

1. Устройство и принцип работы трансформатора
2. Режимы работы трансформатора
3. Коэффициент полезного действия трансформатора
4. Трехфазные трансформаторы
5. Автотрансформатор
6. Измерительные трансформаторы

### 1. Устройство и принцип работы трансформатора

*Трансформатор* — это статический электромагнитный аппарат, служащий для преобразования электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока того же или иного напряжения при неизменной частоте.

Трансформатор состоит из двух основных частей: *магнитопровода* (сердечника) и *обмоток*. Для уменьшения потерь от вихревых токов, возникающих при перемагничивании, сердечники собирают из отдельных тонких (0,3—0,5 мм) пластин специальной трансформаторной стали. Эта сталь характеризуется узкой петлей гистерезиса (см. разд. 3.2) и большим электрическим сопротивлением. Для уменьшения потерь от вихревых токов пластины изолируют друг от друга путем покрытия их изолирующими пленками.

Простейший однофазный трансформатор состоит из стального сердечника и двух обмоток — первичной и вторичной (рис. 7.1). Если к первичной обмотке трансформатора подвести переменное напряжение  $U_1$ , то в ней появится некоторый ток  $i_{01}$ , который создаст в сердечнике переменный магнитный поток  $\Phi_0$ .

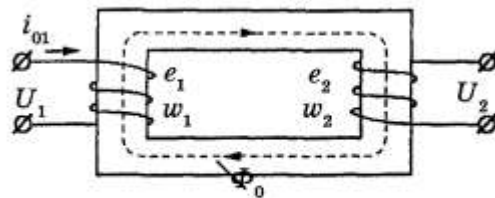


Рис. 7.1

Этот поток по закону электромагнитной индукции наведет в обеих обмотках ЭДС индукции  $e_1$  и  $e_2$ :

$$e_1 = -w_1 \frac{\Delta\Phi_0}{\Delta t};$$

$$e_2 = -w_2 \frac{\Delta\Phi_0}{\Delta t}. \quad (7.1)$$

где  $w_1, w_2$  — число витков в первичной и вторичной обмотках соответственно.

Если приложенное напряжение

$$U_1 = U_{m1} \sin \omega t,$$

то в идеальном трансформаторе (без потерь) его первичная обмотка будет представлять собой чистую индуктивность и ток будет отставать по фазе от напряжения на  $\pi/2$ :

$$i_{01} = I_{01m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}), \quad (7.2)$$

а магнитный поток будет совпадать по фазе с создающим его током:

$$\Phi_0 = \Phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = -\Phi_m \cos \omega t. \quad (7.3)$$

Тогда ЭДС  $e_1$  и  $e_2$  будут равны:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = -w_1 \omega \Phi_m \sin \omega t = -E_{m1} \sin \omega t;$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_0}{dt} = -w_2 \omega \Phi_m \sin \omega t = -E_{m2} \sin \omega t. \quad (7.4)$$

Поскольку для идеального трансформатора в соответствии со вторым законом Кирхгофа  $u_1 = -e_1$  и  $u_2 = e_2$ , то

$$\left| \frac{u_2}{u_1} \right| = \left| \frac{e_1}{e_2} \right| \quad \text{или} \quad \left| \frac{U_2}{U_1} \right| = \frac{E_{m2}}{E_{m1}} = \frac{w_2}{w_1} = k, \quad (7.5)$$

где  $k$  — коэффициент трансформации.

Мы видим, что отношение напряжений на вторичной и первичной обмотках трансформатора равно отношению чисел витков в этих обмотках. Отметим, что формула (7.5) выполняется точно только для идеального трансформатора или в режиме холостого хода.

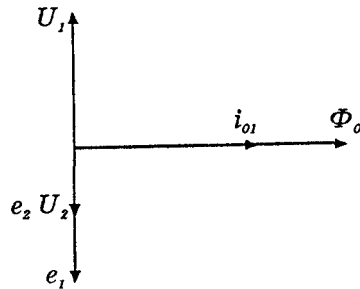


Рис. 7.2

Таким образом, трансформатор преобразует подведенное к нему напряжение в соответствии с отношением числа витков его обмоток. Векторная диаграмма идеального трансформатора показана на рис. 7.2.

Преобразование электрической энергии в трансформаторе сопровождается потерями. В отличие от электрических машин трансформатор не имеет движущихся частей, поэтому механические потери при работе отсутствуют. Имеющиеся потери обусловлены явлением гистерезиса, вихревыми токами, потоками рассеяния магнитного поля и активным сопротивлением обмоток.

Как известно, ферромагнитные материалы состоят из небольших областей самопроизвольного намагничивания, которые называются *доменами*.

Магнитные моменты всех доменов по всему объему ферромагнетика ориентированы беспорядочно, поэтому резуль-

тирующий магнитный момент всего ферромагнетика в отсутствие внешнего магнитного поля равен нулю. Если ферромагнетик поместить в магнитное поле, то магнитные моменты отдельных доменов получают преимущественную ориентацию в направлении поля. Чем больше индукция внешнего поля  $\vec{B}$ , тем сильнее эта ориентация, тем сильнее намагничивается ферромагнетик. При некоторой достаточной величине внешнего поля все магнитные моменты доменов оказываются ориентированными вдоль поля.

Если ферромагнетик поместить в переменное магнитное поле, создаваемое переменным током, то ферромагнетик будет циклически перемагничиваться с частотой переменного тока. При этом домены будут менять свою ориентацию с такой же частотой. При переориентациях доменов совершается работа из-за внутреннего трения доменов друг о друга.

Как известно, в ферромагнетике, подвергнутом циклическому перемагничиванию, магнитный поток связан с током зависимостью, выражаемой петлей гистерезиса. При этом при каждом перемагничивании сердечника затрачивается работа, пропорциональная площади петли гистерезиса. Эта работа вследствие внутреннего трения идет на нагревание сердечника.

Для уменьшения потерь на гистерезис сердечники трансформаторов изготавливают из специальной трансформаторной стали.

*Вихревые токи*, или *токи Фуко*, возникающие в проводниках, находящихся в переменных магнитных полях, создаются и в сердечнике трансформатора. Замыкаясь в толще сердечника, эти токи нагревают его и приводят к потерям энергии. Поскольку вихревые токи возникают в плоскостях, перпендикулярных магнитному потоку, то для их уменьшения сердечники трансформаторов набирают из отдельных изолированных друг от друга стальных пластин.

Потоки рассеяния в сердечнике трансформатора создаются той частью магнитного потока, которая замыкается не че-

рез магнитопровод, а через воздух в непосредственной близости от витков. Поток рассеяния составляет около одного процента от основного магнитного потока трансформатора.

Активное сопротивление обмоток создает потери за счет активных токов, нагревающих обмотки. Для их уменьшения обмотки трансформаторов выполняют, как правило, из меди.

## 2. Режимы работы трансформатора

Режим работы трансформатора, при котором его вторичная обмотка разомкнута, называют *режимом холостого хода* (трансформатор работает без нагрузки). Режим работы трансформатора, при котором во вторичную обмотку включена нагрузка, называют *рабочим*.

В режиме холостого хода основной магнитный поток в сердечнике  $\Phi_0$  создает в первичной обмотке ЭДС самоиндукции, которая уравнивает большую часть приложенного напряжения. Так будет до тех пор, пока вторичная обмотка разомкнута. Если во вторичную обмотку включить нагрузку, то в ней появится ток  $I_2$ , возбуждающий в том же сердечнике свой магнитный поток  $\Phi_2$ , знак которого в соответствии с правилом Ленца противоположен знаку магнитного потока  $\Phi_1$ , создаваемому первичной обмоткой (рис. 7.3).

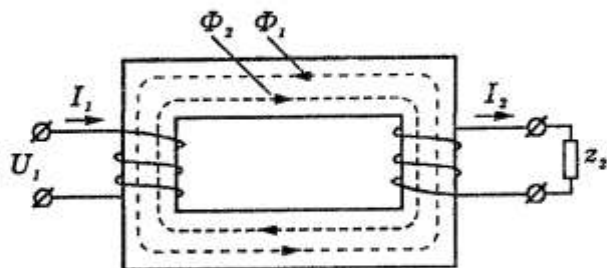


Рис. 7.3

В результате суммарный магнитный поток в сердечнике уменьшится, а это приведет к уменьшению ЭДС  $E_1$  в первичной обмотке. Вследствие этого часть приложенного напря-

жения  $U_1$  окажется неуравновешенной, что приведет к увеличению тока в первичной обмотке. Очевидно, что ток в первичной обмотке будет возрастать до тех пор, пока не прекратится размагничивающее действие тока нагрузки. После этого суммарный магнитный поток восстановится приблизительно до прежнего значения  $\Phi_0$ .

При увеличении сопротивления вторичной обмотки уменьшаются ток  $I_2$  и магнитный поток  $\Phi_2$ , что приводит к возрастанию суммарного магнитного потока и, следовательно, к возрастанию  $E_1$ . В результате нарушится равновесие между приложенным напряжением  $U_1$  и ЭДС  $E_2$ : их разность уменьшится, а следовательно, уменьшится и ток  $I_2$  до такого значения, при котором суммарный магнитный поток вернется к прежнему значению.

Таким образом, магнитный поток в трансформаторе остается практически постоянным как в режиме холостого хода, так и в режиме переменной нагрузки. Это свойство трансформатора называют *способностью саморегулирования*, т. е. способностью автоматически регулировать значение первичного тока  $I_1$  при изменении тока нагрузки  $I_2$ .

## 3. Коэффициент полезного действия трансформатора

Как уже говорилось, преобразование электрической энергии в трансформаторе сопровождается потерями. Коэффициент полезного действия трансформатора (к.п.д.) — это отношение отдаваемой активной мощности к потребляемой:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%, \quad (7.6)$$

где  $P_1$  — мощность, потребляемая из сети,  $P_2$  — мощность, отдаваемая нагрузке. Таким образом, для практического определения к.п.д. трансформатора при номинальной нагрузке необходимо измерить мощности в первичной и вторичной об-

мотках. Это измерение можно значительно упростить, включив во вторичную обмотку активную нагрузку. Тогда  $\cos \varphi \approx 1$  (поток рассеяния невелик), и мощность  $P_2$  может быть вычислена по показаниям амперметра и вольтметра, включенных во вторичную цепь. Такой метод определения к.п.д. называется *методом непосредственных измерений*. Он весьма прост, но имеет два существенных недостатка: малую точность и неэкономичность. Первый из них обусловлен тем, что к.п.д. промышленных трансформаторов очень высок (до 99%), поэтому мощности  $P_2$  и  $P_1$  иногда мало отличаются по величине. В этом случае незначительные ошибки в показаниях приборов приведут к большим ошибкам в значении к.п.д. Неэкономичность этого способа связана с большим расходом электроэнергии за время испытания, так как трансформатор приходится нагружать до номинальной мощности. Поэтому метод непосредственных измерений не нашел промышленного применения, но может быть использован для трансформаторов малой мощности с небольшим к.п.д. (например, в учебной практике).

На практике к.п.д. трансформаторов определяют *косвенным методом*, т. е. путем отдельного определения потерь. При этом исходят из того, что к.п.д. трансформатора может быть представлен в следующем виде:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{cm} + P_m}, \quad (7.7)$$

где  $P_{cm}$  — потери в стали (в сердечнике), а  $P_m$  — потери в меди (в обмотках). Потери в стали и потери в меди измеряют в опытах холостого хода и короткого замыкания соответственно.

В опыте холостого хода, в котором на первичную обмотку подают номинальное напряжение, а вторичную обмотку оставляют разомкнутой, определяют *потери в стали*, т. е. потери на гистерезис и вихревые токи. Так как при номинальном напряжении на первичной обмотке магнитный поток практически постоянен, то независимо от того, нагружен транс-

форматор или нет, потери в стали для него являются постоянной величиной. Таким образом, можно считать, что в режиме холостого хода энергия, потребляемая трансформатором из сети, расходуется только на потери в стали, поэтому мощность этих потерь измеряют ваттметром, включенным в цепь первичной обмотки. При этом, правда, не учитываются потери на нагревание провода первичной обмотки током холостого хода. Но этот ток невелик, и потери от него также невелики. В этом опыте определяется также коэффициент трансформации  $k$  и ток холостого хода  $I_{01}$ .

Если вторичную обмотку трансформатора замкнуть на коротко, а на первичную обмотку подать такое пониженное напряжение, при котором токи в обмотках не превышают номинальных значений, то энергия, потребляемая трансформатором из сети, расходуется в основном на тепловые потери в проводах обмоток трансформатора. В самом деле, при короткозамкнутой вторичной обмотке к первичной подводится пониженное напряжение, поэтому магнитный поток очень мал и потери в стали, зависящие от значения магнитного потока, также малы. Этот опыт называют опытом *короткого замыкания*. Следовательно, ваттметр, включенный в цепь первичной обмотки трансформатора в этом опыте, покажет мощность, соответствующую потерям в меди ( $P_m$ ).

#### 4. Трехфазные трансформаторы

Для преобразования тока трехфазной системы можно воспользоваться группой из трех однофазных трансформаторов, обмотки которых могут быть соединены либо звездой (рис. 7.4, а), либо треугольником (рис. 7.4, б). В этом случае каждый трансформатор работает независимо от остальных как обычный однофазный трансформатор, включенный в одну из фаз трехфазной системы.

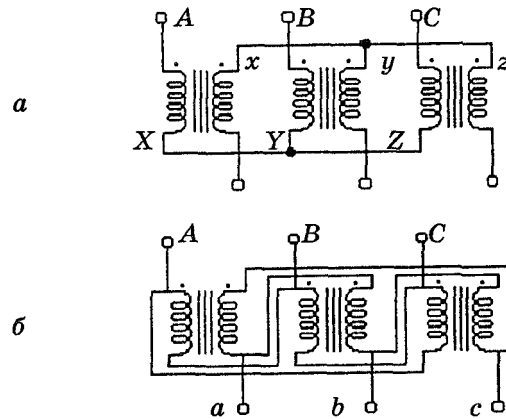


Рис. 7.4

На практике значительно чаще применяют трехфазные трансформаторы, выполненные на одном магнитопроводе (рис. 7.5). При этом три магнитных потока, возбуждаемые токами в первичных обмотках, замыкаются через два других стержня сердечника.

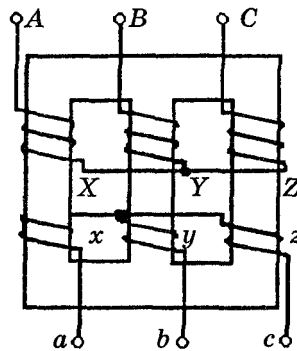


Рис. 7.5

При изготовлении трехфазных трансформаторов на каждый стержень его сердечника навивают по две обмотки: низкого напряжения, а поверх нее — высокого напряжения. Выводы обмоток принято обозначать следующим образом: начала обмоток — заглавными буквами латинского алфавита

$A, B$  и  $C$  для обмоток высокого напряжения и строчными буквами  $a, b$  и  $c$  для обмоток низкого напряжения; концы обмоток — буквами  $X, Y$  и  $Z$  для обмоток высокого напряжения и буквами  $x, y$  и  $z$  — для обмоток низкого напряжения.

Обмотки трехфазного трансформатора обычно соединяют звездой или треугольником. Наиболее простым и дешевым является первый способ. В этом случае каждая обмотка и ее изоляция при заземлении нулевой точки должны быть рассчитаны только на фазное напряжение и линейный ток. Поскольку число витков обмотки трансформатора прямо пропорционально напряжению, то при соединении звездой каждая обмотка требует меньшего количества витков при большем сечении провода; при этом изоляция проводников должна быть рассчитана лишь на фазное напряжение. Такое соединение широко применяется для трансформаторов небольшой и средней мощности. Соединение звездой наиболее желательно для высокого напряжения, так как изоляция рассчитывается лишь на фазное напряжение. Соединение треугольником удобнее при больших токах и в тех случаях, когда нагрузки могут быть подключены без нулевого провода.

Применяется также комбинированное включение трехфазных трансформаторов (первичные обмотки соединены звездой, а вторичные — треугольником, или наоборот). Соединение звезда/треугольник часто используют для трансформаторов большой мощности в тех случаях, когда на стороне низкого напряжения не требуется нулевой провод.

Из соотношений в трехфазной системе следует, что при трехфазной трансформации только отношение фазных напряжений всегда приблизительно равно отношению чисел витков первичной и вторичной обмоток. Отношение же линейных напряжений зависит от способа соединения обмоток трансформатора. При одинаковом способе соединения (звезда/звезда или треугольник/треугольник) отношение линейных напряжений равно фазному коэффициенту трансформа-

ции. Но при комбинированных способах соединения (звезда/треугольник или треугольник/звезда) отношение линейных напряжений меньше или больше этого коэффициента в  $\sqrt{3}$  раз. Это дает возможность регулировать вторичное линейное напряжение трансформатора соответствующим изменением схемы соединения его обмоток.

## 5. Автотрансформатор

Автотрансформатор представляет собой трансформатор, у которого обмотка низкого напряжения является частью обмотки высокого напряжения (рис. 7.6).

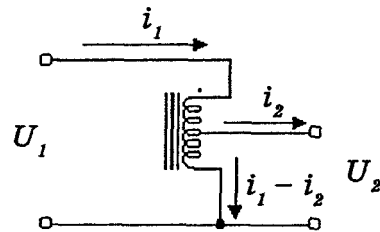


Рис. 7.6

У однофазного автотрансформатора всего одна обмотка. В режиме холостого хода автотрансформатор ничем не отличается от обычного трансформатора. В режиме нагрузки по общей части витков протекает ток, который равен разности токов ( $i_1 - i_2$ ), так как вторичный ток ослабляет магнитный поток в сердечнике (т. е. соответствующий магнитный поток имеет знак, противоположный знаку потока, создаваемого током первичной обмотки).

Чаще всего автотрансформаторы изготавливают со скользящим контактом, что позволяет плавно регулировать выходное напряжение в широких пределах. Примером может служить лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) (рис. 7.7, а).

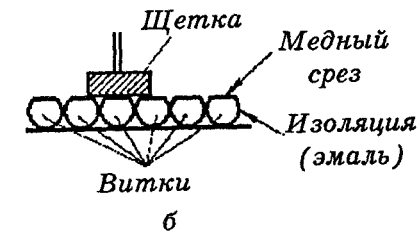
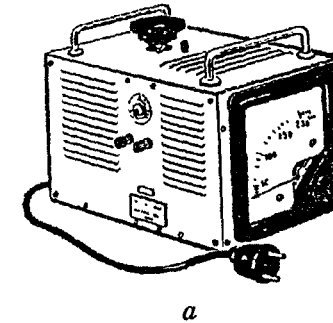


Рис. 7.7

Обмотка этого трансформатора выполнена проводом круглого сечения на тороидальном стальном сердечнике. На одной торцевой стороне изоляцию снимают вместе с частью самого провода, но при этом витки остаются изолированными друг от друга (рис. 7.7, б). По оголенной поверхности витков скользит небольшая щетка, подключая нагрузку к различному числу витков и изменяя тем самым выходное напряжение. Так как перемещающаяся щетка замыкает накоротку сразу 1—2 витка, то при хорошем контакте между ними эти витки могут сгореть. Чтобы этого не случилось, щетку делают из графита, сопротивление которого достаточно велико для ослабления токов в короткозамкнутых витках.

Если часть обмотки автотрансформатора сделать первичной, а всю обмотку вторичной, то автотрансформатор будет повышающим.

В технике больших токов и высоких напряжений измерения электрических величин производят только через измерительные трансформаторы — *трансформаторы тока* и *трансформаторы напряжения*, так как непосредственные измерения с помощью шунтов и добавочных резисторов весьма затруднительны. Так, наибольший ток, который еще можно измерить путем непосредственного включения прибора, составляет 600 А, а напряжение — 2000 В. К тому же шунты и добавочные сопротивления получаются громоздкими и дорогими, а прикосновение к таким приборам в сетях высокого напряжения опасно для жизни.

Трансформатор тока состоит из сердечника и двух обмоток — первичной и вторичной (рис. 7.8).

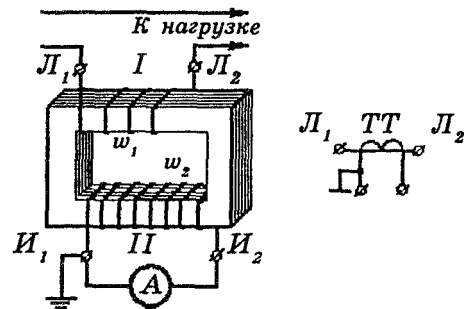


Рис. 7.8

Первичную обмотку, которая содержит небольшое количество витков, включают последовательно с нагрузкой, в цепи которой необходимо измерить ток, а к вторичной обмотке, с большим числом витков, подключают амперметр. Так как сопротивление амперметра мало, то можно считать, что трансформатор тока работает в режиме короткого замыкания, при котором суммарный магнитный поток равен разности потоков, созданных первичной и вторичной обмотками.

Измеряемый ток, протекая по первичной обмотке с низким сопротивлением, создает на ней весьма небольшое паде-

ние напряжения, которое трансформируется во вторичную обмотку. Поскольку число витков вторичной обмотки значительно больше, чем у первичной, то на ней получается значительно большее напряжение при меньшем токе.

Трансформатор тока применяют не только для определения силы тока, но и для включения токовых обмоток ваттметров и некоторых других приборов. Выводы обмоток трансформатора тока маркируют следующим образом: первичная обмотка —  $L_1$  и  $L_2$  (линия), вторичная —  $I_1$  и  $I_2$  (измеритель). На рис. 7.8 также изображено схематическое обозначение трансформатора тока.

Один и тот же трансформатор тока можно использовать для одновременного включения нескольких измерительных приборов (рис. 7.9), однако желательно, чтобы их было не больше двух. Это объясняется тем, что по мере увеличения числа приборов их общее сопротивление возрастает, и режим работы трансформатора тока все более отходит от режима короткого замыкания (уменьшается ток вторичной обмотки).

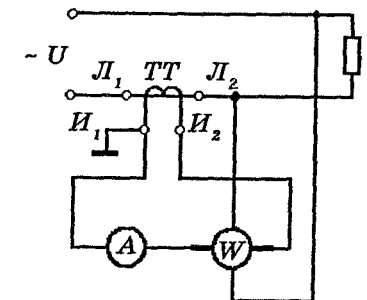


Рис. 7.9

Трансформатор тока не только расширяет пределы измерения приборов, но и гальванически отделяет вторичную цепь от первичной, изолируя тем самым прибор от высоких напряжений сети. Поэтому измерительные приборы

монтируют обычным способом на распределительных щитах. При этом для безопасности один вывод вторичной обмотки заземляют для того, чтобы при пробое изоляции между обмотками провод с высоким потенциалом оказался замкнутым на землю. Трансформаторы тока изготавливают таким образом, чтобы номинальный ток вторичной обмотки составлял 5 А.

Вторичную обмотку работающего трансформатора тока нельзя размыкать и оставлять разомкнутой. Она всегда должна быть замкнута на прибор или закорочена. Это следует делать потому, что при разомкнутой вторичной обмотке магнитный поток в сердечнике обусловлен лишь большим первичным током, а не разностью потоков первичного и вторичного токов. Этот большой магнитный поток создаст на вторичной обмотке высокое напряжение, опасное для жизни. Кроме того, большой магнитный поток может вызвать перегрев сердечника.

Конструктивно трансформаторы тока выполняют по-разному. Все они, как правило, имеют несколько коэффициентов трансформации. Наиболее удобный переносной трансформатор тока — измерительные клещи (рис. 7.10).

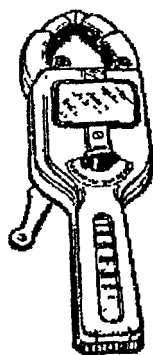


Рис. 7.10

Это трансформатор с разъемным сердечником, смонтированный в одном корпусе с амперметром. При нажатии на рукоятку сердечник размыкается и им обхватывается провод с измеряемым током. После отпускания рукоятки специальная пружина плотно замыкает сердечник, и амперметр показывает силу тока в проводе. В данном случае провод с измеряемым током выступает в роли первичной обмотки. Измерительные клещи очень удобны, так как позволяют измерять ток в любом месте линии без разрыва провода, хотя точность таких измерений невысока.

Трансформатор напряжения состоит из сердечника и двух обмоток — первичной и вторичной (рис. 7.11).

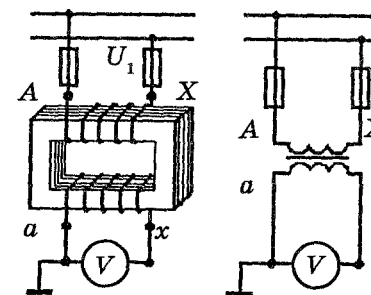


Рис. 7.11

Первичная обмотка содержит значительно больше витков, чем вторичная. На первичную обмотку подается измеряемое напряжение  $U_1$ , а к вторичной обмотке подсоединяется вольтметр. Поскольку сопротивление вольтметра велико, то по вторичной обмотке течет небольшой ток, и можно считать, что трансформатор напряжения работает в режиме холостого хода, т. е. изменения вторичного напряжения пропорциональны изменениям первичного при постоянном коэффициенте трансформации. Фаза вторичного напряжения противоположна фазе первичного. Выводы трансформатора напряжения обозначают следующим образом: выводы первичной обмотки — А, Х, выводы вторичной — а, х. Все трансформаторы напряжения



изготавливают таким образом, чтобы номинальное напряжение вторичной обмотки было равно 100 В.

В целях безопасности обслуживающего персонала один зажим вторичной обмотки и стальной кожух трансформатора напряжения обязательно заземляют для того, чтобы при пробое изоляции между обмотками провод с высоким потенциалом оказался замкнутым на землю. Конструктивно трансформаторы напряжения очень похожи на маломощные силовые трансформаторы.

### **Вопросы для повторения**

- 1. Объясните устройство и принцип действия трансформатора.*
- 2. Перечислите потери в трансформаторе и объясните их физическую природу.*
- 3. Почему сердечник трансформатора собирают из тонких листов трансформаторной стали, изолированных друг от друга?*
- 4. Что называется коэффициентом трансформации?*
- 5. Какой режим работы трансформатора называется холостым ходом?*
- 6. Почему при любом изменении нагрузки трансформатора магнитный поток в его сердечнике остается практически неизменным?*
- 7. Какие методы измерения к.п.д. трансформатора вы знаете?*
- 8. Каково устройство трехфазного трансформатора?*
- 9. Как соединяются между собой обмотки трехфазных трансформаторов?*
- 10. Объясните устройство автотрансформатора.*
- 11. Как включают трансформатор тока, и в каком режиме он работает?*
- 12. Как включают трансформатор напряжения, и в каком режиме он работает?*

## Глава 7. ТРАНСФОРМАТОРЫ

### 7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Трансформатор был изобретен в 1876 г. знаменитым русским электротехником П. Н. Яблочковым и в дальнейшем усовершенствован русским изобретателем П. Ф. Усагиным.

Трансформатором называется статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока. В общем случае вторичная система переменного тока может отличаться от первичной любыми параметрами: значениями напряжения и тока, числом фаз, частотой и т. д. В электротехнике наибольшее применение получили *силовые трансформаторы*, посредством которых изменяют значения переменного напряжения и тока (число фаз и частота остаются неизменными).

Известно, что передача электроэнергии на дальние расстояния осуществляется на высоком напряжении (до 500 кВ и более). Чем выше напряжение  $U$ , тем при той же передаваемой мощности  $S$  меньше ток  $I = S/U$ , благодаря чему значительно уменьшаются потери энергии в электрических линиях и расход металла на изготовление проводов. Для этого в месте производства электрической энергии — на электростанциях — устанавливаются повышающие трансформаторы  $T1$  (рис. 7.1), которые по-



Рис. 7.1

вышают напряжение до нужного значения, а в конце линии электропередачи устанавливаются понижающие трансформаторы  $T2$ , понижающие напряжение до требуемого значения.

Трансформаторы применяются также в нагревательных, сварочных, выпрямительных установках, в электро-

измерительной технике, устройствах радио, связи, автоматики и т. д.

Классифицируют трансформаторы по нескольким признакам: 1) по назначению — на силовые общего применения, силовые специального применения (сварочные, нагревательные и др.), импульсные (для преобразования амплитуды импульсов) и т. д.; 2) по числу трансформируемых фаз — на однофазные и трехфазные; 3) по числу обмоток на фазу — на двухобмоточные, трехобмоточные, многообмоточные; 4) по виду охлаждения — с воздушным (сухие трансформаторы) и масляным (масляные трансформаторы) охлаждением; 5) по форме магнитопровода — на стержневые, броневого и др.

### 7.2. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Простейший трансформатор состоит из магнитопровода (сердечника), выполненного из ферромагнитного материала (обычно листовой электротехнической стали), и двух обмоток, расположенных на стержнях магнитопровода (рис. 7.2). Обмотка, к зажимам которой подводит-

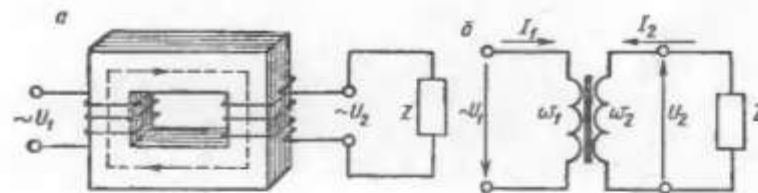


Рис. 7.2

ся электрическая энергия, называется первичной. К другой обмотке, называемой вторичной, подключается приемник  $Z$ .

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции (см. § 3.6). Протекающий по первичной обмотке переменный ток создает в магнитопроводе переменный магнитный поток  $\Phi$ . Этот поток сцеплен с обеими обмотками и индуцирует в каждой из них переменную ЭДС: в первичной обмотке — ЭДС самоиндукции  $E_1$ , во вторичной обмотке — ЭДС взаимной индукции  $E_2$ . Поэтому вторичная обмотка может рассматриваться как источник переменного напряжения. Если вторичная цепь замкнута, то по ней потечет ток.

Как изменится ЭДС вторичной обмотки трансформатора, если переменный ток первичной обмотки заменить постоянным током: а) увеличится? б) уменьшится? в) не изменится? г) станет равной нулю?

В этом случае, в соответствии с положением (2) § 3.6, в обмотках трансформатора не будет наводиться ЭДС, так как магнитный поток  $\Phi = \text{const}$ . Трансформатор предназначен для работы на переменном токе.

Как зависит отношение  $E_1/E_2$  от числа витков обмоток трансформатора  $\omega_1$  и  $\omega_2$ : д)  $E_1/E_2 = \omega_1/\omega_2$ ? е)  $E_1/E_2 = \omega_2/\omega_1$ ?

ЭДС в первичной и вторичной обмотках создаются одним и тем же магнитным потоком  $\Phi$ , сцепленным с обеими обмотками. Поэтому в каждом витке первичной и вторичной обмоток индуцируется одинаковая ЭДС  $E$ . Ввиду последовательного соединения витков ЭДС первичной обмотки равна  $E_1 = \omega_1 E$ , а вторичной обмотки  $E_2 = \omega_2 E$ . Из этого следует, что  $E_1/E_2 = \omega_1/\omega_2$ .

При холостом ходе трансформатора во вторичной обмотке ток не протекает, поэтому, согласно выражению (2.18), напряжение на зажимах вторичной обмотки равно  $U_{2x} = E_2$ . С другой стороны, ввиду малого значения тока первичной обмотки, с достаточной точностью можно считать, что  $U_1 \approx E_1$ , т. е. что ЭДС самоиндукции  $E_1$  полностью уравновешивает действие напряжения, приложенного к первичной обмотке (см. положение (2) § 4.5). Поэтому отношение ЭДС можно заменить отношением напряжений:

$$U_1/U_2 \approx E_1/E_2 = \omega_1/\omega_2 = K, \quad (7.1)$$

где  $K$  — коэффициент трансформации.

Коэффициентом трансформации называется отношение первичного напряжения ко вторичному при холостом ходе трансформатора.

Из формулы (7.1) следует, что  $U_2 = U_1/K$ . Таким образом, трансформатор изменяет значение напряжения в  $K = \omega_1/\omega_2$  раз.

Можно ли понижающий трансформатор использовать в качестве повышающего? — ж) да; з) нет.

Трансформаторы обладают свойством обратимости: один и тот же трансформатор можно использовать в качестве повышающего и понижающего. Обмотку трансформатора, подключенную к сети с более высоким напряжением называют обмоткой высшего напря-

жения (ВН), а обмотку, присоединенную к сети меньшего напряжения, — обмоткой низшего напряжения (НН).

А как определить значения ЭДС трансформатора? Трансформатор можно упрощенно рассматривать как идеальную индуктивность. В § 4.5 показано, что для индуктивности  $u = -e_L = \omega L I_n \cos \omega t = E_n \cos \omega t$ , откуда  $E_n = \omega L I_n$ . Используя формулы (3.14), (3.17) и (4.3), получаем  $E_n = \omega L_n \Psi_n / I_n = 2\pi f \omega \Phi_n$ . Действующее значение синусоидальной ЭДС  $E = E_n / \sqrt{2} = 2\pi f \omega \Phi_n / \sqrt{2}$ . Нетрудно подсчитать, что  $2\pi / \sqrt{2} = 4,44$ , поэтому

$$E = 4,44 f \omega \Phi_n, \quad (7.2)$$

где  $f$  — частота;  $\omega$  — число витков обмотки трансформатора;  $\Phi_n$  — амплитудное значение магнитного потока.

Выражение (7.2) принято называть формулой трансформаторной ЭДС.

К чему приведет удаление магнитопровода трансформатора: и) уменьшится номинальная мощность трансформатора? к) ЭДС во вторичной обмотке станет равной нулю?

Магнитное сопротивление ферромагнетика на два-три порядка меньше, чем у воздуха (см. § 3.3), поэтому практически весь магнитный поток первичной обмотки, не рассеиваясь по воздуху, замыкается по магнитопроводу. Если магнитопровод убрать, возрастет магнитный поток рассеяния и уменьшится поток, связывающий обмотки, что приведет к резкому уменьшению ЭДС  $E_2$  по формуле (7.2) (но не до нуля).

С другой стороны, ферромагнитный сердечник в сотни, тысячи раз увеличивает магнитную индукцию  $B$  (см. § 3.2), а значит, и магнитный поток  $\Phi = BS$ . Это позволяет увеличивать энергию, передаваемую посредством магнитного потока из первичной обмотки во вторичную, и номинальную мощность трансформатора, равную мощности на зажимах вторичной обмотки.

Заметим, что в соответствии с формулой (3.16) энергия магнитного поля  $W_n = BHV/2$  (где  $V$  — объем магнитопровода), поэтому номинальная мощность трансформатора во многом определяется объемом магнитопровода. Промышленность выпускает как миниатюрные трансформаторы мощностью менее одного вольт-ампера, так и трансформаторы мощностью сотни тысяч киловольт-ампер, занимающие объем в десятки кубических метров.

Магнитопровод трансформатора состоит из тонких (обычно 0,5 мм) стальных пластин, покрытых с двух сторон изолирующей пленкой (например, лаком). Такая конструкция магнитопровода обусловлена стремлением ослабить в нем вихревые токи (см. § 3.6), а следовательно, уменьшить величину потерь энергии в трансформаторе.

Иногда обмотки трансформатора наматываются на магнитопровод, который в этом случае может быть кольцевым, выполненным из стальной ленты (рис. 7.3, а). В большинстве случаев обмотки трансформатора выполняются отдельно в виде цилиндрических катушек, поэтому магнитопровод должен быть разборным (рис. 7.3, б), чтобы установить катушки.

В магнитопроводах стержневого типа (рис. 7.4) стержни, на которых расположены обмотки, сверху и снизу

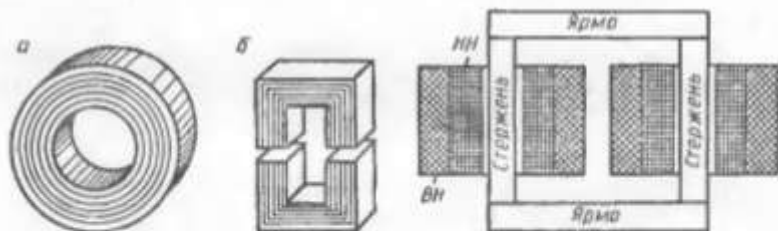


Рис. 7.3

Рис. 7.4

замкнуты ярмом. Для уменьшения влияния воздушных зазоров сборка листов магнитопровода производится внахлестку (рис. 7.5).

В магнитопроводах броневого типа (рис. 7.6) обмотки трансформатора частично прикрываются («бронированы») ярмами.

В масляных трансформаторах обмотки и магнитопровод помещают в бак с трансформаторным (минеральным) маслом.

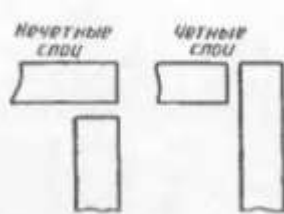


Рис. 7.5

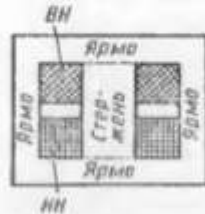


Рис. 7.6

Каково назначение трансформаторного масла: л) для охлаждения обмоток и магнитопровода? м) для электрической изоляции? н) для обоих случаев?

В процессе работы обмотка и сердечник трансформатора нагреваются. При малых мощностях достаточно естественного воздушного охлаждения трансформаторов. Трансформаторы большой мощности (до десятков киловольт-ампер и более) выполняются с масляным охлаждением. Масло в процессе работы циркулирует и отводит тепло от магнитопровода и обмоток к стенкам бака, что улучшает охлаждение трансформатора. В крупных трансформаторах делают принудительную циркуляцию масла.

На каждом трансформаторе имеется табличка, на которой указаны номинальная мощность трансформатора (мощность на зажимах вторичной обмотки), номинальное первичное напряжение (подводимое к первичной обмотке) и вторичное напряжение (напряжение на зажимах вторичной обмотки в режиме холостого хода и при номинальном первичном напряжении). По этим данным легко вычислить токи:  $I_{1ном} = S_{ном} / U_{1ном}$ ;  $I_{2ном} = S_{ном} / U_{2ном}$  (для однофазного трансформатора);  $I_{1ном} = S_{ном} / (\sqrt{3} U_{1ном})$ ;  $I_{2ном} = S_{ном} / (\sqrt{3} U_{2ном})$  (для трехфазного трансформатора).

Ответы: г, д, ж, и, н.

? 1. Что такое трансформатор? 2. В чем его назначение? 3. Как работает трансформатор? 4. Как можно определить на практике коэффициент трансформации? 5. Каково назначение магнитопровода трансформатора? 6. Какие бывают магнитопроводы? В чем достоинства масляных трансформаторов?

### 7.3. РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ

Рассмотрим режим нагрузки трансформатора (рис. 7.7, а), когда вторичная обмотка замкнута на сопротивление  $Z$  и по ней проходит ток  $I_2$ . Регулируя  $Z$ , будем изменять ток.

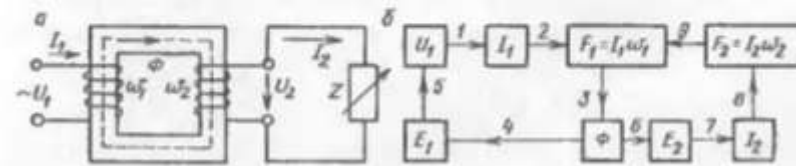


Рис. 7.7

Как изменится ток первичной обмотки  $I_1$  при увеличении тока вторичной обмотки  $I_2$ : а) увеличится? б) уменьшится? в) не изменится?

Потери энергии в силовых трансформаторах невелики (не более 3—5%), поэтому можно считать, что мощности первичной и вторичной обмоток равны, т. е.

$$S_1 = U_1 I_1 = S_2 = U_2 I_2. \quad (7.3)$$

Из этого выражения, считая  $U_1 = \text{const}$  и  $U_2 = \text{const}$  (пренебрегая падениями напряжений в сопротивлениях обмоток трансформатора), получаем, что  $I_1 \equiv I_2$ , т. е. ток первичной обмотки трансформатора изменяется пропорционально току вторичной обмотки (1).

Обмотки трансформатора электрически не связаны. Как же тогда происходит изменение тока  $I_1$  при изменении тока  $I_2$ ? Взаимосвязь в работе обмоток осуществляется через магнитное поле.

Как изменится магнитный поток  $\Phi$  при увеличении тока  $I_2$ : г) увеличится? д) уменьшится? е) практически не изменится?

На рис. 7.7, б показана структурно-логическая схема (СЛС) физических процессов трансформатора при нагрузке. Переменное напряжение  $U_1$  на входе трансформатора создает переменный ток  $I_1$ , образующий МДС первичной обмотки  $F_1 = I_1 w_1$ , действующую по контуру магнитной цепи и создающую переменный магнитный поток  $\Phi$ . Этот поток, с одной стороны, индуцирует в первичной обмотке ЭДС самоиндукции  $E_1$ , которая, по закону Ленца, уравновешивает действие напряжения  $U_1$ . С другой стороны, переменный магнитный поток индуцирует ЭДС  $E_2$  во вторичной обмотке трансформатора. Эта ЭДС создает ток  $I_2$ , который образует МДС вторичной обмотки  $F_2 = I_2 w_2$ . По правилу Ленца,  $F_2$  противодействует магнитному потоку  $\Phi$ , вызывающему эту МДС, т. е. противодействует МДС  $F_1$ . При этом значение тока  $I_1$  строго определенное — такое, чтобы вызвать ЭДС  $E_1$ , уравновешивающую действие  $U_1$  полностью (потери в обмотках пренебрегаем).

Таким образом, с увеличением тока  $I_2$  возрастает МДС  $F_2 = I_2 w_2$ , стремящаяся уменьшить магнитный поток  $\Phi$ . Но уменьшение  $\Phi$  приводит к уменьшению  $E_1$  по формуле (7.2) и нарушению равновесия между  $U_1$  и  $E_1$ , вызывающему увеличение тока  $I_1$  до такого значения, чтобы восстановить прежние значения магнитного потока и ЭДС  $E_1$ . Итак, при изменении нагрузки трансформатора значение магнитного потока практически не изменяется (2).

Поэтому не изменяется и энергия магнитного поля трансформатора при изменении нагрузки? — ж) да; з) нет.

Подставляя в формулу энергии магнитного поля  $W_m = HBV/2$  выражение  $B = \Phi/S$ , получаем  $W_m = H\Phi V/(2S)$ . В этом выражении магнитный поток  $\Phi$ , объем магнитопровода  $V$  и площадь его поперечного сечения  $S$  неизменны, а изменение энергии магнитного поля происходит за счет изменения напряженности  $H$  (см. § 3.1), создаваемой током  $I_1$ . При  $I_1 = 0$   $H = 0$  и  $W_m = 0$ . С увеличением  $I_1$  возрастает  $H$  и  $W_m$ . Иначе и быть не может, ведь магнитное поле — материальный посредник, через который передается энергия от первичной обмотки трансформатора ко вторичной.

Какой ток у понижающего трансформатора больше: и) ток первичной обмотки  $I_1$ ? к) ток вторичной обмотки  $I_2$ ?

Из формул (7.3) и (7.1) следует, что

$$U_1/U_2 = I_2/I_1 = K, \quad (7.4)$$

откуда  $I_2 = KI_1$ , т. е. у понижающего трансформатора вторичный ток в  $K = \omega_1/\omega_2$  раз больше первичного. Таким образом, понижающий трансформатор, передавая мощность  $S_1 = U_1 I_1$  из первичной обмотки во вторичную, уменьшает напряжение и увеличивает ток.

До сих пор мы пренебрегали потерями в трансформаторе. Если их учесть, то при увеличении тока первичной обмотки этот ток вызовет рост падения напряжения в сопротивлениях первичной обмотки, поэтому, хотя и незначительно, но уменьшается ЭДС  $E_1$  и магнитный поток  $\Phi$ , что приведет к уменьшению ЭДС  $E_2$  и напряжения на зажимах вторичной обмотки  $U_2$ . Кроме этого,  $U_2$  уменьшится также за счет падения напряжения на сопротивлениях вторичной обмотки. Поэтому при переходе от холостого хода к режиму номинальной нагрузки произойдет изменение напряжения на выходе трансформатора на значение  $\Delta U$  (в процентах), называемое процентным изменением напряжения:

$$\Delta U = [(U_{2х} - U_{2ном})/U_{2х}]100 \%$$

Процентное изменение напряжения трансформатора составляет обычно 2—3%.

Верно ли, что трансформатор большой мощности имеет меньшее значение КПД, чем маломощный трансформатор? — л) да; м) нет.

При работе трансформатора имеют место потери в обмотках (электрические) и в магнитопроводе (магнитные).

Мощность электрических потерь  $P_x$ , обусловленная нагревом обмоток трансформатора, пропорциональна квадрату тока и определяется суммой электрических потерь в первичной и вторичной обмотках:

$$P_x = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2, \quad (7.5)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  — активные сопротивления первичной и вторичной обмоток.

Магнитные потери происходят главным образом в магнитопроводе. Причина этих потерь — систематическое перемагничивание магнитопровода переменным магнитным полем. Это перемагничивание вызывает в магнитопроводе два вида потерь: потери от гистерезиса  $P_r$  (см. § 3.2), связанные с затратой энергии на преодоление остаточного магнетизма в ферромагнитном материале и пропорциональные площади петли гистерезиса (см. рис. 3.8), и потери от вихревых токов  $P_w$ , наводимых переменным магнитным полем в пластинах магнитопровода:

$$P_m = P_r + P_w.$$

С целью уменьшения магнитных потерь магнитопроводы выполняют из магнитомягкого ферромагнитного материала — электротехнической стали. При этом магнитопровод выполняется не сплошным, а из тонких электрически изолированных друг от друга листов (для уменьшения потерь от вихревых токов).

Мощность магнитных потерь значительно возрастает при увеличении напряжения ( $P_m \propto U^2$ ) и частоты. Кроме того, она зависит от материала сердечника и его массы (объема).

Мощность магнитных потерь определяют при испытаниях трансформатора в режиме холостого хода (рис. 7.8) при номинальном напряжении, когда  $I_2 = 0$ ,  $I_1$  незначительный. При этом электрические потери по формуле (7.5)  $P_x \approx 0$ . Следовательно, показание ваттметра равно мощности магнитных потерь. Заметим, что в соответствии с положением (2) магнитные потери в трансформаторе не зависят от его нагрузки.

Мощность электрических потерь в номинальном режиме определяется при испытаниях трансформатора в режиме короткого замыкания (рис. 7.9) при номинальном токе. Для создания этого режима требуется незначительное напряжение, составляющее  $(0,05—0,1)U_{ном}$ , поэтому

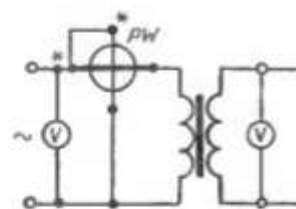


Рис. 7.8

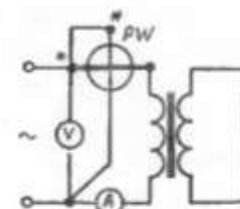


Рис. 7.9

магнитный поток, а значит, и магнитные потери невелики,  $P_m \approx 0$ . Следовательно, показание ваттметра равно номинальной мощности электрических потерь.

Общая мощность потерь в трансформаторе  $P = P_m + P_x$  определяет КПД трансформатора:

$$\eta = P_2/P_1 = (P_1 - P_x - P_m)/P_1 = 1 - (P_m + P_x)/P_1.$$

Как правило, чем выше номинальная мощность силового трансформатора, тем больше его КПД. Так, при  $S_{ном} = 5$  кВ·А  $\eta_{ном} = 0,96$ , а при  $S_{ном} = 10\,000$  кВ·А  $\eta_{ном} = 0,993$ .

Значение КПД трансформатора зависит от его нагрузки. Наибольший КПД трансформатор имеет при нагрузке  $(0,5—0,7)S_{ном}$ , что соответствует средней эксплуатационной нагрузке трансформатора.

Значение КПД трансформатора зависит также от коэффициента мощности  $\cos \varphi_2$  приемника (см. § 4.9). Так, при  $\cos \varphi_2 = 0$  активная мощность нагрузки  $P_2 = S_2 \cos \varphi_2 = 0$  и  $\eta = P_2/P_1 = 0$ . Чем выше коэффициент мощности, тем больше  $P_2$ , а значит, и КПД трансформатора.

Ответы: а, е, з, к, м.

- ? 1. Почему магнитный поток трансформатора практически не зависит от нагрузки? 2. Какой будет СЛС (рис. 7.7, б) для режима холостого хода трансформатора? 3. Что такое процентное изменение напряжения трансформатора и от каких факторов оно зависит? 4. От чего зависят электрические и магнитные потери трансформатора? 5. Каким образом можно повысить КПД трансформатора?

#### 7.4. ТИПЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

**Трехфазный трансформатор.** Передача и распределение электрической энергии чаще всего осуществляется на трехфазном токе (см. § 5.1). При этом для повышения и понижения напряжения, как правило, используются трехфазные трансформаторы.

Принцип работы и электромагнитные процессы трехфазного и однофазного трансформаторов одинаковы. На рис. 7.10 показано расположение обмоток высшего и низшего напряжения на магнитопроводе трехфазного трансформатора, а на рис. 7.11 — наиболее распространенные

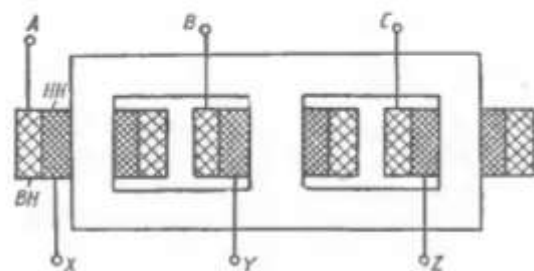


Рис. 7.10

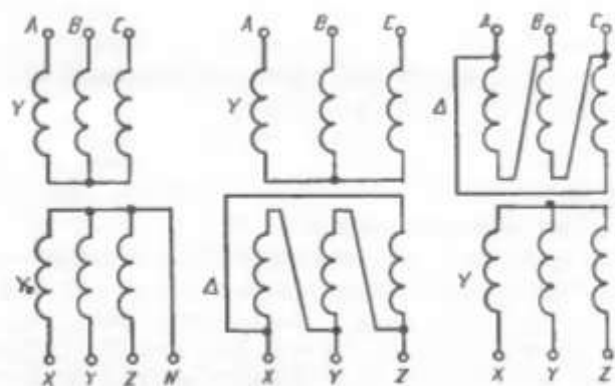


Рис. 7.11

схемы соединений этих обмоток. При выборе схем соединений обмоток трехфазного трансформатора учитывают достоинства и недостатки схем звезды (Y) и треугольника (Δ), рассмотренные в гл. 5.

**Многообмоточные трансформаторы.** Часто приемники имеют различные номинальные напряжения. В этом случае экономически выгоднее вместо нескольких двухобмоточных применить один многообмоточный трансформатор, имеющий одну первичную обмотку и, в зависимости от числа питаемых цепей, несколько вторичных обмоток (рис. 7.12). Такие трансформаторы широко применяются в радиоприемниках, телевизорах, магнитофонах, схемах электроники и другой аппаратуре.

В трехфазных электрических сетях иногда необходимо получить несколько разных по значению напряжений. В этом случае применяются трехфазные трехобмоточные трансформаторы, имеющие в каждой фазе одну первичную и две вторичные обмотки с разными номинальными напряжениями (например, 121 кВ; 38,5 кВ; 11 кВ).

**Автотрансформаторы.** Электрическая схема автотрансформатора показана на рис. 7.13. Обмотка низшего на-

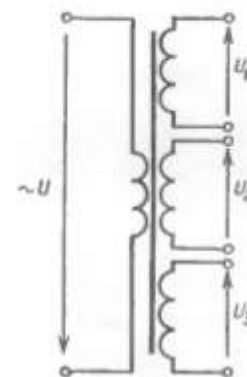


Рис. 7.12

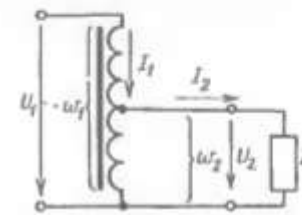


Рис. 7.13

пряжения автотрансформатора является частью обмотки высшего напряжения. В автотрансформаторе передача энергии из первичной во вторичную обмотку осуществляется не только с помощью магнитного потока, замыкающегося по магнитопроводу, но и электрическим путем.

Верно ли, что коэффициент трансформации автотрансформатора  $K = \omega_1/\omega_2$ ? — а) да; б) нет.

Первичное напряжение  $U_1$  равномерно распределено между витками  $\omega_1$ , и на один из них приходится напряжение  $U_1/\omega_1$ . Вторичное напряжение  $U_2$  пропорционально числу витков  $\omega_2$ , относящихся ко вторичной цепи,  $U_2 = \omega_2(U_1/\omega_1)$ . Отсюда коэффициент трансформации автотрансформатора  $K = U_1/U_2 = \omega_1/\omega_2$ , т. е. такой же, как и у однофазного трансформатора.

Так как вторичная обмотка автотрансформатора является частью первичной обмотки, то в сравнении с трансформаторами автотрансформаторы экономически выгоднее. Это преимущество уменьшается с увеличением коэффициента трансформации, поэтому автотрансформаторы применяются при отношении  $U_1/U_2 = 1,5 - 2,0$ .

Достоинством автотрансформатора является также то,

что сечение его магнитопровода меньше, чем у трансформатора равной мощности, так как в автотрансформаторе из первичной цепи во вторичную цепь магнитным путем передается только часть энергии.

Автотрансформаторы применяют для регулирования напряжения в небольших пределах, пуска мощных двигателей, связи двух электрических систем с различными напряжениями. Широкое распространение получили так называемые *регуляторы напряжения* или *лабораторные автотрансформаторы*, у которых число витков  $w_2$  изменяется с помощью скользящего контакта (щетki), перемещаемого непосредственно по защищенным от изоляции виткам обмотки.

**Измерительные трансформаторы.** Различают измерительные трансформаторы напряжения (ТН) (рис. 7.14) и измерительные трансформаторы тока (ТТ) (рис. 7.15).

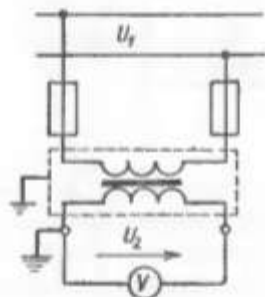


Рис. 7.14

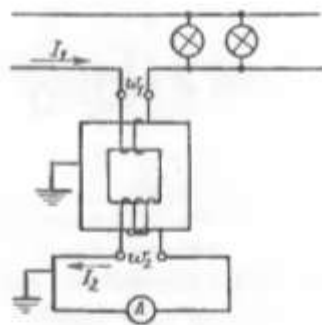


Рис. 7.15

Они позволяют не только расширить пределы измерения приборов, но также электрически изолировать измерительный прибор от высокого напряжения. Для безопасности обслуживания корпус и вторичная обмотка измерительных трансформаторов заземляются.

Измерительные трансформаторы вносят дополнительную погрешность измерения. От каких факторов зависит эта погрешность: в) от сопротивления обмоток подключаемых к трансформатору приборов? г) от соотношения числа витков трансформатора?

**Трансформатор напряжения** уменьшает измеряемое напряжение от значения  $U_1$  до  $U_2$ , т. е. расширяет в  $U_1/U_2$  раз предел измерения напряжения вольтметром, который подключен ко вторичной обмотке (см. рис. 7.14).

Так как по формуле (7.1)  $U_1/U_2 \approx w_1/w_2$ , то предел измерения напряжения вольтметром расширяется в  $w_1/w_2$  раз.

Кроме вольтметров, во вторичную цепь ТН включаются обмотки напряжения ваттметров, счетчиков и других приборов, создающие некоторую токовую нагрузку. С изменением этой нагрузки за счет изменения падения напряжения в обмотках трансформатора изменяется соотношение первичного и вторичного напряжения, что вносит погрешность в результаты измерения. Однако так как электрическое сопротивление вольтметров и обмоток напряжения приборов велико (до десятков тысяч ом), то трансформатор напряжения практически работает в режиме холостого хода и указанная выше погрешность незначительна.

**Трансформатор тока** уменьшает измеряемый ток от значения  $I_1$  до  $I_2$ , т. е. расширяет в  $I_1/I_2$  раз предел измерения тока амперметром, который подключен ко вторичной обмотке (см. рис. 7.15). Так как по формулам (7.1) и (7.4)  $I_1/I_2 \approx w_2/w_1$ , то предел измерения тока амперметром расширяется в  $w_2/w_1$  раз.

Кроме амперметров, в цепь вторичной обмотки ТТ включаются токовые обмотки ваттметров, счетчиков и других приборов, соединенных последовательно с амперметром. В результате последовательного соединения приборов возрастает сопротивление нагрузки ТТ и уменьшается ток  $I_2$ , т. е. изменяется соотношение первичного и вторичного токов, что вносит погрешность в измерения. Однако эта погрешность незначительна, так как сопротивления амперметров и токовых обмоток приборов близки к нулю. По этой же причине ТТ практически работает в режиме короткого замыкания.

Как изменится магнитный поток ТТ при обрыве вторичной цепи трансформатора: д) увеличится? е) уменьшится? ж) не изменится?

МДС  $F_1 = I_1 w_1$ , создающей магнитный поток, оказывает противодействие МДС  $F_2 = I_2 w_2$  (в соответствии с законом Ленца). При обрыве вторичной цепи это противодействие отсутствует ( $I_2 = 0$ ), поэтому при  $F_1 = \text{const}$  резко возрастает магнитный поток. Это, с одной стороны, приводит к увеличению потерь в магнитопроводе, что вызывает его перегрев, с другой стороны, возрастают вторичная ЭДС и напряжение, что может привести к пробое изоляции и представляет опасность для обслуживающего персонала. В результате ТТ, как правило, выходит из строя. При необходимости отключить или заменить ампер-



метр вторичную обмотку ТТ предварительно закорачивают.

**Сварочный трансформатор.** Для электродуговой сварки требуется большой ток (свыше 100 А). Его получают при помощи сварочного трансформатора, который является понижающим, уменьшающим напряжение сети 220 или 380 В до напряжения 60—70 В, которое необходимо для устойчивого горения дуги. Относительно невысокое напряжение обеспечивает безопасность труда сварщика.

Сопротивление электрической дуги весьма мало, поэтому с целью ограничения тока сварки и получения возможности его регулирования последовательно вторичной обмотке трансформатора включают регулируемое индуктивное сопротивление. Например, в трансформаторе типа СТЭ (рис. 7.16) в цепь вторичной обмотки 1 вклю-

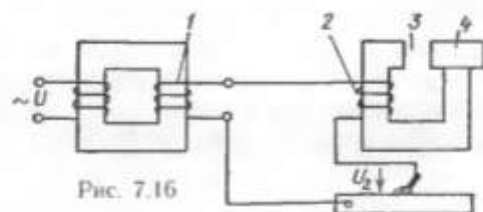


Рис. 7.16

чена специальная катушка индуктивности 2 с регулируемым путем перемещения подвижного сердечника 4 воздушным зазором 3.

Как изменится ток сварки при увеличении воздушного зазора: з) увеличится? и) уменьшится?

По закону Ома, для магнитной цепи катушки магнитный поток  $\Phi = \omega I / R_m$ , где  $R_m = l / (\mu \mu_0 S)$ . При  $\Phi = \text{const}$  (а это обязательно при  $U = \text{const}$ ) рост магнитного сопротивления  $R_m$  (за счет увеличения воздушного зазора) пропорционально увеличивает ток  $I$  сварки.

В процессе сварки изменяется сопротивление электрической дуги за счет изменения ее длины и сечения. Но при этом ток дуги изменяется незначительно, так как сопротивление дуги в сравнении с сопротивлением катушки 2 (см. рис. 7.16) и обмоток трансформатора мало. Поэтому горение дуги устойчивое.

Ответы: а, в, д, з.

? 1. Каковы особенности трехфазного трансформатора в сравнении с однофазным? 2. Как работает автотрансформатор? 3. В чем достоинства и недостатки автотрансформатора в сравнении с