи комплектной трехфазной конденсаторной установки.

AB — автоматический выключатель; ТТ — трансформаторы тока; R — разрядные сопротивления; C — конденсаторы.

включает или отключает только одну секцию конденсаторной батареи, поэтому количество приставок в комплекте устройства определяется числом переключаемых секций конденсаторной батареи.

Рассмотрим работу конденсаторной батареи, оборудованной устройством типа АРКОН, при ее регулировании по величине реактивной мощности. Так как потери в конденсаторах невелики, то, как правило, экономически выгодней использовать мощность батареи для возможно более полной компенсации потребляемой реактивной мощности. При увеличении потребления реактивной мощности сети через заданное время включается очередная секция батарей. Если мощность секции оказывается

недостаточной для полной компенсации реактивной мощности, то также через определенное время включается следующая секция. Таким образом, если мощность конденсаторной батареи превосходит суммарную реактивную мощность, потребляемую в сети, то  $\cos \varphi$  будет поддерживаться на уровне, близком к единице. При снижении потребления реактивной мощности сек-



ции батарей также через определенное время будут последовательно отключаться.

На предприятиях эксплуатируются и другие менее распространенные типы автоматических регуляторов мощности конденсаторных батарей. Работают они в зависимости от времени суток, уровня напряжения, тока нагрузки, а также величины потребляемой или отдаваемой реактивной мощности.

Определенный интерес представляет регулятор мощности конденсаторных батарей, описанный в [Л. 8]. В схеме в качестве управляющего звена использован трехфазный счетчик реактивной энергии. Счетчик переделан так, что при любом изменении потребляемой или отдаваемой реактивной мощности он выдает импульс в схему исполнительного механизма, который включает или отключает часть конденсаторов. Пределы регулирования (моменты включения или отключения части конденсаторов) выбираются в зависимости от графика потребления реактивной мощности.

*Конденсаторы, изготовленные в ГДР.* В Советском Союзе установлено значительное число батарей конденсаторов, изготовленных в ГДР, и поставки их постепенно увеличиваются.

Конденсаторы низкого напряжения изготавливаются в ГДР на напряжения 220, 380 и 500 В с реактивной мощностью 10—40 квар при частоте 50 Гц. Конденсаторы трехфазные, каждая фаза выводится на крышку двумя выводами. Основной диэлектрик — конденсаторная бумага толщиной 8—28 мкм (микрон). В качестве обкладок применяется алюминиевая фольга толщиной 7 мкм, для выводных контактов используется луженая медная фольга толщиной 50 мкм. Пропитка производится синтетическими жидкостями. Электрические потери мощности в конденсаторах находятся в пределах 0,25—0,35%. Низковольтные конденсаторы поступают в СССР в виде комплектов конденсаторных установок мощностью 240—960 квар на напряжение 380 и 500 В, снабженные ручным или автоматическим управлением. При автоматическом управлении включение и выключение производятся регулятором реактивной мощности. В установках имеется нерегулируемая часть конденсаторов и регулируемая. Для регулирования реактивной мощности применяется специальный электронный регулятор. В табл. 20 показаны основные данные комплек-

Номинальная мощность, квар	Мощность, регулируемая по ступеням, квар	Базисная нерегулируемая мощность, квар	Номинальная мощность, квар	Мощность, регулируемая по ступеням, квар	Базисная нерегулируемая мощность, квар
240	6×40	—	720	12×40	240
360	6×40	120	840	12×40	360
480	6×40	240	960	12×40	480
600	9×40	240			

Примечания: 1. Напряжение конденсаторов 380 и 500 В, частота 50 Гц.

2. Напряжение управления 220 В, 50 Гц.

3. Установки снабжены устройствами для управления и измерений.

ных низковольтных конденсаторных батарей поставки ГДР.

*Установка и эксплуатация конденсаторов.* Конденсаторы низкого напряжения устанавливаются обычно в помещениях щитов управления подстанций при централизованной системе или у распределительных пунктов в цехах при местной установке и в отдельных шкафах при индивидуальной установке. Очень крупные централизованные установки конденсаторных батарей, например, с общим содержанием масла более 600 кг устанавливаются в отдельном помещении с выходом наружу. Для охлаждения конденсаторов помещение, где они устанавливаются, и шкафы должны иметь естественную или искусственную вентиляцию.

Конденсаторные батареи 6—10 кВ устанавливаются в распределительных устройствах подстанций.

Конденсаторные установки снабжаются разрядными сопротивлениями. При напряжении свыше 1000 В разрядные сопротивления должны быть постоянно присоединены к конденсаторам. Обычно применяются в качестве разрядных сопротивлений трансформаторы напряжения или индуктивные сопротивления. В конденсаторных установках напряжением до 1000 В рекомендуется автоматическое присоединение разрядных сопротивлений в момент отключения конденсаторов в целях экономии электроэнергии. При напряжениях до 1000 В применяются в качестве разрядных активные и индуктивные сопротивления.

Конденсаторные установки должны иметь общую защиту от токов к. з., действующую без выдержки времени, и групповую, если конденсаторы не имеют встроенной защиты секций.

При необходимости предусматривается защита от повышения напряжения, отключающая конденсаторную батарею при повышении напряжения на 10% выше номинального с выдержкой времени 3—5 мин.

Конденсаторные установки должны выполняться по утвержденному проекту и соответствовать «Правилам устройства электроустановок» (ПУЭ). Для конденсаторных батарей мощностью более 200 квар обязательно, согласно «Правилам технической эксплуатации» (ПТЭ), устройство автоматического регулирования мощности конденсаторов.

Включение и отключение батарей конденсаторов при напряжении свыше 1000 В допускается только с помощью соответствующих выключателей; применение для этой цели разъединителей запрещено.

При секционировании конденсаторных батарей, когда каждая секция включается и выключается отдельным выключателем, на каждой секции устанавливается отдельный комплект разрядных сопротивлений, если нет встроенных в конденсаторы разрядных устройств.

Все операции по включению и выключению конденсаторных батарей производятся в соответствии с «Правилами технической эксплуатации» и «Правилами техники безопасности электроустановок потребителей».

Новая конденсаторная установка перед первым включением подвергается приемо-сдаточным испытаниям, в которые входит: измерение сопротивления изоляции мегаомметром на напряжение 2500 В; измерение емкости конденсаторов; испытание повышенным напряжением переменного тока частотой 50 Гц. Величины испытательного напряжения приведены в табл. 21.

Таблица 21

Испытательное напряжение, кВ	Номинальное напряжение конденсаторов, кВ						
	0,22	0,38	0,5	1,05	3,15	6,3	10,5
Испытание между обкладками	0,42	0,72	0,95	2,0	5,9	11,8	20
Испытание на корпус	2,1	2,1	2,1	4,3	15,8	22,3	30



Продолжительность приложения испытательного напряжения 1 мин. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты изоляции конденсаторов относительно корпуса, имеющих один вывод, соединенный с корпусом, не производится. Испытание переменным током может быть при отсутствии необходимого источника заменено испытанием выпрямленным напряжением удвоенной величины.

В заключение прямо-сдаточных испытаний конденсаторной установки она испытывается трехкратным включением на номинальное напряжение; при этом контролируются величины токов по всем фазам. Токи в различных фазах не должны отличаться друг от друга более чем на 5%.

Перед каждым включением конденсаторной установки необходимо путем внешнего осмотра убедиться в ее исправности (особенно в исправности разрядного устройства). Перед включением конденсаторов следует проверить величину напряжения на сборных шинах, и если оно превышает наивысшее допустимое для данного типа конденсаторов, включение установки запрещается.

В процессе эксплуатации производятся плановые осмотры, текущий и капитальный ремонты конденсаторных установок.

Плановые осмотры конденсаторных установок производятся без их отключения не реже 1 раза в месяц для установок мощностью до 500 квар и не реже 1 раза в декаду для более мощных установок. Во время осмотра конденсаторной установки проверяют:

исправность ограждений и запоров, отсутствие в помещении и на установке посторонних предметов, пыли, грязи, трещин на изоляторах;

температуру окружающего воздуха, которая не должна превышать пределы, допустимые для данного типа конденсаторов;

отсутствие видимых повреждений конденсаторов — вспучивания стенок корпусов, следов вытекания масла или синтетической жидкости, причем наличие пятен (отпотевание) не является основанием для снятия конденсаторов с эксплуатации, однако они берутся под наблюдение;

величину тока и напряжения и равномерность нагрузок фаз;

исправность цепей разрядного устройства;

исправность всех контактов, наличие и исправность средств защиты и блокировок безопасности, наличие и качество защитных средств и средств тушения пожара (разрядной штанги, перчаток, огнетушителя, ящика с песком и пр.).

Текущий ремонт конденсаторных установок производится с обязательным отключением установки не реже 1 раза в год. При этом производится:

тщательный осмотр установки с устранением выявленных неисправностей;

очистка изоляторов, корпусов, аппаратуры и других частей установки и помещения от пыли и грязи;

проверка мегаомметром состояния изоляции;

замена выбывших из строя конденсаторов;

измерение емкости конденсаторов, рассчитанных на напряжение свыше 1000 В;

опробование устройств управления, автоматики, релейной защиты и приводов разъединителей и выключателей, их регулировка.

Осмотр и ремонт индивидуальных конденсаторных установок производятся одновременно с осмотром или ремонтом основного электроприемника, т. е. электродвигателя, трансформатора и др.

Профилактическим испытаниям повышенным напряжением (см. табл. 21) подвергаются при капитальном ремонте только конденсаторы на напряжение 10,5 кВ.

Эксплуатация конденсаторов запрещается при: напряжении на шинах, к которым присоединены конденсаторы, превышающем 110% номинального напряжения конденсаторов; превышении допустимой температуры окружающего воздуха; вспучивании стенок конденсаторов; неравномерности нагрузки фаз более 10% среднего значения тока; увеличении тока батареи более чем на 30% номинального значения; наличии капельной течи пропиточной жидкости; повреждении фарфорового изолятора.

*Режим работы компенсирующих устройств.* Режим работы электроприводов машин, электрических печей, трансформаторов, осветительных и прочих электроустановок в течение смены и суток характеризуется большими колебаниями потребления активной и реактивной мощности. Периодическое составление графиков фактических электрических нагрузок необходимо как для активной, так и реактивной мощности. Рассмотрение фак-



тических графиков позволяет создать примерные перспективные графики потребления активной и реактивной мощности предприятием за рабочую смену и за сутки для различных периодов года.

Для определения фактических нагрузок могут быть использованы записи показателей счетчиков активной и реактивной энергии, например, через каждые полчаса.

На основании наблюдений за фактическим потреблением активной и реактивной мощности могут быть составлены характерные балансы активной и реактивной мощности — максимальных и минимальных нагрузок.

Баланс реактивной мощности или значения потребления реактивной мощности при максимуме нагрузки энергосистемы и минимальной нагрузке предприятия должны быть заданы энергосистемой.

Графики и баланс реактивной мощности и контроль за состоянием напряжения в сети предприятия служат для регулирования работы компенсирующих устройств. Степень использования синхронных двигателей и батарей конденсаторов определяется на основании технико-экономического расчета в соответствии с [Л. 13]. Обычно целесообразность использования перевозбужденных синхронных двигателей, достаточно быстроходных и мощных (375 об/мин, 1000 кВ·А и более) с высоким к. п. д. не вызывает сомнений. Использование маломощных и тихоходных двигателей с невысоким к. п. д. может быть менее выгодным, чем батарей конденсаторов.

Батареи конденсаторов, установленные в сетях низкого (0,22—0,66 кВ) и высокого (3—10 кВ) напряжений, в часы максимальных реактивных нагрузок предприятия, как правило, используются полностью, если их мощность правильно рассчитана.

Значительная часть всех конденсаторов должна быть оборудована устройствами автоматического регулирования, например, по величине напряжения, времени, реактивной мощности, реактивного или полного тока. Нерегулируемая часть конденсаторов не должна превышать наименьшую реактивную нагрузку в сети предприятия. К этой части не относятся конденсаторы, входящие в комплект электропривода или электрической части электротермической или сварочной установки, укомплектованных индивидуальными конденсаторами или батареями конденсаторов, выключаемых вместе с этими установками.



В сети предприятия необходимо предусматривать резерв источников реактивной мощности, хотя бы и неэкономичных (тихоходные и малой мощности синхронные двигатели), которые могли бы быть использованы в случае необходимости при аварийном режиме.

При решении вопросов компенсации реактивной мощности важно определить, насколько снизятся потери активной мощности в сетях вследствие уменьшения потребления реактивной мощности. Поскольку реактивная мощность, некомпенсированная в сети предприятия, поступает от электростанций, расчет таких потерь достаточно сложен и производится энергосистемами.

Важной частью компенсационных устройств на промышленном предприятии являются устройства управления батареями конденсаторов. Устройство может быть ручным децентрализованным, что наиболее удобно для целей регулирования генерации реактивной мощности. В этом случае должно быть лицо, ответственное за своевременное включение и отключение батарей конденсаторов по заданному графику. На средних и крупных предприятиях иногда осуществляется централизованное управление конденсаторными батареями из диспетчерского пункта. Наиболее целесообразно автоматическое управление режимом работы конденсаторных батарей, о чем было сказано выше. На тех предприятиях, где это не выполнено, автоматическое управление батареями конденсаторов следует устанавливать в процессе эксплуатации.

При составлении баланса реактивной мощности приходится учитывать присоединенные к сети промышленных предприятий бытовые и коммунальные нагрузки жилых поселков. Телевизоры, радиоприемники, компрессионные холодильники, стиральные и другие бытовые машины имеют  $\cos \varphi$ , который колеблется от 0,5 до 0,97. Поэтому следует учитывать потребление реактивной мощности присоединенных к предприятию бытовых и коммунальных потребителей.

*Определение потребности в конденсаторах.* Потребность в установке компенсационных устройств, места их установки, их устройство, режим их работы определяются проектной организацией при составлении проектов нового строительства или реконструкции предприятия или отдельных его цехов, и согласовывается с энергосистемой. Такой же порядок согласования существует

и для установки дополнительных компенсирующих устройств, в том числе конденсаторов и конденсаторных батарей в процессе эксплуатации.

Необходимая мощность компенсирующих устройств (статических конденсаторов) определяется для каждого отдельного потребителя реактивной мощности, группы потребителей участка, цеха, всего предприятия. Оптимальная мощность конденсаторов определяется на основании технико-экономических расчетов по методике «Указаний по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях», утвержденных Госэнергонадзором 30 августа 1973 г. [Л. 13].

Емкость конденсаторной батареи  $C$  для сети (поперечная компенсация) при соединении конденсаторов в треугольник равна, мкФ:

$$C = \frac{Q \cdot 10^9}{2\pi f U_{\text{ном}}^2},$$

где  $U_{\text{ном}}$  — номинальное напряжение конденсаторов. Из этой формулы следует, что емкость требующихся конденсаторов обратно пропорциональна квадрату напряжения. Поэтому при одинаковой мощности емкость батареи при напряжении 0,38 кВ будет в 270 раз ( $6,3^2/0,38^2$ ) больше, чем при напряжении 6,3 кВ. При таком соотношении емкостей габариты конденсаторов примерно одинаковы, так как зависят в основном от их мощности.

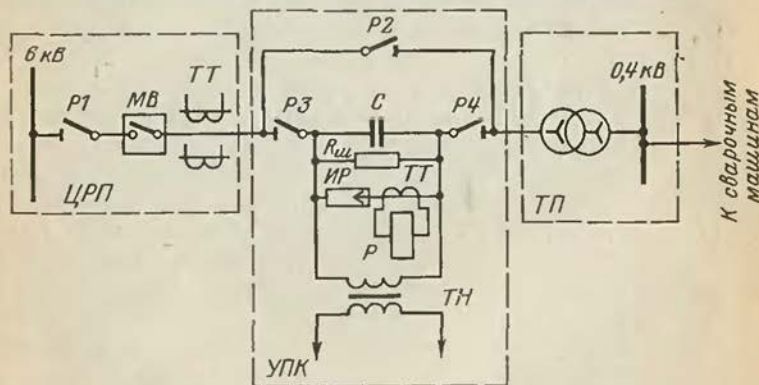


Рис. 50. Схема продольной компенсации реактивной мощности сварочных контактных машин.

ЦРП — центральная распределительная подстанция; ТП — трансформаторная подстанция, питающая сварочные машины; УПК — установка продольной компенсации;  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  — разъединители; МВ — масляный выключатель; ТН — трансформатор напряжения;  $R_{\text{ш}}$  — шунтирующее сопротивление; ИР — искровой разрядник; P — сигнальное реле.

На стороне высокого напряжения устанавливаются на подстанциях конденсаторные батареи 6—10 кВ.

*Установки продольной компенсации.* В электроустановках промышленных предприятий применяется преимущественно поперечная компенсация. Однако иногда прибегают и к продольной компенсации. В [Л. 10] описана установка продольной компенсации (УПК) в сетях одного предприятия на шинах подстанции, питающей машины контактной сварки. Установка смонтирована на стороне высокого напряжения 6 кВ подстанции по схеме, показанной на рис. 50. Подстанция имеет один трансформатор 1800 кВ·А и питает восемь стыковых машин по 600 кВ·А. На каждой фазе было установлено по пять конденсаторов

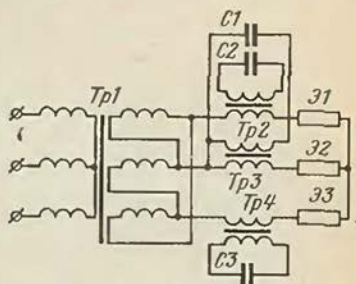


Рис. 51. Схема продольной компенсации реактивной мощности дуговой руднотермической печи.

КПМ50-0,6, включенных параллельно. До монтажа УПК колебания напряжения на шинах 0,38 кВ достигали 25%. После выключения УПК напряжение выравнялось. Коэффициент мощности на шинах 6 кВ повысился примерно на 0,05. Продольная компенсация реактивной мощности успешно применена на мощных ферросплавных печах. Схема продольной компенсации в короткой сети дуговой печи показана на рис. 51. Как видно из рисунка, батареи конденсаторов врезаны в токопроводы фаз печи через специальные трансформаторы. Эта система испытана на ферросплавных печах мощностью 16,5 МВ·А (причем  $\cos \varphi$  печи удалось поднять до 0,96), а также на печах мощностью 63 МВ·А. Специальные трансформаторы к ферросплавным печам мощностью 63 МВ·А ( $3 \times 21$  МВ·А) поставляются теперь в комплекте с установкой продольной компенсации.

### 3-5. ТИРИСТОРНЫЙ КОМПЕНСАТОР

Искусственный сдвиг фаз с опережающим  $\cos \varphi$  получается в схемах с полупроводниковыми управляемыми вентилями — тиристорами.



Схема тиристорного компенсатора реактивной мощности представлена на рис. 52. Он состоит из выпрямителя, выполненного по мостовой схеме на шести вентилях  $B1-B6$ , сглаживающего дросселя  $Др$ , на обмотки которого замкнуты накоротко две группы вентилях выпрямителя. Конденсаторная батарея  $C_k$  и тиристоры  $B10$ ,  $B11$  и  $B12$  составляют узел искусственной коммутации. Тиристорный компенсатор работает следующим образом.

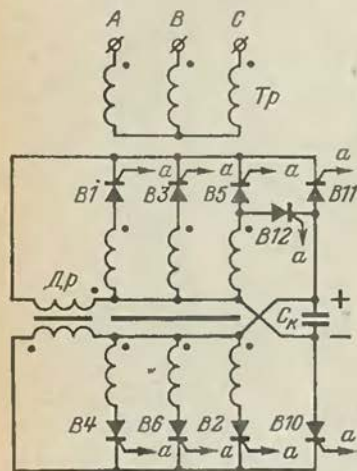


Рис. 52. Схема тиристорного компенсатора реактивной мощности.

$a$  — в схему управления.

При включении его в сеть переменного тока на вторичных обмотках трансформатора, включенных как две обратные звезды, появляется напряжение. Обмотки всех шести фаз вторичной обмотки в порядке их чередования сдвинуты относительно друг друга на  $60^\circ$ .

В момент, когда напряжение на фазе  $A$  становится положительным, отпирается тиристор  $B1$ , т. е. на его управляющем электроде (схема управления на рис. 52 не показана) появляется отпирающий импульс напряжения, затем поочередно отпираются тиристоры  $B2-B6$ , затем опять  $B1$  и появляется выпрямленное напряжение.

Выпрямитель, замкнутый накоротко на сглаживающий дроссель, при включении вентилях с опережением на угол, примерно равный  $90^\circ$ , работает как компенсатор мощности.

В начальный период дроссель запасает энергию. В следующий момент времени получает отпирающий импульс тиристор  $B12$  и происходит быстрый заряд конденсатора  $C_k$  от фазы  $C$ . Далее отпирается коммутирующий тиристор  $B11$  и гасит работающий в этот момент тиристор  $B1$ . Тогда ток, проходящий через обмотку дросселя  $Др$ , пойдет через тиристор  $B11$ .

В установившемся режиме генерирования реактивной мощности каждый из основных тиристоров  $B1-B6$  гасится поочередно с помощью тиристоров  $B10$  или  $B11$

в моменты времени, когда напряжение соответствующей вторичной обмотки положительно, и включается в моменты, когда данное напряжение отрицательно. При этом ток опережает фазные напряжения на угол, близкий к  $90^\circ$ . В описанной схеме коммутационная конденсаторная батарея  $C_k$  может быть в 3—5 раз меньшей мощности, чем генерируемая тиристорным компенсатором. Разработаны и другие схемы компенсирующих устройств с искусственным сдвигом фаз между током и напряжением.

Полупроводниковым компенсирующим устройствам уделяется большое внимание по нескольким причинам. Во-первых полупроводниковые, в частности, тиристорные выпрямители и преобразователи частоты находят все большее применение в электроприводах, электротермических и других электроустановках, и они имеют часто низкий  $\cos \varphi$ , т. е. являются потребителями реактивной мощности, между тем при определенных изменениях в их схемах некоторые из них можно использовать в качестве компенсирующих устройств, генерирующих реактивную мощность. Во-вторых, полупроводниковые устройства являются принципиально отличными от других потребителями или источниками реактивной мощности. Потребление или генерация реактивной мощности осуществляется в них, как было описано, путем искусственного сдвига фаз между током и напряжением соответствующими коммутационными устройствами.

### **3-6. УКАЗАНИЯ ПО КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СЕТЯХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

Проведение на промышленных предприятиях работы по рациональному уменьшению потребления реактивной мощности и обеспечения их средствами искусственной компенсации, как было показано, является одной из важнейших задач электриков предприятий

Государственной инспекцией по энергетическому надзору Министерства энергетики и электрификации СССР (Госэнергонадзором Минэнерго СССР) утверждены новые «Указания по компенсации реактивной мощности в сетях потребителей», разработанные ВНИИЭ [Л. 13]. Цель их — обеспечить наибольшую экономичность при выборе типа, мощности, места установки и режима работы компенсирующих устройств при условии соблюдения всех

технических требований. Выполнение технических требований должно обеспечивать: допустимый режим напряжения в питающей и распределительной сетях; допустимые токовые нагрузки всех элементов сети; режим работы источников реактивной мощности в допустимых пределах; необходимый резерв реактивной мощности в узлах сети; статическую устойчивость работы сетей и электроприемников.

Наивыгоднейшее решение находится путем технико-экономических сравнений, выполняемых проектной организацией. Компенсирующие устройства устанавливаются с разрешения энергосистемы или по ее предписанию. При их отсутствии может быть задержано разрешение на включение установки в целом.

При выборе напряжения, мощности и мест размещения компенсирующих установок учитывается: уменьшение реактивных нагрузок, улучшение режима напряжения у электроприемников, сокращение числа трансформаторов, возможного по условиям эксплуатации, приближение источников реактивной мощности к местам ее потребления, возможно полное использование экономичных синхронных электродвигателей.

Предприятия обязаны соблюдать задаваемый энергосистемой режим потребления реактивной мощности.

Указания предписывают провести на промышленных предприятиях при эксплуатации электрических установок мероприятия, снижающие потребление реактивной мощности, в том числе:

упорядочение технологических процессов, ведущее к улучшению энергетического режима оборудования и к снижению максимума реактивной нагрузки;

устранение холостой работы асинхронных двигателей, сварочных трансформаторов и других электроприемников путем внедрения ограничителей х. х.;

замена или временное отключение трансформаторов, загруженных менее чем на 30% их номинальной мощности;

замена загруженных менее чем на 60% асинхронных двигателей на двигатели меньшей мощности, при условии технико-экономического обоснования;

замена асинхронных двигателей синхронными, допустимая по условиям работы электропривода, если асинхронные двигатели подлежат демонтажу вследствие износа, изменения технологического процесса или возмож-



ности использования в других установках, если замена обоснована технико-экономическим расчетом. Уточнение мест установки и степени использования имеющихся на предприятии источников реактивной мощности должно производиться, исходя из условия минимума стоимости потерь электроэнергии, исчисляемой по специальной методике.

Для целей компенсации реактивной мощности в первую очередь должны использоваться имеющиеся на предприятии батареи конденсаторов, как наиболее экономичные в условиях эксплуатации. Синхронные двигатели должны использоваться в часы наибольшего потребления реактивной мощности и других режимах, когда мощности батарей конденсаторов недостаточны.

Контроль за использованием потребителем средств компенсации должен осуществляться по реактивным счетчикам с указателем максимальной нагрузки, которые по показаниям счетного механизма позволяют определить среднемесячную реактивную нагрузку, а по шкале указателя максимальной нагрузки тридцатиминутную наибольшую реактивную мощность в часы максимума энергосистемы. Для контроля за этими величинами могут быть использованы и другие приборы, например, обычные счетчики реактивной мощности. В этом случае показания тридцатиминутной максимальной нагрузки определяются по записям в оперативной ведомости.

Если потребитель выполняет заданный энергосистемой режим потребления реактивной мощности, то энергосистема предоставляет потребителю скидку с общего счета стоимости использованной электроэнергии. Если же потребитель нарушает заданный режим, то с потребителя взимается надбавка к общей стоимости электроэнергии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов В. С., Николаев С. А. Общая электротехника с основами электроники. М., «Энергия», 1972. 504 с.
2. Общая металлургия. М., «Металлургия», 1971. 472 с.
3. Башенко В. В., Донской А. В., Соломахин И. Н. Электроплавильные печи цветной металлургии. М., «Металлургия», 1971. 320 с.
4. Справочник по электропотреблению в промышленности. М., «Энергия», 1969. 432 с.
5. Константинов Б. А., Соколова К. И., Шулятьева Г. Н. Коэффициент мощности и способы его улучшения на промышленных предприятиях. М., «Энергия», 1965. 64 с.
6. Панкратов Г. К. Схема переключений для двухтрансформаторных подстанций. — «Энергетик», 1969, № 12. с. 26—27.
7. Андреев В. А., Леонов В. В. Схема автоматического переключения трансформаторов. — «Энергетик», 1969, № 4, с. 21—22.
8. Олейник В. С., Шарамок И. И. Устройство и схема автоматического регулирования мощности конденсаторных установок. — «Промышленная энергетика», 1969, № 3, с. 7—9.
9. Новодворец Л. А. Испытание силовых конденсаторных установок. М., «Энергия», 1971. 64 с.
10. Вагин Г. Я. Устаивка продольно-емкостной компенсации в сети, питающей контактную электросварку. — «Промышленная энергетика», 1970, № 1, с. 31—33.
11. Литвак Л. В. Рациональная компенсация реактивных нагрузок на промышленных предприятиях. Госэнергоиздат, 1963. 256 с.
12. Мадьяр Л. Коэффициент мощности  $\cos \phi$ . Пер. с нем. Госэнергоиздат, 1961. 376 с.
13. Указания по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях. М., «Энергия», 1974. 72 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Глава 1. Понятие о реактивной мощности . . . . .	4
1-1. Переменный ток . . . . .	4
1-2. Активные, реактивные и полные сопротивления, токи и мощности . . . . .	9
1-3. Баланс активной и реактивной мощности . . . . .	18
1-4. Потери электроэнергии при распределении и потреблении реактивной мощности . . . . .	21
1-5. Экономическая эффективность повышения $\cos \varphi$ . . . . .	23
Глава 2. Основные потребители реактивной мощности . . . . .	24
2-1. Силовые трансформаторы и реакторы . . . . .	24
2-2. Асинхронные двигатели . . . . .	36
2-3. Дуговые электропечи . . . . .	50
2-4. Индукционные печи . . . . .	61
2-5. Электросварочные установки . . . . .	68
2-6. Электроосветительные установки с газоразрядными лампами . . . . .	71
2-7. Удельное потребление реактивной мощности электроприемниками промышленных предприятий . . . . .	72
Глава 3. Компенсация реактивной мощности . . . . .	73
3-1. Источники реактивной мощности на промышленных предприятиях . . . . .	73
3-2. Синхронные компенсаторы . . . . .	74
3-3. Синхронные двигатели . . . . .	74
3-4. Конденсаторные установки . . . . .	82
3-5. Тиристорный компенсатор . . . . .	95
3-6. Указания по компенсации реактивной мощности в сетях потребителей . . . . .	97
Список литературы . . . . .	100



## *Уважаемые читатели!*

В 1976 году установлена новая форма распространения (продажи) узкоспециальной литературы издательства «Энергия».

Эта литература будет продаваться только через специализированный магазин № 170 «Книга — почтой» Москниги.

Ниже помещен список узкоспециальной литературы по электроэнергетике для оформления индивидуальных заказов.

### **ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭНЕРГЕТИКИ**

- План. № 196. **Бесчинский А. А., Коган Ю. М.** Экономические проблемы электрификации. 25 л. 1 р. 49 к.
- План. № 197. **Кибернетику — на службу коммунизму.** Т. 8. Проблемы исследования и управления в больших системах энергетики. Под ред. А. И. Берга, В. А. Великова. 25 л. 3 р.
- План. № 198. **Энергетика мира.** Переводы докладов IX Мировой энергетической конференции 1974 г. Под общ. ред. П. С. Непорожного. 25 л. 2 р. 45 к.

### **ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА**

#### **Производственно-техническая литература**

##### *Электрические системы*

- План. № 251. **25 лет исследований в области энергетических систем.** Пер. с франц. 10,5 л. 81 к.
- План. № 252. **Планирование развития и эксплуатации энергосистем.** Международная конференция по большим электрическим системам (СИГРЭ-74). Под ред. В. А. Великова. 10 л. 67 к.

##### *Электрические станции и подстанции*

- План. № 253. **Агранович И. И.** Особенности монтажа электрооборудования атомных электростанций. 10 л. 51 к.
- План. № 254. **Выключатели высокого напряжения.** Международная конференция по большим электрическим системам (СИГРЭ-74). Под ред. Н. В. Шилина. 7 л. 47 к.
- План. № 255. **Гамус И. М., Цветов И. М.** Пневматические установки электрических подстанций. 12,5 л. 78 к.
- План. № 256. **Морозова Ю. А.** Параметры и характеристики вентильных систем возбуждения мощных синхронных генераторов. 9 л. 46 к.

- План. № 257. Подстанции переменного тока. Международная конференция по большим электрическим системам (СИГРЭ-74). Под ред. Ю. А. Якуба. 7 л. 47 к.

*Линии электропередачи и распределительные сети*

- План. № 258. Составление смет на строительство электросетей. 12 л. 61 к. Авт.: Я. М. Горфинкель, В. С. Горшков, Г. Д. Гофман, Г. Г. Мостовенко.
- План. № 259. Передачи энергии постоянным током и оборудование преобразовательных подстанций. Международная конференция по большим электрическим системам (СИГРЭ-74). Под ред. В. В. Худякова. 7 л. 47 к.
- План. № 260. Помехи от линий высокого напряжения. Международная конференция по большим электрическим системам (СИГРЭ-72). Под ред. М. В. Костенко. 4 л. 32 к.

*Техника высоких напряжений*

- План. № 261. Раевич Д. В., Соколова М. В. Расчет разрядных и начальных напряжений газовых промежутков. 10 л. 10 л. 81 к.

*Автоматика, релейная защита и связь в энергосистемах*

- План. № 262. Микуцкий Г. В. Каналы высокочастотной связи для релейной защиты и автоматики. 22 л. 1 р. 25 к.
- План. № 263. Передача информации в энергосистемах. Международная конференция по большим электрическим системам (СИГРЭ-74). Под ред. Г. В. Микуцкого. 4 л. 27 к.
- План. № 264. Релейная защита и противоаварийная автоматика. Международная конференция по большим электрическим системам (СИГРЭ-74). Под ред. В. М. Ермоленко и А. М. Федосеева. 8 л. 54 к.
- План. № 265. Слударж М. И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных двигателей. 21 л. 1 р. 20 к.

С аннотациями на эти книги можно ознакомиться во второй части плана выпуска литературы на 1976 год, который направлен во все книжные магазины.

Магазин № 170 принимает индивидуальные заказы на книги до 15 января 1975 года.

Заказ оформляется на почтовой открытке, в которой указывается № по плану, автор, название книги (книг), количество экземпляров, адрес отправителя.

Книги будут высылаться после выходе их из печати наложенным платежом.

Адрес магазина: Москва, 121096 ул. Василисы Кожинной, д. 10. Магазин № 170 «Книга — почтой». Телефон: 145-61-42.

Проезд: метро ст. «Багратионовская»; авт.: 89, 116, 132; трол. 39 до ост. ул. Василисы Кожинной.

Издательство «Энергия»

*ВАСИЛИЙ МИХАЙЛОВИЧ ГЛУШКОВ,  
ВЛАДИМИР ПЕТРОВИЧ ГРИБИН*

**КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ  
В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Редактор *Ф. Ф. Карпов*

Редактор издательства *Э. К. Биленко*

Обложка художника *Н. А. Князькова*

Технический редактор *Г. Г. Самсонова*

Сдано в набор 19/V 1975 г. Подписано к печати 21/X 1975 г. Т-17343

Формат 84×108<sup>2</sup>/<sub>32</sub> Бумага типографская № 2 Усл. печ. л. 5,46

Уч.-изд. л. 5,46 Тираж 20 000 экз. Зак. 183 Цена 19 коп.

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете Совета Министров СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
Шлюзовая наб., 10.



Цена 19 коп.