

Лекция 3.
Трёхфазные цепи.
Асинхронные машины.
Трансформаторы

Трехфазные системы

Три синусоидальные ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутые по фазе на 120 градусов, образуют **трехфазную симметричную систему**. Аналогично получаются трехфазные системы напряжений и токов.

В настоящее время трехфазные системы получили широкое распространение, что объясняется главным образом следующими **причинами**:

- при одинаковых напряжениях, мощностях потребителей и прочих равных условиях питание трехфазным током позволяет получить значительную экономию материала проводов по сравнению тремя однофазными линиями;
- при прочих равных условиях трехфазный генератор дешевле, легче и экономичнее, чем три однофазных генератора такой же общей мощности; то же относится к трехфазным двигателям и трансформаторам;
- трехфазная система токов позволяет получить вращающееся магнитное поле с помощью трех неподвижных катушек, что существенно упрощает производство и эксплуатацию трехфазных двигателей;
- при равномерной нагрузке трехфазный генератор создает на валу приводного двигателя постоянный момент в отличие от однофазного генератора, у которого мощность и момент на валу пульсируют с двойной частотой тока.

Принцип получения трехфазной ЭДС. Основные схемы соединения трехфазных цепей

На рисунке 3.1 изображена схема простейшего трехфазного генератора, с помощью которой легко пояснить принцип получения трехфазной ЭДС. В однородном магнитном поле постоянного магнита вращаются с постоянной угловой скоростью ω три рамки, сдвинутые в пространстве одна относительно другой на угол 120 градусов.

В момент времени $t = 0$ рамка $AХ$ расположена горизонтально и в ней индуцируется ЭДС

$$e_A = E_m \sin \omega t.$$

Точно такая же ЭДС будет индуцироваться и в рамке $ВУ$, когда она повернется на 120° и займет положение рамки $AХ$. Следовательно, при $t = 0$

$$e_B = E_m \sin (\omega t - 120^\circ) .$$

Рассуждая аналогичным образом, находим ЭДС в рамке CZ :

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ).$$

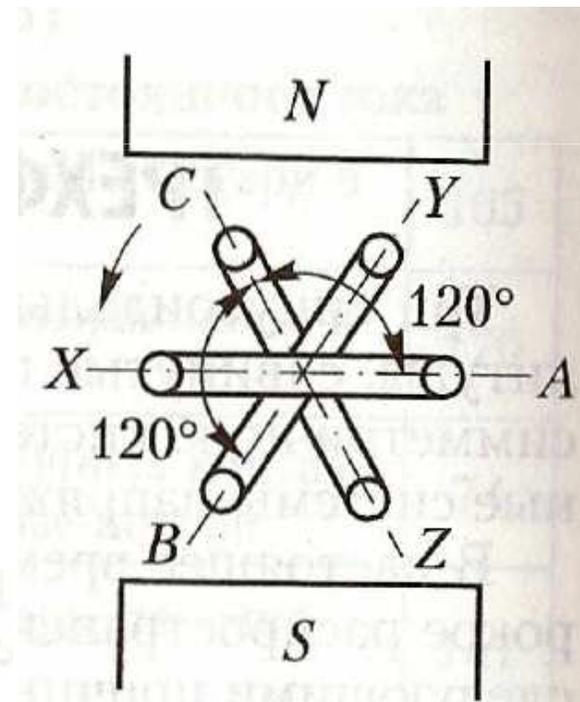


Рисунок 3.1

На рисунке 3.2, а представлен график мгновенных значений ЭДС, e_A , e_B , e_C , на рисунке 3.2, б — векторная диаграмма трехфазной системы ЭДС.

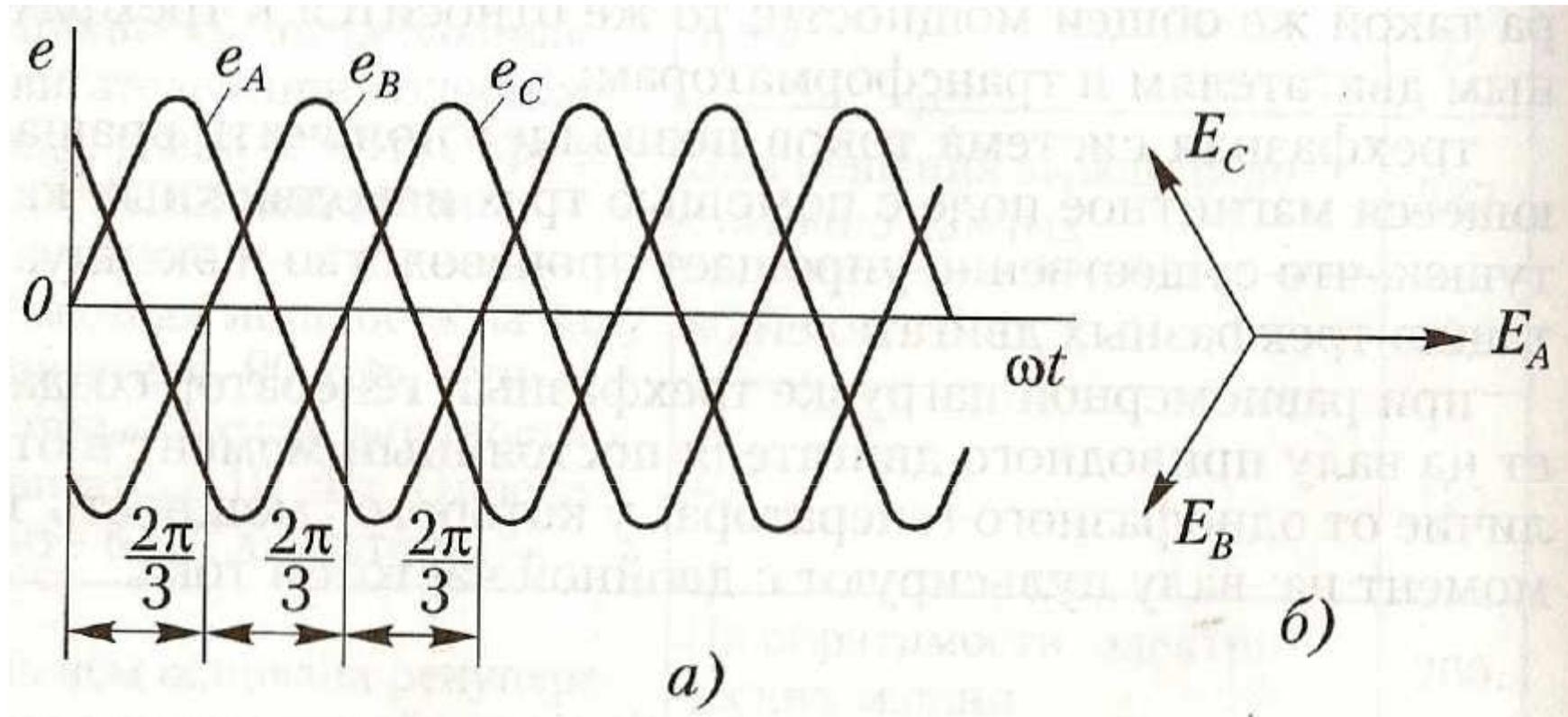


Рисунок 3.2

Если к каждой из рамок $AХ$, $ВУ$ и $СZ$ подсоединить нагрузку (посредством щеток и контактных колец), то в образовавшихся цепях появятся токи.

При симметричной нагрузке, когда все три нагрузочных сопротивления равны по величине и имеют одинаковый характер, синусоиды напряжений и токов изображаются графиками, аналогичными графику ЭДС.

При этом начальные фазы токов определяются характером нагрузки, токи I_A, I_B, I_C равны по амплитуде и сдвинуты по фазе на 120° один относительно другого. Векторная диаграмма трехфазных напряжений и токов при симметричной нагрузке изображена на рисунке 3.3

В реальном трехфазном генераторе три неподвижные обмотки размещаются на статоре, а магнитное поле, индукция которого распределена по синусоидальному закону, создается вращающимся ротором.

Трехфазный генератор, соединенный проводами с трехфазным потребителем, образует **трехфазную цепь**.

В трехфазной цепи протекает трехфазная система токов, т.е. синусоидальные токи с тремя различными фазами. Участок цепи, по которому протекает один из токов, называют **фазой** трехфазной цепи.

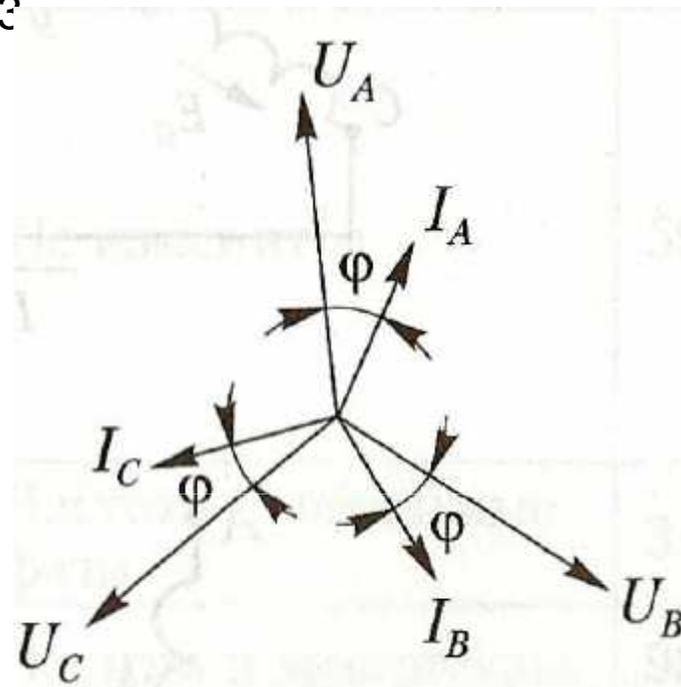


Рисунок 3.3

На электрических схемах трехфазный генератор принято изображать в виде трех обмоток, расположенных под углом 120 градусов друг к другу. При соединении **звездой** (рисунок 3.4) концы этих обмоток объединяют в одну точку, которую называют нулевой точкой генератора и обозначают O . Начала обмоток обозначают буквами A , B , C .

При соединении **треугольником** (рисунок 3.5) конец первой обмотки генератора соединяют с началом второй, конец второй с началом третьей, конец третьей — с началом первой. К точкам A , B , C подсоединяются провода соединительной линии.

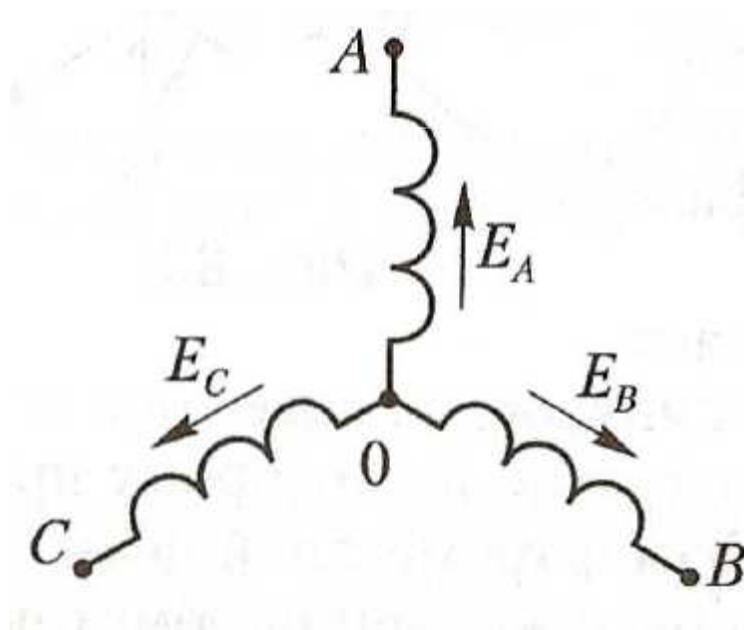


Рисунок 3.4

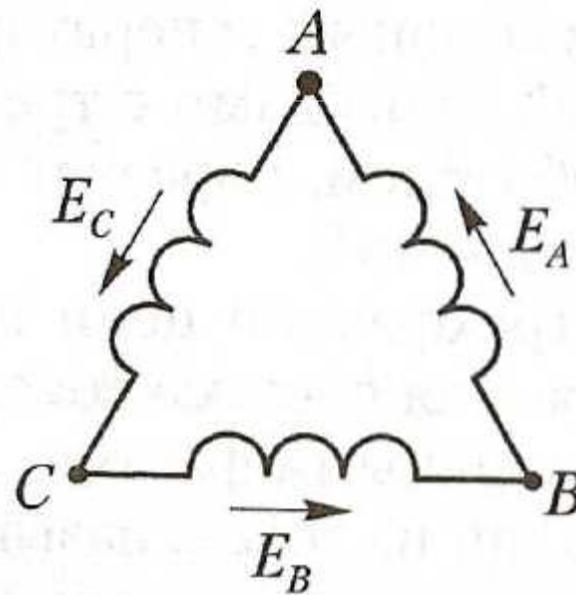


Рисунок 3.5

В **симметричной звезде** фазные и линейные токи и напряжения связаны соотношениями:

$$I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}; \quad U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}.$$

В четырехпроводной сети используется **нулевой провод**. Ток в нулевом проводе равен нулю при строго симметричной нагрузке. Если нагрузка несимметричная, то неравными будут и токи. Обрыв нулевого провода в общем случае приводит к изменению фазных напряжений, симметричные фазные напряжения становятся несимметричными. Таким образом, нулевой провод в четырехпроводной цепи предназначен для обеспечения симметрии фазных напряжений при несимметричной нагрузке. Несимметрия фазных напряжений недопустима, так как приводит к нарушению нормальной работы потребителей.

При соединении **треугольником** фазные и линейные токи и напряжения связаны соотношениями:

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}; \quad I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\text{ф}}.$$

Активная, реактивная и полная мощности трехфазной цепи. Коэффициент мощности

Активная мощность трехфазной цепи равна сумме активных мощностей ее фаз:

$$P = P_A + P_B + P_C.$$

Реактивная мощность трехфазной цепи равна сумме реактивных мощностей ее фаз:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C.$$

Очевидно, что в симметричной трехфазной цепи

$$P_A = P_B = P_C = P_\phi;$$

$$Q_A = Q_B = Q_C = Q_\phi.$$

Мощность одной фазы определяется по формулам для однофазной цепи. Таким образом,

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi;$$

$$Q = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi.$$

Эти формулы можно использовать для подсчета мощности симметричной трехфазной цепи. Однако измерения фазных напряжений и токов связаны с некоторыми трудностями, так как необходим доступ к нулевой точке. Проще измерить линейные токи и напряжения непосредственно на клеммах щита питания. Поэтому формулы мощности трехфазной системы записывают через линейные токи и напряжения.

При соединении звездой

$$P = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi = 3 \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} I_{\text{л}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi .$$

При соединении треугольником

$$P = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi = 3U_{\text{л}} \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi .$$

Таким образом, в обоих случаях активная мощность симметричной цепи

$$P = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi .$$

Аналогично реактивная (Q) и полная (S) мощность

$$Q = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi . \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} .$$

Коэффициент мощности симметричной трехфазной цепи находят как отношение активной и полной мощностей:

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}} = \frac{P}{S}.$$

Все эти формулы точны для симметричных цепей. Реальные цепи рассчитывают таким образом, чтобы их нагрузка была близка к симметричной, поэтому приведенные формулы имеют широкое применение.

Выбор схем соединения осветительной и силовой нагрузок при включении их в трехфазную сеть

При выборе схемы соединения нагрузки (звезда, треугольник, звезда с нулевым проводом) необходимо учитывать три основных фактора: характер нагрузки; номинальное напряжение сети; номинальное напряжение потребителей. Рассмотрим примеры.

1. Определить схему соединения осветительной нагрузки, если

$$U_{\text{сети}} = 380 \text{ В}, \quad U_{\text{лампы}} = 220 \text{ В}.$$

Прежде всего устанавливаем, что лампы должны быть включены на фазное напряжение. Действительно,

$$U_{\text{ф}} = U_{\text{л}} / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220 \text{ В}.$$

Поэтому выбираем схему соединения звездой. Поскольку нагрузка осветительная, надо предположить ее несимметрию и для обеспечения симметрии фазных напряжений включить нулевой провод. Следовательно, заданным условиям удовлетворяет схема соединения звездой с нулевым проводом.

2. Определить схему соединения осветительной нагрузки, если

$$U_{\text{сети}} = 220 \text{ В}, \quad U_{\text{лампы}} = 220 \text{ В}.$$

В рассматриваемом случае лампы должны быть включены непосредственно на линейное напряжение. Выбираем схему соединения треугольником. Симметрия линейных напряжений обеспечивается генераторами, питающими сеть.

3. Выбрать схему соединения обмоток (фаз) трехфазного двигателя, если $U_{\text{обм}} = 220 \text{ В}$, $U_{\text{сети}} = 380 \text{ В}$.

Обмотки трехфазного двигателя образуют симметричную нагрузку, следовательно, в нулевом проводе нет необходимости. Если обмотки двигателя соединить треугольником, то каждая из них окажется под линейным напряжением 380 В и перегреется. Следовательно, обмотки двигателя надо соединить звездой. Тогда к каждой обмотке будет приложено напряжение, на которое она рассчитана: $U_{\phi} = 220 \text{ В}$.

Асинхронные машины. Устройство асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель является простейшей из электрических машин. Как и любая электрическая машина, он имеет две основные части — статор и ротор (рисунок 3.6).

Статор состоит из чугунной станины 1 в которой закреплен магнитопровод (сердечник) в виде полого цилиндра 2. Между станиной и сердечником обычно оставляют зазор, через который проходит охлаждающий воздух. Для уменьшения потерь на вихревые токи сердечник статора набирают из тонких (0,5 мм) листов электротехнической стали, изолированных друг от друга лаком. В пазы, вырезанные по внутренней окружности статора, укладывают обмотку 3. У двухполюсной машины обмотка статора состоит из трех катушек, сдвинутых на углы 120° , у четырехполюсной из шести катушек, сдвинутых на 60° , у шестиполюсной — из девяти катушек и т.д. Обмотку в пазах статора закрепляют клиньями.

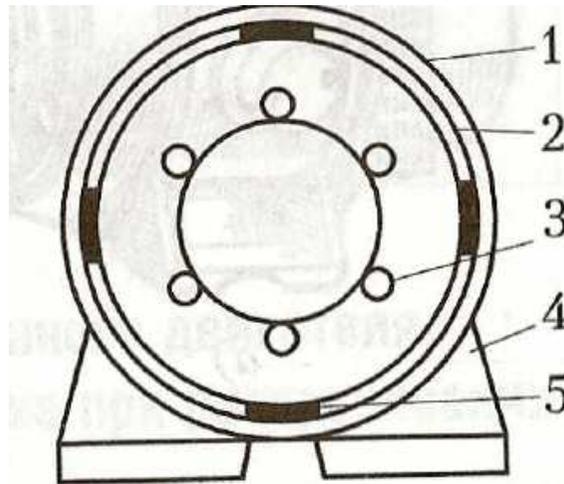


Рисунок 3.6

Ротор также набирают из тонких листов электротехнической стали. В пазах ротора размещают обмотку, которая может быть короткозамкнутой (рисунок 3.7, а) или фазной (рисунок 3.7, б). Короткозамкнутая обмотка типа «беличьей клетки» состоит из толстых проводящих стержней (медь, алюминий), соединенных по торцам медными или алюминиевыми кольцами.

Короткозамкнутая обмотка не изолируется от ротора. Иногда ее изготавливают заливкой расплавленного алюминия в пазы ротора.

Устройство фазной обмотки ротора аналогично устройству обмотки статора.

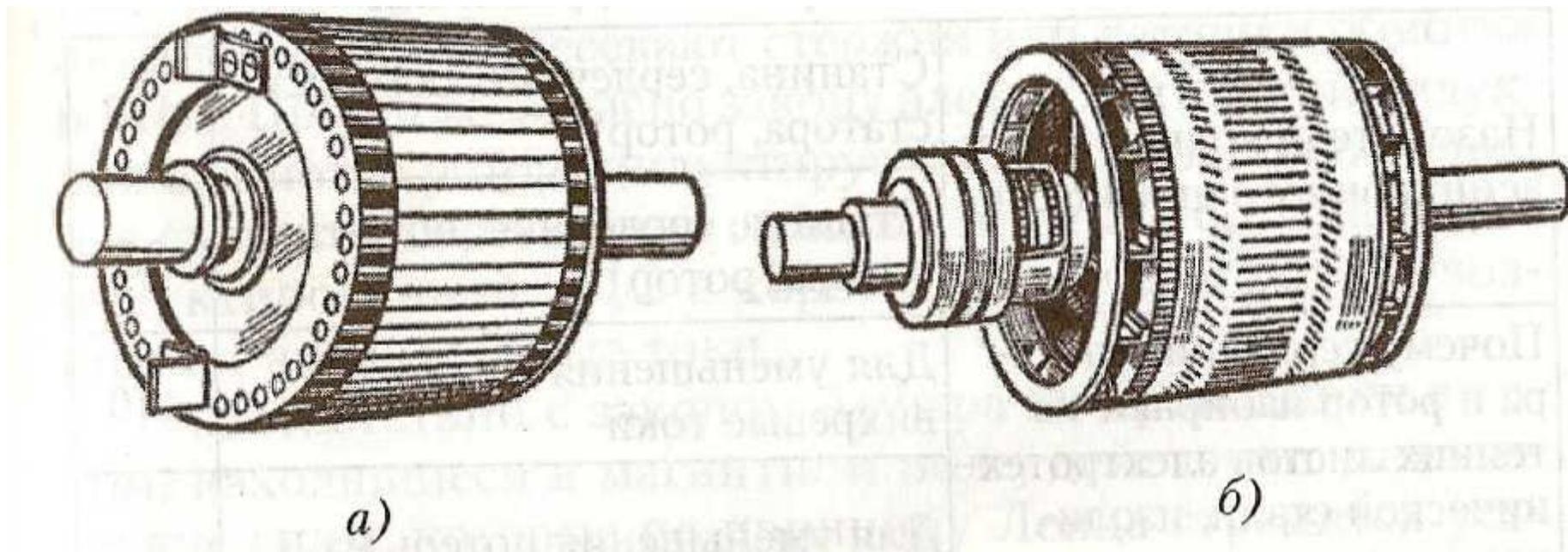


Рисунок 3.7

Принцип действия асинхронного двигателя. Физические процессы, происходящие при раскручивании ротора

Принцип действия асинхронного двигателя основан на использовании вращающегося магнитного поля и основных законов электротехники.

При включении двигателя в сеть трехфазного тока в статоре образуется вращающееся магнитное поле, силовые линии которого пересекают стержни или катушки обмотки ротора. При этом согласно закону электромагнитной индукции в обмотке ротора индуктируется ЭДС, пропорциональная скорости пересечения силовых линий. Под действием индуктированной ЭДС в короткозамкнутом роторе возникают значительные токи.

В соответствии с законом Ампера на проводники с током, находящиеся в магнитном поле, действуют механические силы, которые по принципу Ленца стремятся устранить причину, вызывающую индуктированный ток, т.е. пересечение стержней обмотки ротора силовыми линиями вращающегося поля. Таким образом, возникшие механические силы будут раскручивать ротор в направлении вращения поля, уменьшая скорость пересечения стержней обмотки ротора магнитными силовыми линиями.

Достичь скорости вращения поля в реальных условиях ротор не может, так как тогда стержни его обмотки оказались бы неподвижными относительно магнитных силовых линий и исчезли бы индуцированные токи в обмотке ротора. Поэтому ротор вращается со скоростью, меньшей скорости вращения поля, т.е. несинхронно с полем, или асинхронно.

Если силы, тормозящие вращение ротора, невелики, то ротор достигает скорости, близкой к скорости вращения поля. При увеличении механической нагрузки на валу двигателя скорость вращения ротора уменьшается, токи в обмотке ротора увеличиваются, что приводит к увеличению вращающего момента двигателя. При некоторой скорости вращения ротора устанавливается равновесие между тормозным и вращающим моментами.

Пуск асинхронного двигателя

Прежде чем включить асинхронный двигатель в сеть, нужно установить схему соединения его обмоток, соответствующую номинальному режиму работы.

Предположим, что линейное напряжение сети 220 В, а в паспорте двигателя указано напряжение (*линейное*) 220/380 В. При этих условиях обмотки надо соединить треугольником, чтобы напряжение на них соответствовало расчетному.

На практике при пуске асинхронного двигателя для ограничения пусковых токов его обмотки кратковременно соединяют звездой. Переключение с треугольника на звезду и обратно осуществляют специальным переключателем. Отметим, что такое переключение не производится, если рассматриваемый двигатель включается в сеть с линейным напряжением 380 В. В этом случае его обмотки и при пуске, и при номинальном режиме работы должны быть соединены звездой. Пусковой момент асинхронного двигателя невелик, поэтому пуск обычно производят при отключенной нагрузке.

Под действием пускового момента ротор начинает раскручиваться, вращающий момент возрастает, двигатель быстро проходит участок, соответствующий неустойчивому режиму работы и переходит на участок, соответствующий устойчивому режиму. Здесь увеличению скорости вращения ротора соответствует уменьшение вращающего момента, поэтому рост скорости быстро прекратится. Ротор устойчиво вращается со скоростью, несколько меньшей скорости поля. Теперь с помощью фрикционной муфты можно включить нагрузку. Момент нагрузки не должен превышать максимальный момент.

Если по условиям эксплуатации двигатель должен запускаться при включенной нагрузке, то его следует рассчитать так, чтобы пусковой момент превышал момент нагрузки при номинальном режиме.

На практике применяются два типа двигателей с искусственно увеличенным пусковым моментом. Первый тип — двигатели с двойной «беличьей клеткой» ротора — рассчитывают обычно на большие мощности. Второй тип — двигатели с глубоким пазом ротора — получили наибольшее распространение. Стержни короткозамкнутой обмотки таких двигателей имеют вид узких пластин, глубоко врезанных в ротор. Короткозамкнутые двигатели небольшой мощности с увеличенным пусковым моментом включают в сеть непосредственно (без пусковых реостатов и переключателей).

На рисунке 3.8 показана клеммовая колодка асинхронного двигателя при соединении обмоток статора звездой (а) и треугольником (б).

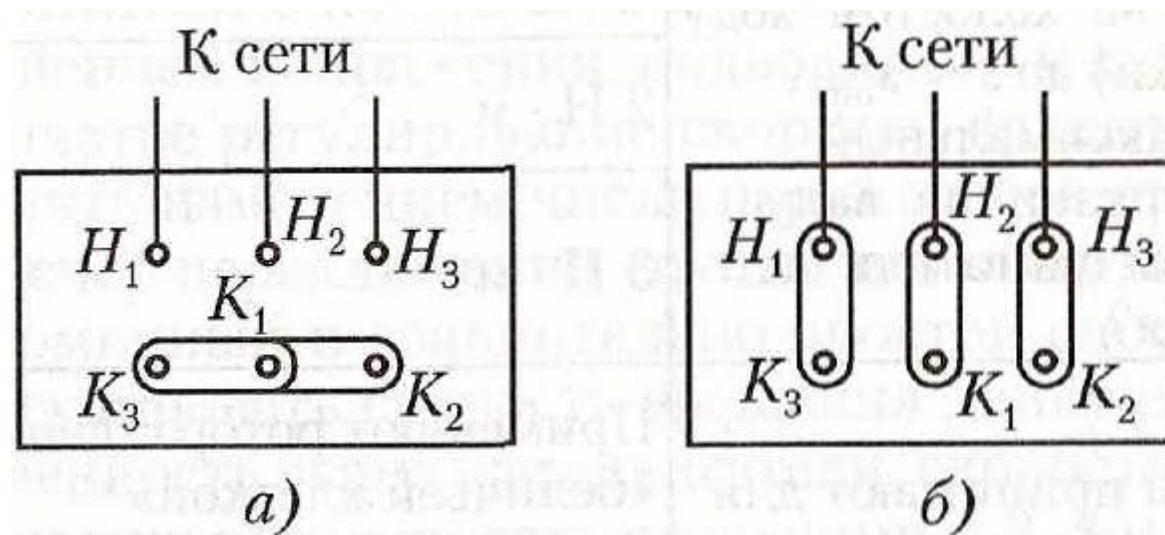


Рисунок 3.8

Трансформаторы. Назначение трансформаторов и их применение

Трансформатор предназначен для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения. Увеличение напряжения осуществляется с помощью повышающих трансформаторов, уменьшение - понижающих.

Трансформатор простой, надежный и экономичный электрический аппарат. Он не имеет движущихся частей и скользящих контактных соединений, его КПД достигает 99%.

Трансформаторы применяются в линиях электропередачи, в технике связи, в автоматике, измерительной технике и других областях.

В соответствии с **назначением** различают: силовые трансформаторы для питания электрических двигателей и осветительных сетей; специальные трансформаторы для питания сварочных аппаратов, электропечей и других потребителей особого назначения; измерительные трансформаторы для подключения измерительных приборов.

По **числу фаз** трансформаторы делятся на однофазные и трехфазные. Трансформаторы, используемые в технике связи, делятся на низкочастотные и высокочастотные.

Расчетные мощности трансформаторов весьма различны—от долей вольт-ампера до десятков тысяч киловольт-ампер; рабочие частоты — от единиц герц до сотен килогерц.

Устройство трансформатора

Трансформатор представляет собой замкнутый магнитопровод (рисунок 3.9), на котором расположены две или несколько обмоток. В маломощных высокочастотных трансформаторах, используемых в радиотехнических схемах, магнитопроводом может являться воздушная среда.

Для уменьшения потерь на вихревые токи в материал магнитопровода вводят примесь кремния, повышающую его электрическое сопротивление, а сам магнитопровод собирают из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,35—0,5 мм, изолированных друг от друга теплостойким лаком или специальной бумагой.

Обмотки трансформаторов изготавливают из медного провода и располагают на одном и том же или на разных стержнях, рядом или одну под другой. В последнем случае непосредственно к стержню примыкает обмотка низшего напряжения, а поверх нее размещается обмотка высшего напряжения.

Обмотка трансформатора, к которой подводится напряжение питающей сети, называется **первичной**, а обмотка, к которой подсоединяется нагрузка, — **вторичной**. На сердечнике может быть размещено несколько вторичных обмоток с разным числом витков, что позволяет получить различные по величине вторичные напряжения.

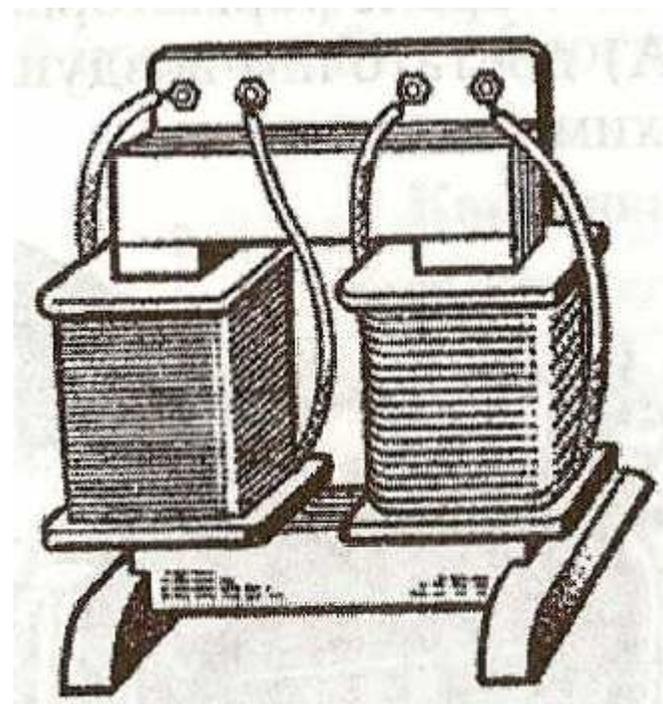


Рисунок 3.9

Принцип действия однофазного трансформатора. Коэффициент трансформации

Работа трансформатора основана на явлении взаимной индукции, которое является следствием закона электромагнитной индукции.

Рассмотрим более подробно сущность процесса трансформации тока и напряжения. Принципиальная схема однофазного трансформатора показана на рисунке 3.10.

При подключении первичной обмотки трансформатора к сети переменного тока напряжением U_1 по обмотке начнет проходить ток I_1 , который создаст в сердечнике переменный магнитный поток Φ . Магнитный поток, пронизывая витки вторичной обмотки, индуцирует в ней ЭДС E_2 , которую можно использовать для питания нагрузки.

Поскольку первичная и вторичная обмотки трансформатора пронизываются одним и тем же магнитным потоком Φ , выражения индуцируемых в обмотке ЭДС можно записать в виде

$$E_1 = 4,44 f \omega_1 \Phi_m;$$

$$E_2 = 4,44 f \omega_2 \Phi_m,$$

Где f - частота переменного тока; ω_1, ω_2 - числа витков обмоток; Φ_m - амплитудное значение переменного магнитного потока Φ .

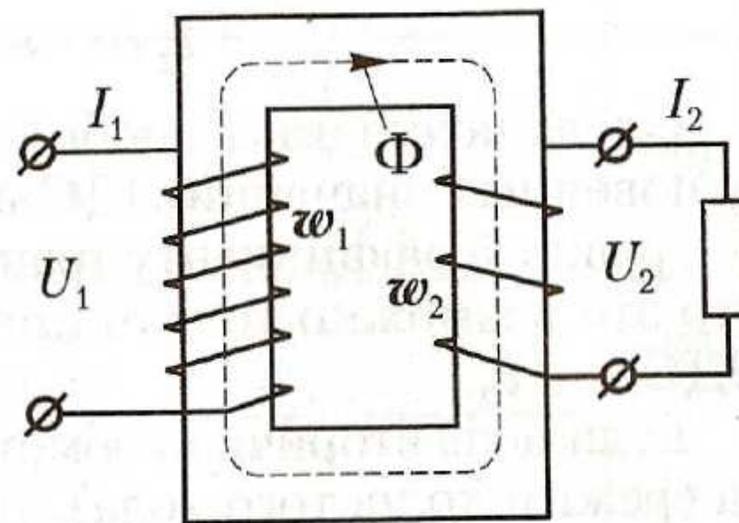


Рисунок 3.10

Поделив одно равенство на другое, получим

$$E_2 / E_1 = \omega_2 / \omega_1 = k.$$

Отношение чисел витков обмоток трансформатора называют **коэффициентом трансформации k** .

Таким образом, коэффициент трансформации показывает, как относятся действующие значения ЭДС вторичной и первичной обмоток.

Также можно записать

$$I_1 / I_2 \approx U_2 / U_1 = k.$$

Трехфазные трансформаторы

В линиях электропередачи используются в основном трехфазные силовые трансформаторы. Магнитопровод (сердечник) трехфазного трансформатора имеет три стержня, на каждом из которых размещаются две обмотки одной фазы (рисунок 3.11).

Для подключения трансформатора к линиям электропередачи на крышке бака имеются вводы, представляющие собой фарфоровые изоляторы, внутри которых проходят медные стержни. Вводы высшего напряжения обозначают буквами *A, B, C*, вводы низшего напряжения — буквами *a, b, c*. Ввод нулевого провода располагают слева от ввода *a* и обозначают *0* (рисунок 3.12).

Принцип работы и электромагнитные процессы в трехфазном трансформаторе аналогичны рассмотренным выше. Особенностью трехфазного трансформатора является зависимость коэффициента трансформации линейных напряжений от способа соединения обмоток.

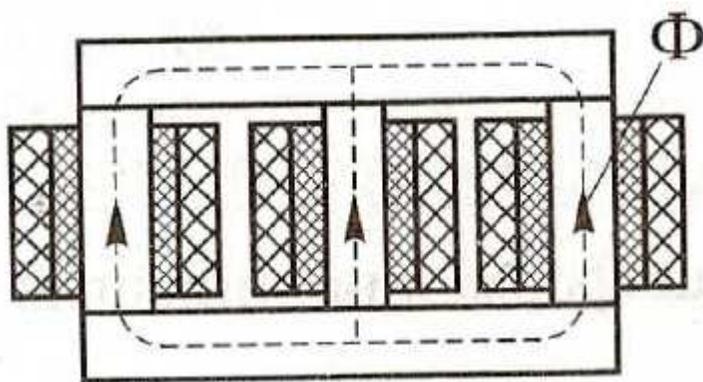


Рисунок 3.11

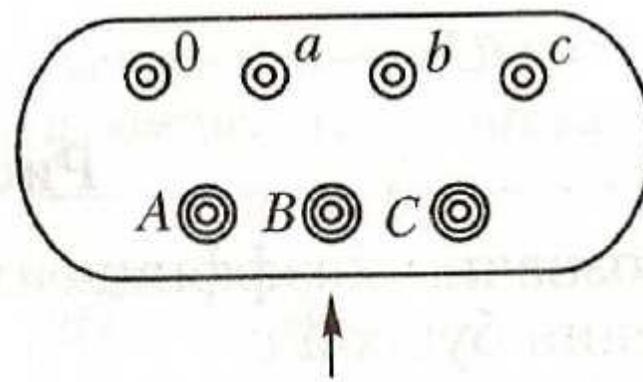


Рисунок 3.12

Применяются главным образом **три способа соединения обмоток** трехфазного трансформатора; 1) соединение первичных и вторичных обмоток звездой (рисунок 3.13, а); 2) соединение первичных обмоток звездой, вторичных - треугольником (рисунок 3.13, б); 3) соединение первичных обмоток треугольником, вторичных — звездой (рисунок 3.13, в).

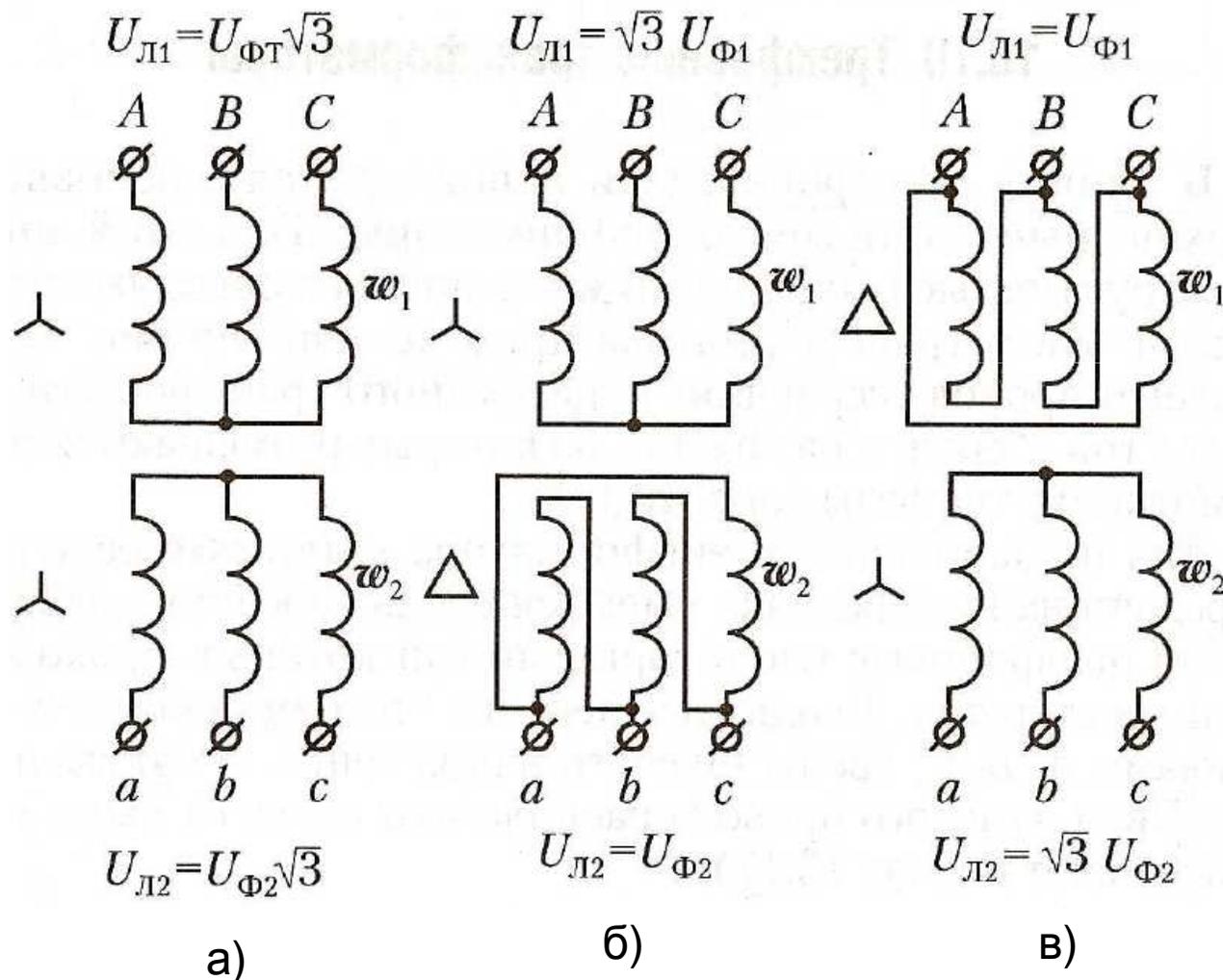


Рисунок 3.13

Специальные трансформаторы

Автотрансформаторы позволяют плавно регулировать значение напряжения. Автотрансформаторы применяются для пуска мощных двигателей переменного тока, регулирования напряжения в осветительных сетях, а также в других случаях, когда необходимо регулировать напряжение в небольших пределах.

Измерительные трансформаторы напряжения и тока применяются для включения измерительных приборов, аппаратуры автоматического регулирования и защиты в высоковольтные цепи. Они позволяют уменьшить размеры и массу измерительных устройств, повысить безопасность обслуживающего персонала, расширить пределы измерения приборов переменного тока.

Измерительные трансформаторы напряжения служат для включения вольтметров и обмоток напряжения измерительных приборов. Поскольку эти обмотки имеют большое сопротивление и потребляют маленькую мощность, можно считать, что трансформаторы напряжения работают в режиме холостого хода.

Заземление вторичных обмоток трансформаторов напряжения требуется для повышения безопасности обслуживающего персонала при повреждениях трансформаторов напряжения и попадании высокого напряжения во вторичные цепи. Заземляться должна нулевая точка или один из концов вторичных обмоток.

Измерительные трансформаторы тока используются для включения амперметров и токовых катушек измерительных приборов. Эти катушки имеют очень маленькое сопротивление, поэтому трансформаторы тока практически работают в режиме короткого замыкания.

Сварочные трансформаторы. К источникам питания сварочных аппаратов предъявляются специфические требования: при заданной мощности они должны создавать большие токи в нагрузке, причем резкое изменение сопротивления нагрузки не должно существенно сказываться на величине сварочного тока.

В соответствии с рассмотренными требованиями сварочные трансформаторы обеспечивают понижение напряжения от 220 или 380 В до 60-70 В. Такое напряжение на зажимах вторичной обмотки устанавливается при холостом ходе сварочного трансформатора. В процессе сварки оно колеблется от максимального значения 60—70 В до значений, близких к нулю.