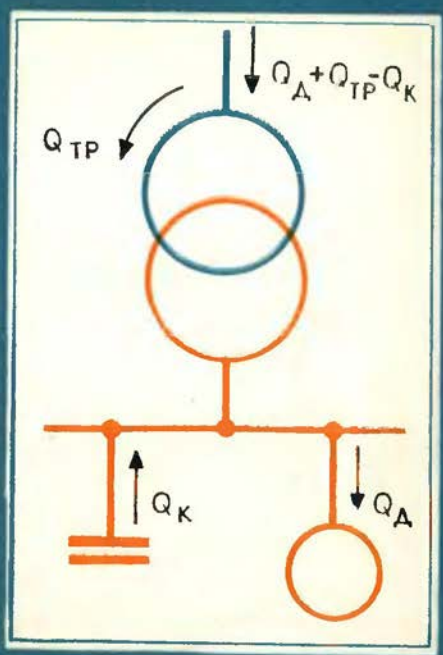


Б21.311.1
М61



БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА



Г.П. МИНИН

РЕАКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ



Библиотека
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Выпуск 476

Г. П. МИНИН



РЕАКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ

ВТОРОЕ ИЗДАНИЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ

11678



МОСКВА «ЭНЕРГИЯ» 1978

ББК 31.2

М 61

УДК 621.311.1.016.25

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Андреевский В. Н., Большам Я. М., Зевакин А. И., Каминский Е. А., Мусаэлян Э. С., Ларионов В. П., Розанов С. П., Смирнов А. Д., Семенов В. А., Устинов П. И.

Минин Г. П.

М 61 Реактивная мощность. — 2-е изд., перераб. — М.: Энергия, 1978. — 88 с., ил. — (Б-ка электро-монтера; Вып. 476).

15 к.

В книге объяснены причины обязательного возникновения реактивной мощности при электроснабжении потребителей и значение коэффициента реактивной мощности. Рассматриваются основные потребители реактивной мощности — трансформаторы, асинхронные двигатели и другие электроприемники в зависимости от режима их работы, а также причины, вызывающие дополнительные потери в сети и ущерб при передаче реактивной мощности.

Уделено внимание вопросам снижения реактивной мощности. Даны основы технико-экономических расчетов компенсации реактивной мощности нагрузок потребителей с учетом последних указаний по компенсации реактивной мощности. Первое издание вышло в 1963 г.

Книга рассчитана на электромонтеров, работающих в отделах главного энергетика промышленных предприятий и обслуживающих компенсационные установки.

М $\frac{30311-277}{051(01)-78}$ —45-78

ББК 31.2

6П2.1.081

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одной из причин возникновения дополнительных потерь в электрических сетях является вынужденная передача реактивной мощности, необходимая для действия основных потребителей электроэнергии. Потребление реактивной мощности характеризуется коэффициентом мощности ($\cos \varphi$). Чем больше значение коэффициента мощности, тем меньше дополнительных потерь в сетях. Таким образом, возникает проблема повышения коэффициента мощности как одно из важных мероприятий по уменьшению потерь в сетях, связанная с уменьшением потребления реактивной мощности электроприемниками.

Наряду с организационно-техническими мероприятиями по упорядочению и рационализации потребления электроэнергии главное значение имеет компенсация реактивной мощности нагрузки потребителей. При оценке степени компенсации реактивной мощности, как будет выяснено, более показательным по сравнению с коэффициентом мощности $\cos \varphi$ является коэффициент реактивной мощности $\operatorname{tg} \varphi$, применяемый, например, при расчетах с потребителями за электроэнергию.

В настоящей книге основное внимание уделяется прикладной стороне вопроса. Изложены вопросы компенсации реактивной мощности нагрузок, приведены технико-экономические расчеты компенсационных устройств и их размещения в сетях. При этом учтены рекомендации действующих Указаний по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях [7]. Примеры расчета компенсации, приводимые в тексте, частью или полностью заимствованы из этих указаний.

Замечания и пожелания читателей по книге просьба направлять в адрес издательства «Энергия»: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Автор

1. ПОНЯТИЕ О РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Магнитное поле, индуктивность, реактивная мощность. Опытом установлено, что когда по проводнику проходит электрический ток, вокруг проводника всегда образуется магнитное поле. Магнитное поле представляется в виде условных магнитных линий, замыкающихся концентрически вокруг проводника и создающих магнитный поток Φ . Интенсивность магнитного поля, т. е. число магнитных линий на единицу площади (1 см^2), называется магнитной индукцией B , которая пропорциональна току, зависит от формы и размеров проводника, а также от свойств среды — магнитной проницаемости. Для ферромагнитных веществ, например для стали, магнитная проницаемость во много раз больше магнитной проницаемости воздуха.

Если проводник навить в виде катушки индуктивности и пропустить ток, то магнитные поля всех n витков будут складываться и внутри катушки образуется общий магнитный поток, который равен алгебраической сумме потоков Φ_w , связанных (сцепленных) с отдельными витками катушки индуктивности, и называется потоко-сцеплением, т. е.

$$\Psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots$$

Если магнитные потоки витков равны между собой, то

$$\Psi = w\Phi, \quad (1)$$

где Φ — магнитный поток одного витка; w — число витков катушки индуктивности.

Установлено, что если замкнутый контур (катушку) перемещать в неоднородном магнитном поле или же неподвижный контур поместить в меняющееся по величине во времени магнитное поле, то в контуре возникает (индуцируется, наводится) э. д. с. Наведенная в контуре э. д. с. e пропорциональна скорости изменения потока во

времени и числу витков ω контура, а по направлению (по знаку) обратна магнитному потоку, т. е.

$$e = -\omega \frac{d\Phi}{dt}.$$

На обратное направление указывает знак « $-$ ». Здесь $d\Phi$ обозначает предельно малое изменение магнитного потока за предельно малое изменение времени. Так, если поток убывает, то э. д. с. будет положительна, если же поток нарастает, то наведенная э. д. с. будет отрицательна. Направление тока, возникающего в контуре под действием наведенной э. д. с., совпадает с направлением э. д. с., и по закону Ленца ток всегда направлен так, что противодействует изменению магнитного потока внутри контура. Коэффициент пропорциональности между потокосцеплением катушки индуктивности и током, образующим магнитное поле катушки, при неизменной магнитной проницаемости среды, называется индуктивностью катушки

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{\omega\Phi}{I}. \quad (2)$$

Индуктивность L катушки, находящейся в воздухе, для данной катушки постоянна; она определяется конструктивными данными катушки (числом витков, размерами и др.). Если катушку поместить в ферромагнитную среду, то индуктивность катушки резко возрастет и будет пропорциональна магнитной проницаемости среды. Практически ферромагнитная среда создается при помощи стального замкнутого сердечника катушки (магнитопровод). Магнитная проницаемость стали зависит от магнитной индукции. Поэтому индуктивность катушки со стальным сердечником не постоянна, а зависит от силы тока, проходящего по катушке.

При изменении тока в катушке изменяется ее общий поток, вследствие чего в катушке наводится э. д. с. e_L , называемая э. д. с. с а м о и н д у к ц и и. Электродвижущая сила самоиндукции также зависит от скорости изменения магнитного потока, связанного с изменением тока в катушке и числом ее витков:

$$e_L = -\frac{\omega d\Phi}{dt} = -\frac{L di}{dt},$$

где di — предельно малое изменение тока в катушке индуктивности за предельно малое изменение времени dt .

Как видно из приведенного выражения, э. д. с. самоиндукции пропорциональна индуктивности катушки L и скорости изменения тока в катушке di/dt .

Направление э. д. с. самоиндукции по закону Ленца такое, что при увеличении тока э. д. с. самоиндукции ослабляет ток в контуре; при уменьшении тока э. д. с. складывается с напряжением, приложенным к катушке (и вызывающим ток в ней). Этим объясняется, что при размыкании цепи катушки с большой индуктивностью, обтекаемой током, возникает большая искра.

Если проводить аналогию с механикой, то проявление самоиндукции в электрической цепи аналогично проявлению инерционности маховика: масса маховика противодействует как его раскручиванию, так и торможению. Явление «электрической инерции» можно проследить при включении в цепь тока катушки с индуктивностью L и сопротивлением r . Ток в такой цепи установится не сразу, а через время $t=3\tau$ достигнет 95% конечного значения. Величина $\tau=L/r$ измеряется в секундах и называется постоянной времени цепи¹. Практически считается, что через время, равное 3τ , процесс установления тока закончен, хотя теоретически этот процесс происходит бесконечно долго.

Установлено также, что магнитное поле является одним из видов материи, в котором заключена энергия. Эта энергия проявляется, например, в виде механического взаимодействия проводников, обтекаемых током и находящихся в магнитном поле; в виде возникновения э. д. с. в контуре, перемещающемся в магнитном поле; в виде тока при коротком замыкании контура, нагревающего провода и др.

Энергия магнитного поля катушки с индуктивностью L по мере увеличения тока увеличивается, так как увеличивается потокосцепление Ψ катушки, и достигает максимума при установившемся значении тока I . Если просуммировать все приращения энергии магнитного поля за каждое предельно малое приращение тока при

¹Зная из формулы (2) размерность индуктивности $[L]=\left[\frac{В}{А} с\right]$ и сопротивления $[r]=[Ом]$ и выполняя действия, получаем размерность постоянной времени

$$[\tau]=\left[\frac{В \cdot с}{А \cdot Ом}\right]=[с].$$

изменении тока от 0 до установившегося значения I , то полная энергия, запасенная в магнитном поле, будет равна:

$$W_L = \frac{LI^2}{2}. \quad (3)$$

Важно отметить, что в цепи постоянного тока катушка индуктивности запасает энергию в магнитном поле только за время переходного процесса, т. е. за время нарастания тока с нуля (момент включения катушки) до установившегося значения, равное примерно

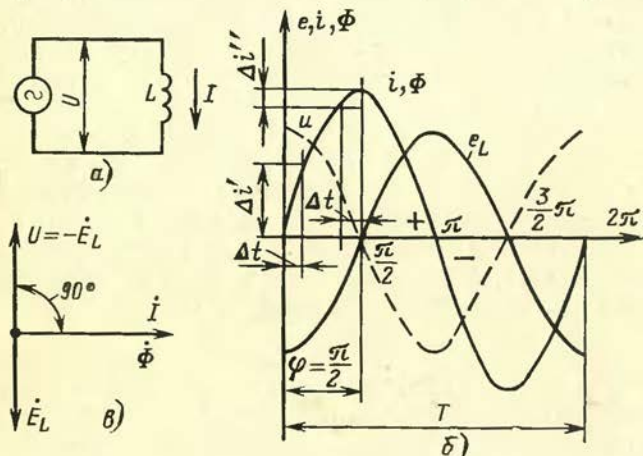


Рис. 1. Цепь с индуктивностью.

а — схема включения; б — график изменения тока i , потока Φ , э. д. с. самоиндукции e_L и приложенного напряжения u ; в — векторная диаграмма.

$\Delta t = 3\tau$. В дальнейшем же энергия в цепи, поступающая от источника тока, расходуется только на выделение тепла в сопротивлении катушки. Если катушку отключить от источника питания и замкнуть накоротко, то магнитное поле, уменьшаясь (исчезая), наведет в катушке э. д. с. самоиндукции и возникший затухающий ток будет выделять запасенную в магнитном поле энергию в виде тепла, образуемого от нагрева сопротивления r . Если цепь катушки, обтекаемую током, разомкнуть, то энергия магнитного поля высвободится в виде дуги (искры) в месте разрыва цепи, так как при почти мгновенном изменении тока от значения I до 0 наведенная э. д. с. самоиндукции будет очень велика, она опре-

деляется почти мгновенным изменением потока $d\Phi/dt$.

Рассмотрим теперь включение катушки индуктивности в цепь переменного тока (рис. 1,а). Если переменный ток i изменяется по синусоидальному закону (рис. 1,б), то изменение магнитного потока Φ , неразрывно связанного с током, его вызывающим, будет точно следовать за изменением тока¹. Следовательно, магнитный поток будет изменяться также по синусоидальному закону и его изменения по времени будут совпадать с изменениями тока, т. е. ток и магнитный поток совпадают по фазе. На этом основании изменения тока и магнитного потока изображены одной и той же кривой, но, естественно, в разных масштабах. Следовательно, если мгновенное значение тока определяется выражением

$$i = I_M \sin \omega t,$$

где I_M — максимальное (амплитудное) значение тока; $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ — угловая скорость (число периодов за 2π с); $f = 1/T$ — частота переменного тока (число периодов в секунду); T — период переменного тока; t — время, то мгновенное значение магнитного потока равно:

$$\Phi = \Phi_M \sin \omega t,$$

где Φ_M — максимальное (амплитудное) значение потока.

Изменение магнитного потока, как мы знаем из предыдущего, вызывает возникновение в катушке э. д. с. самоиндукции e_L , которая также изменяется по синусоидальному закону. Значение e_L зависит от числа витков и частоты переменного тока. На рис. 1,б изображен график синусоидального тока i (магнитного потока Φ). Рассматривая этот график, мы видим, что приращение тока за один и тот же промежуток времени $\Delta t \frac{\Delta i'}{\Delta t} > \frac{\Delta i''}{\Delta t}$ и, следовательно, скорость изменения тока di/dt (тоже и потока $d\Phi/dt$) максимальна при переходе синусоиды через нулевую линию, т. е. для момента времени, когда ток при изменении полярности равен нулю. Это значит, что e_L достигает максимума при $i=0$. Наоборот, при достижении током максимума скорость его изменения равна нулю, так как ток, увеличиваясь, достигает максимума и затем начинает уменьшаться.

¹ Здесь и ниже, как принято, мгновенные значения величины обозначаются строчными буквами, действующие — прописными и максимальные — прописными с индексом «м».

В этот момент э. д. с. самоиндукции равна нулю. Как видно на рис. 1,б, в первую четверть периода (при возрастании тока) э. д. с. самоиндукции отрицательна, во второй четверти периода (при уменьшении тока) э. д. с. положительна и т. д. Таким образом, э. д. с. самоиндукции отстает от вызвавшего ее тока на $1/4$ периода, т. е. на угол $\varphi = \pi/2$.

Чтобы ток в цепи с катушкой преодолел противодействующую э. д. с. самоиндукции, необходимо эту э. д. с. уравновесить напряжением U источника тока. Это уравновешивающее напряжение в любой момент времени равно э. д. с. самоиндукции, но имеет противоположное направление ($U = -E_L$) и, следовательно, опережает ток, проходящий по катушке, на угол $\pi/2$, как показано на векторной диаграмме на рис. 1,в.

Отсюда следует важный вывод: ток, проходящий по катушке индуктивности, активным сопротивлением которой можно пренебречь, отстает от приложенного к ее зажимам напряжения на угол 90° , т. е.

$$u = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Напряжение U , уравновешивающее э. д. с. самоиндукции, можно рассматривать как падение напряжения на зажимах катушки индуктивности при прохождении через нее тока, т. е. принять, что индуктивность катушки определяет сопротивление в цепи переменного тока. Это сопротивление, очевидно равное $x_L = U/I$, называется реактивным сопротивлением индуктивности или просто индуктивным сопротивлением и измеряется в омах.

Индуктивное сопротивление зависит от угловой скорости переменного тока и, следовательно, пропорционально частоте f и индуктивности L катушки и выражается формулой

$$x_L = 2\pi fL = \omega L^*. \quad (4)$$

Определим теперь мощность, потребляемую катушкой, полагая, что ее сопротивление $r = 0$.

Из электротехники известно, что мгновенная мощность p в любом случае равна произведению мгновенных

* Допустим, что при $f = 50$ Гц $x_L = 100$ Ом, при $f_1 = 60$ Гц (частота 60 Гц применяется в ряде зарубежных стран) $x_L = 100 \times 60/50 = 120$ Ом.

значений тока i и напряжения u для любого момента времени. Тогда

$$p = ui = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) I_m \sin \omega t = U_m I_m \cos \omega t \sin \omega t = \\ = \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t, \quad (5)$$

так как $I_m = \sqrt{2}I$ и $U_m = \sqrt{2}U$, где I и U — действующие значения тока и напряжения.

Из полученного выражения следует:

1. Мгновенная мощность p катушки индуктивности при $t=0$ изменяется по синусоидальному закону, но с двойной частотой.

2. Среднее значение активной (или средней) мощности, потребляемой индуктивностью, равно нулю, так как среднее значение ординат синусоид за период равно нулю (площадь положительной полуволны равна площади отрицательной полуволны).

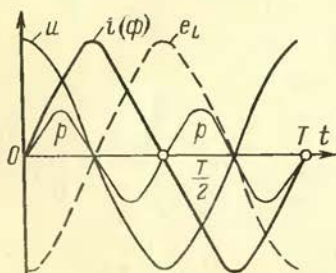


Рис. 2. Графики изменений тока i , магнитного потока Φ , приложенного напряжения u , э.д.с. самоиндукции e_L и мощности p в цепи с индуктивностью. T — период.

График изменения мгновенной мощности катушки показан на рис. 2. Как видно из графика, в течение первого полупериода тока (от 0 до $T/2$) мгновенная мощность p дважды достигает максимума — положительного, равного по формуле (4) $I^2 \omega L = I^2 x_L$ (так как в этот момент $\sin 2\omega t = 1$), и отрицательного, равного $-I^2 x_L^*$. Поэтому средняя мощность за полупериода равна нулю. Физически это явление можно представить так, что в течение первого положительного полупериода синусоиды мощности энергия от генератора поступает в катушку и накапливается в ней в виде наибольшего значения энергии магнитного поля, равной согласно (3)

* Мгновенная мощность $p = iu = i(ix_L) = i^2 x_L$ или в действующих значениях $P_x = I^2 x_L$.

$W_{LM} = LI^2_M/2$, а в течение второго отрицательного периода возвращается обратно генератору. В течение второго полупериода тока явление обмена энергией между генератором и магнитным полем катушки повторяется.

Отсюда следуют важные выводы:

1. Между генератором и магнитным полем катушки индуктивности происходит периодический (колебательный) обмен энергии без преобразования электрической энергии в тепловую (так как $r=0$), механическую или иную.

2. Средняя (или активная) мощность катушки равна нулю, т. е. катушка индуктивности не потребляет от генератора активную мощность (топливо на электростанции при таком обмене мощности не расходуется).

3. Колебательный процесс передачи мгновенной мощности $\pm p$ воспринимается валом турбины генератора как равнопеременная нагрузка с частотой $2f$, не вызывающая дополнительного расхода топлива.

Обменная энергия между генератором и индуктивностью оценивается по максимальному значению мгновенной обменной мощности (при $\sin 2\omega t = 1$). Эта мощность называется реактивной мощностью и обозначается Q , т. е.

$$Q = UI = I^2 \omega L = I^2 x^*_L, \quad (6)$$

где x_L — реактивное (индуктивное) сопротивление катушки.

Реактивная мощность измеряется в вольт-амперах реактивных (вар) и является мерой обменной энергии между генератором и индуктивной нагрузкой.

Заметим, что в системе электроснабжения отдельные звенья электропередачи и нагрузки всегда имеют индуктивную составляющую (трансформаторы, линии, асинхронные двигатели и др.).

Электрическое поле, емкость, реактивная мощность. Если к двум параллельным металлическим пластинам, разделенным изоляцией и называемым конденсатором, приложить постоянное напряжение, то на пластинах образуются разноименные по знаку электрические за-

* При значениях $\sin \varphi$, отличных от единицы, реактивная мощность вычисляется по формуле $Q = UI \sin \varphi$; подробнее этот вопрос рассмотрен ниже.

ряды и между пластинами возникнет электрическое поле. Это поле отличается от магнитного тем, что линии электрического поля не замкнуты и, начинаясь у положительного заряда одной пластины, оканчиваются у отрицательного заряда другой пластины (вне конденсатора электрического поля нет). Разноименно заряженные частицы или тела притягиваются друг к другу, одноименно заряженные — отталкиваются. Поэтому они способны совершать работу. Следовательно, электрическое поле, как и магнитное, обладает энергией, называемой электрической энергией. Эта энергия зависит от интенсивности электрического поля, определяемой его напряженностью $\epsilon = U/l$, где l — расстояние и U — напряжение между обкладками конденсатора.

Конденсаторы характеризуются емкостью, которая определяется зарядом одной из пластин (обкладок) конденсатора и приложенным напряжением и выражается формулой

$$C = \frac{Q}{U_C}, \quad (7)$$

где Q — заряд конденсатора (не смешивать с обозначением реактивной мощности), измеряемый в кулонах (Кл), откуда $U_C = Q/C$.

Заряд прямо пропорционален площади пластин конденсатора, обратно пропорционален расстоянию между пластинами и зависит от свойств диэлектрика (среда между обкладками). Следовательно, емкость конденсатора зависит от его конструкции и для данной конструкции постоянна.

Если разряженный конденсатор включить на постоянное напряжение, то в первый момент (момент включения) конденсатор еще не заряжен, $Q_0 = 0$, и поэтому напряжение на зажимах конденсатора $U_C = Q_0/C = 0$, что равнозначно короткому замыканию конденсатора. Следовательно, ток заряда (ток короткого замыкания) будет определяться только напряжением источника тока и сопротивлением внешней цепи r , т. е. $I_0 = U/r$.

В последующие моменты времени ток заряда будет спадать и при полном заряде конденсатора станет равным нулю. Время заряда t определяется по-

стоянной времени цепи $\tau = rC^*$ и практически равно $t \cong 3\tau$ (95% полного заряда).

Если заряженный конденсатор, отключив его от сети, замкнуть на сопротивление r , то конденсатор начнет разряжаться с той же постоянной времени. В первый момент разряда

$$I_1 = \frac{U_C}{r},$$

где U_C — напряжение заряженного конденсатора, а r — сопротивление цепи.

Разряд конденсатора закончится практически через время $t \approx 3\tau$. Таким образом, *постоянная времени характеризует как скорость заряда, так и скорость разряда конденсатора.*

При разряде конденсатора на сопротивление r запасенная в электрическом поле конденсатора энергия преобразуется в тепло, выделяемое в этом сопротивлении. При замыкании конденсатора накоротко энергия электрического поля высвобождается в искре, образуемой при замыкании зажимов конденсатора.

Энергия электрического поля конденсатора емкостью C , заряженного до напряжения U , определяется соотношением

$$W_C = \frac{UQ}{2} = \frac{CU^2}{2}. \quad (8)$$

Важно отметить, что в цепи постоянного тока конденсатор запасает энергию только за время заряда. Заряженный конденсатор не потребляет ток от источника тока.

Рассмотрим теперь включение конденсатора в цепь переменного синусоидального тока, причем примем $r=0$.

Предположим, что мы включили конденсатор на синусоидальное напряжение (рис. 3,а) в момент прохождения напряжения u через отрицательный максимум, т. е.

*Постоянная времени измеряется в секундах, что можно доказать следующим образом. Из формулы (7) следует, что $C = \left[\frac{\text{Кл}}{\text{В}} \right]$, но $[\text{Кл}] = [\text{А} \cdot \text{с}]$, откуда $C = \left[\frac{\text{А} \cdot \text{с}}{\text{В}} \right] = \left[\frac{\text{с}}{\text{Ом}} \right]$. Подставляя полученные результаты в формулу для вычисления постоянной времени $\tau = rC$, имеем $\tau = [\text{Ом}] \cdot \left[\frac{\text{с}}{\text{Ом}} \right] = \text{с}$.

в момент $u = -U_M$ (рис. 3,б). Мгновенное значение напряжения $u = U_M \sin \omega t$. По условию $r = 0$, поэтому конденсатор мгновенно зарядится до значения $-Q = CU_M$, в этот момент зарядный ток $i = 0$.

Далее, в течение $1/4$ периода напряжение уменьшается по синусоидальному закону до нуля (рис. 3,б). За каждый малый момент времени конденсатор мгновенно разряжается до соответствующего напряжению значения $q = CU_M \sin \omega t = Q \sin \omega t$ (так как $Q = CU$) и через $1/4$ периода при $U_M \sin \omega t = 0$ ток разряда достиг-

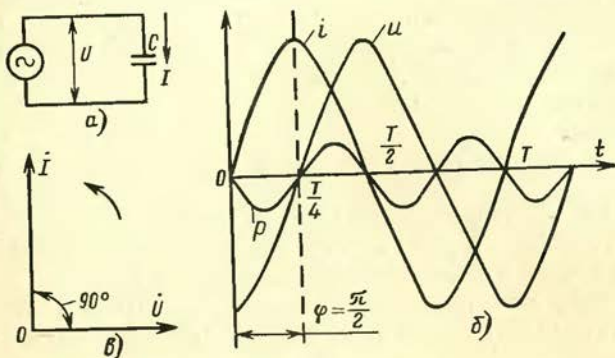


Рис. 3. Цепь с емкостью.

a — схема включения; *б* — графики изменения тока I , приложенного напряжения u и мощности p . T — период; *в* — векторная диаграмма.

нет максимального положительного значения. Далее, напряжение на зажимах конденсатора увеличивается в положительном направлении и по мере роста напряжения конденсатор заряжается, достигая при U_M наибольшего положительного заряда $+Q = CU_M$. Затем процесс повторяется.

Рассматривая график изменения тока и напряжения во времени, мы видим, что ток достигает максимума ранее на время $T/4$, чем напряжение. Таким образом, ток опережает напряжение.

Векторная диаграмма тока и напряжения показана на рис. 3,в. Для выбранного начала отсчета значения тока и напряжения будут выражаться формулами

$$i = I_M \sin \omega t$$

и

$$u = U_M \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Отсюда следует:

1. Ток в цепи с емкостью опережает на угол 90° напряжение, приложенное к зажимам конденсатора.

2. Заряд и разряд конденсатора происходят по синусоидальному закону. Это позволяет формально считать, что через конденсатор проходит переменный ток, значение которого зависит от емкости конденсатора и частоты переменного тока (т. е. от емкостного сопротивления конденсатора).

Емкостное сопротивление конденсатора, Ом, определяется выражением

$$x_C = \frac{U}{I} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (9)$$

Мгновенная мощность конденсатора равна:

$$p = ui = U_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) I_m \sin \omega t = UI \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) - \\ - UI \cos\left(2\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = -UI \sin 2\omega t.$$

Из полученного выражения следует:

1. Мгновенная мощность конденсатора изменяется по синусоидальному закону с двойной частотой.

2. Средняя (т. е. активная) мощность конденсатора равна нулю.

3. Мгновенная мощность конденсатора (т. е. цепи с емкостью) отрицательная по отношению к мгновенной мощности в цепи с индуктивностью (сравни, рис. 3,б и 2), что, как будет видно дальше, имеет большое практическое значение.

Как видно из рис. 3,б, в течение первой и третьей четвертей периода напряжение на зажимах конденсатора уменьшается от максимального значения U_m до нуля (независимо от знака напряжения) и конденсатор разряжается, а в течение второй и четвертой четвертей

*Доказать, что емкостное сопротивление конденсатора измеряется в омах, можно на основании следующего: $x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi} \frac{T}{C} = \frac{T}{2\pi C}$.

Но $Q = CU$, откуда $C = Q : U$ и, следовательно, $x_C = \frac{TU}{2\pi Q}$. Выполнив действия над размерностями, имеем $x_C = \left[\frac{с \cdot В}{А \cdot с} \right] = [Ом]$, так как заряд Q измеряется в кулонах или ампер-секундах.

периода напряжение увеличивается от 0 до U_m и конденсатор заряжается.

В течение заряда конденсатор потребляет от генератора энергию от 0 до $CU_m^2/2$, идущую на создание электрического поля конденсатора, а за время разряда энергия, запасенная в электрическом поле конденсатора, уменьшается от $CU_m^2/2$ до 0. Таким образом, при включении конденсатора в цепь генератора переменного тока (и полагая в цепи $r=0$) происходит периодический колебательный обмен мгновенной мощностью $\pm p$ между генератором и электрическим полем конденсатора с частотой $2f$ без преобразования в тепловую или механическую энергию. Обмен энергией между генератором и конденсатором происходит в течение каждого полупериода переменного тока, вследствие чего энергия, потребляемая конденсатором, равна нулю.

Мгновенное значение мощности в цепи с емкостью достигает максимального значения для момента времени, когда $\sin 2\omega t = 1$, является мерой обменной энергии между генератором и емкостной нагрузкой, называется реактивной мощностью конденсатора и выражается:

$$Q = UI = C\omega U^2 = I^2 x_C, \quad (10)$$

где x_C — реактивное (емкостное) сопротивление конденсатора.

Обратим еще раз внимание на то, что реактивная мощность емкости отрицательна по отношению к реактивной мощности индуктивности.

Как подробно рассмотрено ниже, в системе электроснабжения естественными конденсаторами являются, например, провода воздушной линии относительно друг друга и земли, жилы кабеля и т. п.

Коэффициент реактивной мощности. В реальных условиях электроснабжения звенья электропередачи и нагрузка потребителя всегда содержат наряду с активным сопротивлением составляющие индуктивного и емкостного сопротивлений. Как правило, всегда превалирует индуктивная нагрузка (а не емкостная), вследствие чего одновременно с активной мощностью должна передаваться и реактивная мощность индуктивного характера. В самом общем случае нагрузка в цепи переменного тока может быть сведена к схеме, состоящей из активного r_a , реактивного индуктивного x_L , имеющего

активное сопротивление r и реактивного емкостного x_c сопротивлений. На рис. 4,а приведена эквивалентная схема одной фазы электроприемника тока, содержащая все перечисленные составляющие сопротивлений. На рис. 4,б для этой схемы построена векторная диаграмма.

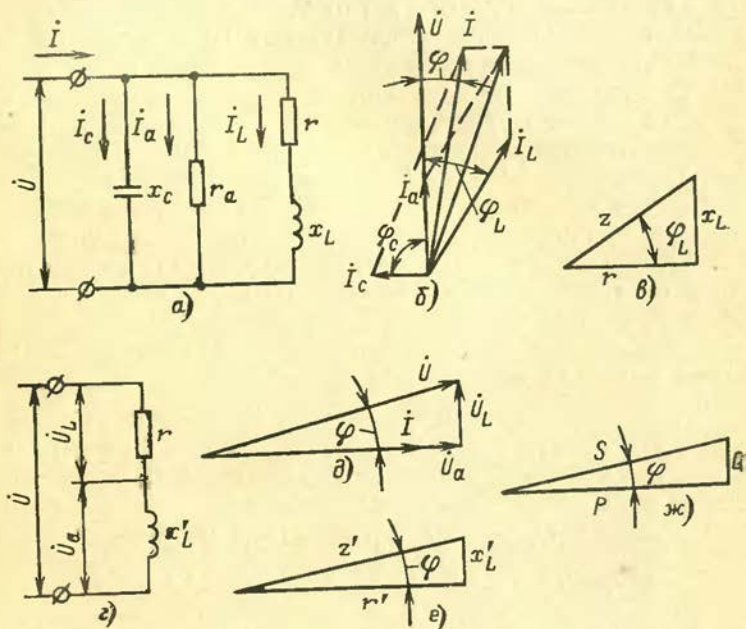


Рис. 4. Нагрузка в цепи переменного тока и ее векторные диаграммы. а — эквивалентная схема нагрузки; б — векторная диаграмма; в — треугольник сопротивлений для ветви с индуктивностью; з — схема замещения нагрузки; д — векторная диаграмма схемы замещения; е — треугольник сопротивлений схемы замещения; ж — треугольник мощностей нагрузки.

Как видно из схемы, напряжение \dot{U} приложено ко всем трем ветвям, соединенным параллельно. Ток \dot{I}_L в ветви с индуктивностью отстает от напряжения \dot{U} на угол φ_L , который определяется из треугольника сопротивлений¹ (рис. 4,в), построенного для ветви с индуктивностью $\operatorname{tg} \varphi_L = x_L/r$. Ток \dot{I}_a в цепи с активным сопротивлением совпадает по фазе с напряже-

¹ Полное сопротивление цепи z , состоящей из активного сопротивления r и реактивного x , определяется выражением $z = \sqrt{r^2 + x^2}$, и, следовательно, r и x являются катетами прямоугольного треугольника с гипотенузой z .

нием U , а ток I_C в цепи с емкостью опережает напряжение на угол $\varphi_C = 90^\circ$. В зависимости от соотношения реактивных сопротивлений x_L и x_C общий ток нагрузки I может отставать или опережать напряжение U . В данном примере превалирует индуктивное сопротивление и ток I отстает от U .

Из построенной векторной диаграммы видно, что схема электроприемника в данном случае может быть заменена простейшей схемой, состоящей из r' и x'_L (рис. 4,з), для которой векторная диаграмма и треугольник сопротивлений показаны на рис. 4,д и е соответственно.

На рис. 4,з емкостное сопротивление не показано, но оно противоположно по своему действию индуктивному сопротивлению и поэтому частично его скомпенсировало, что и отражено в векторной диаграмме: x'_L на рис. 4,е меньше x_L на рис. 4,в.

Мгновенная мощность, потребляемая электроприемником (рис. 4,з), равна:

$$p = ui = u_a i + u_L i = p_a + p_L.$$

Составляющая мгновенной мощности в активном сопротивлении, выраженная через действующие значения, равна:

$$\begin{aligned} p_a &= u_a i = U_{m.a} \sin \omega t I_{m.a} \sin \omega t = U_{m.a} I_{m.a} \sin^2 \omega t = \\ &= \frac{U_{m.a} I_{m.a}}{2} - \frac{U_{m.a} I_{m.a}}{2} \cos 2\omega t = U_a I - U_a I \cos 2\omega t, \end{aligned}$$

где $I_{m.a}$ и $U_{m.a}$ — максимальные активные значения тока и напряжения.

Среднее значение периодической слагаемой с двойной частотой за период равно нулю (знакопеременная нагрузка на вал турбины).

Постоянная составляющая $U_a I$, представляющая среднюю за период расходуемую мощность в активном сопротивлении на нагревание, называется активной мощностью цепи

$$P = U_a I = I^2 r'.$$

Из векторной диаграммы рис. 4,д видно, что $U_a = U \cos \varphi$, следовательно:

$$P = UI \cos \varphi. \quad (11)$$

Составляющая мгновенной мощности в индуктивном сопротивлении

$$p_L = u_L i = U_L I \sin 2\omega t.$$

Максимальная реактивная мощность цепи имеет место при $\sin 2\omega t = 1$, а так как согласно рис. 4, б $U_L = U \sin \varphi$, то реактивная мощность цепи

$$Q = UI \sin \varphi. \quad (12)$$

Коэффициент реактивной мощности цепи определяется отношением реактивной мощности к активной

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} \quad (13)$$

и наглядно выражает реактивную мощность в долях от активной. Здесь φ — угол сдвига фаз между током и напряжением нагрузки.

Коэффициент мощности цепи определяется косинусом угла сдвига фаз между током и напряжением нагрузки и выражается как $\cos \varphi = \frac{P}{UI}$ и для трехфазного тока

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3}UI}. \quad (14)$$

Коэффициент мощности менее показателен при оценке реактивной мощности цепи. Этот вопрос подробно рассмотрен ниже (см. с. 65).

Связь между указанными коэффициентами такая:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}.$$

Вернемся к схеме рис. 4, г, для которой на рис. 5 построены графики изменения во времени напряжений, тока и мощности в цепи с активным сопротивлением и индуктивностью. Как видно из графиков, за первый полупериод тока мгновенная мощность приемника p , а также ее составляющие p_a и p_L в течение времени $t_2 - t_1$ положительны. Энергия, получаемая от генератора, за это время частью преобразуется в сопротивлении r' в тепло, частью запасается в магнитном поле. В течение времени $t_3 - t_2$ мгновенная мощность приемника p и активная составляющая p_a положительны, а реактивная составляющая p_L отрицательна. За это время энергия, рассеиваемая в виде тепла в сопротивлении r' , получается от генератора и частично из магнитного поля, энергия которого убывает при уменьшении тока. Наконец, в течение времени $t_4 - t_3$ реактивная мощность p_L отри-

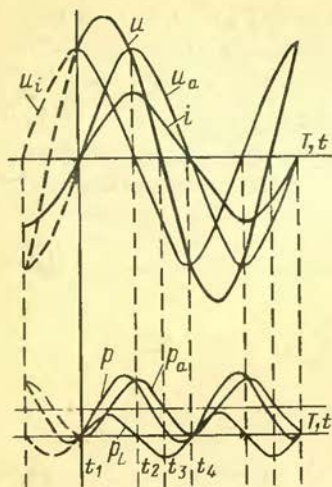


Рис. 5. Графики изменений напряжений, тока и мощности цепи с активным сопротивлением и индуктивностью.

цательна и превосходит по абсолютной величине положительную мощность p_a , т. е. энергия магнитного поля за это время возвращается генератору и частью превращается в тепло в сопротивлении r' . Далее процесс повторяется в той же последовательности.

Таким образом, сопротивление r' нагревается не только вследствие выделения в нем активной мощности за счет активной нагрузки $\Delta P_a = (I \cos \varphi)^2 r'$, но и дополнительно, за счет обмена энергией генератора и магнитного поля

$$\Delta P_p = (I \sin \varphi)^2 r'.$$

Из сказанного вытекают важные выводы:

1. При обмене энергии между генератором и магнитным полем и обратно в сети возникают дополнительные потери активной мощности или, другими словами, при передаче по сети реактивной мощности всегда затрачивается дополнительная активная мощность на потери в сети.

2. Так как реактивная мощность всегда сопутствует активной, то неизбежно возникают дополнительные активные потери в сети.

3. Возникает проблема возможного снижения активных потерь в сети при передаче реактивной мощности, имеющая народнохозяйственное значение.

Если при неизменных номинальных действующих значениях тока и напряжения изменяется коэффициент мощности от нуля (при $\varphi = \pm 90^\circ$) до единицы ($\varphi = 0$), то активная мощность изменяется в пределах от нуля до значения $P = UI$. Эта максимальная величина мощности S называется полной мощностью, измеряется в вольт-амперах (В·А):

$$S = UI \quad (15)$$

и определяет предельную передаваемую мощность.

Зная, что

$$(UI \cos \varphi)^2 + (UI \sin \varphi)^2 = (UI)^2,$$

имеем:

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

откуда

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (16)$$

Этому выражению соответствует треугольник мощностей (рис. 4, ж), из которого могут быть определены $\cos \varphi = P/S$; $\sin \varphi = Q/S$ и $\operatorname{tg} \varphi = Q/P$.

Дальнейшее изложение и посвящено проблеме снижения реактивной мощности, т. е. вопросу компенсации реактивной мощности. В чем же заключается принцип компенсации реактивной мощности? Как было установлено, ток, проходящий через конденсатор, опережает приложенное к нему напряжение на 90° , в то время как ток, проходящий через катушку индуктивности, отстает от приложенного напряжения на 90° . Таким образом, емкостный ток противоположен индуктивному току и реактивная мощность, идущая на создание электрического поля, противоположна по направлению реактивной мощности, идущей на создание магнитного поля. Поэтому емкостный ток и емкостная реактивная мощность считаются условно отрицательными по отношению к току намагничивания и реактивной мощности намагничивания, условно принятыми положительными. Таким образом, численно равные реактивные мощности емкости и намагничивания взаимно «уничто-

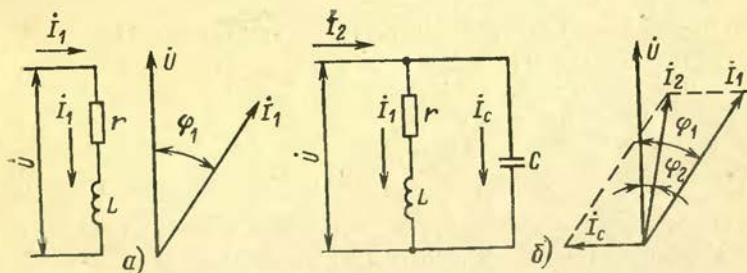


Рис. 6. Принцип компенсации реактивного тока намагничивания.

а — схема до компенсации, φ_1 — угол сдвига фаз между током I_1 и напряжением U ; б — схема с компенсацией. Угол сдвига фаз φ_2 между током I_2 и напряжением U уменьшился ($\varphi_2 < \varphi_1$), а коэффициент мощности увеличился ($\cos \varphi_2 > \cos \varphi_1$).

жаются» ($Q_C - Q_L = 0$) и сеть разгружается от протекающей реактивной составляющей тока нагрузки. Принцип компенсации при помощи емкостного тока поясняет векторная диаграмма на рис. 6.

Емкость конденсатора C , подключенного параллельно нагрузке, содержащей r и L , подбирают такой, чтобы ток I_C , проходящий через конденсатор, был по возможности близок по абсолютной величине к намагничивающему току I_L , потребляемому индуктивностью L . Из векторной диаграммы видно, что подключение конденсатора C дало возможность уменьшить угол сдвига фаз между током и направлением нагрузки с величины φ_1 до величины φ_2 и соответственно повысить коэффициент мощности нагрузки. Увеличивая емкость, можно полностью скомпенсировать реактивную мощность нагрузки, когда $\varphi = 0$.

Расчет компенсирующей емкости, как будет показано ниже, обычно производится по реактивной мощности, потребляемой нагрузкой и компенсирующей конденсаторной батареей.

2. ПОТРЕБИТЕЛИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Потребителями реактивной мощности, необходимой для создания магнитных полей, являются как отдельные звенья электропередачи (трансформаторы, линии, реакторы), так и такие электроприемники, преобразующие электроэнергию в другой вид энергии, которые по принципу своего действия используют магнитное поле (асинхронные двигатели, индукционные печи и т. п.).

До 80—85% всей реактивной мощности, связанной с образованием магнитных полей, потребляют асинхронные двигатели и трансформаторы. Относительно меньшая часть в общем балансе реактивной мощности приходится на долю прочих ее потребителей, например на индукционные печи, сварочные трансформаторы, преобразовательные установки, люминесцентное освещение и т. п.

Ниже мы познакомимся с основными потребителями реактивной мощности и выясним зависимость ее потребления от режима работы оборудования.

Трансформатор как потребитель реактивной мощности. Трансформатор является одним из основных звеньев в передаче электроэнергии от электростанции до потребителя. В зависимости от расстояния между электро-

станцией и потребителем и от схемы передачи электроэнергии число ступеней трансформации лежит в пределах от двух до шести. Поэтому установленная трансформаторная мощность обычно в несколько раз превышает суммарную мощность генераторов энергосистемы.

Каждый трансформатор сам является потребителем реактивной мощности. Реактивная мощность необходима для создания переменного магнитного потока, при по-

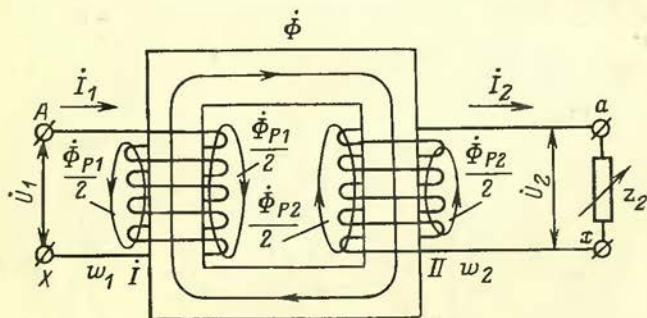


Рис. 7. Схема трансформатора.

Φ — главный магнитный поток трансформатора; Φ_{p1} , Φ_{p2} — потоки рассеяния первичной и вторичной обмоток; z_2 — переменная нагрузка трансформатора; I_1 , I_2 , U_1 , U_2 , w_1 , w_2 — токи, напряжения и числа витков первичной (I) и вторичной (II) обмоток трансформатора.

мощи которого энергия из одной обмотки трансформатора передается в другую. Кроме того, реактивная мощность затрачивается на создание потоков рассеяния. Дело в том, что в силу несовершенства конструкции трансформатора не весь магнитный поток, возбуждаемый первичной обмоткой, сцепляется со всеми витками обмоток. Неизбежно часть магнитного потока Φ_{p1} замыкается побочными путями через корпус и главным образом через воздух и сцеплена только с витками первичной обмотки. При работе трансформатора с нагрузкой, т. е. когда ток проходит и по вторичной обмотке, часть магнитного потока Φ_{p2} сцепляется только с витками вторичной обмотки и замыкается также в основном по воздуху. Эти потоки Φ_{p1} и Φ_{p2} и называются потоками рассеяния (рис. 7). Потоки рассеяния, пересекая витки соответствующих обмоток, наводят

в них э. д. с. самоиндукции, эквивалентные некоторой индуктивности трансформатора.

Необходимо отметить, что главный поток Φ , замыкающийся по стальному магнитопроводу при экономически выбранных индукциях, не прямо пропорционален питающему напряжению (в силу непропорциональной зависимости от тока), а потоки рассеяния, замыкающиеся в основном по воздуху, пропорциональны току и определяемая ими индуктивность не зависит от тока, т. е. постоянна.

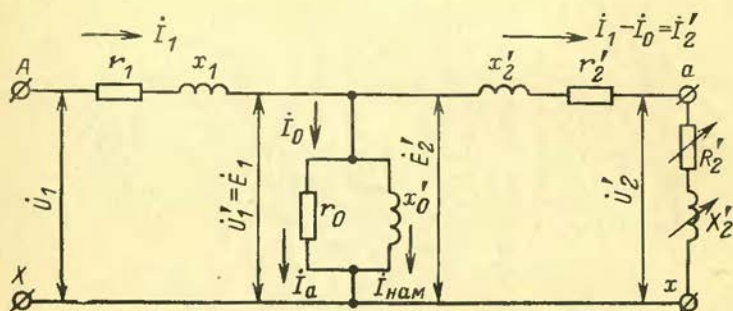


Рис. 8. Схема замещения трансформатора.

Схема замещения трансформатора. Для удобства изучения поведения трансформатора при различных режимах его схему, изображенную на рис. 7, заменяют эквивалентной ей схемой замещения, изображенной на рис. 8. Схема замещения составлена для одной фазы трансформатора, поскольку нагрузка принимается равномерной. Необходимо обратить внимание на то, что первичная и вторичная обмотки трансформатора электрически изолированы, но, несмотря на это, как доказывалось в теории трансформаторов, схема замещения может быть представлена T-обратной схемой. Параметры отдельных элементов схемы замещения выбираются так, чтобы напряжения, токи и мощности обеих схем (схемы на рис. 7 и 8) были одинаковы.

Коэффициент трансформации в схеме замещения всегда принимается равным единице. Для этого параметры вторичной обмотки (со штрихами) пересчитывают

(приводят) к параметрам первичной обмотки по формулам

$$U'_2 = U_2 \frac{\omega_1}{\omega_2}; I'_2 = I_2 \frac{\omega_2}{\omega_1}; r'_2 = r_2 \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2;$$

$$x'_2 = x_2 \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2; z'_2 = z_2 \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2.$$

где ω_1 и ω_2 — число витков первичной и вторичной обмоток.

Ток, создающий главный магнитный поток, определяется параллельно ветвью r_0 и x_0 , где активное сопротивление r_0 эквивалентно активным потерям в стальном сердечнике, вызванным перемагничиванием и вихревыми токами, а индуктивное сопротивление x_0 определяет непосредственно намагничивающий ток $I_{\text{нам}}$ и э. д. с. самоиндукции E_1 . В соответствии с этим ток I_0 ветви содержит активную составляющую I_a и реактивную составляющую $I_{\text{нам}}$, сдвинутые друг относительно друга на 90° , так как $I_0^2 = I_a^2 + I_{\text{нам}}^2$.

Сопротивления r_1 и r'_2 соответствуют активным сопротивлениям первичной и приведенной вторичной обмоток; x_1 и x'_2 — реактивные сопротивления, определяемые потоками рассеяния. Обычно $r_0 \gg r_1$ и r'_2 и $x_0 \gg x_1$ и x'_2 .

Переменные составляющие нагрузки трансформатора X'_2 и R'_2 также приведены в первичной обмотке. Напряжение сети U_1 приложено к зажимам A и X первичной обмотки, при этом на вторичных зажимах a и x имеется вторичное приведенное напряжение U'_2 .

Приведенный вторичный ток I'_2 нагрузки равен геометрической разности векторов первичного тока I_1 и тока параллельной ветви $I_0 = \sqrt{I_a^2 + I_{\text{ном}}^2}$.

Векторная диаграмма трансформатора при холостом ходе (т. е. при разомкнутой вторич-

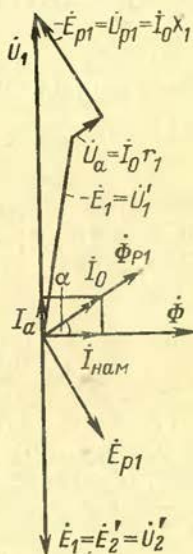


Рис. 9. Векторная диаграмма трансформатора при холостом ходе.

ной обмотке), построенная для схемы замещения, приведена на рис. 9.

На диаграмме э. д. с. индуктивности намагничивания изображена вектором \dot{E}_1 , который уравнивает вектор $-\dot{E}=\dot{U}'_1$ (падение напряжения на индуктивности намагничивания). Электродвижущая сила индуктивности рассеяния \dot{E}_{p1} уравнивается вектором $-\dot{E}_{p1}=\dot{U}_{p1}$ (падение напряжения на индуктивности рассеяния). Главный поток $\dot{\Phi}$ совпадает по фазе с намагничивающим током $I_{\text{нам}}$. Поток же рассеяния первичной обмотки $\dot{\Phi}_{p1}$ находится в фазе с током I_0 и, следовательно, не совпадает по фазе с главным потоком на угол α , определяемый соотношением $\text{tg } \alpha = I_a/I_{\text{нам}}$. Напряжение сети \dot{U}_1 уравнивает все составляющие падений напряжения в обмотке

$$\dot{U}_1 = \dot{U}'_1 + \dot{U}_{p1} + \dot{U}_a.$$

При холостом ходе $\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2$.

Как видно из векторной диаграммы, реактивная мощность трансформатора на холостом ходу равна:

$$Q_0 = I_{\text{нам}} U'_1 + I_0 U_{p1},$$

что следует из того, что $I_{\text{нам}}$ и U'_1 , а также I_0 и U_{p1} взаимно перпендикулярны, т. е. представляют слагаемые реактивной мощности холостого хода. (Активная мощность этих слагаемых равна нулю.) Но так как $U'_1 \gg U_{p1}$ и $\alpha \approx 0$, то можно принять, что $I_0 \approx I_{\text{нам}}$ и $U_1 = U'_1$ и тогда с достаточным для практики приближением можно найти:

$$Q_0 = I_0 U_1 = \frac{I \%}{100} I_n U_n = \frac{I \% S_n}{100}, \quad (17)$$

где $I, \%$ — ток холостого хода трансформатора в процентах номинального тока нагрузки (дается в каталоге); S_n — номинальная полная мощность трансформатора, В·А (если U_n дается в киловольтах, то S_n — в киловольтамперах).

Векторная диаграмма трансформатора, работающего на комплексную (индуктивную) нагрузку, приведена на рис. 10. Ток нагрузки создает в первичной обмотке падение напряжения $I_1 z_1$, а во вторичной $I'_2 z'_2$, причем $z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2}$ и $z'_2 = \sqrt{(r'_2)^2 + (x'_2)^2}$.

Коэффициент мощности нагрузки (см. рис. 8)

$$\cos \varphi = \frac{R'_2}{\sqrt{(R'_2)^2 + (x'_2)^2}}$$

Эта диаграмма отличается от диаграммы холостого хода тем, что первичный ток $I_1 = I'_2 + I_0$ и $I_1 \gg I_0$, вследствие чего пренебрегать реактивным падением напряжения в обмотках трансформатора, вызванным индуктивностью рассеяния, нельзя.

Реактивное падение напряжения, вызванное номинальным током трансформатора, называется напряжением короткого замыкания u_k . Оно обычно выражается в процентах номинального напряжения и приводится в каталогах.

Действительно, если на схеме замещения (см. рис. 8) замкнем накоротко вторичные зажимы ax , а к первичным зажимам $AХ$ подведем такое напряжение, чтобы по цепи $x_1 r_1 - x'_2 r'_2$ проходил номинальный ток, то приближенно $u_k = (x_1 + x'_2) I_1 = (x_1 + x'_2) I'_2$, так как $x_1 \approx z_1$, $x'_2 \approx z'_2$, а $I_0 \approx 0$ (так как $u_k \ll U_n$) или $u_k = I_n x$, где $x = x_1 + x'_2$.

Реактивная мощность потоков рассеяния при номинальной нагрузке трансформатора приближенно определяется по выражению

$$Q_{p,n} = I_n^2 x = I_n u_k = \frac{u_k \%}{100} U_n I_n = \frac{u_k \% S_n}{100}, \quad (18)$$

где S_n — номинальная мощность трансформатора; $u_k \%$ — напряжение короткого замыкания (по каталогу).

При нагрузке отличной от номинальной, когда $I/I_n = \beta$:

$$Q_p = \frac{u_k \% S_n}{100} \beta^2,$$

так как $Q = I^2 x$.

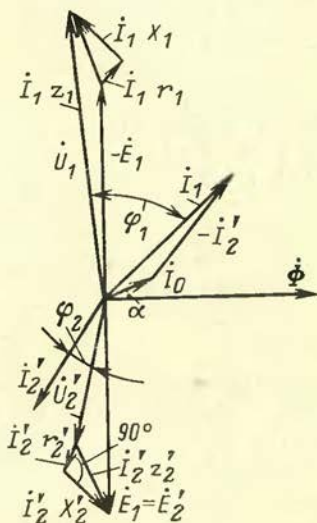


Рис. 10. Векторная диаграмма трансформатора с нагрузкой индуктивного характера.

Полная реактивная мощность трансформатора при любой нагрузке определяется выражением

$$Q = Q_0 + Q_p = \frac{I\% S_n}{100} + \frac{u_k\% S_n}{100} \beta^2 = \frac{S_n}{100} (I^0/\% + u_k^0/\% \beta^2). \quad (19)$$

Таким образом, реактивная мощность трансформатора состоит из двух частей — реактивной мощности холостого хода Q_0 , не зависящей от нагрузки, и реактивной мощности рассеяния Q_p , зависящей от тока нагрузки. При уменьшении нагрузки трансформатора от номинальной до холостого хода реактивная мощность уменьшается от 100 примерно до 40—50%.

Пример. Определить реактивную мощность трансформатора 560 кВ·А, 6/0,4 кВ, если согласно ГОСТ $I_0=6\%$, $u_k=5,5\%$.

Реактивная мощность трансформатора при холостом ходе по (17)

$$Q_0 = \frac{6 \cdot 560}{200} = 33,6 \text{ квар.}$$

Реактивная мощность, зависящая от нагрузки по (18) (для номинальной нагрузки):

$$Q_{p,n} = \frac{5,5 \cdot 560}{100} = 30,8 \text{ квар.}$$

Полная реактивная мощность по (19) для номинальной нагрузки

$$Q_n = 33,6 + 30,8 = 74,4 \text{ квар.}$$

Полная реактивная мощность для половинной нагрузки $\beta=0,5$ по (19)

$$Q = \frac{560}{100} (6 + 5,5 \cdot 0,5^2) = 41,3 \text{ квар.}$$

Для ориентировки ниже даны средние значения тока холостого хода $I_0, \%$, и напряжения короткого замыкания $u_k, \%$, трансформаторов в зависимости от их мощности S_n и номинального первичного напряжения U_n :

S_n , кВ·А	100	1000	10 000
U_n , кВ	6,3—35	10—35	35—120
$I_0, \%$	6—8	5—5,5	3—3,5
$u_k, \%$	5,5—6,5	5,5—6,5	7,5—10,5

Из приведенных данных видно, что с увеличением номинальной мощности трансформатора ток холостого хода $I_0, \%$, уменьшается, а напряжение короткого замыкания $u_k, \%$ — увеличивается. При прикидочных расче-

тах для трансформаторов средней мощности (цеховые трансформаторы 630—2500 кВ·А) можно принимать, что ток холостого хода в процентах численно равен напряжению короткого замыкания в процентах. Тогда номинальная реактивная мощность трансформатора может быть приближенно подсчитана по выражению, квар:

$$Q_n \approx \frac{2I_0 \% S_n}{100} \approx \frac{2u_k \% S_n}{100}. \quad (20)$$

Изменение реактивной мощности трансформатора не пропорционально изменению напряжения питания. Дело в том, что по технико-экономическим соображениям индукция в стальном сердечнике при номинальном напряжении принимается обычно довольно высокой, вследствие чего при повышении напряжения сердечник быстро насыщается (чрезмерная индукция) и связь между намагничивающим током и напряжением теряет пропорциональность — ток холостого хода возрастает значительно быстрее прироста напряжения. Реактивная мощность холостого хода Q_0 при этом также возрастает непропорционально, а в большей степени. Поэтому, если трансформатор имеет ответвления со стороны питания, необходимо следить за тем, чтобы трансформатор работал с ответвлением, соответствующим данному напряжению сети. Если номинальное напряжение ответвления меньше напряжения сети, то реактивная мощность намагничивания увеличивается. При уменьшении напряжения (по сравнению с номинальным) ток холостого хода и реактивная мощность намагничивания Q_0 уменьшаются примерно пропорционально снижению напряжения.

Составляющая реактивной мощности Q_p , зависящая от нагрузки (и определяемая потоком рассеяния), изменяется прямо пропорционально току нагрузки (так как поток замыкается в основном по воздуху), и если этот ток изменяется пропорционально напряжению, то изменение Q_p также пропорционально напряжению.

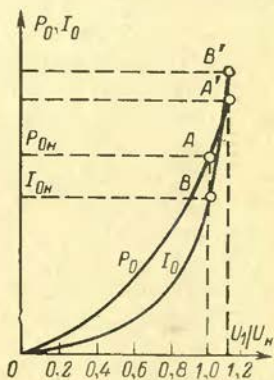


Рис. 11. Зависимость тока холостого хода и реактивной мощности трансформатора от изменения напряжения.

Для примера на рис. 11 приведена зависимость тока и мощности холостого хода от изменения напряжения. График построен следующим образом. По вертикальной оси отложены значения тока I_0 и мощности P_0 холостого хода. По горизонтальной оси отложены относительные значения напряжения, т. е. отношение приложенного к трансформатору напряжения сети U_1 к номинальному напряжению трансформатора U_H . При $U_1=U_H$ ($U_1/U_H=1$) трансформатор потребляет номинальную мощность холостого хода P_{0H} (точка A) и номинальный ток холостого хода I_{0H} (точка B), приводимые в каталожных данных на трансформаторы. Как видно из графика, при повышении напряжения сети, например, на 10% ($U_1/U_H=1,1$) мощность и ток холостого хода трансформатора резко возрастают (не пропорционально увеличению напряжения, точки A' и B' соответственно).

Асинхронный двигатель как потребитель реактивной мощности. Асинхронные двигатели наряду с активной мощностью потребляют до 60—65% всей реактивной мощности нагрузок энергосистемы.

По принципу действия асинхронный двигатель подобен трансформатору. Как и в трансформаторе, энергия первичной обмотки двигателя — статора передается во вторичную обмотку — ротор посредством магнитного поля. В теории асинхронных машин показывается, что магнитное поле создается совместным действием намагничивающих сил (н. с.) обмоток статора и ротора, которые вращаются относительно статора с одной и той же скоростью и, следовательно, неподвижны относительно друг друга. Это и дает возможность рассматривать асинхронный двигатель с вращающимся ротором с механической нагрузкой на валу как статический трансформатор. Вторичной нагрузкой этого трансформатора является активное сопротивление, в котором поглощается мощность, равная мощности на валу двигателя, включая потери. Доказано, что таким сопротивлением нагрузки является активное сопротивление, численно равное r_2/s , где r_2 — сопротивление ротора и s — скольжение двигателя. Напомним, что скольжением s , %, называется отношение частоты вращения магнитного поля относительно ротора к синхронной частоте вращения поля, т. е.

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1},$$

где $n_1=60f_1/p$ — синхронная частота вращения магнитного поля, об/мин; n_2 — частота вращения ротора, зависящая от нагрузки на валу, об/мин; f_1 — частота переменного тока, питающего статор двигателя, Гц; p — число пар полюсов двигателя.

Например, если $n_1=1500$ об/мин и $n_2=1470$ об/мин, то скольжение. $s = \frac{1500 - 1470}{1500} = 0,02$ или 2% .

Частота вращения ротора зависит от нагрузки и с увеличением нагрузки уменьшается, причем номинальной нагрузке соответствует номинальная частота вращения ротора (указывается на щитке двигателя). Поэтому скольжение однозначно связано с нагрузкой. С увеличением нагрузки на валу скольжение увеличивается, что эквивалентно уменьшению активного сопротивления во вторичной цепи эквивалентного трансформатора, т. е. увеличению нагрузки трансформатора.

Схема замещения двигателя. Аналогия асинхронного двигателя с трансформатором приводит нас к схеме замещения асинхронного двигателя (рис. 12), точно соответствующей схеме замещения трансформатора. Для полной аналогии схемы замещения асинхронного двигателя со схемой замещения с трансформатора преобразуем цепь ротора следующим образом:

$$\frac{r'_2}{s} + jx'_2 = \frac{r'_2}{s} + r'_2 - \frac{r'_2 s}{s} + jx'_2 = r'_2 + jx'_2 + r'_2 \frac{1-s}{s}.$$

Это дает нам формальную возможность считать в качестве вторичной нагрузки замещаемого трансформатора переменное сопротивление $r'_2(1-s)/s$, зависящее от скольжения (т. е. от нагрузки на валу замещенного асинхронного двигателя), при известных параметрах вторичной обмотки $r'_2 + jx'_2$ *

Существенным отличием магнитной системы двигателя от магнитной системы трансформатора является наличие относительно большого воздушного зазора меж-

* Параметры обмотки ротора приведены к параметрам обмотки статора, так же как и для трансформаторов. Цель такого преобразования — привести параметры цепи ротора двигателя к виду вторичных обмоток трансформатора и в то же время учесть специфическую для асинхронных двигателей величину, а именно скольжение.

В данном случае алгебраически выражены геометрические величины; они определяются комплексными числами, в связи с чем в формуле введена величина j .

ду статором и ротором. На преодоление этого воздушного зазора магнитным потоком требуется большая н. с. обмотки двигателя, что приводит к большему намагничивающему току и к значительно большему току холостого хода асинхронного двигателя по сравнению с трансформатором. В зависимости от величины воздушного зазора ток холостого хода асинхронного двигателя лежит в пределах от 25 до 60% I_n , в то время как ток холостого хода трансформатора составляет 2—6% номинального тока.

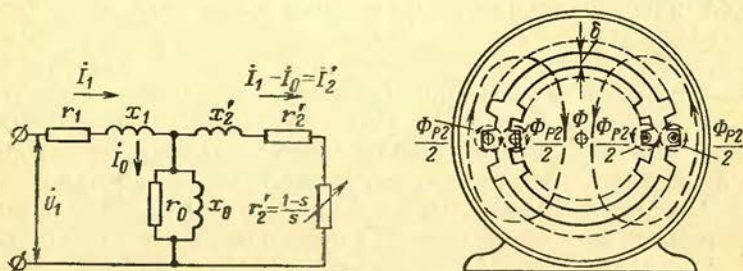


Рис. 12. Схема замещения асинхронного двигателя.

\dot{U}_1 — напряжение сети; \dot{I}_1 — ток статора; \dot{I}_2' — приведенный ток ротора; \dot{I}_0 — ток параллельной ветви намагничивания; r_1 , x_1 и x'_2 , r'_2 — соответственно активные и реактивные сопротивления обмоток статора и ротора (приведенные); $r'_2(1-s)/s$ — эквивалентное сопротивление нагрузки (s — скольжение двигателя); r_0 , x_0 — параметры ветви намагничивания.

Рис. 13. Потoki рассеяния асинхронного двигателя (для одной фазы).

Φ — главный магнитный поток; Φ_{p1} — поток рассеяния статора; Φ_{p2} — поток рассеяния ротора; δ — воздушный зазор между статором и ротором.

Наличие воздушного зазора приводит также к увеличению потоков рассеяния статора и ротора.

На рис. 13 приведена картина распределения главного потока Φ и потоков рассеяния Φ_{p1} и Φ_{p2} для одной фазы двигателя. Индуктивности на схеме замещения (см. рис. 12), определяющие эти потоки, соответственно представлены реактивными сопротивлениями x_0 , x_1 и x'_2 . Векторная диаграмма двигателя не отличается от векторной диаграммы трансформатора (см. рис. 10).

Так же как и для трансформатора, реактивная мощность асинхронного двигателя изменяется в пределах от реактивной мощности холостого хода Q_0 до реактивной мощности, потребляемой при номинальной нагрузке Q_n , причем увеличение реактивной мощности при увеличе-

нии нагрузки так же обуславливается потоками рассеяния, зависящими от тока нагрузки.

Реактивная мощность двигателя. При номинальном напряжении потребляемая асинхронным двигателем реактивная мощность Q может быть выражена:

$$Q = Q_0 + \beta^2 I^2 x = Q_0 + \beta^2 Q_p, \quad (21)$$

где Q_0 — реактивная мощность холостого хода двигателя; Q_p — реактивная мощность рассеяния при нагрузке; $\beta = P/P_n$.

Номинальная реактивная мощность асинхронного двигателя может быть определена по паспортным (табличным) данным двигателя, квар:

$$Q_n = \frac{P_n}{\eta_n} \operatorname{tg} \varphi_n, \quad (22)$$

где η_n — к. п. д. двигателя по каталогу (номинальный); $\operatorname{tg} \varphi_n$ соответствует $\cos \varphi_n$, указанному на щитке; P_n — номинальная мощность двигателя на валу, кВт.

Эта формула следует из треугольника мощностей, приведенного на рис. 4, ж.

Так как для асинхронных двигателей при холостом ходе $\cos \varphi_{x,x} \approx 0,1 \div 0,2$, чему соответствует $\sin \varphi_{x,x} = 0,99 \div 0,97$, то пренебрегая активной составляющей тока холостого хода двигателя, обусловленной механическими потерями и потерями в стали, можно принять $\sin \varphi_{x,x} \approx 1$. Тогда реактивная трехфазная мощность намагничивания приблизительно может быть определена по выражению, квар:

$$\begin{aligned} Q_0 &\approx \sqrt{3} I_{x,x} U_n = \sqrt{3} I_n U_n \cos \varphi_n \frac{I_{x,x}}{I_n \cos \varphi_n} = \\ &= \frac{P_n}{\eta_n} \frac{I_{x,x}}{I_n \cos \varphi_n}. \end{aligned} \quad (23)$$

Погрешность в определении Q_0 при этом составляет 1—3%. Ток холостого хода должен быть измерен при холостом ходе двигателя при U_n с расцепленной муфтой.

Реактивная мощность потоков рассеяния двигателя, зависящая от нагрузки, определится из выражения

$$Q_p = (Q_n - Q_0) \beta^2 = \beta^2 \frac{P_n}{\eta_n} \left(\operatorname{tg} \varphi_n - \frac{I_{x,x}}{I_n \cos \varphi_n} \right).$$

Подставляя найденные значения Q_0 и Q_p в (21), получим выражение полной реактивной мощности асинхронного двигателя

$$Q = \frac{P \operatorname{tg} \varphi}{\eta} = \frac{P_n}{\eta_n} \left[\frac{I_{x,x}}{I_n \cos \varphi_n} + \beta^2 \left(\operatorname{tg} \varphi_n - \frac{I_{x,x}}{I_n \cos \varphi_n} \right) \right], \quad (24)$$

где P , η и $\operatorname{tg} \varphi$ соответствуют данной нагрузке двигателя; $\beta = P_{\eta_n} / (P_{n\eta}) \approx P / P_n$.

Пример. Определить реактивную мощность асинхронного двигателя типа А52-2, 10 кВт, 380 В, $\cos \varphi_n = 0,89$ ($\operatorname{tg} \varphi_n = 0,512$), $\eta = 0,875$ для нагрузок 100 и 50%.

Для номинальной нагрузки по (22)

$$Q_n = \frac{10}{0,875} 0,512 = 5,85 \text{ квар.}$$

Номинальный ток двигателя

$$I_n = \frac{10}{\sqrt{3 \cdot 0,38 \cdot 0,89 \cdot 0,875}} = 19,6 \text{ А.}$$

Измеряем ток холостого хода двигателя при расцепленной муфте: $I_{x,x} = 5$ А.

Тогда реактивная мощность двигателя для 5 кВт ($\beta = 0,5$) согласно (24)

$$Q = \frac{10}{0,875} \left[\frac{5}{19,6 \cdot 0,89} + 0,5^2 \left(0,512 - \frac{5}{19,6 \cdot 0,89} \right) \right] = 3,9 \text{ квар.}$$

Коэффициент реактивной мощности¹ при нагрузке 50% по (13) $\operatorname{tg} \varphi_{0,5} = 3,9/5,0 = 0,685$, а коэффициент мощности (активной) $\cos \varphi_{0,5} = 0,825$.

Необходимо подчеркнуть, что реактивная мощность намагничивания для асинхронных двигателей (не зависящая от нагрузки) по сравнению с трансформаторами является определяющей и составляет 60—80% полной. Поэтому при уменьшении активной нагрузки реактивная мощность почти не уменьшается (уменьшается очень незначительно), вследствие чего коэффициент реактивной мощности непропорционально повышается, а коэффициент мощности понижается. Так, если $P_1 > P_2$, то практически $Q_1 \approx Q_2 = Q$ и тогда $Q/P_1 < Q/P_2$, т. е. $\operatorname{tg} \varphi_1 < \operatorname{tg} \varphi_2$ или $\cos \varphi_1 > \cos \varphi_2$.

¹ Напомним, что коэффициентом реактивной мощности называется $\operatorname{tg} \varphi = Q/P$, а коэффициент мощности (активной) — $\cos \varphi =$

$$= \frac{P}{\sqrt{3}IU} = \frac{P}{S}.$$

Зависимость реактивной мощности асинхронного двигателя от напряжения. Посмотрим, как изменяется реактивная мощность асинхронного двигателя при изменении питающего напряжения. При увеличении напряжения увеличивается магнитный поток Φ , создающий э. д. с. E_1 , уравнивающую почти полностью увеличенное напряжение сети U_1 . Увеличение магнитного потока связано с увеличением намагничивающего тока, что влечет за собой увеличение реактивной составляющей мощности, потребляемой двигателем при холостом ходе. При насыщении магнито-

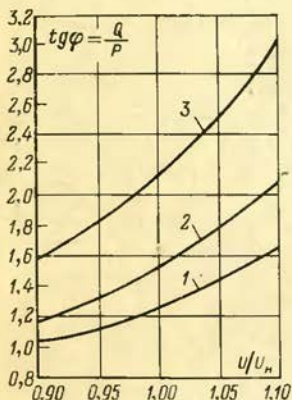


Рис. 14. Зависимость $\operatorname{tg} \varphi$ от напряжения для асинхронного двигателя мощностью 1 кВт.

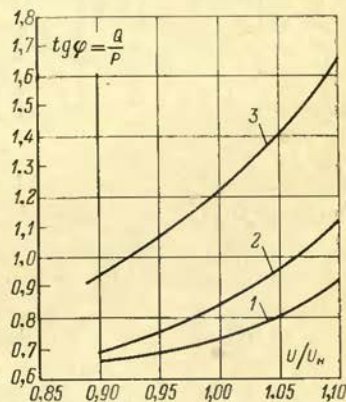


Рис. 15. Зависимость $\operatorname{tg} \varphi$ от напряжения для асинхронного двигателя мощностью 20 кВт.

провода намагничивающий ток увеличивается не пропорционально увеличению напряжения, а в большей степени. При этом реактивная мощность рассеяния увеличивается пропорционально напряжению (поток рассеяния замыкается в основном по воздуху).

В результате при повышенном напряжении реактивная мощность двигателя практически определяется мощностью намагничивания. Учитывая, что при повышении напряжения активная нагрузка на валу двигателя не изменяется, приходим к выводу, что в этом случае коэффициент реактивной мощности $\operatorname{tg} \varphi = Q/P$ существенно увеличивается.

При снижении напряжения уменьшаются магнитный поток и намагничивающий ток. Если при этом нагрузка на валу не уменьшится, то возрастут активные

составляющие токов статора и ротора (так как эти токи возрастут), вследствие чего возрастает составляющая реактивной мощности, определяемая потоками рассеяния. Общая реактивная мощность двигателя в зависимости от соотношения Q_0 и Q_p несколько уменьшается. Не надо забывать, что при пониженном напряжении питания и при неизменном

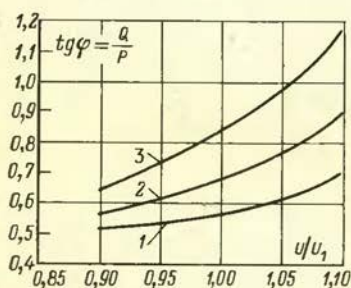


Рис. 16. Зависимость $\operatorname{tg} \varphi$ от напряжения для асинхронного двигателя мощностью 2000 кВт.

момента сопротивления на валу (неизменная нагрузка) двигатель потребляет увеличенный ток, вследствие чего начинает перегреваться обмотка двигателя. При изменении напряжения в пределах $\pm 5\%$ номинального каждый двигатель должен развивать номинальную мощность без перегрева обмоток.

На рис. 14—16 приведены зависимости $\operatorname{tg} \varphi = Q/P$ от напряжения для асинхронных двигателей серии А разных мощностей при разных нагрузках [2]. На рис. 14—16 кривые 1, 2 и 3 даны для коэффициентов загрузки $\beta = 1; 0,75$ и $0,5$ соответственно.

Для примера рассмотрим характеристики $\operatorname{tg} \varphi = f(U)$ при $\beta = 1; 0,75$ и $0,5$ для двигателя типа А72-6, 380 В, 20 кВт, 1500 об/мин (рис. 15).

Значения $\operatorname{tg} \varphi$ для заданных нагрузок из кривых рис. 15 при значениях $0,9U_H$, U_H и $1,1U_H$ и вычисленные значения Q сведены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость Q от U и β для асинхронного двигателя мощностью 20 кВт

	U			U_H			$1,1U_H$		
	1	0,75	0,5	1	0,75	0,5	1	0,75	0,5
$\beta = \frac{P}{P_H}$	1	0,75	0,5	1	0,75	0,5	1	0,75	0,5
P , кВт	20	15	10	20	15	10	20	15	10
$\operatorname{tg} \varphi$	0,64	0,68	0,94	0,72	0,84	1,22	0,91	1,21	1,63
$Q = P \operatorname{tg} \varphi$, квар	12,7	10,2	9,4	14,4	12,6	12,2	18,2	16,6	16,3
$\cos \varphi$	0,84	0,83	0,73	0,81	0,76	0,63	0,74	0,67	0,52

Таблица 1 наглядно показывает, что:

1. При неизменном напряжении при увеличении нагрузки двигателя $\cos \varphi$ повышается, коэффициент реактивной мощности $\operatorname{tg} \varphi$ понижается, но при этом полная реактивная мощность двигателя увеличивается (за счет прироста реактивной мощности рассеяния).

2. При неизменной нагрузке при увеличении напряжения $\cos \varphi$ понижается, коэффициент реактивной мощности $\operatorname{tg} \varphi$ повышается и полная реактивная мощность не пропорционально увеличивается (за счет возрастания реактивной мощности намагничивания). Так, для $\beta=1$ при увеличении напряжения на 10% реактивная мощность увеличивается на 26% $[(18,2/14,4) \cdot 100 \approx 126\%]$.

Другие потребители реактивной мощности. Кроме двигателей и трансформаторов, являющихся основными потребителями реактивной мощности, ее потребляют все те электроприемники, работа которых связана с образованием магнитных полей. Среди них имеются крупные потребители реактивной мощности, но их относительно немного и много потребителей малой мощности.

Индукционные печи. К крупным электроприемникам, требующим для своего действия большой реактивной мощности, прежде всего относятся индукционные печи промышленной частоты для плавки металлов. По существу эти печи представляют собой мощные, но не совершенные с точки зрения трансформаторостроения трансформаторы, вторичной обмоткой которых является металл (садка), расплавляемый индуктированными в нем токами. Магнитопровод в силу своих конструктивных особенностей (большие воздушные зазоры в магнитопроводе, неполное потокосцепление первичной обмотки) требует повышенной н. с. и создает большие потоки рассеяния, следствием чего является повышенное потребление реактивной мощности. Коэффициент реактивной мощности индукционных печей лежит в пределах $\operatorname{tg} \varphi=1-3$, чему соответствует $\cos \varphi \approx 0,3-0,1$. Потребление реактивной мощности такой печи практически не зависит от ее загрузки.

Индукционные печи повышенной частоты (500—800 Гц) обычно питаются от машинных преобразователей частоты. Для таких установок $\operatorname{tg} \varphi \approx 0,75$ ($\cos \varphi \approx 0,8$).

Сварочные трансформаторы для дуговой электросварки относятся к мелким потребителям такого же характера потребления реактивной

мощности. Для устойчивого горения дуги необходимо, чтобы зависимость напряжения на дуге от тока была резко падающей и чтобы цепь дуги имела большую индуктивность. Это достигается путем искусственного создания повышенных потоков рассеяния (например, размещением первичной и вторичной обмоток на разных стержнях магнитопровода, путем применения магнитных шунтов в магнитной системе трансформатора) или включением во вторичную обмотку (в цепь дуги) дросселя с переменным воздушным зазором. Все эти меры приводят к увеличению реактивной мощности Q_p сварочных трансформаторов в основном за счет доли, зависящей от нагрузочного тока. Номинальный коэффициент мощности сварочных трансформаторов в зависимости от номинального тока I_H составляет примерно:

I_H, A	100	350	500	700
$\cos \varphi$	0,43	0,50	0,52	0,52
$\operatorname{tg} \varphi$	2,1	1,73	1,64	1,64

Дуговые и руднотермические печи являются также крупными потребителями реактивной мощности. Полная мощность таких печей доходит до 25 000—40 000 кВ·А в единице. Работая в комплекте с индивидуальными регулируемыми трансформаторами эти печи потребляют реактивную мощность в основном трансформаторе и так называемой «короткой цепи» (шины, соединяющие вторичную обмотку печных трансформаторов с печью). Коэффициент реактивной мощности дуговых печей лежит в пределах $\operatorname{tg} \varphi \approx 0,5-0,75$. При большой мощности печи реактивная мощность таких печей велика, например для дуговой печи мощностью 2500 кВ·А при $\operatorname{tg} \varphi = 0,75$ потребляемая активная мощность составляет $P = 2500 \cdot 0,8 = 20\,000$ кВт и реактивная $Q = 25\,000 \cdot 0,6 = 15\,000$ квар.

Преобразовательные установки, преобразующие переменный ток в постоянный при помощи выпрямителей, также относятся к крупным потребителям реактивной мощности. Выпрямительные установки нашли широкое применение в промышленности и на транспорте. Так, установки большой мощности с ртутными преобразователями используются для питания электролизных ванн, например при производстве алюминия, каустической соды и др. Железнодорожный транспорт в нашей стране почти полностью электрифицирован, причем значительная часть железных дорог

использует постоянный ток от преобразовательных установок. Преобразовательные установки состоят из трансформатора (иногда с регулировкой вторичного напряжения) и выпрямительной части. В качестве выпрямителей используются ртутные нерегулируемые выпрямители, а также ртутные выпрямители с сеточным регулированием тока нагрузки. В настоящее время широкое применение нашли полупроводниковые (кремниевые) выпрямители. Получают распространение тиристорные регулируемые выпрямители для электропривода.

В многофазных установках с ртутными выпрямителями без сеточного регулирования в процессе работы дуга циклически возникает между анодами фазовых выпрямителей и общим катодом. В первый момент коммутации, когда мгновенное значение напряжения на предыдущей фазе сравнивается с мгновенным значением напряжения последующей фазы, дуга горит некоторое время (в зависимости от индуктивности цепи) между обоими анодами и катодом. Погасание дуги предыдущего анода происходит, когда мгновенное значение напряжения последующего анода будет превышать напряжение предыдущего анода. Время перехода дуги с одного анода на другой, выраженное в долях периода 2π промышленного тока, называется углом коммутации γ . Чем больше фаз, участвующих в выпрямлении, тем меньше γ .

В выпрямителях с сеточным регулированием значение выпрямленного тока регулируется «запиранием» очередного анода путем подачи на некоторое время отрицательного потенциала между сеткой и катодом. В этом случае момент зажигания дуги (момент нарастания выпрямленного тока) отстает от напряжения своей фазы на угол α , называемый углом регулирования. Чем больше угол регулирования, тем меньше выпрямленный ток.

Процесс выпрямления всегда сопровождается генерацией высших гармоник переменного тока. Поэтому первичный ток нагрузки трансформатора обычно отличается от синусоиды. Ток нагрузки основной частоты (1-й гармоники) будет отставать от напряжения основной частоты сети на угол ϕ , который зависит от угла регулирования и угла коммутации (сугубо приближенно $\phi \approx \alpha + \gamma/2$), и, следовательно, выпрямительная часть преобразовательной установки будет потреблять реак-

тивную мощность, приближенно оцениваемую по выражению

$$Q \approx P_1 \operatorname{tg}(\alpha + \gamma/2), \quad (25)$$

где P_1 — активная мощность нагрузки основной частоты (1-й гармоники).

Здесь интересно отметить, что природа реактивной мощности выпрямительной установки не связана с образованием магнитных полей.

Коэффициент реактивной мощности преобразовательных установок без сеточного регулирования, включая питающий трансформатор, примерно $\operatorname{tg} \varphi = 0,35$. Для установок с сеточным регулированием потребление реактивной мощности в зависимости от глубины регулирования возрастает и коэффициент реактивной мощности доходит до $\operatorname{tg} \varphi \approx 0,75 - 0,8$. Аналогичные явления происходят и в установках с полупроводниковыми выпрямителями.

Люминесцентное освещение, относящееся к мелким потребителям реактивной мощности, благодаря своей экономичности и другим преимуществам перед лампами накаливания нашло широкое применение для освещения промышленных помещений, улиц и площадей городов. Действие люминесцентных ламп основано на электрическом разряде в разреженном газовом пространстве (цилиндрической колбе) с парами ртути, в результате чего возникает излучение газовой среды, богатое невидимыми ультрафиолетовыми лучами. Эти лучи, воздействуя на люминофор, которым изнутри покрыта поверхность колбы, вызывают его интенсивное видимое свечение.

Электрический разряд в газе является неустойчивым процессом, и даже при небольших колебаниях напряжения разряд либо прерывается, либо превращается в лавинообразный процесс, приводящей к порче трубки. Поэтому для стабилизации тока разряда последовательно с газоразрядной трубкой обязательно включают ограничивающее сопротивление, называемое балластным.

В качестве балластного сопротивления почти всегда используется дроссель (катушка индуктивности на стальном сердечнике). Он же обычно используется для создания зажигающего импульса за счет э. д. с. самоиндукции дросселя. Кроме того, последовательное включение дросселя существенно уменьшает паузы тока и,

следовательно, пульсацию светового потока. Вместе с тем применение дросселя вызывает потребление реактивной мощности, значение которой определяется в основном параметрами дросселя и лежит в пределах $\operatorname{tg} \varphi \approx 1,3 \div 1,7$ ($\cos \varphi \approx 0,5 \div 0,6$).

Активные потери в дросселе (в обмотке и стали) составляют примерно 25% мощности лампы. Для примера оценим потребляемую реактивную мощность люминесцентной лампы номинальной мощностью 30 Вт, включенной последовательно с дросселем:

$$Q = (P_n + 0,25P_n) \operatorname{tg} \varphi = 1,25 \cdot 30 (1,3 \div 1,7) = 49 \div 64 \text{ вар.}$$

Относительно большое потребление реактивной мощности всегда должно быть компенсировано. Поэтому обычно люминесцентная лампа включается совместно с пускорегулирующим аппаратом (ПРА), в котором, в частности, предусматриваются средства компенсации реактивной мощности путем включения конденсатора.

Линии электропередачи. В заключение необходимо остановиться на таких элементах передачи, как линии электропередачи. Как известно, вокруг каждого проводника, по которому течет ток, возникает магнитное поле и, следовательно, потребляется реактивная мощность.

Для простоты рассмотрим двухпроводную воздушную линию. Прямой и обратный провода линии можно рассматривать как «сплюснутый» виток катушки, вследствие чего между проводами существует магнитное поле, изображенное на рис. 17. При увеличении расстояния между проводами индуктивность линии увеличивается. В этом случае мы будем иметь как бы один виток катушки, а индуктивность катушки тем больше, чем больше ее диаметр. Поэтому для уменьшения индуктивности линии (для уменьшения ее индуктивного сопротивления $x = \omega L$) необходимо провода прокладывать по возможности ближе друг к другу, однако с учетом ряда ограничений, например по условиям изоляции.

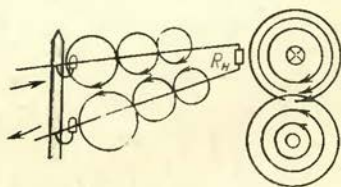


Рис. 17. Магнитное поле прямого и обратного провода воздушной линии.

Реактивная мощность, потребляемая воздушной трехфазной линией среднего напряжения, может быть определена по формуле, квар/км:

$$Q_{\text{л}} = 3I^2 \frac{\omega L}{1000} = \left(\frac{P}{U \cos \varphi} \right)^2 x \cdot 10^{-3}, \quad (26)$$

где P , U и $\cos \varphi$ — параметры передаваемой по линии нагрузки; L и x — индуктивность и реактивное сопротивление линии.

Индуктивность трехфазной воздушной линии на 1 км длины может быть подсчитана по формуле, Гн/км:

$$L = \left(4,6 \lg \frac{D_{\text{ср}}}{r} + 0,5 \right) \cdot 10^{-4}, \quad (27)$$

где $D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{ABC}$ — среднее геометрическое расстояние между проводами, см; A , B , C — расстояние между проводами, см; r — радиус провода, см.

Для воздушных линий 6—35 кВ индуктивное сопротивление на 1 км лежит в пределах от 0,37 до 0,4 Ом.

Для прикидочных расчетов можно пользоваться приближенной формулой, квар/км:

$$Q_{\text{л}} \approx 0,0012I^2, \quad (28)$$

где I — ток нагрузки в линии, А.

Для длинных воздушных линий, а также для протяженных кабельных превалирует емкостная составляющая реактивного сопротивления линии, вследствие чего длинные воздушные линии высокого напряжения рассматриваются как источники отрицательной реактивной мощности.

Токоограничивающие реакторы также являются потребителями реактивной мощности. Зная их индуктивность, их реактивную мощность можно определить по той же формуле (26), что и для линии.

3. КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Потери и ущерб, вызываемые передачей реактивной мощности. Передача реактивной мощности по сети приводит к следующим потерям и ущербу.

Дополнительные активные потери мощности и энергии в сети. При передаче электроэнергии от места ее выработки к месту потребления одновременно с активной энергией (полезно используе-

мой на месте потребления) передается сопутствующая ей реактивная энергия, необходимая для обеспечения действия большинства электроприемников и звеньев электропередачи.

Как установлено выше, полная передаваемая мощность равна:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

и полный ток в звене электропередачи

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U}$$

Если сопротивление одной фазы звена электропередачи равно r , то потери активной мощности в трехфазном звене будут равны, кВт:

$$\begin{aligned} \Delta P &= 3I^2 r \cdot 10^{-3} = \frac{S^2 r}{U^2} 10^{-3} = \\ &= \frac{P^2 r}{U^2} 10^{-3} + \frac{Q^2 r}{U^2} 10^{-3} = \Delta P_a + \Delta P_p, \end{aligned} \quad (29)$$

где ΔP_a — составляющая потерь активной мощности от передачи активной мощности, кВт; ΔP_p — составляющая потерь активной мощности от передачи реактивной мощности, кВт.

Таким образом, несмотря на то, что на выработку реактивной мощности не расходуется активная мощность, при передаче ее к месту потребления возникают активные потери во всех звеньях передачи, которые

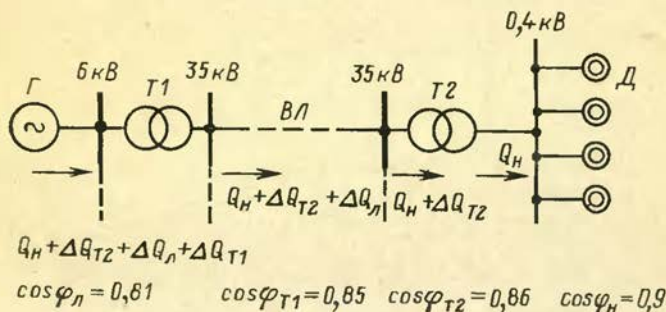


Рис. 18. Простейшая схема электропередачи, показывающая потребление реактивной мощности звеньями электросети.

покрываются активной энергией генераторов (т. е. за счет дополнительного расхода топлива).

В качестве примера рассмотрим простейшую схему электропередачи (рис. 18), состоящей из генератора G с номинальным коэффициентом мощности 0,8, повышающего трансформатора $T1$, воздушной линии $ВЛ$, понижающего трансформатора $T2$ и нагрузки D с коэффициентом мощности 0,9. Примем, что оба трансформатора и генератор по номинальной мощности соответствуют номинальной нагрузке на стороне 0,4 кВ.

Реактивная мощность нагрузки на шинах 0,4 кВ в долях активной равна $Q_n = \operatorname{tg} \varphi P_n = 0,48P_n$.

Помимо реактивной мощности, потребляемой нагрузкой, реактивная мощность потребляется каждым звеном электропередачи.

Для обоих трансформаторов примем следующие параметры: активные потери в трансформаторе $\Delta P_T = 0,02P_n$, ток холостого хода $I_0 = 6\%$, напряжение короткого замыкания $u_k = 7\%$. Тогда реактивные потери в трансформаторе определяются выражением (19) *

$$\Delta Q_{T1} = 0,01P_n(I_0\% + u_k\%) = 0,01(6+7)P_n = 6,13P_n.$$

Этому соответствует коэффициент реактивной мощности

$$\operatorname{tg} \varphi_{T1} = 0,13P_n / (0,02P_n) = 6,5, \text{ т. е. } \cos \varphi_{T1} = 0,154.$$

Коэффициент реактивной мощности на шинах 35 кВ понижающей подстанции определится по выражению

$$\operatorname{tg} \varphi_{T2} = \frac{Q_n + \Delta Q_{T2}}{P_n + \Delta P_{T2}} = \frac{0,48P_n + 0,13P_n}{P_n + 0,02P_n} = \frac{0,61}{1,02} = 0,59,$$

чему соответствует $\cos \varphi_{T2} = 0,86$.

Примем потери активной мощности в воздушной линии равными 6% передаваемой мощности, т. е. $\Delta P_L = 0,06P_n$. Для линии 35 кВ принимается $x = 0,4$ Ом/км, $r = 0,39$ Ом/км (для медных проводов сечением 50 мм²), т. е. $\operatorname{tg} \varphi_L = 0,4/0,39 \approx 1$.

Тогда потери реактивной мощности в линии

$$\Delta Q_L = \Delta P_L \operatorname{tg} \varphi_L = 0,06P_n.$$

* В нашем примере принято, что $P_n : S_n \approx 1$, откуда $Q = \frac{P_n}{100} (I_0\% + u_k\%)$.

Коэффициент реактивной мощности на шинах 35 кВ повышающей подстанции будет равен:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_{T1} &= \frac{Q_H + \Delta Q_{T2} + \Delta Q_L}{P_H + \Delta P_{T2} + \Delta P_L} = \frac{0,48P_H + 0,13P_H + 0,06P_H}{P_H + 0,02P_H + 0,06P_H} = \\ &= \frac{0,67}{1,08} = 0,614 \\ &(\cos \varphi_{T1} = 0,85). \end{aligned}$$

Коэффициент реактивной мощности на шинах генераторного напряжения определится с учетом потерь реактивной и активной мощности повышающего трансформатора

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_r &= \frac{Q_H + \Delta Q_{T2} + \Delta Q_L + \Delta Q_{T1}}{P_H + \Delta P_{T2} + \Delta P_L + \Delta P_{T1}} = \\ &= \frac{0,48P_H + 0,13P_H + 0,06P_H + 0,13P_H}{P_H + 0,02P_H + 0,06P_H + 0,02P_H} = \frac{0,8}{1,1} = 0,72, \end{aligned}$$

чему соответствует коэффициент мощности генератора $\cos \varphi_r = 0,81$.

Если теперь полностью компенсировать реактивную мощность нагрузки, т. е. $Q_H = 0$, то коэффициент реактивной мощности генератора повысился бы до значения

$$\operatorname{tg}' \varphi_r = \frac{0,13P_H + 0,06P_H + 0,13P_H}{P_H + 0,02P_H + 0,06P_H + 0,02P_H} = \frac{0,32}{1,1} = 0,29,$$

т. е. $\cos'_r = 0,96$.

При неизменной нагрузке равной номинальной

$$P_H = \sqrt{3}UI \cos \varphi_r = \sqrt{3}UI' \cos \varphi'_r,$$

откуда

$$I' = I \frac{\cos \varphi_r}{\cos \varphi'_r}.$$

Тогда отношение активных потерь в сети

$$\frac{\Delta P'_H}{\Delta P_H} = \frac{3(I')^2 r_\Sigma}{3I^2 r_\Sigma} = \frac{\left(I \frac{\cos \varphi_r}{\cos \varphi'_r} \right)^2}{I^2},$$

откуда

$$\Delta P'_H = \Delta P_H \left(\frac{\cos \varphi_r}{\cos \varphi'_r} \right)^2 = \Delta P_H \left(\frac{0,81}{0,96} \right)^2 = 0,72 \Delta P_H.$$

Здесь I' — ток при полной компенсации реактивной мощности нагрузки ($Q_H = 0$); r_Σ — активное сопротивление участка сети.

Таким образом, передача от генератора к нагрузке реактивной мощности $Q_H=0,48P_H$ в данном случае приводит к увеличению активных потерь в сети на 28%.

Перерасход металла. Дополнительные потери, которые прибавляются к потерям, связанным с передачей активной энергии, заставляют по условиям нагрева увеличивать сечения проводов всех звеньев электропередачи, что ведет к перерасходу цветного металла¹.

Действительно, так как полный ток I связан с активной составляющей тока I_a выражением $I \cos \varphi = I_a$, т. е. $I = I_a : \cos \varphi$, то общие потери активной мощности в зависимости от коэффициента мощности будут равны:

$$\Delta P = 3I^2 r \cdot 10^{-3} = \frac{3I_a^2 r}{(\cos \varphi)^2} 10^{-3} = \frac{\Delta P_a}{(\cos \varphi)^2},$$

т. е. общие потери в линии обратно пропорциональны квадрату коэффициента мощности. Так, например, если передается одна и та же активная мощность, которой соответствует активная составляющая тока I_a , то при уменьшении коэффициента мощности с 1 до 0,8 активные потери в линии возрастут в $1/0,8^2=1,56$ раза, что потребует увеличения массы меди проводов в $\sqrt{1,56}=1,25$ раза, или на 25%.

Неполное использование мощности трансформаторов. Чем меньше коэффициент мощности, т. е. чем больше передаваемая реактивная мощность, тем меньше передаваемая активная мощность. Уменьшение активной мощности пропорционально уменьшению коэффициента мощности. Например, уменьшение коэффициента мощности нагрузки с 1 до 0,8 снижает пропускаемую через трансформатор активную мощность до 0,8 номинального значения, т. е. на 20%.

Неполное использование мощности первичных двигателей и генераторов электростанций и увеличение удельного расхода топлива. Если реактивная мощность превысит номинальное значение, определяемое по номинальному коэффициенту мощности генератора, то активная нагрузка должна быть снижена так, чтобы полный ток нагрузки по условиям нагрева обмоток не превышал номинального тока генератора, к. п. д. генератора при этом снижается, увеличивается удельный расход топлива.

¹ С увеличением сечения возрастает масса провода, что в свою очередь требует применения более тяжелых опор.

Дополнительные потери реактивной мощности. Передача реактивной мощности приводит к дополнительной потере реактивной мощности ΔQ в линии

$$\Delta Q = 3I^2x_l,$$

где x — индуктивное сопротивление линии на 1 км, Ом; l — длина линии, км; I — полный ток, А.

На эту величину должна быть увеличена мощность компенсирующих устройств нагрузки.

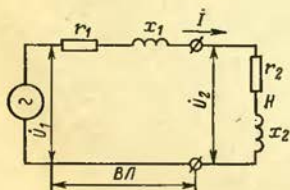


Рис. 19. Схема замещения одной фазы линии электропередачи ВЛ с нагрузкой H на конце.

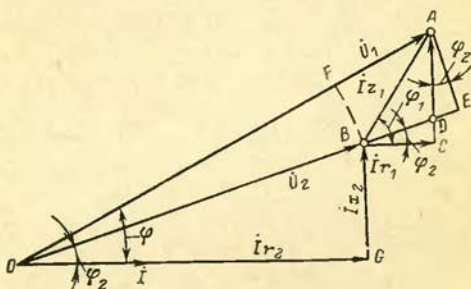


Рис. 20. Векторная диаграмма линии электропередачи, нагруженной на конце.

Увеличение потери напряжения в линии. Выясним, как определяется потеря напряжения от величины передаваемой реактивной мощности. На рис. 19 изображена (для одной фазы) схема замещения линии передачи и электроприемника с индуктивным характером. На рис. 20 для этой схемы построена векторная диаграмма. На диаграмме φ_2 — угол сдвига по фазе тока I и напряжения U_2 на нагрузке; φ_1 определяется параметрами линии ($\text{tg } \varphi_1 = x_1/r_1$) и φ — угол сдвига между током и напряжением U_1 генератора.

Напомним, что падением напряжения в линии является геометрическая разность векторов $\dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \dot{I}z_1$, где $z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2}$, а потерей напряжения — арифметическая разность тех же векторов $\dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \dot{F}A$. Если угол φ_2 сдвига фаз в цепи нагрузки относительно невелик (коэффициент мощности выше 0,8), то можно принять следующие допущения: $\dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \dot{F}A \approx \dot{B}E$, а отрезок BC считать гипотенузой треугольника BDC . Тогда

из векторной диаграммы $BD/BC \approx \cos \varphi_2$ или $BD = BC \cos \varphi_2 = Ir_1 \cos \varphi_2$.

Аналогично $AC \approx AD$, и тогда $DE/AD \approx DE/AC \approx \sin \varphi_2$ или $DE = AC \sin \varphi_2 = Ix_1 \sin \varphi_2$.

Так как $BE = BD + DE$, то потеря напряжения равна:

$$\Delta U = U_1 - U_2 = Ir_1 \cos \varphi_2 + Ix_1 \sin \varphi_2.$$

Выражая потерю напряжения для трехфазной линии через мощности, получим:

$$\Delta U_s = \sqrt{3} (Ir_1 \cos \varphi_2 + Ix_1 \sin \varphi_2) = \frac{Pr_1}{U^2} + \frac{Qx_1}{U^2}. \quad (30)$$

Полученное выражение показывает, что потери напряжения в линии зависят не только от значения передаваемой активной мощности, но и от значений передаваемой реактивной мощности и реактивного сопротивления линии. При уменьшении передаваемой реактивной мощности до нуля напряжение в конце линии увеличится на Qx_1/U_2 . Изменяя реактивную мощность, можно регулировать напряжение в линии в пределах $\pm Qx_1/U^2$.

Суточные колебания реактивной мощности, вызванные изменением состава включенного оборудования и изменением нагрузки, если не принимать специальных мер, могут привести к недопустимым колебаниям напряжения у электроприемников. Так, днем, когда активная и реактивная нагрузки велики, напряжение понижается. При этом снижается производительность станков (увеличивается скольжение асинхронных двигателей), уменьшается выпуск продукции. Наоборот, ночью напряжение повышается иногда сверх допустимых пределов, что приводит к резкому сокращению срока службы ламп накаливания.

Выводы. Перечисленные потери и ущерб требуют организованных мероприятий по уменьшению передаваемой по сети реактивной мощности. Эти мероприятия делятся на мероприятия по снижению потребления реактивной мощности потребителей за счет рационального и правильного использования электрооборудования и на мероприятия по компенсации реактивной мощности нагрузок потребителей. Учитывая большое народнохозяйственное значение вопроса снижения потерь активной энергии в электросетях страны, мероприятия по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях регламентируются государством.

Мероприятия по снижению реактивной мощности нагрузок потребителя. На каждом промышленном предприятии должны быть проведены мероприятия по рациональному использованию всего электрооборудования, направленные на снижение реактивной мощности нагрузок, в первую очередь потребляемую асинхронными двигателями и трансформаторами.

Следующие мероприятия являются основными.

Создание нормального режима работы асинхронных двигателей. Номинальный коэффициент мощности (при P_n и U_n) асинхронных двигателей, в зависимости от номинальной мощности двигателя, лежит в среднем в пределах от 0,85 до 0,92, чему соответствует коэффициент реактивной мощности от 0,615 до 0,425. При недогрузке двигателя и особенно при увеличении напряжения сверх номинального коэффициент мощности существенно уменьшается. Это объясняется тем, что при уменьшении активной нагрузки двигателя реактивная мощность мало меняется, вследствие чего уменьшается коэффициент мощности. При увеличении напряжения резко увеличивается намагничивающий ток и резко возрастает потребление реактивной мощности при неизменной активной, что также приводит к снижению коэффициента мощности. Поэтому все недогруженные двигатели (для которых нагрузки не превышают 45%) должны быть заменены на двигатели соответственно меньшей мощности.

При нагрузке более 70% замена двигателя нецелесообразна. Вопрос о замене двигателей на меньшую мощность при их нагрузке в пределах 45—70% решается технико-экономическим расчетом, исходя из сопоставлений стоимости активных потерь в заменяемом и заменяющем двигателях и стоимости замены.

Ограничение времени холостого хода. Бесцельное потребление реактивной мощности имеет место при холостом ходе оборудования. В этом случае двигатель потребляет до 80% всей своей реактивной мощности без всякой необходимости. Показано расчетами, что если длительность холостого хода превышает 10 с, то целесообразно двигатель отключать на это время от сети. При этом должна быть сопоставлена технологическая периодичность пусков и остановок двигателя в час (по данным завода-изготовителя) с точки зрения его перегрева пусковыми токами.

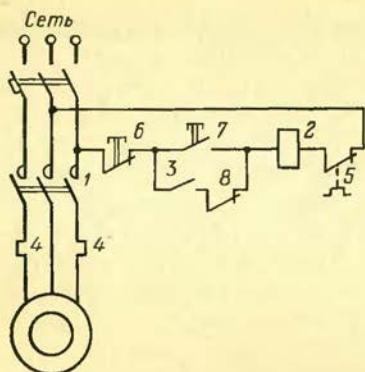


Рис. 21. Схема включения ограничителя холостого хода двигателя.

1 — рабочие контакты; 2 — обмотка; 3 — блок-контакт магнитного пускателя; 4 — нагревательные элементы; 5 — контакт реле тепловой защиты; 6 — кнопка «Стоп»; 7 — кнопка «Пуск»; 8 — контакт ограничителя холостого хода.

ваемых деталей¹. Этот выключатель обычно включается в цепь управления станка, например в цепь обмотки магнитного пускателя, который своими рабочими контактами разрывает цепь двигателя. Одна из принципиальных схем включения ограничителя холостого хода приведена на рис. 21.

Переключения обмоток двигателей с треугольника на звезду. Момент на валу двигателя при переключении обмоток с треугольника на звезду уменьшается в 3 раза, так как он уменьшается пропорционально квадрату уменьшения напряжения $(U_A/U_\Delta)^2 = (\sqrt{3})^2 = 3$. Если двигатель соединен в треугольник и его нагрузка составляет не более 30—35% номинальной, то вместо замены двигателя на меньший можно переключить его обмотку на звезду. При этом существенно уменьшаются намагничивающий ток и, следовательно, потребляемая реактивная мощность.

Правильный ремонт электродвигателей. Нередко после капитального ремонта коэффициент мощности асинхронного двигателя уменьшается, это бывает, как правило, когда при ремонте производят об-

¹ В настоящее время широко распространены бесконтактные (без механической связи) путевые и конечные выключатели, срабатывающие при приближении к ним металлических деталей.

точку ротора и воздушный зазор двигателя увеличивается. Это приводит к резкому увеличению намагничивающего тока и, следовательно, к увеличению потребляемой реактивной мощности. Измеренный ток холостого двигателя при номинальном напряжении U_n не должен быть после ремонта больше номинального тока холостого хода.

Замена асинхронных двигателей на синхронные. Когда технологические условия позволяют, целесообразно применять синхронные двигатели. Применение синхронных двигателей всегда оправдано для привода механизмов с длительным режимом работы, например для привода мощных компрессоров, насосов, вентиляторов, воздуходувок и т. п. При этом все синхронные двигатели должны работать с опережающим коэффициентом мощности не более 0,9, создающим запас компенсирующей реактивной мощности.

Создание нормального режима работы цеховых трансформаторов. Большинство трансформаторов работают круглосуточно. При параллельной работе трансформаторов в случае снижения нагрузки до 30—50% один трансформатор должен быть отключен. Нагрузка должна контролироваться по амперметрам. В нерабочие дни, в обеденные перерывы часть трансформаторов следует отключать. При ремонтных и наладочных работах на предприятиях в нерабочее время необходимо так организовать схему питания рабочих мест, чтобы в работе находилось минимально необходимое число трансформаторов. Положение ответвлений трансформатора со стороны питания должно соответствовать фактическому напряжению сети. Если ответвления установлены на меньшее напряжение (по сравнению с напряжением сети), то реактивная мощность трансформатора увеличивается.

Источники реактивной мощности. На электростанциях генераторы одновременно с активной мощностью вынужденно генерируют реактивную мощность, потребляемую в сети в основном трансформаторами и асинхронными двигателями. При этом в любой момент времени так же, как и для активной мощности, сохраняется баланс реактивных мощностей (выработка равна потреблению).

При протяженной сети передача реактивной мощности от генератора до потребителя экономически не вы-

годна (большие потери в сети, генераторах, падение напряжение и т. д.). Поэтому принимаются меры к уменьшению перетоков реактивной мощности путем генерации ее как в отдельных узлах сети, так и у потребителя. В сетях энергосистемы почти исключительно в качестве источников реактивной энергии применяют синхронные компенсаторы, являющиеся специальными синхронными двигателями, работающими на холостом ходу в режиме перевозбуждения, т. е. потребляющими отрицательную реактивную мощность (см. ниже).

У потребителей электроэнергии в качестве источников реактивной мощности для компенсации реактивной нагрузки применяют в основном конденсаторные батареи, а также используют имеющиеся в технологическом оборудовании синхронные двигатели в режиме перевозбуждения. Как компенсаторы, так и перевозбужденные синхронные двигатели являются электроприемниками, имеющими емкостный характер, т. е. потребляющими отрицательную реактивную мощность. При включении таких электроприемников в сеть с реактивной нагрузкой (мощность намагничивания) положительная реактивная мощность уменьшается на величину отрицательной реактивной мощности подключенных конденсаторов или перевозбужденных синхронных двигателей. Поэтому условно считается, что конденсаторные батареи и перевозбужденные синхронные двигатели генерируют реактивную мощность.

Если предположить такой крайний случай, когда нагрузка имеет только емкостный характер, например работают только синхронные двигатели в режиме с перевозбуждением, то в сети имели бы место тоже активные потери, но в данном случае от передачи отрицательной реактивной мощности, потребляемой двигателями. Эти потери можно было бы скомпенсировать путем включения индуктивности, т. е. за счет положительной реактивной мощности. В данном случае источником реактивной мощности являлась бы индуктивность.

Конденсаторные батареи. Мощность конденсатора равна, квар:

$$Q_C = I^2 x_C = \frac{U_n^2}{x_C} = \omega C U_n^2 \cdot 10^{-3}, \quad (31)$$

где U_n — номинальное напряжение сети и конденсатора, кВ; C — емкость конденсатора, мкФ; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота сети.

Как видно, мощность конденсатора пропорциональна квадрату напряжения. Поэтому, например, конденсатор емкостью C и номинальным напряжением 6 кВ генерирует на этом напряжении реактивную мощность больше, чем на напряжении 0,4 кВ, в $(6/0,4)^2=225$ раз. Этим объясняется более высокая удельная стоимость конденсаторных батарей на напряжение 380—660 В по сравнению с батареями 6—10 кВ (подробнее этот вопрос рассмотрен ниже).

Для полного использования конденсаторной мощности конденсаторы батареи, как правило, соединяют в треугольник и включают на линейное напряжение. Общая мощность такой батареи равна, квар:

$$Q_6 = 3\omega CU_n^2 \cdot 10^{-3}, \quad (32)$$

где C — емкость конденсаторов, включенных между каждой парой фаз, мкФ.

При фактическом напряжении сети U , отличном от номинального U_n , мощность конденсаторной батареи Q' изменяется пропорционально квадрату напряжения и может быть определена по формулам.

Для батарей 380—660 В

$$Q' = \left(\frac{U}{U_n}\right)^2 Q_n = \left(\frac{U}{U_{н.б}}\right)^2 Q_n, \quad (33)$$

так как для этих батарей номинальное напряжение батареи $U_{н.б}$ равно номинальному напряжению сети U_n .

Для батарей 6—10 кВ

$$Q'' = \left(\frac{U}{1,05U_n}\right)^2 Q_n, \quad (34)$$

так как для этих батарей $U_{н.б}=1,05U_n$. Коэффициент 1,05 учитывает, что при номинальных напряжениях 6 и 10 кВ, эксплуатационные напряжения составляют 6,3 и 10,5 кВ.

Таким образом, при снижении напряжения сети мощность батарей существенно уменьшается, в то время как по режиму сети требовалась бы повышенная отдача реактивной мощности в сеть. Так, например, при уменьшении напряжения на 10% мощность батарей уменьшается почти на 20%. Это обстоятельство является недостатком конденсаторных батарей.

Характерным для конденсаторных батарей являются небольшие активные потери, относительно невысокая

стоимость, небольшие эксплуатационные расходы и возможность при необходимости наращивать мощность батарей.

Для возможности регулирования реактивной мощности выпускаются секционированные комплектные батареи (до шести секций), снабженные регулятором (например, типа «АРКОН»), реагирующим на отклонение напряжения сети или на ток нагрузки.

Таблица 2

Удельные потери активной мощности в конденсаторах
(по ГОСТ 1282-72)

Номинальное напряжение, кВ	Удельные потери, кВт/Мвар						
	Серия II		Серия III		Серия IV		
	КС1	КС2	КС1	КС2	КС0	КС1	КС2
0,38	4,5	4,5	3,5	3,5	3,5	—	—
0,66	4,0	4,0	3,5	3,5	3,5	—	—
6,3; 10,5	—	—	2,5	2,3	2,2	2,2	2,0

Удельные потери активной мощности в конденсаторах приведены в табл. 2.

Принципиальные схемы включения конденсаторных батарей 380—660 В и 6—10 кВ показаны на рис. 22.

Как видно из схемы, предусмотрена возможность контроля равенства токов по фазам (при мощности бата-

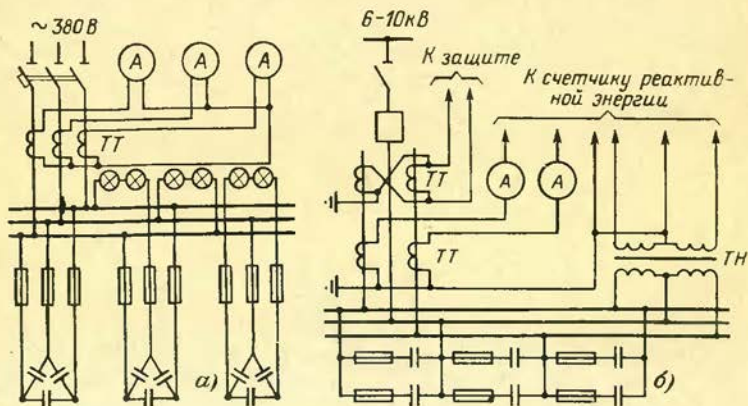


Рис. 22. Принципиальная схема включения компенсирующих конденсаторов на распределительной сборке 380 В (а) и на шинах 6—10 кВ (б).

реи до 400 квар может быть установлен один амперметр). Разрядные сопротивления подключены к конденсаторам постоянно. Для конденсаторов 380 В для этой цели обычно используются лампы накаливания 220 В, соединенные последовательно. Для уменьшения активных потерь в лампах схема часто составляется так, чтобы лампы автоматически присоединялись к конденсаторам только после их отключения от сетей (на рисунке не показано). Для установок 6—10 кВ, как правило, в качестве разрядного сопротивления применяется трансформатор напряжения $TН$, глухо присоединенный к конденсаторным шинкам. Защита конденсаторов на напряжении до 1000 В выполняется автоматами или предохранителями. Все секции конденсаторов, кроме того, имеют индивидуальные предохранители.

Синхронные двигатели, выпускаемые у нас в стране, рассчитаны на опережающий коэффициент мощности, равный $\cos \varphi_n = 0,9$ и при номинальной активной нагрузке и напряжении в пределах от 0,95 до $1,05U_n$ могут генерировать реактивную мощность, квар, равную

$$Q_n = \frac{P_n}{\eta} \operatorname{tg} \varphi_n, \quad (35)$$

где P_n — номинальная активная мощность двигателя на валу, кВт; η — номинальный к. п. д.; $\operatorname{tg} \varphi_n = 0,484$, что соответствует $\cos \varphi_n = 0,9$.

Для прикидочных расчетов (принимая в среднем $\eta \approx 0,96$) номинальную реактивную мощность синхронного двигателя можно определить по выражению, квар:

$$Q_n \approx 0,5 P_n. \quad (36)$$

При недогрузке двигателя по активной мощности ($\beta = P/P_n < 1$) возможна перегрузка по реактивной мощности ($\alpha = Q/Q_n > 1$). Наибольшая допустимая перегрузка по реактивной мощности зависит также от напряжения на зажимах двигателя, причем при снижении напряжения максимальная реактивная мощность увеличивается, а при повышении снижается. Средние значения коэффициента нагрузки по реактивной мощности в зависимости от изменения активной нагрузки и напряжения питания синхронных двигателей серий СДН и СДД 6 и 10 кВ приведены в табл. 3.

Синхронные двигатели, используемые для генерации реактивной мощности, выгодно отличаются от конденсаторных батарей тем, что допускают плавное регулиро-

Таблица 3

Значение $\alpha_M = \frac{Q_M}{Q_N}$ для синхронных двигателей серий СДН,
СТД 6—10 кВ для всех номинальных частот вращения

Серия двигателя	Напряжение на зажимах, % U_N	Значения α_M при коэффициенте нагрузки β			
		1	0,9	0,8	0,7
СДН	95	1	1,31	1,39	1,45
	100	1	1,21	1,27	1,33
	105	1	0,96	1,12	1,17
СЛТ	95	1	1,3	1,42	1,52
	100	1	1,23	1,34	1,43
	105	1	1,12	1,23	1,31
	110	—	0,9	1,08	1,16

вание (при помощи возбуждения) генерируемой мощности. Активные потери на генерацию реактивной мощности для синхронных двигателей больше, чем для конденсаторных батарей и зависят в квадрате от генерируемой реактивной мощности.

Активные потери в обмотке синхронного двигателя, вызываемые генерацией реактивной мощности в пределах от $\cos \varphi = 1$ до $\cos \varphi_N = 0,9$ при номинальной активной мощности P_N , кВт, и напряжении U_N , кВ, могут быть подсчитаны, если известно сопротивление r фазы двигателя в горячем состоянии, по формуле, кВт:

$$\Delta P_N = \frac{Q_N^2 r}{U_N^2}. \quad (37)$$

В общем случае, когда P , Q и U отличаются от номинальных значений, рекомендуется пользоваться выражением, кВт:

$$\Delta P = D_1 \frac{Q}{Q_N} + D_2 \frac{Q^2}{Q_N^2}, \quad (38)$$

где $D_1 + D_2 = \Delta P_N$, т. е. активные потери, вызванные генерацией реактивной мощности Q_N при P_N и U_N [7]. Значения D_1 и D_2 вычислены для всех серий синхронных двигателей, выпускаемых отечественной промышленностью, и приводятся в [2, 7] (см. табл. П1—П4).

Для прикидочных расчетов потери активной мощности при генерации Q_N можно приближенно подсчитать, исходя из к. п. д. η двигателя, кВт:

$$\Delta P_N \approx \frac{1}{6} \left(\frac{P_N}{\eta} - P_N \right). \quad (39)$$

Здесь принято, что потери в меди обмотки составляют 1/2 полных потерь двигателя и составляющая потерь от реактивной мощности (при $\cos \varphi_m = 0,9$, $Q \approx 0,5P_n$) равна 1/3 потерь в меди обмотки. Так, например, для двигателя серии СДН-15-64-6, 2500 кВт, 6 кВ, $\cos \varphi_n = 0,9$, $\eta = 96,5\%$ дополнительные потери при выдаче номинальной реактивной мощности по приближенной формуле равны:

$$\Delta P_n = \frac{1}{6} \left(\frac{2500}{\eta} - 2500 \right) = 15,1 \text{ кВт.}$$

По данным [2] для электродвигателя

$$D_1 + D_2 = 8,13 + 7,74 = 15,87 \text{ кВт,}$$

т. е. расхождение порядка 5%, что вполне допустимо.

Посмотрим теперь, чем же объясняется возможность синхронных двигателей генерировать реактивную мощность.

Главным отличием синхронных двигателей от асинхронных является то, что магнитное поле, необходимое для действия двигателя, создается в основном от отдельного источника постоянного тока (возбудителя). Вследствие этого синхронный двигатель в нормальном режиме (при $\cos \varphi = 1$) почти не потребляет от сети реактивной мощности для создания главного магнитного потока.

Обмотка статора трехфазного синхронного двигателя не отличается от обмотки асинхронного двигателя. При подключении двигателя к трехфазной сети по обмотке статора проходят токи, образующие вращающееся магнитное поле. Так как потоки статора и ротора вращаются с одной и той же частотой вращения $n = 60f/p$, то эти потоки относительно друг друга неподвижны. Рассмотрим взаимодействия потоков, напомнив, что обмотка статора называется якорем, взаимодействие полей статора и ротора называется реакцией якоря.

Обычно синхронные двигатели выполняются с явно выраженными полюсами. На рис. 23,а изображена одна фаза обмотки статора в виде одного витка для случая, когда ток I статора совпадает с э. д. с. двигателя E_0 , наведенной потоком возбуждения Φ_v .

Как видно из рис. 23, при принятом направлении тока в обмотке статора и ротора¹ магнитный поток Φ_a

¹ Крестиком обозначено направление тока от наблюдателя, точкой — к наблюдателю. Направление вращения ротора при этом определяется по правилу левой руки.

статора в воздушном зазоре направлен поперек главного потока Φ_{δ} полюсов ротора и не изменяет его по значению, а лишь сгущает и разрежает его на концах полюсов. В этом случае реактивная мощность из сети на

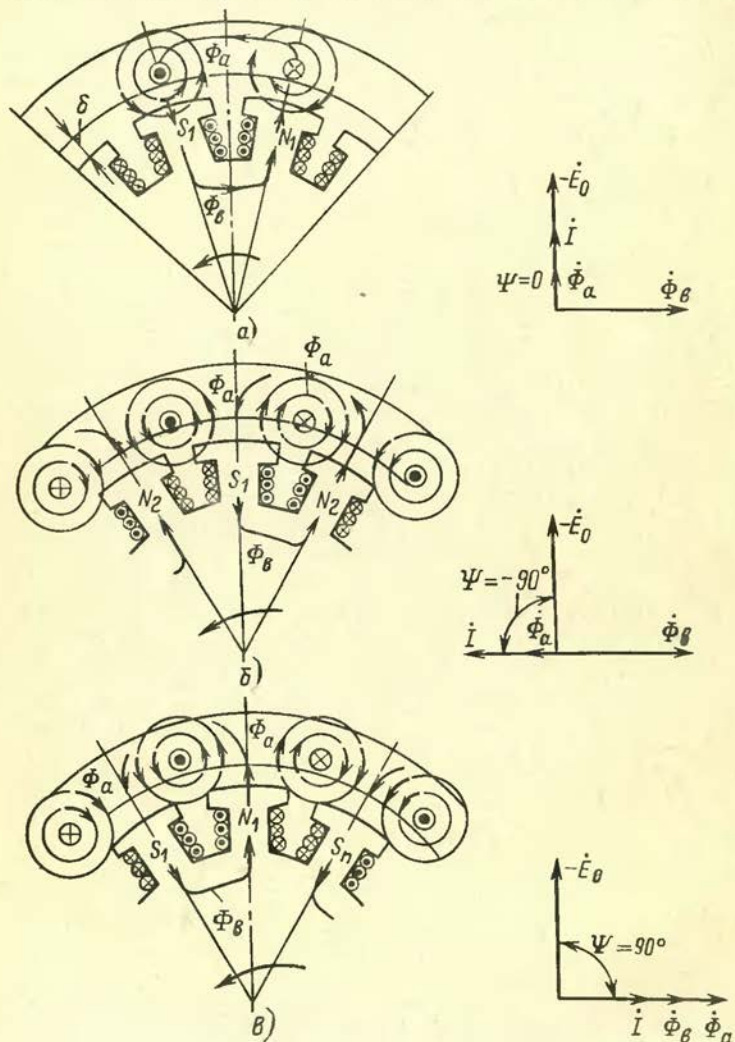


Рис. 23. Взаимодействие магнитных потоков ротора и статора синхронного двигателя (реакция якоря).

$a - \cos \varphi = 1$; $б - \cos \varphi$ — опережающий; $в - \cos \varphi$ — отстающий.

создание магнитного потока в воздушном зазоре δ не расходуется, за исключением небольшой части, идущей на образование потока рассеяния статора.

Предположим теперь, что ток статора двигателя опережает на угол 90° э. д. с. двигателя E_0 . На рис. 23,б изображено взаимное положение той же обмотки статора и полюсов ротора в момент, когда ток в обмотке статора достигает максимума на $1/4$ периода ранее, чем э. д. с. В этом случае магнитный поток статора Φ_a направлен навстречу главному потоку Φ_b и уменьшает его, т. е. оказывает размагничивающее действие. Следовательно, уменьшается э. д. с. двигателя E_0 .

Если ток статора и напряжение сети неизменны, то для восстановления режима нужно увеличить э. д. с. до первоначального значения путем увеличения потока Φ_b , т. е. увеличивая ток возбуждения. Как говорят, в этом случае машину перевозбуждают (увеличивают ток возбуждения выше значения, соответствующего $\cos \varphi = 1$). При этом та часть реактивной энергии сети, которая расходовалась на размагничивание (на создание потока Φ_a , т. е. на уменьшение главного магнитного потока Φ_b), компенсируется увеличенным током возбуждения ротора. Компенсация реактивной мощности намагничивания таким путем равнозначна потреблению из сети двигателем отрицательной реактивной энергии. Таким образом, синхронный двигатель при перевозбуждении потребляет из сети отрицательную реактивную мощность, т. е. ведет себя как конденсатор.

Рассмотрим такой случай, когда ток статора синхронного двигателя отстает от э. д. с. двигателя.

На рис. 23,в изображено взаимное положение фазы статора и полюсов ротора для случая, когда ток в обмотке фазы достигает максимума на $1/4$ периода позже э. д. с. Поток статора Φ_a направлен согласно с главным потоком ротора Φ_b и усиливает его: E_0 увеличивается. Для того чтобы при этом э. д. с. E_0 не изменилась (напряжение сети неизменно), нужно уменьшить ток возбуждения на величину, соответствующую потоку статора. Для образования этого потока статора (идущего частично и на создание главного потока Φ_b) из сети забирается реактивная мощность намагничивания. В этом случае двигатель недовозбужден (т. е. ток возбуждения меньше значения при $\cos \varphi = 1$) и потребляет

из сети реактивную энергию аналогично асинхронному двигателю (но в относительно меньшем количестве, так как часть главного потока создается обмоткой возбуждения).

Как следует из сказанного, поток статора Φ_a можно рассматривать как совокупность двух взаимно сдвинутых на угол 90° составляющих: продольного потока $\Phi_d = \Phi_a \sin \psi$ и поперечного потока $\Phi_q = \Phi_a \cos \psi$ (см. рис. 24). Эти потоки создаются соответствующими со-

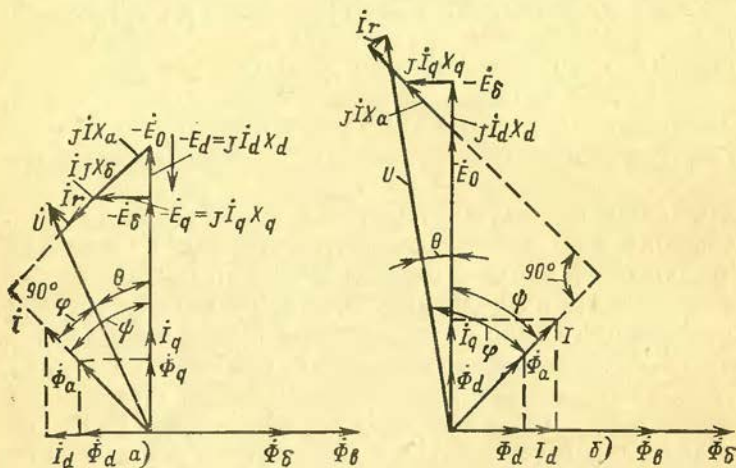


Рис. 24. Векторные диаграммы синхронного двигателя в режимах перевозбуждения (а) и недовозбуждения (б).

ставляющими тока двигателя I_d и I_q , определяющимися условными индуктивными сопротивлениями: x_d (обусловлено продольным потоком) и x_q (обусловлено поперечным потоком реакции якоря). Индуктивное сопротивление статора, обусловленное потоком рассеяния, равно x_s .

Теперь рассмотрим векторные диаграммы синхронного двигателя для случаев работы с перевозбуждением и недовозбуждением, приведенные на рис. 24, а и б соответственно.

На векторной диаграмме для опережающего тока обозначены: Φ_v поток, создаваемый обмоткой возбуждения, возбуждающий э. д. с. двигателя \dot{E}_0 (уравновешивает составляющую напряжения минус \dot{E}_0). Ток двигателя I опережает $-\dot{E}_0$ на угол ψ . Составляющие потока

$\dot{\Phi}_a : \dot{\Phi}_d, \dot{\Phi}_q$ возбуждают э. д. с., которые уравниваются напряжениями $-\dot{E}_d$ и $-\dot{E}_q$.

Падение напряжения в индуктивном сопротивлении рассеяния и активном сопротивлении статора представлено векторами $jI x_s$ и $I r$. Напряжение сети \dot{U} уравнивает все составляющие напряжения двигателя.

Из векторной диаграммы видно, что реакция якоря при опережающем токе является размагничивающей, так как $\dot{\Phi}_d$ направлен против $\dot{\Phi}_v$ и результирующий поток в воздушном зазоре $\dot{\Phi}_\delta = \dot{\Phi}_v - \dot{\Phi}_d$. Ему соответствует э. д. с., равная $\dot{E}_\delta < \dot{E}_0$. Из диаграммы также видно, что $\psi = \varphi + \theta$, где θ — угол между напряжением сети U и э. д. с. E_0 машины (зависящий от активной нагрузки и характеризующий устойчивость синхронной работы), а φ — угол сдвига между током I двигателя и напряжением \dot{U} сети и определяющий коэффициент мощности двигателя.

При отстающем токе (рис. 24, б) $\dot{\Phi}_\delta = \dot{\Phi}_v + \dot{\Phi}_d$ и $\dot{E}_\delta > \dot{E}_0, \psi = \varphi - \theta$.

Если в общем случае обозначить индуктивное сопротивление, обусловленное реакцией якоря, через x_a , то общее индуктивное сопротивление двигателя, называемое синхронным сопротивлением, будет равно $x_c = x_a + x_s$. Для крупных машин можно принять $r=0$. Такое допущение дает возможность упростить векторную диаграмму. На рис. 25 приведена упрощенная векторная диаграмма, построенная для двух значений тока возбуждения (при постоянной нагрузке). Из диаграммы видно, что при одном и том же значении по модулю тока нагрузки $I' = I''$ при опережающем токе $I' \dot{E}'_0 > \dot{E}''_0$.

Следовательно, $\dot{\Phi}'_\delta > \dot{\Phi}''_\delta$ и $i'_v > i''_v$, т. е. машина перевозбуждена.

На рис. 26 изображены так называемые U-образные кривые синхронного двигателя для разных нагрузок P_0, P_1 и P_2 . Минимальное значение тока статора I для каждой нагрузки соответствует $\cos \varphi = 1$. Левая часть кривых соответствует недо возбужденной машине, потребляющей из сети реактивную мощность намагничивания, правая — перевозбужденной машине, потребляющей из сети

Средневзвешенный коэффициент мощности нагрузки, применявшийся при расчетах с потребителями, вычислялся по средневзвешенному тангенсу $\operatorname{tg} \varphi_{\text{ср}}$, определяемому по показаниям реактивного и активного счетчиков за заданный отрезок времени. Так, если за время $t_2 - t_1$, например за расчетный период, показания счетчика активной энергии равны $A_a = A_{a2} - A_{a1}$ и реактивного счетчика $A_p = A_{p2} - A_{p1}$, то $\operatorname{tg} \varphi_{\text{ср}} = A_p / A_a$.

Было установлено, что показания реактивного счетчика неправильно отражали действительный режим передачи реактивной мощности. Так, определенное по по-

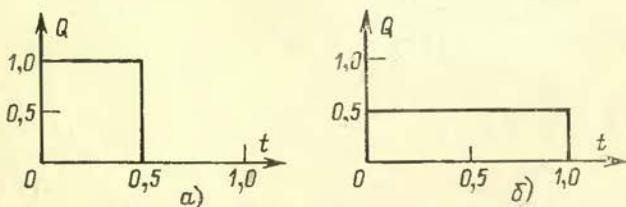


Рис. 27. Идеализированные графики реактивной нагрузки, для которых реактивная энергия, учтенная счетчиком, одна и та же (площади равны), а реактивные мощности различны.

казаниям счетчиков значение $\cos \varphi_{\text{ср}}$ обычно не соответствовало данному режиму нагрузки и часто оказывалось выше $\cos \varphi$ в часы прохождения максимума нагрузки. Это можно объяснить, в частности, широким применением неотключаемых в ночное время конденсаторных батарей, что вело к перекомпенсации (при наличии стопоров на реактивных счетчиках это соответствовало остановке диска счетчика), несовпадением графиков реактивной и активной нагрузок. Все это приводило к заниженному значению A_p и, следовательно, к заниженному значению $\operatorname{tg} \varphi_{\text{ср}}$, т. е. к завышенному значению $\cos \varphi_{\text{ср}}$. Компенсация реактивной мощности, выполненная по средневзвешенному значению $\cos \varphi_{\text{ср}}$, оказывалась недостаточной в часы максимума нагрузки, что вызывало дефицит реактивной мощности в данном узле, увеличение потерь в сети, снижение напряжения и т. д.

Для примера рассмотрим два идеализированных графика реактивной нагрузки (рис. 27), для которых реактивная энергия, учтенная реактивным счетчиком, одинакова и равна $Qt/2$ (пример заимствован из [4]). В пер-

вом случае (рис. 27, а) потери активной мощности ΔP_1 и потери энергии $\tilde{\Delta A}_1$ [см. (29)] на любом участке сети с сопротивлением R равны:

$$\Delta P_1 = \frac{Q^2}{U^2} R \text{ и } \Delta A_1 = \frac{Q^2}{U^2} R \frac{t}{2}.$$

Во втором случае (рис. 27, б)

$$\Delta P_2 = \left(\frac{Q}{2}\right)^2 \frac{R}{U^2} \text{ и } \Delta A_2 = \left(\frac{Q}{2}\right)^2 \frac{R}{U^2} t.$$

Из приведенных выражений видно, что в первом случае требуется в 2 раза бóльшая мощность компенсирующих устройств, так как в 4 раза больше потери активной мощности и в 2 раза больше потери энергии, и все это при одном и том же значении учтенной счетчиком реактивной энергии $Qt/2$.

В соответствии с действующими директивными указаниями компенсацию реактивной мощности производят, исходя из баланса реактивной мощности в данном узле электросети. Суммарная генерируемая реактивная мощность для любого режима работы электросистемы всегда равна суммарной потребляемой реактивной мощности. В общем случае условие баланса реактивной мощности в данном узле электросети выражается [4]:

$$Q_{\Gamma} + Q_{\kappa} \geq Q_{\Pi} + \Delta Q - Q_{\text{Л}} + Q_{\text{Р}}, \quad (40)$$

где Q_{Γ} — реактивная мощность, которая может быть получена в данном узле от генераторов электростанций; Q_{κ} — реактивная мощность компенсирующих устройств в данном узле; Q_{Π} — реактивная мощность, потребляемая нагрузками данного узла; ΔQ — потери реактивной мощности в элементах электросети данного узла; $Q_{\text{Л}}$ — реактивная мощность, генерируемая емкостью протяженных линий (кабельных, воздушных), относящихся к данному узлу; $Q_{\text{Р}}$ — резерв реактивной мощности в данном узле.

Для промышленных предприятий обычно $Q_{\text{Л}}=0$, а необходимый резерв принимается порядка 10%, т. е. $Q_{\text{Р}}=1,1Q_{\Pi}$, тогда

$$Q_{\kappa}=1,1Q_{\Pi} - (Q_{\Gamma} - \Delta Q).$$

Значение $Q_{\Gamma} - \Delta Q = Q_{\text{э}}$ определяется энергосистемой и задается потребителю.

Таким образом, мощность компенсирующих устройств потребителя на границе раздела сетей энерго-снабжающей организации и потребителя находится из выражения

$$Q_k \geq 1,1 Q_{\text{п}} - Q_{\text{э}} \quad (41)$$

Для электроустановок малой мощности обычно требуется полная компенсация, т. е.

$$Q_k = Q_{\text{п}}$$

Как видно из приведенных выражений, расчет компенсации реактивной мощности должен производиться, исходя из значений реактивной нагрузки (квар и Мвар) в соответствии с графиком реактивных нагрузок.

Коэффициент мощности $\cos \varphi$ является недостаточным показателем для оценки реактивной составляющей нагрузки, особенно при высоких значениях $\cos \varphi$, что видно из зависимости реактивной мощности Q от $\cos \varphi$ и $\text{tg } \varphi$, приведенной ниже:

Коэффициент активной мощности $\cos \varphi$	1,0	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,9
Коэффициент реактивной мощности $\text{tg } \varphi$	0	0,14	0,20	0,25	0,29	0,33	0,36	0,40	0,43	0,45	0,48
Значение реактивной мощности Q , % активной мощности	0	14	20	25	29	33	36	40	43	45	48

Так, например, при достаточно высоком значении $\cos \varphi = 0,95$ реактивная нагрузка составляет 33% активной. Более показательным является коэффициент реактивной мощности, равный $\text{tg } \varphi = Q/P$ и выражающий непосредственно значение реактивной мощности в долях активной мощности.

4. КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НАГРУЗКИ

Потребители без синхронных двигателей. На промышленных предприятиях обычно вся реактивная нагрузка присоединена по стороне 380—660 В. Компенсирующие же устройства могут быть подключены или только к шинам 6—10 кВ, или частью к шинам 6—10 кВ и частью на стороне 380—660 В, или же только на стороне 380—660 В. Мощность компенсирующих устройств Q_k определяется из выражения (41).

Вопрос, как экономически выгоднее распределить эту компенсирующую мощность, решается технико-экономическим сравнением перечисленных вариантов.

Начнем с простого случая, когда на предприятии установлены один-два трансформатора 6—10/0,4 кВ и синхронные двигатели отсутствуют. Учтем, что удельные затраты на установку конденсаторных батарей на стороне 6—10 кВ ниже, чем на стороне 0,4 кВ, но прибавляются затраты на устройство ячейки 6—10 кВ для подключения конденсаторной батареи. Учтем также, что мощность $Q_{\text{к}}$ со стороны 6—10 кВ должна быть передана через трансформаторы на сторону 0,4 кВ*. Если трансформаторы загружены полностью ($\beta=1$), то встает вопрос о замене трансформаторов на большую мощность и о выгоде этого.

Затраты, руб., на установку конденсаторных батарей мощностью Q определяются по выражению

$$Z=Z_0+Z_1Q, \quad (42)$$

где Z_0 — постоянная составляющая затрат, руб., не зависящая от генерируемой реактивной мощности; Z_1 — удельные затраты на 1 Мвар генерируемой мощности, руб./Мвар.

Для конденсаторных батарей без регулирующих устройств

$$Z_0=0,223K_0. \quad (43)$$

При наличии регулирующих устройств

$$Z'_0=0,223K_0+0,27K_p, \quad (43a)$$

где K_0 — стоимость вводного устройства (ячейки), руб.; K_p — стоимость регулирующего устройства, руб.; 0,223 — коэффициент, учитывающий суммарные ежегодные отчисления от стоимости вводного устройства; 0,27 — то же от стоимости регулирующего устройства [7].

Удельные затраты:

$$Z_1=0,223K_y \left(\frac{U_{\text{б.к}}}{U_{\text{н}}} \right)^2 + C_0 p_{\text{б.к}}, \quad (44)$$

где K_y — удельная стоимость установки конденсаторной батареи; $U_{\text{б.к}}$ — номинальное напряжение конденсаторной батареи; $U_{\text{н}}$ — номинальное напряжение сети; C_0 — удельная стоимость потерь активной мощности в сети и конденсаторной батареи, руб./кВт (задается энергосисте-

* Номинальное напряжение электроприемников (оно же принимается за номинальное напряжение сети) 380 В. Но вторичное напряжение трансформатора равно 400 В для покрытия потери напряжения в распределительной сети.

мой); $p_{б.к}$ — удельные потери активной мощности в конденсаторной батарее, кВт/Мвар.

Ход расчетов покажем на примере.

Пример 1. К шинам распределительного пункта промышленного предприятия присоединен один трансформатор 6/0,38 кВ номинальной мощностью $S_{\pi}=1000$ кВ·А. Активная нагрузка на стороне 380 В $P=0,9$ МВт, реактивная $Q_{\pi}=0,8$ Мвар. По (16) имеем $S = \sqrt{0,9^2 + 0,8^2} = 1,2$ кВ·А, т. е. трансформатор перегружен $S > S'_{\pi}$.

Энергоснабжающей организацией задана полная компенсация реактивной мощности, следовательно, $Q_0=0$. Синхронных двигателей нет. Компенсация реактивной мощности может быть выполнена путем установки конденсаторных батарей: а) на шинах 6 кВ; б) на стороне 380 В; в) на стороне 6 кВ и на стороне 380 В. Следует выбрать наиболее экономичный вариант, причем известно, что для конденсаторных батарей 6 кВ $Z_{01}=670$ руб. и $Z_{11}=1600$ руб/Мвар, а для 380 В $Z_{00}=0$ (не требуется замена ячейки) и $Z_{10}=3000$ руб/Мвар. Если конденсаторы будут установлены только на стороне 6 кВ, то при передаче всей компенсирующей мощности (0,8 Мвар) на сторону 380 В потребуются увеличение номинальной мощности трансформатора. Стоимость замены трансформатора с оборудованием на следующую ступень (1600 кВ·А) 5000 руб. В обоих случаях принимаем загрузку трансформатора $\beta=1$.

Решение. Определяем реактивную мощность, которая может быть передана со стороны 6 кВ к нагрузкам 380 В исходя из нагрузки трансформатора:

$$Q = \sqrt{(S_{\pi})^2 - P^2} = \sqrt{1^2 - 0,9^2} = 0,44 \text{ Мвар.}$$

Очевидно, что это и есть возможная наибольшая мощность конденсаторной батареи 6 кВ, т. е. $Q_1=0,44$ Мвар.

Тогда мощность конденсаторных батарей на стороне 380 В будет равна:

$$Q_0 = Q_{\pi} - Q_1 = 0,8 - 0,44 = 0,36 \text{ Мвар.}$$

Теперь определим затраты на установку батарей по этому (первому) варианту, руководствуясь формулами (43) и (44):

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_{01} + Z_{11}Q_1 + Z_{00} + Z_{10}Q_0 = \\ &= 670 + 1600 \cdot 0,44 + 3000 \cdot 0,36 = 2454 \text{ руб.} \end{aligned}$$

В этом расчете первые два слагаемых относятся к батарее 6 кВ, вторые — к батарее 380 В.

Если мы заменим трансформатор 1000 кВ·А на трансформатор следующей ступени по мощности 1600 кВ·А, то сможем передать через трансформатор со стороны 6 кВ на сторону 380 В

$$Q_1 = \sqrt{1,6^2 - 0,9^2} = 1,4 \text{ Мвар,}$$

т. е. больше, чем нам необходимо по условиям компенсации (0,8 Мвар). В этом случае установка батарей на стороне 380 В не потребуется ($Q_0=0$).

Затраты по второму варианту составят:

$$Z_2 = 670 + 1600 \cdot 0,8 + 0,223 \cdot 5000 = 3065 \text{ руб.}$$

И, наконец, определим затраты для варианта, когда конденсаторные батареи устанавливаются только на стороне 380 В. Так как затраты на оборудование вводной ячейки 6 кВ для батареи отпадают, то

$$Z_3 = 3000 \cdot 0,8 = 2400 \text{ руб.}$$

Как видно из расчетов, последний вариант является наиболее выгодным, т. е. оптимальным.

Далее, необходимо общую мощность конденсаторных батарей распределить между групповыми распределительными сборками РП, к которым подключена нагрузка так, чтобы потери в сети 380 В были наименьшими.

Размещение конденсаторных батарей в сетях 380—660 В. В общем случае распределение суммарной мощности конденсаторных батарей Q_c производится с учетом реактивной мощности, передаваемой со стороны 6—10 кВ Q , реактивных нагрузок РП 380—660 В и сопротивлений радиальных питающих линий.

Пусть от шин 380 В отходят N радиальных линий с сопротивлениями r_1, r_2, \dots, r_N , питающих N сборок с реактивными нагрузками $Q_{н1}, Q_{н2}, \dots, Q_{нN}$, причем $Q_n = Q_{н1} + Q_{н2} + \dots + Q_{нN}$ и $Q_c \leq Q_n$.

Найдем эквивалентное сопротивление, Ом, всех питающих линий по выражению

$$r_s = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots + \frac{1}{r_N}}. \quad (45)$$

Тогда для какой-то n -й линии определим часть реактивной мощности Q_n , передаваемой со стороны 6—10 В, для которой потери в линии будут ей пропорциональны (т. е. оптимальны):

$$Q_n = \frac{Q r_s}{r_n}. \quad (46)$$

Ход расчета опять покажем на примере.

Пример 2. Схема питания нагрузок показана на рис. 28. Реактивные нагрузки $Q_{н1}—Q_{н4}$ каждого РП и сопротивления питающих линий указаны на схеме. Суммарная мощность конденсаторных батарей на стороне 380 В определена расчетом и равна 700 квар. Из сети 6—10 кВ передается $Q = 225$ квар. Требуется правильно распределить общую мощность батарей между всеми РП.

Решение. Определим эквивалентное сопротивление питающих линий (45)

$$r_э = \frac{1}{\frac{1}{0,02} + \frac{1}{0,04} + \frac{1}{0,015} + \frac{1}{0,035}} = 0,00587 \text{ Ом.}$$

Тогда вся реактивная мощность, передаваемая со стороны 6—10 кВ ($Q=225$ квар), распределяется между сборками следующим образом (46):

$$Q_1 = \frac{225 \cdot 0,00587}{0,02} = 66 \text{ квар;}$$

$$Q_2 = \frac{225 \cdot 0,00587}{0,04} = 33 \text{ квар;}$$

$$Q_3 = \frac{225 \cdot 0,00587}{0,015} = 88 \text{ квар;}$$

$$Q_4 = \frac{225 \cdot 0,00587}{0,035} = 38 \text{ квар.}$$

Расчетные значения конденсаторных батарей, устанавливаемых на сборках РП с учетом передаваемой мощности со стороны 6—10 кВ, равны:

$$Q_{1с} = Q_{в1} - Q_1 = 85 - 66 = 19 \text{ квар;}$$

$$Q_{2с} = Q_{в2} - Q_2 = 400 - 33 = 367 \text{ квар;}$$

$$Q_{3с} = Q_{в3} - Q_3 = 240 - 88 = 152 \text{ квар;}$$

$$Q_{4с} = Q_{в4} - Q_4 = 225 - 38 = 187 \text{ квар.}$$

Шкала номинальных мощностей нерегулируемых комплектных конденсаторных батарей 380 В с наименьшими значениями (тип УК-0, 38-43) следующая: 75; 150; 225; 450 квар.

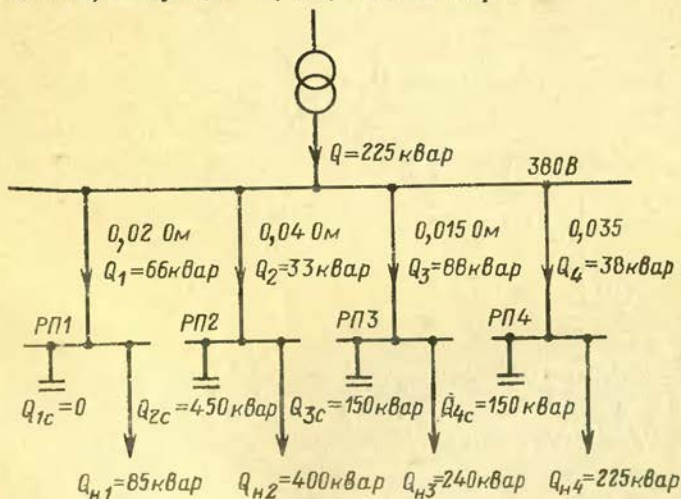


Рис. 28. Расчетная схема размещения конденсаторных батарей в сетях 380—660 В при радиальном питании (к примеру 2).

Ориентируясь на эту шкалу, выбираем:

$$Q_{1c}=0; Q_{2c}=450 \text{ квар}; Q_{3c}=150 \text{ квар} \text{ и } Q_{4c}=150 \text{ квар.}$$

Суммарная мощность батарей равна:

$$Q_c=450+150+150=750 \text{ квар,}$$

т. е. несколько больше расчетного значения (700 квар).

Рассмотрим теперь случай, когда суммарная мощность устанавливаемых конденсаторных батарей больше суммы реактивных нагрузок всех РП и, кроме того, к шинам 380—660 В также подключена реактивная нагрузка.

В этом случае к каждому РП необходимо подключить конденсаторную батарею, мощность которой равна мощности реактивной нагрузки данного РП. Тогда все питающие РП линии разгружаются от передачи реактивной мощности со стороны 6—10 кВ. Избыточная мощность батарей подсоединяется непосредственно к шинам 380—660 В. Покажем это на примере.

Пример 3. На рис. 29 показана схема питания РП радиальными линиями с указанием реактивных нагрузок. Суммарная мощность конденсаторных батарей определена расчетом $Q_c=900$ квар.

Суммарная реактивная нагрузка РП1—РП4 равна: $Q_{в1}+Q_{в2}+Q_{в3}+Q_{в4}=85+135+240+200=660$ квар, что меньше $Q_c=900$ квар. Кроме того, к шинам присоединена реактивная нагрузка $Q_{вш}=400$ квар. Из сети передается $Q=160$ квар.

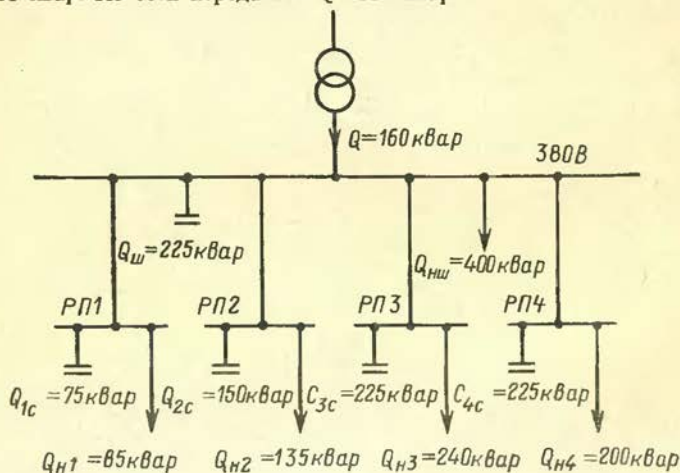


Рис. 29. Расчетная схема размещения конденсаторных батарей в сетях 380—660 В при радиальном питании и нагрузке на шинах (к примеру 3).

Решение. Для каждого РП, ориентируясь на шкалу номинальных мощностей конденсаторных батарей, подбираем конденсаторные батареи $Q_{1c}=75$, $Q_{2c}=150$, $Q_{3c}=225$ и $Q_{4c}=225$ квар. Тогда мощность батареи, подключенной к шинам, будет:

$$Q_{ш} = Q_c - Q_{1c} - Q_{2c} - Q_{3c} - Q_{4c} = 900 - 75 - 150 - 225 - 225 = 225 \text{ квар.}$$

Суммарная мощность всех конденсаторных батарей Q_c меньше суммы реактивных нагрузок ($Q_{ш1} + Q_{ш2} + Q_{ш3} + Q_{ш4} + Q_{ш}$) на $Q = 1060 - 900 = 160$ квар, которая и должна быть передана через трансформатор.

Если нагрузки питаются от токопровода с ответвлениями, размещение конденсаторных батарей производится с учетом сопротивлений ответвлений. Эквивалентное сопротивление сети для каждой точки ответвления определяется, начиная с конца токопровода, по формуле параллельного соединения сопротивлений

$$r_s = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Распределение реактивных нагрузок определяется по выражению (46).

Ход расчета показан на примере для общего случая, когда задана суммарная мощность конденсаторных батарей на стороне 380—660 В Q_c и часть компенсирующей мощности передается со стороны 6—10 кВ Q .

Пример 4. Схема питания нагрузок, подключенных к токопроводу, показана на рис. 30. Реактивные нагрузки сборок $Q_{ш1} - Q_{ш4}$, сопротивления участков токопровода $r_{01} - r_{34}$ и ответвлений $r_1 - r_4$ указаны на схеме. Суммарная мощность конденсаторных батарей $Q_{1c} - Q_{4c}$ на стороне 380 В $Q_c = 600$ квар. Со стороны 6 кВ пере-

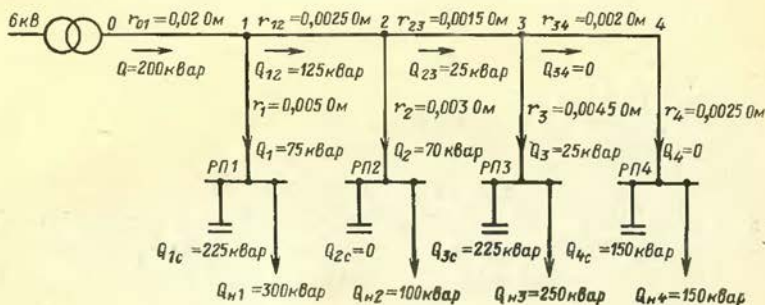


Рис. 30. Расчетная схема размещения конденсаторных батарей при питании токопроводом с ответвлениями (к примеру 4).

дается компенсирующая мощность $Q=200$ квар. Найти оптимальные значения мощности конденсаторных батарей, подключаемых к сборкам.

Решение. Последовательно определяем эквивалентные сопротивления сети для всех ответвлений, начиная с конца токопровода.

Для ответвления от точки 3, для которой $R_1=r_{34}+r_4$ и $R_2=r_3$:

$$r_{33} = \frac{(r_{34} + r_4)r_3}{(r_{34} + r_4) + r_3} = \frac{(0,002 + 0,0025) \cdot 0,0045}{(0,002 + 0,0025) + 0,0045} = 0,00225 \text{ Ом.}$$

Для ответвления от точки 2 аналогично

$$r_{22} = \frac{(0,0015 + 0,00225) \cdot 0,003}{(0,0015 + 0,00225) + 0,003} = 0,00167 \text{ Ом.}$$

Для ответвления от точки 1

$$r_{11} = \frac{(0,0025 + 0,00167) \cdot 0,005}{(0,0025 + 0,00167) + 0,005} = 0,00227 \text{ Ом.}$$

Определяем по (46) реактивную мощность, передаваемую со стороны 6 кВ по ответвлению 1 на сборку РП1:

$$Q_1 = (200 \cdot 0,00227) / 0,005 = 91 \text{ квар.}$$

Тогда при полной компенсации мощность конденсаторной батареи для этой сборки будет равна:

$$Q = 300 - 91 = 209 \text{ квар.}$$

Согласно шкале мощностей конденсаторных батарей принимаем $Q_{1c} = 225$ квар. Тогда в ответвление 1 будет передаваться мощность $Q_{н1} - Q_{1c} = 300 - 225 = 75$ квар (а не 91 квар) и на участке токопровода 1-2 мощность будет:

$$Q_{12} = Q - Q_1 = 200 - 75 = 125 \text{ квар.}$$

Реактивная мощность, передаваемая в ответвлении 2, равна:

$$Q_2 = (125 \cdot 0,00167) / 0,003 = 70 \text{ квар.}$$

Мощность батареи для РП2

$$Q_{2c} = Q_{н2} - Q_2 = 100 - 70 = 30 \text{ квар.}$$

принимаем $Q_{c2} = 0$.

На участке 2-3 передается мощность

$$Q_{23} = 125 - 100 = 25 \text{ квар}$$

и в ответвлении 3

$$Q_3 = (25 \cdot 0,0027) / 0,0045 = 15 \text{ квар.}$$

Реактивная мощность батареи на сборке РП3

$$Q_{3c} = 250 - 15 = 235 \text{ квар.}$$

Принимаем по шкале мощностей $Q_{3c} = 225$ квар.

Тогда в ответвлении 3 будет передаваться мощность

$$Q_3 = 15 + (235 - 225) = 25 \text{ квар.}$$

На участке токопровода 3-4 $Q_{34} = 0$. Следовательно, $Q_{4c} = 150$ квар.

Таким образом, суммарная мощность всех конденсаторных батарей равна:

$$Q_c = 225 + 225 + 150 = 600 \text{ квар,}$$

т. е. равна заданной мощности.

Если ответвлениями от токопровода к нагрузкам небольшой длины и потерями в них можно пренебречь, то конденсаторные батареи следует выбирать по мощности близкими нагрузкам на ответвлениях и размещать их, начиная с наиболее удаленного РП. Определение мощности батарей покажем на примере.

Пример 5. Схема токопровода изображена на рис. 31 с указанием нагрузок (квар). Определить мощность конденсаторных батарей, присоединяемых в точках ответвлений, если суммарная мощность батарей задана $Q_c = 770$ квар и из сети 6 кВ передается $Q = 140$ квар.

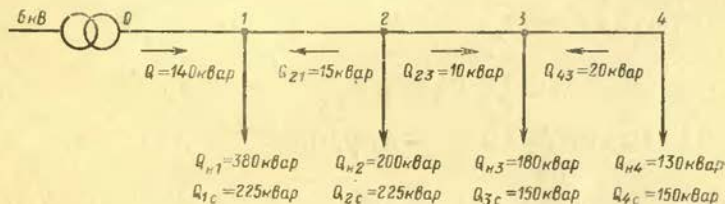


Рис. 31. Расчетная схема размещения конденсаторных батарей при питании токопроводом с короткими ответвлениями (к примеру 5).

Решение. Устанавливаем в точке 4 батарею мощностью $Q_{4c} = 150$ квар. Тогда на участке 3—4 токопровода будет передаваться реактивная мощность в направлении точки 3

$$Q_{43} = Q_{4c} - Q_{н4} = 150 - 130 = 20 \text{ квар.}$$

В точке 3 устанавливаем батарею $Q_{3c} = 150$ квар, тогда на участке 2—3 будет передаваться мощность в направлении точки 3 $Q_{23} = 180 - 150 - 20 = 10$ квар.

В точке 2 устанавливаем батарею $Q_{2c} = 225$ квар, и, следовательно, на участке 1—2 будет передаваться в направлении точки 1 мощность $Q_{21} = 225 - 200 - 10 = 15$ квар. Кроме того, в точку 1 реактивная мощность передается со стороны 6 кВ $Q = 140$ квар. Следовательно, мощность батареи $Q_{1c} = 380 - 140 - 15 = 225$ квар.

Суммарная мощность устанавливаемых на ответвлениях конденсаторных батарей, исходя из шкалы мощностей, оказывается равной

$$Q_c = 225 + 225 + 150 + 150 = 750 \text{ квар,}$$

т. е. близкая к заданной.

Для токопровода с равномерно распределенной нагрузкой конденсаторная батарея под-

ключается в одной точке токопровода. Оптимальное расстояние точки присоединения батареи к токопроводу от трансформатора находится по формуле

$$L_3 = L_0 + \left(1 - \frac{Q_c}{2Q}\right)L,$$

где Q_c — мощность конденсаторной батареи, квар; Q — суммарная реактивная нагрузка токопровода, квар; L_0 — длина магистральной части токопровода (без ответвлений); L — длина распределяющей части токопровода.

Пример 6. Нагрузка цеха промышленного предприятия присоединена к токопроводу и распределена равномерно по длине токопровода $L=100$ м. Длина магистральной части (без ответвлений) $L_0=130$ м. Суммарная реактивная нагрузка $Q=500$ квар.

Определить расстояния L_3 от цехового трансформатора до точки присоединения конденсаторной батареи заданной мощности $Q_c=400$ квар, исходя из условий минимума потерь активной мощности в токопроводе.

Решение:

$$L_3 = 130 + \left(1 - \frac{400}{2 \cdot 500}\right) 100 = 190 \text{ м.}$$

Потребители с синхронными двигателями. Рассмотрим компенсацию реактивной мощности крупного промышленного предприятия с большим количеством цеховых трансформаторов, имеющего синхронные двигатели большой мощности на стороне 6—10 кВ. В первую очередь для компенсации должны быть использованы синхронные двигатели. Генерируемая ими реактивная мощность частью используется для компенсации реактивной нагрузки на шинах 6—10 кВ, но в основном подлежит передаче на сторону 380—660 В. Если установленные трансформаторы по своей нагрузке не смогут передать реактивную мощность, генерируемую синхронными двигателями, то встает вопрос о целесообразности установки дополнительного трансформатора.

Мощность конденсаторных батарей на стороне 380—660 В будет определяться как разность заданной общей компенсирующей мощностью и мощности, переданной со стороны 6—10 кВ. Затраты на компенсацию реактивной мощности в данном случае определяются как сумма затрат на генерацию реактивной мощности на стороне 6—10 кВ (стоимость активных потерь синхронных двигателей) и затрат на установку конденсаторных батарей на стороне 380—660 В.

Наибольшая реактивная мощность, которая может быть передана со стороны 6—10 кВ в сеть 380—660 В при N трансформаторах одинаковой мощности, определяется по формуле, Мвар:

$$Q_1 = \sqrt{(N\beta S_n)^2 - P^2}, \quad (47)$$

где P — суммарная активная нагрузка на стороне 380—660 В; S_n — номинальная мощность каждого трансформатора, МВ·А; N — число трансформаторов; β — коэффициент нагрузки трансформаторов.

Если из энергосистемы передается реактивная мощность Q_s , то компенсирующая мощность Q_k должна быть не меньше следующей:

$$Q_k \geq Q_A + Q_B - Q_s,$$

где Q_A — реактивная нагрузка на шинах 6—10 кВ; Q_B — реактивная нагрузка на стороне 380—660 В.

Максимальная реактивная мощность, генерируемая синхронными двигателями, определяется по выражению, квар:

$$Q_m = \frac{\alpha_m P_n \operatorname{tg} \varphi_n}{\eta_n}, \quad (48)$$

где P_n — номинальная активная мощность двигателя на валу, кВт; $\operatorname{tg} \varphi_n = 0,484$ соответствует принятому номинальному $\cos \varphi_n = 0,9$; η_n — к. п. д. по каталогу; $\alpha_m = Q_m / Q_n$ — коэффициент, учитывающий допустимую перегрузку по реактивной мощности в зависимости от напряжения и коэффициента нагрузки по активной мощности (см. табл. 3).

Потери активной мощности ΔP в синхронном двигателе при генерации реактивной мощности в зависимости от $\alpha = Q / Q_n$ выражаются квадратичной кривой и с достаточным приближением могут быть вычислены по выражению, кВт:

$$\Delta P = D_1 \frac{Q}{Q_n} + D_2 \left(\frac{Q}{Q_n} \right)^2 \quad (49)$$

(при $Q = Q_n$ $\Delta P = D_1 + D_2$, кВт).

Значения D_1 и D_2 для двигателей типов СДН, СД, СД и СДЗ вычислены и приводятся в приложении (табл. П1—П4) [2, 7].

Если имеющаяся группа N синхронных двигателей на стороне 6—10 кВ используется частично и для ком-

пенсации реактивной мощности на стороне 380—660 В, то потери в двигателях вычисляются по выражению

$$\Delta P = \frac{D_1}{Q_n} Q + \frac{2D_2 Q_{\text{пр}}}{Q_n^2 N} Q + \frac{D_2}{Q_n^2 N} Q^2, \quad (50)$$

где $Q_{\text{пр}}$ — реактивная мощность, используемая на стороне 6—10 кВ.

Стоимость потерь активной мощности в этом случае равна:

$$C = C_0 \left(\frac{D_1}{Q_n} + \frac{2D_2 Q_{\text{пр}}}{Q_n^2 N} \right) Q + C_0 \frac{D_2}{Q_n^2 N} Q^2, \quad (51)$$

где C_0 — удельная стоимость потерь активной мощности в сети и двигателях, руб/кВт (задается энергосистемой); Q_n — номинальная реактивная мощность синхронного двигателя; Q — фактическая реактивная мощность синхронного двигателя. Значения D_1 и D_2 приведены в приложении.

Из (51) определяются удельные потери на 1 Мвар генерируемой мощности, руб/Мвар:

$$Z_1 = C_0 \left(\frac{D_1}{Q_n} + \frac{2D_2 Q_{\text{пр}}}{Q_n^2 N} \right) \quad (52)$$

и на 1 Мвар² генерируемой мощности, руб/Мвар²:

$$Z_2 = C_0 \frac{D_2}{Q_n^2 N}. \quad (53)$$

Таким образом, затраты на генерацию реактивной мощности равны:

$$Z = Z_1 Q + Z_2 Q^2. \quad (54)$$

Технико-экономический расчет покажем на примере.

Пример 7. К шинам 10 кВ распределительного пункта промышленного предприятия присоединены шесть трансформаторов по $P = 1000$ кВ·А, 10/0,4 кВ с коэффициентом нагрузки $\beta = 0,7$ и два синхронных двигателя типа СДН мощностью по $P_d = 4000$ кВт с частотой вращения 1000 об/мин, работающие с нагрузкой $\beta = 0,8$ при номинальном напряжении на шинах 10 кВ.

Суммарная нагрузка на стороне 380 В равна $P_B = 4$ МВт и $Q_B = 3$ Мвар, т. е. коэффициент реактивной мощности на стороне 380 В до компенсации равен $\text{tg } \varphi_2 = 3/4 = 0,75$ ($\cos \varphi_2 = 0,8$). Потребление реактивной мощности в сети 10 кВ $Q_A = 3$ Мвар. Из сети энергосистемы предприятию передается $Q_0 = 1$ Мвар.

Необходимо определить, можно ли через установленные трансформаторы передать на сторону 380 В всю реактивную мощность, генерируемую синхронными двигателями, или же потребуются установка дополнительного трансформатора и выгодно ли это? При ре-

шенни примем, что удельная стоимость установки конденсаторной батареи на стороне 380 В $K_y = 12$ руб/квар, стоимость установки дополнительного трансформатора 1000 кВ·А с необходимым оборудованием $K_T = 17000$ руб. и стоимость дополнительных потерь энергии в синхронных двигателях (вызванных генерацией реактивной мощности) $p_0 = 70$ руб/кВт.

Схема питания показана на рис. 32.

Решение. С учетом передаваемой из системы реактивной мощности синхронные двигатели должны скомпенсировать на стороне 10 кВ

$$Q_{пр} = Q_A - Q_B = 3 - 1 = 2 \text{ Мвар.}$$

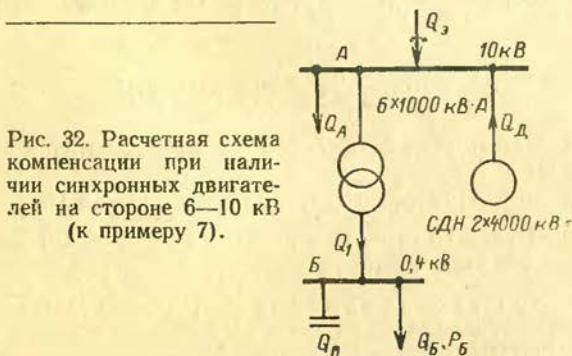


Рис. 32. Расчетная схема компенсации при наличии синхронных двигателей на стороне 6—10 кВ (к примеру 7).

Реактивная мощность, генерируемая двумя двигателями, по (48) и табл. 3 и П

$$Q_d = 2 \frac{1,27 \cdot 4000 \cdot 0,484}{0,964} = 5100 \text{ квар.}$$

Тогда мощность, могущая быть переданной на сторону 380 В, с учетом нагрузки на шинах 10 кВ $Q_A = 3$ Мвар и получаемой из сети $Q_B = 1$ Мвар

$$Q_1 = Q_d + Q_B - Q_A = 5,1 + 1 - 3 = 3,1 \text{ Мвар.}$$

Трансформаторы могут пропустить

$$Q'_1 = \sqrt{(N\beta P_T)^2 - P^2} = \sqrt{(6 \cdot 0,7 \cdot 1)^2 - 4^2} = 1,3 \text{ Мвар.}$$

При этом мощность батареи на стороне 380 В по условию баланса должна быть:

$$Q_0 = Q_B - Q'_1 = 3 - 1,3 = 1,7 \text{ Мвар.}$$

Чтобы увеличить пропускную способность трансформаторов, добавим один трансформатор ($N=7$), тогда

$$Q'_1 = \sqrt{(7 \cdot 0,7 \cdot 1)^2 - 4^2} = 2,85 \text{ Мвар,}$$

т. е. можно передать почти всю располагаемую реактивную мощность на стороне 10 кВ и установки батарей на стороне 380 В практически не потребуются.

Теперь сравним оба варианта по экономическим соображениям. При шести трансформаторах затраты складываются из стоимости потерь активной энергии в синхронных двигателях и стоимости установки конденсаторной батареи на стороне 380 В.

Для синхронных двигателей типа СДН, 10 кВ, 4000 кВт, 1000 об/мин

$$D_1=10,6 \text{ кВт}, D_2=11,8 \text{ кВт} \text{ и } Q_n=2,01 \text{ Мвар}$$

(определено по табл. П2).

Тогда удельные затраты по (52)—(53)

$$Z'_1 = 70 \left(\frac{10,6}{2,01} + \frac{2 \cdot 11,8 \cdot 2}{2,01^2 \cdot 2} \right) = 778 \text{ руб/Мвар}$$

и

$$Z'_2 = 70 \frac{11,8}{2,01^2 \cdot 2} = 102 \text{ руб/Мвар}^2.$$

Для конденсаторной батареи 380 В удельные затраты на установку по (44)

$$Z'_{10} = 0,223 \cdot 12\,000 (380/380)^2 + 70 \cdot 4,5 = 3000 \text{ руб/Мвар.}$$

Общие затраты по первому варианту ($Q_1=1,3$ Мвар)

$$Z' = 778 \cdot 1,3 + 102 \cdot 1,3^2 + 3000 \cdot 1,7 = 6280 \text{ руб.}$$

При семи трансформаторах ($Q_1=2,85$ Мвар) затраты складываются из стоимости потерь в двигателях и стоимости установки дополнительного трансформатора

$$Z'' = 778 \cdot 2,85 + 102 \cdot 2,85^2 + 0,223 \cdot 17\,000 = 6850 \text{ руб.}$$

Как видно из расчетов, оптимальным является 1-й вариант без установки дополнительного трансформатора ($N=6$). При этом избыток реактивной мощности на стороне 10 кВ, равный $Q_p=5,1-2-1,3=1,8$ Мвар, будет являться резервом реактивной мощности в данном узле.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица III

Основные технические данные синхронных двигателей
серии СДН на напряжение 6 кВ, $\cos \varphi = 0,9$

Тип двигателя	Номинальная мощность		К. п. д., %	Постоянные величины аппроксимации, кВг	
	активная, кВт	реактивная, квар		D_1	D_2

1000 об/мин

СДН-14-49-6	1000	511	95,37	5,09	3,99
СДН-14-59-6	1250	633	95,95	4,74	4,42
СДН-15-30-6	1600	812	95,75	6,65	6,80
СДН-15-49-6	2000	1010	96,06	8,06	7,53
СДН-15-64-6	2500	1260	96,50	8,13	7,74
СДН-15-76-6	3200	1610	96,75	10,3	8,91
СДН-16-69-6	4000	2000	96,48	14,1	11,8
СДН-16-84-6	5000	2500	96,90	13,8	11,5
СДН-16-104-6	6300	3150	97,22	14,6	13,1

750 об/мин

СДН-14-46-8	800	407	94,86	4,9	4,57
СДН-14-59-8	1000	511	95,61	4,37	4,96
СДН-15-30-8	1250	637	94,84	7,73	7,29
СДН-15-49-8	1600	812	95,77	7,22	7,33
СДН-15-64-8	2000	1010	96,12	8,08	6,98
СДН-16-54-8	2500	1265	95,85	11,2	10,2
СДН-16-71-8	3200	1615	95,56	10,1	10,5
СДН-16-86-8	4000	2010	96,80	11,0	11,4
СДН-17-59-8	5000	2510	96,53	17,2	15,2
СДН-17-76-8	6300	3150	96,94	18,1	14,8
СДН-17-94-8	8000	3980	97,22	20,3	18,1
СДН-17-119-8	10000	5000	97,40	23,5	21,0

600 об/мин

СДН-14-44-10	630	325	93,98	5,6	4,06
СДН-14-56-10	800	410	94,65	5,76	4,63
СДН-15-39-10	1000	511	94,68	7,66	5,38
СДН-15-49-10	1250	637	95,16	7,54	6,56
СДН-15-64-10	1600	812	95,78	7,79	6,99
СДН-16-54-10	2000	1010	95,66	10,7	8,68
СДН-16-71-10	2500	1265	96,22	10,9	8,46
СДН-16-86-10	3200	1615	96,58	11,6	10,5
СДН-17-59-10	4000	2010	96,67	12,9	12,7
СДН-17-76-10	5000	2510	97,06	14,6	11,7
СДН-17-94-10	6300	3150	97,24	17,1	14,4
СДН-18-71-10	8000	4000	96,94	22,3	20,1
СДН-18-91-10	10000	5000	97,26	22,7	22,1

Продолжение табл. III

Тип двигателя	Номинальная мощность		К. п. д., %	Постоянные величины аппроксимация, кВт	
	активная, кВт	реактивная, квар		D_1	D_2

590 об/мин

СДН-14-36-12	400	209	92,66	3,88	2,97
СДН-14-44-12	500	257	93,45	5,05	3,63
СДН-15-34-12	630	327	93,82	5,16	4,72
СДН-15-39-12	800	412	94,15	6,48	5,54
СДН-15-49-12	1000	511	94,89	6,61	5,88
СДН-16-41-12	1250	637	94,78	8,44	6,09
СДН-16-51-12	1600	816	95,39	8,63	7,61
СДН-16-64-12	2000	1020	95,95	9,22	8,29
СДН-17-49-12	2500	1265	95,79	11,5	9,36
СДН-17-59-12	3200	1615	96,29	10,2	11,7
СДН-17-76-12	4000	2010	96,60	11,3	13,2
СДН-18-59-12	5000	2520	96,37	20,0	14,9
СДН-18-71-12	6300	3160	96,79	21,0	16,3
СДН-18-91-12	8000	3990	97,18	18,1	18,5
СДН-18-111-12	10 000	5000	97,43	20,6	22,5

375 об/мин

СДН-15-21-16	320	170	90,12	4,76	4,1
СДН-15-26-16	400	211	91,45	5,31	4,27
СДН-15-34-16	500	262	92,75	5,52	4,23
СДН-15-41-16	630	327	93,20	6,64	4,91
СДН-16-34-16	800	415	93,85	7,07	5,25
СДН-16-41-16	1000	515	94,08	8,30	6,55
СДН-16-51-16	1250	642	94,80	8,43	7,07
СДН-17-39-16	1600	821	94,94	12,1	7,56
СДН-17-49-16	2000	1020	95,36	11,9	10,4
СДН-17-59-16	2500	1270	95,80	12,5	11,8
СДН-18-49-16	3200	1615	95,59	17,5	12,2
СДН-18-61-16	4000	2020	96,12	17,6	13,4

300 об/мин

СДН-15-29-20	320	172	90,15	4,64	4,6
СДН-15-36-20	400	211	91,18	5,13	5,08
СДН-15-26-20	500	264	91,70	5,81	5,39
СДН-16-34-20	630	330	92,66	6,68	5,46
СДН-16-41-20	800	416	93,32	7,76	6,0
СДН-17-31-20	1000	519	93,22	9,60	7,7
СДН-17-39-20	1250	646	94,05	9,87	8,25
СДН-17-46-20	1600	821	94,79	10,8	9,15
СДН-18-39-20	2000	1020	95,08	13,4	9,85
СДН-18-49-20	2500	1270	95,38	15,3	10,7
СДН-18-61-20	3200	1630	95,90	16,9	11,8
СДН-18-74-20	4000	2020	96,31	18,2	13,0

Продолжение табл. III

Тип двигателя	Номинальная мощность		К. п. д., %	Постоянные величины аппроксимации, кВт	
	активная, кВт	реактивная, квар		D_1	D_2
<i>250 об/мин</i>					
СДН-16-21-24	320	172	89,10	5,78	4,22
СДН-16-26-24	400	214	90,90	5,83	4,34
СДН-16-34-24	500	264	92,18	6,14	4,58
СДН-16-41-24	630	331	92,83	6,86	5,45
СДН-16-31-24	800	418	93,17	8,5	6,30
СДН-17-39-24	1000	520	93,37	10,0	7,19
СДН-17-46-24	1250	646	94,20	10,3	8,21
СДН-18-39-24	1600	825	93,77	14,6	10,4
СДН-18-49-24	2000	1025	94,51	16,0	10,4
СДН-18-61-24	2500	1270	95,23	15,9	11,7
СДН-19-46-24	3200	1630	95,41	16,7	15,4
СДН-19-54-24	4000	2030	95,71	20,8	16,3
<i>187 об/мин</i>					
СДН-17-19-32	320	174	89,25	5,19	4,72
СДН-17-21-32	400	216	90,20	5,97	5,38
СДН-17-26-32	500	266	91,60	6,57	5,29
СДН-17-34-32	630	334	92,34	6,27	6,91
СДН-18-26-32	800	423	92,08	11,1	7,29
СДН-18-34-32	1000	524	92,76	11,5	8,31
СДН-19-44-32	1250	650	93,76	12,1	8,40
<i>167 об/мин</i>					
СДН-17-21-36	320	175	88,68	6,65	4,18
СДН-17-26-36	400	216	90,03	7,64	4,25
СДН-17-31-36	500	268	91,30	8,07	4,70
СДН-18-24-36	630	336	91,10	9,73	7,14
СДН-18-29-36	800	423	91,68	10,5	8,30
СДН-18-36-36	1000	523	92,86	11,3	8,31
СДН-19-26-36	1250	655	93,69	11,4	9,65
<i>150 об/мин</i>					
СДН-18-14-40	320	181	86,55	6,26	6,93
СДН-18-19-40	400	220	89,60	6,22	6,12
СДН-18-24-40	500	268	91,24	6,53	5,90
<i>100 об/мин</i>					
СДН-19-31-60	800	430	90,53	12,9	10,3
СДН-19-39-60	1000	532	91,55	15,3	10,6
СДН-20-24-60	1250	660	91,55	21,0	11,9
СДН-20-31-60	1600	836	92,54	21,5	12,5
СДН-20-39-60	2000	1040	93,60	20,7	13,9
СДН-20-49-60	2500	1290	94,24	19,6	19,2

Основные технические данные синхронных двигателей
серии СДН на напряжение 10 кВ, $\cos \varphi = 0,9$

Тип двигателя	Номинальная мощность		К. п. д., %	Постоянные величины аппроксимации, кВт	
	активная, кВт	реактивная, квар		D_1	D_2
<i>1000 об/мин</i>					
СДН-15-39-6	1250	645	94,45	6,77	6,98
СДН-15-49-6	1600	817	95,08	7,58	7,56
СДН-15-64-6	2000	1010	95,73	8,39	7,20
СДН-15-76-6	2500	1265	96,07	9,2	8,93
СДН-16-69-6	3200	1620	95,95	11,3	11,0
СДН-16-84-6	4000	2010	96,43	10,6	11,8
СДН-16-104-6	5000	2510	96,72	13,1	11,0
<i>750 об/мин</i>					
СДН-16-39-8	1250	640	93,86	7,20	6,48
СДН-16-44-8	1600	815	94,58	8,30	8,12
СДН-16-54-8	2000	1020	95,04	9,48	9,83
СДН-16-71-8	2500	1265	95,80	8,81	8,23
СДН-16-86-8	3200	1615	95,62	12,2	12,3
СДН-17-59-8	4000	2010	96,04	14,2	13,0
СДН-17-76-8	5000	2510	96,42	15,0	12,8
СДН-17-94-8	6300	3160	96,75	16,5	15,3
<i>690 об/мин</i>					
СДН-16-44-10	1250	637	94,01	8,60	6,05
СДН-16-54-10	1600	820	94,65	9,43	8,24
СДН-16-71-10	2000	1015	95,38	9,64	7,5
СДН-16-86-10	2500	1265	95,60	10,1	10,2
СДН-17-59-10	3200	1620	95,91	10,3	13,6
СДН-17-76-10	4000	2010	96,45	11,3	13,6
СДН-17-94-10	5000	2510	96,65	14,1	13,7
СДН-18-71-10	6300	3170	96,40	17,6	18,7
<i>590 об/мин</i>					
СДН-17-34-12	1250	642	92,86	9,08	8,53
СДН-17-41-12	1600	820	93,76	9,51	11,0
СДН-17-49-12	2000	1020	94,76	10,00	9,36
СДН-17-59-12	2500	1275	95,57	8,49	10,2
СДН-17-76-12	3200	1620	96,04	9,72	11,2
СДН-18-59-12	4000	2039	95,67	16,4	15,4
СДН-18-71-12	5000	2520	96,28	16,5	16,4
СДН-18-91-12	6300	3160	96,62	14,2	19,4
СДН-18-111-12	8000	4000	97,00	16,9	22,1

Тип двигателя	Номинальная мощность		К. п. д., %	Постоянные величины аппроксимации, кВт	
	активная, кВт	реактивная, квар		D_1	D_2

375 об/мин

СДН-17-41-16	1250	642	93,76	10,0	7,79
СДН-17-49-16	1600	825	94,25	10,3	10,4
СДН-17-59-16	2000	1020	94,95	10,4	12,0
СДН-18-49-16	2500	1280	94,88	13,2	13,1
СДН-18-61-16	3200	1625	95,15	14,7	14,7
СДН-18-74-16	4000	2020	95,53	18,5	13,8

300 об/мин

СДН-18-31-20	1250	645	93,45	9,71	8,07
СДН-18-39-20	1600	826	93,86	10,5	11,9
СДН-18-49-20	2000	1025	94,60	13,0	12,3
СДН-18-61-20	2500	1275	95,34	12,3	13,2
СДН-18-74-20	3200	1620	95,54	14,0	15,1

250 об/мин

СДН-18-39-24	1250	650	93,46	9,96	8,83
СДН-18-49-24	1600	825	94,21	11,1	9,51
СДН-18-64-24	2000	1025	94,83	12,5	8,53
СДН-19-46-24	2500	1280	94,68	13,7	13,3
СДН-19-54-24	3200	1635	95,02	18,2	14,4

Таблица П3

Основные технические данные синхронных двигателей
серии СТД 3000 об/мин, $\cos \varphi = 0,9$

Тип двигателя	Номинальная мощность		К. п. д., %	Постоянные величины аппроксимации, кВт	
	активная, кВт	реактивная, квар		D_1	D_2

Напряжение 6 кВ

СТД-630-2	630	320	96,17	2,22	2,95
СТД-800-2	800	408	96,33	2,91	3,52
СТД-1000-2	1000	505	96,52	3,39	3,99
СТД-1250-2	1250	630	96,85	3,93	3,54
СТД-1600-2	1600	705	96,99	4,93	4,13
СТД-2000-2	2000	1000	96,96	5,48	5,94
СТД-2500-2	2500	1250	97,43	6,74	5,53
СТД-3200-2	3200	1600	97,61	7,87	6,94
СТД-4000-2	4000	2000	97,57	8,99	10,0

Продолжение табл. ПЗ

Тип двигателя	Номинальная мощность		К. п. д., %	Постоянные величины аппроксимации, кВт	
	активная, кВт	реактивная, квар		D_1	D_2
СТД-5000-2	5000	2500	97,63	10,5	11,9
СТД-6300-2	6300	3150	97,83	10,3	11,6
СТД-8000-2	8000	4000	97,93	12,5	15,0
СТД-10000-2	10 000	5000	97,95	16,8	16,3
СТД-12500-2	12 500	6200	97,945	20,6	20,4

Напряжение 10 кВ

СТД-630-2	630	320	95,53	2,27	3,11
СТД-800-2	800	408	95,58	2,79	4,06
СТД-1000-2	1000	505	95,79	3,61	4,42
СТД-1250-2	1250	630	96,15	3,84	4,43
СТД-1600-2	1600	705	96,31	4,64	5,57
СТД-2000-2	2000	1000	96,48	5,37	6,80
СТД-2500-2	2500	1250	97,00	6,17	7,13
СТД-3200-2	3200	1600	97,08	7,76	8,98
СТД-4000-2	4000	2000	97,19	9,41	11,1
СТД-5000-2	5000	2500	97,84	10,4	13,2
СТД-6300-2	6300	3150	97,49	10,6	14,8
СТД-8000-2	8000	4000	97,64	12,3	17,7
СТД-10000-2	10 000	5000	97,80	14,2	19,2
СТД-12500-2	12 500	6200	97,79	20,0	23,7

Таблица П4

Основные технические данные синхронных двигателей серий СД и СДЗ, напряжением 380 В, $\cos \varphi = 0,9$

Тип двигателя	Номинальная мощность		К. п. д., %	Постоянные величины аппроксимации, кВт	
	активная, кВт	реактивная, квар		D_1	D_2
<i>1000 об/мин</i>					
12-24-6	250	130	93,0	1,74	2,18
12-29-6	320	166	93,5	2,04	2,54
12-36-6	400	206	94,0	2,2	2,88
12-46-6	500	256	94,5	2,45	3,21
<i>750 об/мин</i>					
12-24-8	200	105	92,5	0,98	1,95
12-29-8	250	131	93,2	1,55	2,28
12-36-8	320	166	93,7	1,88	2,51
12-46-8	400	206	94,2	2,10	2,72

Продолжение табл. П4

Тип двигателя	Номинальная мощность		К. п. д., %	Постоянные величины аппроксимации, кВт	
	активная, кВт	реактивная, квар		D_1	D_2
	<i>690 об/мин</i>				
12-24-10	160	84	92,2	1,33	1,53
12-29-10	200	105	92,3	1,47	2,00
12-36-10	250	130	93,0	1,72	2,18
12-46-10	320	166	93,6	2,08	2,42
	<i>590 об/мин</i>				
12-24-12	125	67	90,2	1,23	1,88
12-29-12	160	85	91,0	1,46	2,25
12-36-12	200	105	92,0	2,35	2,39
12-46-12	250	131	92,5	2,01	2,67
	<i>375 об/мин</i>				
13-20-16	125	68	88,5	1,63	2,33
13-25-16	160	87	89,5	1,88	2,57
13-34-16	200	107	90,5	1,98	2,93

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глушков В. М., Грибин В. П. Компенсация реактивной мощности в энергоустановках промышленных предприятий. М.: Энергия, 1975.
2. Карпов Ф. Ф. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях. М.: Энергия, 1975.
3. Константинов Б. А., Зайцев Г. З. Компенсация реактивной мощности. М.: Энергия, 1976.
4. Мельников Н. А. Реактивная мощность в электрических сетях. М.: Энергия, 1975.
5. Пиотровский Л. М. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974.
6. Попов В. С. Теоретическая электротехника. М.: Энергия, 1975.
7. Указания по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях. М.: Энергия, 1974.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Понятие о реактивной мощности	4
2. Потребители реактивной мощности	22
3. Компенсация реактивной мощности	42
4. Компенсация реактивной мощности нагрузки	65
Приложение	79
Список литературы	86

Глеб Петрович Минин

РЕАКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ

Редактор Е. А. Каминский

Редактор издательства И. П. Березина

Обложка художника Н. А. Князькова

Технический редактор М. П. Осипова

Корректор М. Г. Гулина

ИБ № 398

Сдано в набор 24.01.78 Подписано к печати 28.03.78 Т-06579

Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 2 Гарн. шрифта литера-

турная Печать высокая Усл. печ. л. 4,62 Уч.-изд. л. 4,63

Тираж 30 000 экз. Зак. 545 Ценз 15 к.

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

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Госу-

дарственном комитете Совета Министров СССР по делам изда-

тельств, полиграфии и книжной торговли. Москва, М-114, Шлю-

зовая наб., 10.

15 к.