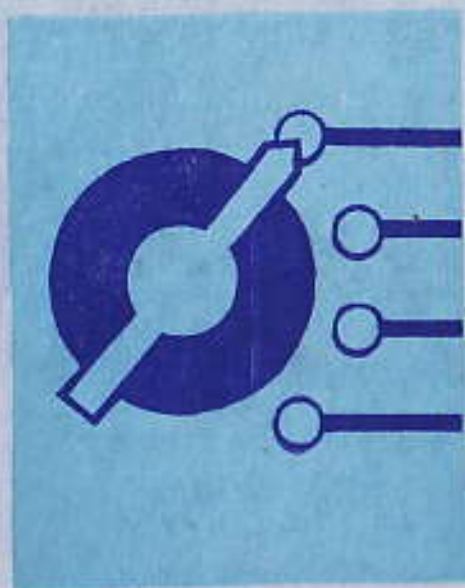


И. А. ДАНИЛОВ  
П. М. ИВАНОВ

# Общая электротехника



Продолжение

Проволочка тензометрического датчика наклеена параллельно оси стержня. Как изменится сопротивление датчика при сжатии стержня?	Увеличится	70
	Не изменится	10
Как изменится индуктивность дросселя, если увеличить воздушный зазор между якорем и сердечником?	Уменьшится	237
	Увеличится	193
	Не изменится	214
Как изменится емкость конденсатора, если увеличить диэлектрическую проницаемость вещества, разделяющего его пластины?	Уменьшится	226
	Увеличится	243
	Не изменится	182
	Уменьшится	141

## ГЛАВА 9

### ТРАНСФОРМАТОРЫ

#### § 9.1. 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 к. п. д. 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.

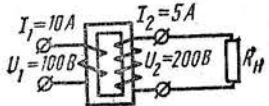
Расчетные мощности трансформаторов весьма различны — от долей вольт-ампера до десятков тысяч киловольт-ампер; рабочие частоты — от единиц герц до сотен килогерц.

Карточка № 9.1 (269)

Назначение трансформаторов и их применение

Укажите одно из важнейших достоинств цепей переменного тока по сравнению с цепями постоянного тока.	Возможность передачи электроэнергии на дальние расстояния	130
	Возможность преобразования электроэнергии в тепловую и механическую	26
	Возможность изменения величины напряжения и тока в цепи с помощью трансформатора	168
При каком напряжении целесообразно а) передавать электроэнергию; б) потреблять электроэнергию.	а) высоком; б) низком	63
	а) низком; б) высоком	85
	Это зависит от характера тока	160
	а) высоком; б) высоким	69

Продолжение

Какой трансформатор изображен на схеме? 	Понижающий, так как ток во вторичной цепи меньше тока в первичной цепи	99
	Повышающий, так как напряжение во вторичной цепи больше напряжения в первичной цепи	53
Где применяются трансформаторы?	В линиях электропередачи	64
	В технике связи	164
	В автоматике и измерительной технике	55
	Во всех перечисленных и многих других областях техники	43
Какие трансформаторы используются для питания электроэнергией жилых помещений?	Силовые	142
	Измерительные	159
	Специальные	102

## § 9.2. УСТРОЙСТВО ТРАНСФОРМАТОРА

Трансформатор представляет собой замкнутый магнитопровод (рис. 9.1), на котором расположены две или несколько обмоток. В мало-мощных высокочастотных трансформаторах, используемых в радиотехнических схемах, магнитопроводом может являться воздушная среда.

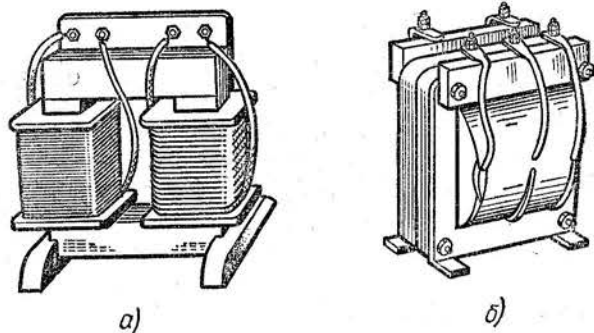


Рис. 9.1. Конструкция однофазного мало-мощного трансформатора стержневого (а) и броневое (б) типов

Для уменьшения потерь на гистерезис магнитопровод изготавливают из магнитномягкого материала — трансформаторной стали, имеющей узкую петлю намагничивания. Для уменьшения потерь на вихревые токи в материал магнитопровода вводят примесь кремния, повышаю-

щую его электрическое сопротивление, а сам магнитопровод собирают из отдельных листов электротехнической стали толщиной  $0,35 \div 0,5$  мм, изолированных друг от друга теплостойким лаком или специальной бумагой.

Различают трансформаторы стержневого (рис. 9.1, а) и броневое (рис. 9.1, б) типов. Последний хорошо защищает катушки (обмотки) от механических повреждений. Верхнюю часть магнитопровода, называемую ярмом, крепят после насадки на стержень катушек (обмоток). Стержни и ярмо соединяют очень плотно, чтобы исключить воздушные зазоры на стыках. В мало-мощных трансформаторах нахо-

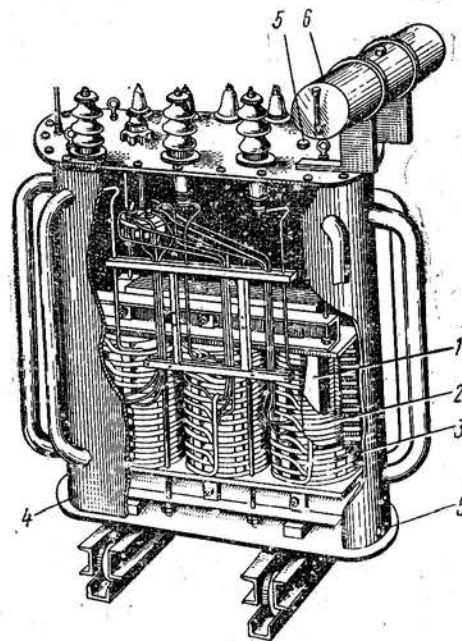


Рис. 9.2. Трехфазный силовой трансформатор:

1 — магнитопровод; 2 — обмотка низшего напряжения; 3 — обмотка высшего напряжения; 4 — бак; 5 — пробки для заливки и слива масла; 6 — расширитель

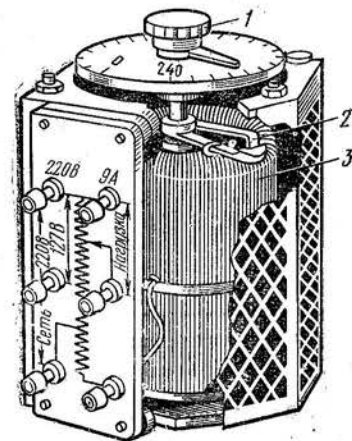


Рис. 9.3. Автотрансформатор ЛАТР-1:

1 — ручка скользящего контакта; 2 — скользящий контакт; 3 — обмотка

дят широкое применение кольцевые магнитопроводы, которые собирают из штампованных колец или навивают из длинной ленты. В этих магнитопроводах отсутствует воздушный зазор, поэтому магнитный поток рассеяния мал. В трансформаторах, рассчитанных на повышенные частоты, кольцевые магнитопроводы часто прессуют из ферромагнитного порошка, смешанного с изоляционным лаком.

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

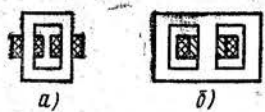
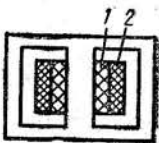
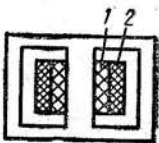
нагрузка, — вторичной. На сердечнике может быть размещено несколько вторичных обмоток с разным числом витков, что позволяет получить различные по величине вторичные напряжения.

При работе трансформатора за счет токов в обмотках, а также вследствие перемагничивания магнитопровода и вихревых токов выделяется тепло. Трансформаторам небольшой мощности (до 10 кВА) достаточно воздушного охлаждения; они называются сухими.

В мощных трансформаторах применяется масляное охлаждение (рис. 9.2). Магнитопровод с обмотками размещается в баке, заполненном минеральным (трансформаторным) маслом. Масло не только отводит тепло за счет конвекции или принудительной циркуляции, но и является хорошим диэлектриком (изолятором). Масляные трансформаторы надежны в работе и имеют меньшие размеры и массу по сравнению с «сухими» трансформаторами той же мощности. При изменении температуры объем масла меняется. При повышении температуры излишек масла поглощается расширителем, а при понижении температуры масло из расширителя возвращается в основной бак.

В тех случаях, когда требуется плавно изменять вторичное напряжение, применяют скользящий контакт для изменения числа витков обмотки (примерно так же, как это делается в ползунковых реостатах). Скользящий контакт широко используется в автотрансформаторах, рассчитанных на регулирование напряжения в небольших пределах (рис. 9.3).

Карточка № 9.2 (167)  
Устройство трансформатора

Какие трансформаторы изображены на рисунках? 	а и б — стержневого типа	103
	а — стержневого типа; б — бронированного типа	25
	а — бронированного типа; б — стержневого типа	171
Почему магнитопроводы высококачественных трансформаторов прессуют из ферромагнитного порошка? 	Для упрощения технологии изготовления	56
	Для увеличения магнитной проводимости	75
	Для уменьшения тепловых потерь	111
Какая из обмоток является обмоткой низшего напряжения? 	Обмотка 1	7
	Обмотка 2	178

Продолжение

Почему допустимая плотность тока в обмотках трансформаторов с масляным охлаждением, составляющая $2 \div 4$ А/мм <sup>2</sup> , примерно в 2 раза выше, чем в «сухих» трансформаторах?	Потому что надежнее изоляция витков	1
	Потому что лучше условия охлаждения	47
Можно ли расширитель трансформатора полностью залить маслом?	Можно	120
	Нельзя	177

### § 9.3. ФОРМУЛА ТРАНСФОРМАТОРНОЙ Э. Д. С.

Рассмотрим катушку (рис. 9.4), к зажимам которой подведено синусоидальное напряжение. Пренебрежем сопротивлением катушки и потерями на гистерезис и вихревые токи. Тогда приложенное к катушке напряжение  $u = U_m \sin \omega t$  будет уравновешиваться только э. д. с. самоиндукции

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

Это очевидно, так как полностью уравновешивать друг друга могут только равные по величине и одинаково изменяющиеся во времени величины.

В соответствии с законом электромагнитной индукции

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

следовательно,

$$E_m \sin \omega t = -\omega \frac{d\Phi}{dt}.$$

Это дифференциальное уравнение позволяет найти зависимость между э. д. с. обмотки и магнитным потоком в магнитопроводе (сердечнике):

$$d\Phi = -\frac{E_m}{\omega} \sin \omega t dt.$$

Проинтегрируем левую и правую части:

$$\Phi = -\frac{E_m}{\omega} \int \sin \omega t dt = \frac{E_m}{\omega^2} \cos \omega t + A.$$

Здесь постоянная интегрирования  $A$  равна нулю, так как синусоидальная э. д. с. не может создать постоянную составляющую магнитного потока. Таким образом,

$$\Phi = \frac{E_m}{\omega^2} \cos \omega t = \Phi_m \cos \omega t,$$

где  $\Phi_m = E_m / (\omega^2)$  — амплитуда переменного магнитного потока в сердечнике катушки.

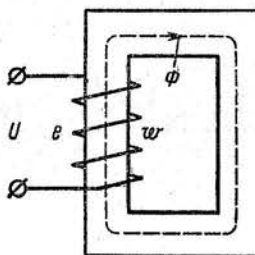


Рис. 9.4. Катушка с сердечником в цепи переменного тока

Подставив в последнее равенство  $E_m = \sqrt{2}E$  и  $\omega = 2\pi f$ , получим

$$\Phi_m = \frac{\sqrt{2}E}{2\pi f\omega}$$

или

$$E = \frac{2\pi f\omega\Phi_m}{\sqrt{2}}$$

Нетрудно подсчитать, что  $2\pi/\sqrt{2} = 4,44$  т. е.

$$E = 4,44 f\omega\Phi_m.$$

Это выражение, связывающее действующее значение э. д. с. в обмотке с амплитудой магнитного потока в сердечнике, принято называть формулой трансформаторной э. д. с. Она играет важную роль в теории трансформаторов и электрических машин переменного тока.

Карточка № 9.3 (307)

Формула трансформаторной э. д. с.

Будет ли протекать ток через обмотку катушки, если потери в магнитопроводе (сердечнике) равны нулю?	Будет	174
	Не будет	143
Какое уравнение связывает магнитный поток в сердечнике с мгновенным значением э. д. с. в обмотке?	$e = E_m \sin \omega t$	39
	$d\Phi = -\frac{E_m}{\omega} \sin \omega t dt$	163
	Другое уравнение	134
Найдите интеграл $\int \sin \omega t dt$ .	$\frac{1}{\omega} \cos \omega t$	50
	$-\frac{1}{\omega} \cos \omega t$	22
	$-\frac{1}{\omega} \cos \omega t + A$	33
$\Phi = 0,01 \cos \omega t$ . Определите амплитуду магнитного потока $\Phi_m$ .	0,01 Вб	79
	Для решения задачи недостаточно данных	30
	$0,01/\omega$ В·с	176
$f = 100/2\pi$ с <sup>-1</sup> $\omega = 100\sqrt{2}$ ; $\Phi_m = 0,01$ В·с <sup>-1</sup> Определить э. д. с. $E$ .	4,44 В	100
	44,4 В	140
	100 В	58

#### § 9.4. 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.

При подключении первичной обмотки трансформатора к сети переменного тока напряжением  $U_1$  по обмотке начнет проходить ток  $I_1$  (рис. 9.5), который создаст в сердечнике переменный магнитный поток  $\Phi$ . Магнитный поток, пронизывая витки вторичной обмотки, индуцирует в ней э. д. с.  $E_2$ , которую можно использовать для питания нагрузки.

Поскольку первичная и вторичная обмотки трансформатора пронизываются одним и тем же магнитным потоком  $\Phi$ , выражения индуцируемых в обмотке э. д. с. 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;  $\omega_1, \omega_2$  — числа витков обмоток;  $\Phi_m$  — амплитудное значение переменного магнитного потока  $\Phi$ .

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 э. д. с. вторичной и первичной обмоток.

На основании закона электромагнитной индукции можно написать

$$e_1 = -\omega_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -\omega_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Поделив одно равенство на другое, получим

$$e_2/e_1 = \omega_2/\omega_1 = k.$$

Следовательно, в любой момент времени отношение мгновенных значений э. д. с. вторичной и первичной обмоток равно коэффициенту трансформации. Нетрудно понять, что это возможно только при полном совпадении по фазе э. д. с.  $e_1$  и  $e_2$ .

Если цепь вторичной обмотки трансформатора разомкнута (режим холостого хода), то напряжение на зажимах обмотки равно ее э. д. с.:  $U_2 = E_2$ , а напряжение питающей сети почти полностью уравнове-

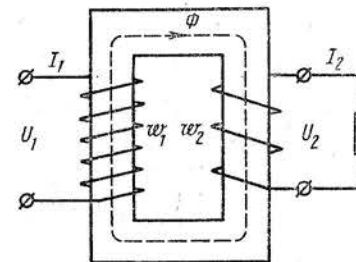


Рис. 9.5. Принципиальная схема однофазного трансформатора

шивается э. д. с. первичной обмотки:  $U \approx E_1$ . Следовательно, можно написать, что

$$k = E_2/E_1 \approx U_2/U_1.$$

Таким образом, коэффициент трансформации может быть определен на основании измерений напряжения на входе и выходе ненагруженного трансформатора. Отношение напряжений на обмотках ненагруженного трансформатора указывается в его паспорте.

Учитывая высокий к. п. д. трансформатора, можно полагать, что  $S_1 \approx S_2$ , где  $S_1 = U_1 I_1$  — мощность, потребляемая из сети, а  $S_2 = U_2 I_2$  — мощность, отдаваемая в нагрузку.

Таким образом,  $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$ , откуда

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

Отношение токов первичной и вторичной обмоток приближенно равно коэффициенту трансформации.

#### Карточка № 9.4 (249)

Принцип действия однофазного трансформатора.  
Коэффициент трансформации

Принцип действия трансформатора основан на	законе Ампера	154
	законе электромагнитной индукции	147
	принципе Ленца	144
Чему равно отношение действующих и мгновенных значений э. д. с. первичной и вторичной обмоток трансформатора?	Отношению чисел витков обмоток	153
	Приближенно отношению чисел витков обмоток	149
Может ли напряжение на зажимах вторичной обмотки превышать: а) э. д. с. $E_1$ в первичной обмотке; б) э. д. с. $E_2$ во вторичной обмотке?	Может	185
	Не может	70
	а) может; б) не может	141
	а) не может; б) может	145
Чему равно отношение напряжений на зажимах первичной и вторичной обмоток?	Отношению чисел витков обмоток	151
	Приближенно отношению чисел витков обмоток	136
$U_1=200$ В; $P=1$ кВт; $I_2=0,5$ А. Определите приближенное значение коэффициента трансформации	Для решения задачи недостаточно данных	68
	$k \approx 50$	112
	$k \approx 10$	172
	$k \approx 0,1$	52

### § 9.5. РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДА ТРАНСФОРМАТОРА

Холостым ходом трансформатора называют такой режим его работы, при котором цепь вторичной обмотки разомкнута, а к первичной обмотке подведено номинальное напряжение (рис. 9.6).

В режиме холостого хода ток во вторичной цепи и мощность, отдаваемая в нагрузку, равны нулю. Трансформатор потребляет из сети ток холостого хода  $I_0$ , который создает магнитный поток в сердечнике и покрывает потери на гистерезис и вихревые токи. Ток  $I_0$  составляет несколько процентов от номинального тока.

Помимо магнитного потока  $\Phi$ , замыкающего по магнитопроводу и индуктирующего в обмотках э. д. с.  $E_1$  и  $E_2$ , в трансформаторе возникают магнитные

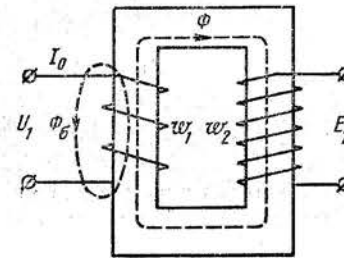


Рис. 9.6. Холостой ход трансформатора

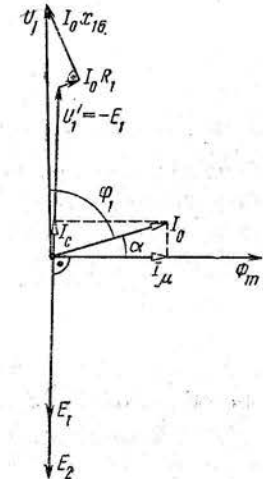


Рис. 9.7. Векторная диаграмма трансформатора в режиме холостого хода

потоки рассеяния  $\Phi_\sigma$ , каждый из которых связан только со своей обмоткой и замыкается по воздуху. В режиме холостого хода магнитный поток рассеяния связан с первичной обмоткой, так как вторичная обмотка обесточена. Магнитный поток рассеяния определяет индуктивное сопротивление обмоток трансформатора  $x_\sigma$  так же, как поток самоиндукции определяет индуктивное сопротивление любой обмотки  $x_L$ , включенной в цепь переменного тока:

$$x_\sigma = \omega L_\sigma,$$

где  $L_\sigma$  — индуктивность рассеяния обмотки.

Кроме того, напомним, что обмотка трансформатора обладает активным сопротивлением  $R_1$ .

С учетом сказанного уравнение второго закона Кирхгофа в векторной форме для первичной цепи в режиме холостого хода можно записать в виде

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_0 R_1 + \bar{I}_0 x_{1\sigma}.$$

Соотношения между синусоидально изменяющимися физическими величинами, характеризующими работу трансформатора, могут быть наглядно представлены векторной диаграммой (рис. 9.7).

Построение диаграммы проводим следующим образом. Откладываем вектор магнитного потока  $\vec{\Phi}_m$ , замыкающегося по магнитопроводу трансформатора, и совпадающий с ним по фазе вектор намагничивающего тока  $\vec{I}_\mu$ .

Если магнитный поток изменяется по синусоидальному закону  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ , то э. д. с. определяются выражениями производных от синусоидальной функции времени:

$$e_1 = -E_{1m} \cos \omega t; e_2 = -E_{2m} \cos \omega t.$$

Видно, что э. д. с.  $e_1$  и  $e_2$  отстают по фазе от магнитного потока на  $90^\circ$ .

Откладываем векторы  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$ , повернув их на  $90^\circ$  по часовой стрелке относительно вектора  $\vec{\Phi}_m$ . Откладываем вектор  $\vec{U}'_1 = -E_1$  и совпадающий с ним по фазе вектор тока потерь в стали на гистерезис и вихревые токи  $\vec{I}_c$ . Откладываем вектор тока холостого хода  $\vec{I}_0 = \sqrt{\vec{I}_c^2 + \vec{I}_\mu^2}$ . Прибавляем к вектору  $-\vec{E}_1$  вектор  $\vec{I}_0 \vec{R}_1$ , совпадающий по фазе с вектором тока  $\vec{I}_0$ , и вектор  $\vec{I}_0 \vec{x}_{1\sigma}$ , опережающий на  $90^\circ$  вектор тока холостого хода. В соответствии с уравнением второго закона Кирхгофа сумма указанных векторов равна вектору приложенного к первичной обмотке напряжения  $\vec{U}_1$ .

На рис. 9.7 для большей наглядности реальные соотношения между векторами искажены. В действительности вектор тока потерь в стали  $\vec{I}_c$  значительно меньше вектора намагничивающего тока  $\vec{I}_\mu$ , а угол  $\alpha$ , на который вектор  $\vec{I}_0$  повернут относительно вектора  $\vec{\Phi}_m$ , составляет всего  $5 \div 6^\circ$ . Кроме того, векторы  $\vec{I}_0 \vec{x}_{1\sigma}$  и  $\vec{I}_0 \vec{R}_1$  значительно меньше по величине вектора  $\vec{E}_1$  и составляют  $2 \div 3\%$  от него. Особенно мало падение напряжения на активном сопротивлении обмотки. Практически в большинстве случаев им пренебрегают.

Отметим также, что реально в первичной обмотке трансформатора протекает один ток  $\vec{I}_0$ . Токи  $\vec{I}_c$  и  $\vec{I}_\mu$ , физический смысл которых был рассмотрен выше, являются его составляющими.

Карточка № 9.5 (230)

Режим холостого хода трансформатора

Какое равенство несправедливо при холостом ходе трансформатора?	$E_1 \approx U_{1н}$	135
	$E_2 \approx U_2$	165
	$U_2/U_1 \approx k$	132
	$I_1/I_2 \approx k$	8

Продолжение

Чем принципиально отличается магнитный поток рассеяния от основного магнитного потока трансформатора?	Магнитный поток рассеяния замыкается по воздуху, основной — по магнитопроводу	28
	Магнитный поток рассеяния в десятки раз меньше основного магнитного потока	86
	Магнитный поток рассеяния сцеплен с одной обмоткой, основной — с двумя	54
Трансформатор включен в сеть переменного тока промышленной частоты. Индуктивность рассеяния первичной обмотки $L\sigma = 0,001$ Г. Определите индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки	0,314 Ом	133
	0,05 Ом	107
	0,1 Ом	37
Какие синусоидально изменяющиеся физические величины совпадают по фазе при холостом ходе трансформатора?	$\Phi, E_1, E_2$	170
	$E_1, E_2, U_2$	173
	$E_1, U_1, U_2$	114
	$\Phi, I_0$	109
При каком условии ток холостого хода совпадает по фазе с магнитным потоком в сердечнике?	Ни при каком	129
	При отсутствии потерь в сердечнике на гистерезис и вихревые токи	12
	При $k=1$	78

### § 9.6. ОПЫТ ХОЛОСТОГО ХОДА ТРАНСФОРМАТОРА

Схема, по которой проводится опыт холостого хода трансформатора, изображена на рис. 9.8. В опыте измеряются напряжение, ток и мощность первичной обмотки, э. д. с. (напряжение холостого хода) вторичной обмотки. На основании этих измерений определяют потери в сердечнике, коэффициент трансформации, составляющие тока холостого хода и строят векторную диаграмму. Опыт холостого хода проводят при номинальном напряжении  $U_{1н}$ , а следовательно, при расчетном значении магнитного потока в сердечнике.

При холостом ходе трансформатора потери энергии в обмотках невелики: во вторичной обмотке они полностью отсутствуют, так как  $I_2 = 0$ , а в первичной обмотке составляют десятые доли процента ( $0,002 \div 0,003$  от номинальных потерь), так как ток холостого хода в десятки раз мень-

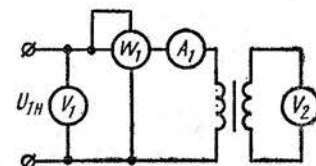


Рис. 9.8. Принципиальная схема опыта холостого хода трансформатора

ше номинального тока. Поэтому потерями в обмотках можно пренебречь и считать, что ваттметр показывает потери в сердечнике трансформатора на гистерезис и вихревые токи. Эти потери в режиме холостого хода равны потерям в сердечнике трансформатора при номинальном режиме, так как определяются величиной магнитного потока в сердечнике.

Составляющая тока холостого хода, идущая на покрытие потерь в сердечнике, определяется по известной формуле

$$I_c = P/U'_1,$$

где  $P$  — показания ваттметра, а  $U'_1$  — напряжение, приближенно равное  $U_1$ .

Если известно отношение чисел витков обмотки  $k$ , то значение  $U'_1$  может быть определено более точно:  $U'_1 = U_2/k$ , где  $U_2$  — измеряется вольтметром.

Намагничивающий ток при холостом ходе определяют как катет прямоугольного треугольника:

$$I_\mu = \sqrt{I_0^2 - I_c^2}.$$

Если число витков обмоток неизвестно, то коэффициент трансформации оценивают по показаниям вольтметров:

$$k \approx U_2/U_1.$$

#### Карточка № 9.6 (161)

##### Опыт холостого хода трансформатора

Какие приборы необходимы для опыта холостого хода трансформатора?	Два вольтметра, ваттметр, два амперметра	123
	Два вольтметра, ваттметр, амперметр	9
	Два вольтметра, амперметр	89
При холостом ходе трансформатора каковы потери: а) в сердечнике; б) в обмотках?	а) равны номинальным; б) пренебрежимо малы	125
	а) и б) пренебрежимо малы	51
	а) равны номинальным	31
	а) пренебрежимо малы; б) равны номинальным	101
Какую мощность измеряет ваттметр при холостом ходе трансформатора?	Мощность потерь в трансформаторе при номинальном режиме	108
	Мощность потерь в сердечнике при номинальном режиме	92
	Мощность потерь в обмотках при номинальном режиме	17
	Мощность потерь в обмотках при холостом ходе	131

Продолжение

В опыте холостого хода трансформатора приборы показывают: $U_1 = 100$ В; $U_2 = 500$ В; $I_0 = 5$ А; $P = 100$ Вт. Определите намагничивающий ток	1 А	45
	4,9 А	3
	5 А	20
	5,1 А	71
В предыдущем случае число витков первичной обмотки $w_1 = 200$ . Определите число витков вторичной обмотки.	100	59
	500	42
	1000	32

#### § 9.7. РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ

При подключении к трансформатору нагрузки в цепи вторичной обмотки проходит ток, создающий в сердечнике свой магнитный поток, который по принципу Ленца направлен против магнитного потока первичной обмотки. При этом замыкающийся по сердечнику магнитный поток  $\bar{\Phi}_m$  равен геометрической сумме магнитных потоков:

$$\bar{\Phi}_m = \bar{\Phi}_{1m} + \bar{\Phi}_{2m},$$

где  $\bar{\Phi}_{1m}$  и  $\bar{\Phi}_{2m}$  создаются токами первичной и вторичной обмоток.

Приняв во внимание, что  $\bar{U}_1 \approx -\bar{E}_1$  и учтя формулу трансформаторной э. д. с., получим

$$U_1 \approx 4,44 f w_1 \Phi_m.$$

Напряжение сети  $U_1$ , к которой подключен трансформатор, практически не зависит от нагрузки, следовательно, (это ясно из последней формулы) и магнитный поток в сердечнике не зависит от тока нагрузки:  $\Phi_m = \text{const}$ . Физически это можно представить следующим образом. С увеличением тока нагрузки пропорционально увеличивается ток, потребляемый трансформатором из сети. Магнитные потоки первичной и вторичной обмоток одновременно увеличиваются, а так как они направлены встречно, результирующий магнитный поток  $\Phi_m$  остается неизменным.

Поскольку  $\Phi_m = \text{const}$ , намагничивающая сила, создающая магнитный поток, неизменна:

$$\bar{F} = \bar{I}_1 w_1 + \bar{I}_2 w_2 = \text{const}.$$

Здесь  $I_1 w_1$  и  $I_2 w_2$  — н. с. соответственно первичной и вторичной обмоток.

При холостом ходе  $I_2 = 0$ ,  $I_1 = I_0$ , следовательно,

$$F = I_0 w_1.$$

Поскольку величина  $F$  не изменяется при всех режимах работы трансформатора, можно написать

$$\overline{I_0 \omega_1} = \overline{I_1 \omega_1} + \overline{I_2 \omega_2}.$$

Это уравнение называют уравнением намагничивающих (магнитодвижущих) сил трансформатора.

Векторная диаграмма нагруженного трансформатора без учета сопротивления обмоток изображена на рис. 9.9.

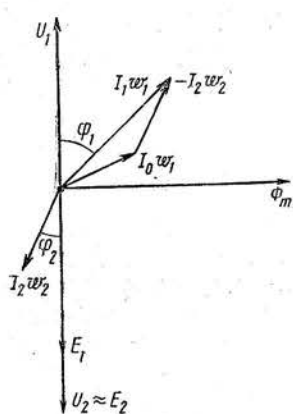


Рис. 9.9. Векторная диаграмма нагруженного трансформатора без учета сопротивления обмоток

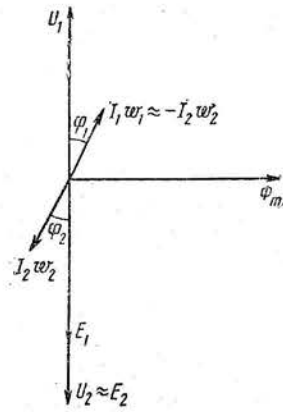


Рис. 9.10. Векторная диаграмма нагруженного трансформатора без учета тока холостого хода

Построение диаграммы начинаем с вектора магнитного потока  $\overline{\Phi}_m$ . Векторы э. д. с.  $\overline{E}_1$  и  $\overline{E}_2$  отстают по фазе от вектора потока  $\overline{\Phi}_m$  на  $90^\circ$ . Поскольку сопротивление обмоток не учитывается, принимаем  $\overline{U}_2 \approx \overline{E}_2$ ,  $\overline{U}_1 = -\overline{E}_1$ .

Угол  $\varphi_2$  сдвига фаз между вектором тока  $\overline{I}_2$  и вектором напряжения на нагрузке  $\overline{U}_2$  определяем по его тангенсу:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = x_n / R_n.$$

где  $x_n$  и  $R_n$  — соответственно реактивное и активное сопротивления потребителя электрической энергии.

Так как реактивное сопротивление нагрузки может иметь как индуктивный, так и емкостный характер, вектор тока  $\overline{I}_2$  может отставать или опережать по фазе вектор напряжения  $\overline{U}_2$ .

Положение вектора тока  $\overline{I}_0$  определяют на основании опыта холостого хода трансформатора. После того как построены векторы  $\overline{I}_2 \omega_2$  и  $\overline{I}_0 \omega_1$  (параллельные векторам  $\overline{I}_2$  и  $\overline{I}_0$ ), положение вектора  $\overline{I}_1 \omega_1$  определяют из уравнения намагничивающих сил трансформатора.

Из векторной диаграммы видно, что угол  $\varphi_1$  сдвига фаз между вектором напряжения сети  $\overline{U}_1$  и вектором тока  $\overline{I}_1$ , потребляемого из сети, зависит от угла  $\varphi_2$ , т. е. от характера нагрузки. Остановимся более подробно на этом, введя дополнительные упрощения. Пренебрежем током  $\overline{I}_0$ , который составляет около 5% от тока  $\overline{I}_1$ , и построим векторную диаграмму рис. 9.10. При этом получаем  $\overline{I}_1 \omega_1 \approx -\overline{I}_2 \omega_2$ , а  $\varphi_1 \approx \varphi_2$ . Таким образом, включение нагрузки в сеть через трансформатор практически не изменяет коэффициента мощности  $\cos \varphi$ . Равенство углов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — приближенное. Оно нарушается тем больше, чем больше падение напряжения в обмотках трансформатора и ток холостого хода.

Карточка № 9.7 (304)

Работа трансформатора под нагрузкой

Как изменится магнитный поток в сердечнике трансформатора при увеличении тока нагрузки в 2 раза?	Не изменится	4
	Увеличится в 2 раза	35
	Уменьшится в 2 раза	118
Ток холостого хода равен 1 А, первичная обмотка имеет 100 витков. Чему равна результирующая н. с. первичной и вторичной обмоток при номинальной нагрузке трансформатора?	Для решения задачи необходимо знать ток нагрузки	21
	Для решения задачи необходимо знать ток нагрузки и число витков вторичной обмотки	138
При номинальной нагрузке магнитный поток в сердечнике трансформатора равен $\Phi_m$ , результирующая намагничивающая сила обмоток $F$ . Чему равны эти величины при холостом ходе трансформатора?	100 А	90
	$\Phi_m; F$	41
	$0; F$	103
Какие переменные физические величины совпадают по фазе при работе нагруженного трансформатора?	$\Phi_m; 0$	38
	Обе величины близки к нулю	186
	$E_1; E_2; U_2$	124
Угол сдвига фаз между напряжением на вторичной обмотке и током нагрузки увеличился в 2 раза. Как изменился угол сдвига фаз между напряжением и током в первичной обмотке?	$E_1; E_2$	87
	$E_2; U_2$	15
	$-E_1; U_1$	5
Угол сдвига фаз между напряжением на вторичной обмотке и током нагрузки увеличился в 2 раза. Как изменился угол сдвига фаз между напряжением и током в первичной обмотке?	Не изменился	158
	Увеличился примерно в 2 раза	182
	Уменьшился примерно в 2 раза	121

### § 9.8. ВНЕШНЯЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТРАНСФОРМАТОРА. ПРОЦЕНТНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ВТОРИЧНОГО НАПЯЖЕНИЯ

Внешней характеристикой трансформатора называется зависимость напряжения на зажимах вторичной обмотки от тока нагрузки при неизменных частоте, напряжении на первичной обмотке и коэффициенте мощности:  $U_2 = f(I_2)$  при  $\omega = \text{const}$ ,  $U_1 = \text{const}$ ,  $\cos \varphi_2 = \text{const}$ .

При чисто активной нагрузке ( $\cos \varphi_2 = 1$ ) напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора с увеличением тока нагрузки уменьшается. Это объясняется увеличением внутреннего падения напряжения в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

Влияние характера нагрузки на величину вторичного напряжения поясняется рис. 9.11, на котором построены векторные диаграммы для

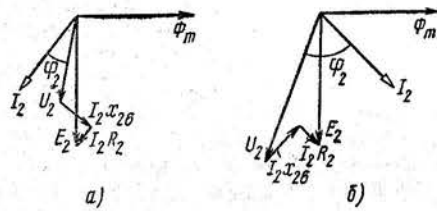


Рис. 9.11. Векторная диаграмма вторичной цепи трансформатора при индуктивном (а) и емкостном (б) характере нагрузки

вторичной цепи трансформатора в соответствии с уравнением второго закона Кирхгофа в векторной форме:

$$\vec{U}_2 = \vec{E}_2 + \vec{I}_2 R_2 + \vec{I}_2 x_{2\sigma}$$

Чтобы получить вектор  $\vec{E}_2$ , надо к вектору  $\vec{U}_2$  прибавить векторы  $\vec{I}_2 R_2$  и  $\vec{I}_2 x_{2\sigma}$ . При этом следует иметь в виду, что вектор  $\vec{I}_2 R_2$  совпадает по фазе с вектором  $\vec{I}_2$ , а вектор  $\vec{I}_2 x_{2\sigma}$  опережает

по фазе вектор  $\vec{I}_2$  на  $90^\circ$ . Нетрудно заметить, что при прочих равных условиях при индуктивном характере нагрузки (рис. 9.11, а) с увеличением угла  $\varphi_2$  напряжение  $U_2$  несколько понижается, а при емкостном характере нагрузки (рис. 9.11, б) — повышается.

Таким образом, индуктивная нагрузка приводит к более резкому снижению напряжения  $U_2$  по сравнению с чисто активной нагрузкой, а емкостная нагрузка препятствует его уменьшению и может даже привести к незначительному повышению напряжения на зажимах вторичной обмотки при увеличении нагрузки.

Внешние характеристики трансформатора представлены на рис. 9.12.

В качестве одной из практических характеристик трансформатора принимают изменение его вторичного напряжения  $\Delta U_2$ , которое измеряют при изменении тока нагрузки от нуля до номинального значения, при неизменных частоте, напряжении питания и коэффициенте мощности трансформатора.

Изменение напряжения  $\Delta U$  определяют на основании опыта или расчета с использованием векторной диаграммы.

Опытное определение напряжения  $\Delta U$  возможно двумя способами (рис. 9.13):

1) устанавливают номинальное значение  $U_{2н}$  вторичного напряжения при холостом ходе трансформатора, а затем нагружают трансфор-

матор и измеряют напряжение  $U_2$  на зажимах вторичной обмотки при номинальном токе нагрузки;

2) устанавливают номинальное значение  $U_{2н}$  вторичного напряжения при номинальной нагрузке трансформатора, а затем уменьшают нагрузку до нуля и измеряют напряжение  $U_2$  при холостом ходе.

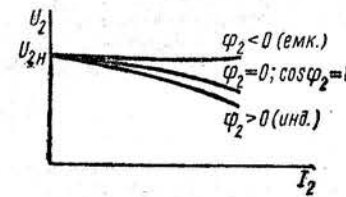


Рис. 9.12. Внешние характеристики трансформатора

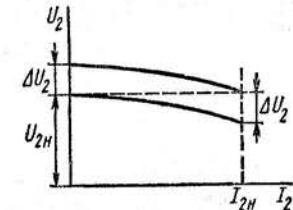


Рис. 9.13. Способы определения изменения вторичного напряжения трансформатора

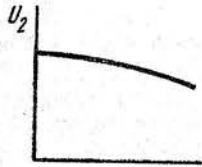
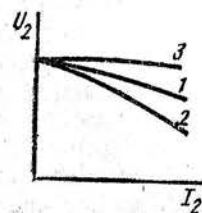
Изменение напряжения принято выражать в процентах от номинального значения вторичного напряжения:

$$\Delta U_2 \% = \frac{U_{2н} - U_2}{U_{2н}} \cdot 100.$$

У выпускаемых отечественной промышленностью силовых трансформаторов изменение вторичного напряжения при  $\cos \varphi_2 = 0,8$  колеблется в пределах от 4 до 8%.

#### Карточка № 9.8 (131)

#### Внешняя характеристика трансформатора. Процентное изменение вторичного напряжения

Какие из величин, которые могут изменяться в процессе работы трансформатора, влияют на напряжение вторичной обмотки $U_2$ ?	$U_1, \omega, x_{1\sigma}, I_2$	23
	$U_1, \omega, I_2, \varphi_2$	77
	$I_2, \omega, x_{2\sigma}, R_n$	24
 <p>На рисунке изображена внешняя характеристика трансформатора. Какая величина откладывается по оси абсцисс?</p>	$U_1$	74
	$\cos \varphi_2$	82
	$R_n$	76
	$I_2$	19
 <p>Кривая 1 соответствует чисто активной нагрузке трансформатора. При каком характере нагрузки получены кривые 2 и 3?</p>	2 и 3 — индуктивном	44
	2 — индуктивном; 3 — емкостном	115
	2 — емкостном; 3 — индуктивном	57

Продолжение

При холостом ходе трансформатора номинальное напряжение $U_{2н}=400$ В. При номинальной нагрузке $U_2=380$ В. Определите изменение вторичного напряжения трансформатора.	5%	10
	5,1%	137
Какой характер имела нагрузка трансформатора в предыдущем случае?	Для решения задачи недостаточно данных	117
	Емкостный	146
	Индуктивный	122
	Активный	96
	Для ответа на вопрос недостаточно данных	110

### § 9.9. ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

При рассмотрении опыта холостого хода было установлено, что потери в сердечнике трансформатора могут быть измерены ваттметром, включенным в первичную цепь. Эти потери зависят от величины магнитного потока и при изменении нагрузки трансформатора от нуля до номинального значения практически не изменяются.

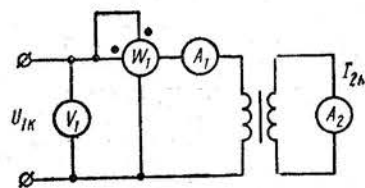


Рис. 9.14. Принципиальная схема опыта короткого замыкания трансформатора

Режим короткого замыкания трансформатора при номинальном напряжении первичной обмотки является аварийным: обмотки быстро перегреваются, и трансформатор выходит из строя. Поэтому опыт короткого замыкания проводится при пониженном напряжении  $U_1$ .

В опыте короткого замыкания помимо токов и напряжений измеряется мощность, потребляемая трансформатором из сети (рис. 9.14).

При постановке опыта короткого замыкания подводимое к трансформатору напряжение  $U_1$  постепенно повышают от нуля до значения, при котором токи в первичной и вторичной обмотках достигают номинальных значений. При этом напряжение короткого замыкания  $U_{1к}$  составляет примерно 5% от номинального значения  $U_1$ . Из формулы трансформаторной э. д. с. следует, что магнитный поток в сердечнике пропорционален напряжению  $U_1$ . Следовательно, в опыте короткого

Помимо потерь в сердечнике возникают тепловые потери в обмотках трансформатора, которые пропорциональны квадрату тока и существенно изменяются при изменении нагрузки.

Для определения потерь в обмотках при номинальном токе нагрузки ставится опыт короткого замыкания трансформатора.

замыкания магнитный поток составляет около 5% от номинального значения, а потери в сердечнике — тысячные доли номинальных потерь. Поэтому можно считать, что в опыте короткого замыкания ваттметр измеряет потери в обмотках трансформатора.

Измерив потери, можно подсчитать к. п. д. трансформатора по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + P_M}$$

где  $P_2$  — мощность приемника;  $P_0$  — потери в стали сердечника;  $P_M$  — потери в меди обмоток.

Поскольку потери в обмотках зависят от нагрузки, к. п. д. трансформатора зависит от режима его работы. Можно показать, что к. п. д. трансформатора достигает максимального значения при таком токе нагрузки, при котором потери в обмотках становятся равными потерям в сердечнике.

Зависимость к. п. д. трансформатора от тока нагрузки изображена на рис. 9.15.

Современные трансформаторы рассчитывают таким образом, что максимум к. п. д. достигается при нагрузке, равной примерно половине номинального значения. Коэффициент полезного действия силовых трансформаторов очень высок (98 ÷ 99%).

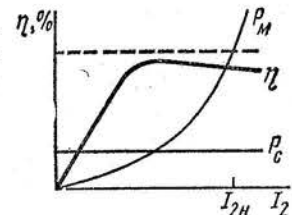
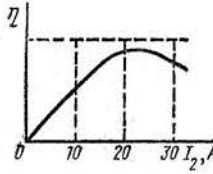


Рис. 9.15. Зависимость к. п. д. трансформатора от тока нагрузки

#### Карточка № 9.9 (289)

##### Потери энергии и коэффициент полезного действия трансформаторов

Что показывает ваттметр: а) в опыте холостого хода; б) в опыте короткого замыкания?	Потери энергии в трансформаторе при номинальной нагрузке	66
	а) потери энергии в сердечнике; б) потери энергии в обмотках	184
Зависят ли от нагрузки потери энергии: а) в обмотках; б) в сердечнике трансформатора?	Зависят	73
	Не зависят	127
	а) зависят; б) не зависят	94
	а) не зависят; б) зависят	49
 <p>При каком токе нагрузки потери в сердечнике равны потерям в обмотках?</p>	$I_2=0$	13
	$I_2=10$ А	93
	$I_2=20$ А	126
	$I_2=40$ А	16

Номинальная мощность на выходе трансформатора $P_2=0,97$ кВт. В опыте холостого хода ваттметр показывает 10 Вт, в опыте короткого замыкания 20 Вт. Определите к. п. д. трансформатора при номинальной нагрузке, %.	Для решения задачи недостаточно данных	67
	99	36
	98	65
Измерена мощность на входе и выходе трансформатора: $P_1=10$ кВт; $P_2=9,8$ кВт. Определите к. п. д. трансформатора, %.	97	104
	97	62
	98	81
Определите к. п. д. трансформатора, %.	99	61
	Для решения задачи недостаточно данных	162

§ 9.10. ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

В линиях электропередачи используются в основном трехфазные силовые трансформаторы. Внешний вид, конструктивные особенности и компоновка основных элементов этого трансформатора представлены

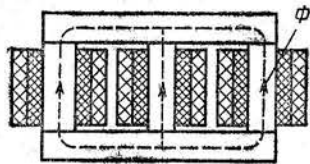


Рис. 9.16. Размещение обмоток на сердечнике трехфазного трансформатора

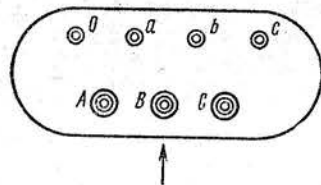


Рис. 9.17. Расположение и маркировка вводов на крышке бака трансформатора

на рис. 9.2. Магнитопровод (сердечник) трехфазного трансформатора имеет три стержня, на каждом из которых размещаются две обмотки одной фазы (рис. 9.16).

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* (рис. 9.17).

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

Применяются главным образом три способа соединения обмоток трехфазного трансформатора: 1) соединение первичных и вторичных

обмоток звездой (рис. 9.18, а); 2) соединение первичных обмоток звездой, вторичных — треугольником (рис. 9.18, б); 3) соединение первичных обмоток треугольником, вторичных — звездой (рис. 9.18, в).

Обозначим отношение чисел витков обмоток одной фазы буквой *k*. Эта величина соответствует коэффициенту трансформации однофазного трансформатора и может быть выражена через отношение фазных напряжений:

$$k = \omega_2/\omega_1 \approx U_{\phi 2}/U_{\phi 1}.$$

Обозначим коэффициент трансформации линейных напряжений буквой *c*.

При соединении обмоток по схеме  $\lambda/\lambda$

$$c = U_{\lambda 2}/U_{\lambda 1} = \sqrt{3} U_{\phi 2}/\sqrt{3} U_{\phi 1} = k.$$

При соединении обмоток по схеме  $\lambda/\Delta$

$$c = U_{\lambda 2}/U_{\lambda 1} = U_{\phi 2}/\sqrt{3} U_{\phi 1} = k/\sqrt{3}.$$

При соединении обмоток по схеме  $\Delta/\lambda$

$$c = U_{\Delta 2}/U_{\lambda 1} = \sqrt{3} U_{\phi 2}/U_{\phi 1} = \sqrt{3} k.$$

Таким образом, при одном и том же числе витков обмоток трансформатора можно в  $\sqrt{3}$  раза увеличить или уменьшить его коэффициент трансформации, выбирая соответствующую схему соединения обмоток.

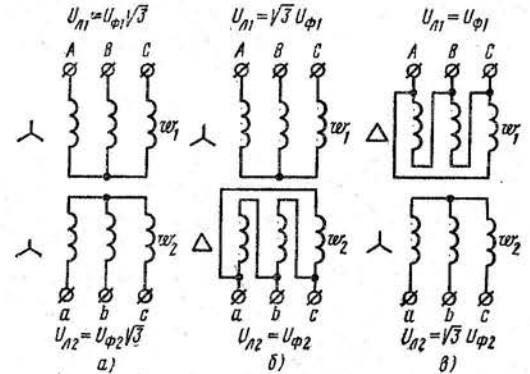
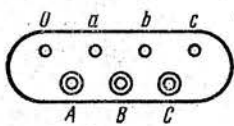


Рис. 9.18. Способы соединения обмоток трехфазного трансформатора

Карточка № 9.10 (245)

Трехфазные трансформаторы

Сколько стержней должен иметь сердечник трехфазного трансформатора?	Один	18
	Два	2
	Три	128
 <p>На рисунке изображена клеммовая панель нижнего трехфазного трансформатора. Какие клеммы должны быть подсоединены к питающей сети?</p>	<i>A, B, C</i>	175
	<i>a, b, c</i>	46
	<i>0, a, b, c</i>	95

Продолжение

Число витков в каждой фазе первичной обмотки 1000, в каждой фазе вторичной обмотки 200. Линейное напряжение питающей сети 1000 В. Определите линейное напряжение на выходе трансформатора.	200 В	6
	5000 В	40
	Для решения задачи недостаточно данных	83
Решите предыдущую задачу при условии, что обмотки соединены по схеме $\Delta/\Delta$	200/√3 В	148
	1000/√3 В	80
	200√3 В	181
	Для решения задачи недостаточно данных	105
Решите предыдущую задачу при условии, что обмотки соединены по схеме $\Delta/\Delta$ .	200/√3 В	84
	1000/√3 В	161
	200√3 В	11

### § 9.11. АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Принципиальная схема автотрансформатора изображена на рис. 9.19. У автотрансформатора часть витков первичной обмотки используется в качестве вторичной обмотки, поэтому помимо магнитной связи имеется электрическая связь между первичной и вторичной цепями. В соответствии с этим энергия из первичной цепи во вторичную передается как при помощи магнитного потока, замыкающегося по магнитопроводу, так и непосредственно по проводам.

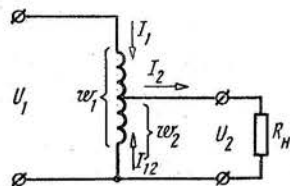


Рис. 9.19. Принципиальная схема автотрансформатора

Поскольку формула трансформаторной э. д. с. применима к обмоткам автотрансформатора так же, как и к обмоткам трансформатора, коэффициент трансформации автотрансформатора выражается известными отношениями:

$$k = w_2/w_1 = E_2/E_1 \approx U_2/U_1 \approx I_1/I_2.$$

Вследствие электрического соединения обмоток через часть витков, принадлежащую одновременно первичной и вторичной цепям, протекают токи  $I_1$  и  $I_2$ , которые направлены встречно и при небольшом коэффициенте трансформации мало отличаются друг от друга по величине. Поэтому их разность оказывается небольшой и обмотку можно выполнить из тонкого провода. Таким образом, при коэффициенте

трансформации  $k = 1,2 \div 2$  экономится значительное количество меди. При больших коэффициентах трансформации это преимущество автотрансформатора исчезает. Электрическое соединение первичной и вторичной цепей повышает опасность при эксплуатации аппарата, так как при пробое изоляции в понижающем автотрансформаторе оператор может оказаться под высоким напряжением первичной цепи.

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 автоматичес-

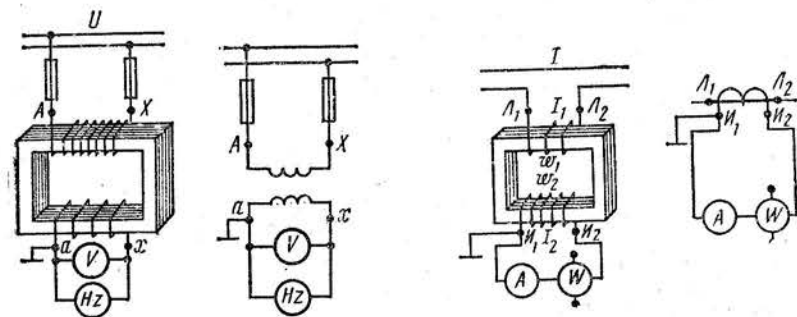


Рис. 9.20. Схема включения и условное обозначение измерительного трансформатора напряжения

Рис. 9.21. Схема включения и условное обозначение измерительного трансформатора тока

кого 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 (рис. 9.20). Поскольку эти обмотки имеют большое сопротивление и потребляют маленькую мощность, можно считать, что трансформаторы напряжения работают в режиме холостого хода.

Измерительные трансформаторы тока используются для включения амперметров и токовых катушек измерительных приборов (рис. 9.21). Эти катушки имеют очень маленькое сопротивление, поэтому трансформаторы тока практически работают в режиме короткого замыкания.

Результирующий магнитный поток в сердечнике трансформатора равен разности магнитных потоков, создаваемых первичной и вторичной обмотками. В нормальных условиях работы трансформатора тока он невелик. Однако при размыкании цепи вторичной обмотки в сердечнике будет существовать только магнитный поток первичной обмотки, который значительно превышает разностный магнитный поток. Потери в сердечнике резко возрастут, трансформатор перегреется и вый-

дет из строя. Кроме того, на концах оборванной вторичной цепи появится большая э. д. с., опасная для работы оператора. Поэтому трансформатор тока нельзя включать в линию без подсоединенного к нему измерительного прибора. Для повышения безопасности обслуживающего персонала кожух измерительного трансформатора должен быть тщательно заземлен.

Карточка № 9.11 (207)

Автотрансформаторы и измерительные трансформаторы

Чем принципиально отличается автотрансформатор от трансформатора?	Малым коэффициентом трансформации	113
	Возможностью изменения коэффициента трансформации	88
	Электрическим соединением первичной и вторичной цепей	34
Коэффициент трансформации автотрансформатора $k=10$ . а) Какая часть витков обмотки является общей для первичной и вторичной цепей? б) Какой ток течет по этим виткам?	а) $0,1 I_1$ ; б) $0,9 I_1$	116
	а) $0,9 I_1$ ; б) $0,1 I_1$	155
Какие приборы нельзя подключать к трансформатору напряжения?	Вольтметры, обмотки напряжения ваттметров, высокоомные обмотки реле	152
	Амперметры, токовые обмотки ваттметров, низкоомные обмотки реле	72
Какой прибор нельзя подключать к трансформатору тока?	Амперметр	97
	Реле с малым входным сопротивлением	29
	Вольтметр	119
	Ваттметр	156
На какие режимы работы рассчитаны: а) трансформатор напряжения; б) трансформатор тока?	а) холостой ход; б) короткое замыкание	166
	а) короткое замыкание; б) холостой ход	27
	Это зависит от подключенного измерительного прибора	91

§ 9.12. 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.

Относительно невысокие напряжения при больших токах обеспечивают не только эффективное тепловыделение в сварочном контакте, но и безопасность сварщика, работающего обычно среди металлических конструкций с высокой электропроводностью.

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

Сопротивление электрической дуги, возникающей при сварке, изменяется при перемещениях руки сварщика. Если бы напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора поддерживалось неизменным, возникали бы резкие колебания тока в цепи и регулировать тепловыделение было бы невозможно. Поэтому сварочный трансформатор устроен так, что при резком уменьшении сопротивления дуги ток в цепи увеличивается незначительно, а произведение  $I^2R$ , определяющее количество тепла, сохраняется на требуемом уровне.

В соответствии с законом Ома при резком уменьшении сопротивления и незначительном увеличении тока напряжение на дуге снижается. Сварочный трансформатор имеет крутопадающую внешнюю характеристику (рис. 9.22).

Сварочный трансформатор выдерживает короткие замыкания, возникающие в случае прикосновения электрода к сварочному шву. Ток короткого замыкания, как показывает внешняя характеристика, ограничен. Вторичная обмотка трансформатора рассчитана на достаточно длительное протекание этого тока.

При постоянном напряжении питающей сети быстрое снижение выходного напряжения трансформатора при незначительном возрастании тока может быть достигнуто только за счет увеличения внутреннего падения напряжения в обмотках трансформатора. Для этого нужно увеличить сопротивление обмоток.

Сварочные трансформаторы изготавливают с большим и регулируемым сопротивлением обмоток. При этом увеличивают не активное сопротивление проводов, а индуктивное сопротивление рассеяния обмоток, так как увеличение активного сопротивления привело бы к возрастанию потерь энергии и перегреву трансформатора.

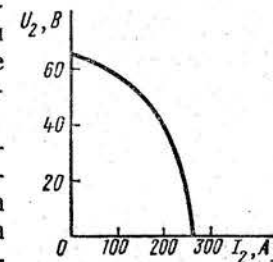


Рис. 9.22. Внешняя характеристика сварочного трансформатора

Для увеличения индуктивного сопротивления рассеяния обмоток увеличивают поток рассеяния, вводя в сердечник трансформатора шунтирующий магнитопроводящий стержень, через который замыкается часть основного магнитного потока. Изменяя величину воздушного зазора в шунтирующем стержне, можно изменять величину магнитного потока рассеяния. Средний подвижный стержень, играющий роль магнитного шунта, предусмотрен; например, в конструкции отечественного сварочного трансформатора СТАН-1.

Применяют и другие способы изменения индуктивного сопротивления рассеяния обмоток. Так, в трансформаторе СТЭ в цепь вторичной обмотки включают специальный дроссель с регулируемым воздушным зазором, а в трансформаторе ТС-500 изменяют расстояние между первичной и вторичной обмотками.

Карточка № 9.12 (262)

Сварочные трансформаторы

Почему для сварки используются трансформаторы с крутопадающей внешней характеристикой?	Для получения на вторичной обмотке устойчивого напряжения $60 \pm 70$ В	48
	Для ограничения тока короткого замыкания	14
Почему сварочный трансформатор рассчитывают на сравнительно небольшое вторичное напряжение (укажите неверный ответ)?	Для повышения при заданной мощности величины сварочного тока	157
	Для улучшения условий безопасной работы сварщика	93
	Для получения крутопадающей внешней характеристики	139
Почему для получения крутопадающей внешней характеристики целесообразно увеличивать индуктивное, а не активное сопротивление обмоток трансформатора?	По конструктивным соображениям	169
	Для уменьшения тепловых потерь	180
Как изменяют индуктивное сопротивление рассеяния обмоток в трансформаторе СТАН-1?	Измерением воздушного зазора в дросселе	133
	Изменением расстояния между обмотками	60
	Изменением воздушного зазора в магнитном шунте	179
Какие однофазные сварочные трансформаторы выпускаются отечественной промышленностью?	СТЭ	167
	СТАН-1; ТС-500	187
	Все перечисленные марки	150

ГЛАВА 10

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 10.1. ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

**Вращающееся магнитное поле двухфазного тока.** Рассмотрим образование вращающегося магнитного поля на примере двухфазного синусоидального тока и двух катушек, сдвинутых в пространстве одна относительно другой на угол  $90^\circ$ .

Катушка 1 создает магнитное поле, силовые линии которого перпендикулярны к ее плоскости. На рис. 10.1 это магнитное поле представлено вектором магнитной индукции  $\vec{B}_1$ . Магнитное поле катушки 2 характеризуется вектором магнитной индукции  $\vec{B}_2$ . К катушке 1 подводится синусоидальный ток

$$i_1 = I_m \sin \omega t,$$

к катушке 2 — ток

$$i_2 = I_m \sin (\omega t + \pi/2) = I_m \cos \omega t.$$

Индукция магнитного поля пропорциональна создающему его току, следовательно,

$$B_1 = B_m \sin \omega t;$$

$$B_2 = B_m \cos \omega t.$$

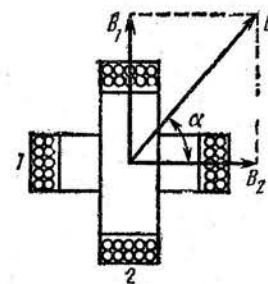


Рис. 10.1. Образование вращающегося магнитного поля с помощью двух катушек

Магнитные поля катушек, налагаясь друг на друга, образуют результирующее поле. Модуль вектора индукции результирующего магнитного поля определим из векторной диаграммы по теореме Пифагора:

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} = \sqrt{B_m^2 \sin^2 \omega t + B_m^2 \cos^2 \omega t} = B_m.$$

Таким образом, индукция результирующего магнитного поля оказывается не зависящей от времени величиной, равной максимальному значению индукции поля одной катушки. Это значит, что магнитные поля первой и второй катушек меняются так согласованно, что результирующее поле остается постоянным по величине.

Направление силовых линий результирующего магнитного поля характеризуется направлением вектора  $\vec{B}$ , который образует угол  $\alpha$  с горизонтальной осью и определяется из выражения

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_1}{B_2} = \frac{B_m \sin \omega t}{B_m \cos \omega t} = \operatorname{tg} \omega t.$$