

Часть вторая. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

9. Трансформаторы

Трансформатором называется электромагнитное статическое устройство, предназначенное для преобразования параметров электрической энергии в цепях переменного тока. С помощью трансформаторов можно изменить величину напряжения, тока, начальной фазы и частоты, т.е. любого из параметров, определяющих напряжение или ток в цепи. В данном курсе мы ограничимся рассмотрением наиболее распространённого вида трансформаторов – трансформатора напряжения, т.е. устройства, предназначенного для преобразования одного переменного синусоидального напряжения в другое той же частоты.

Вся электрическая энергия, вырабатываемая промышленным способом, проходит несколько стадий преобразования напряжения с помощью трансформаторов. Вырабатывать энергию с напряжениями безопасными для потребителя невыгодно, т.к. при таких напряжениях очень дорогой будет её передача и распределение. Передача энергии производится при напряжениях от 110 до 1150 кВ. Производство энергии при таких напряжениях невозможно, т.к. невозможно выполнить в этих условиях электрическую изоляцию генераторов. Напряжение генераторов обычно не превосходит 35 кВ, поэтому с помощью трансформаторов это напряжение повышается до уровня линии электропередачи, а у потребителя оно несколькими ступенями понижается до 380/220 В. Однако многие устройства не могут работать и при таком напряжении, в частности устройства автоматики, бытовой техники, компьютеры и т.п. Поэтому они содержат один или несколько трансформаторов, преобразующих сетевое напряжение к необходимому для них уровню питания.

9.1. Устройство и принцип действия

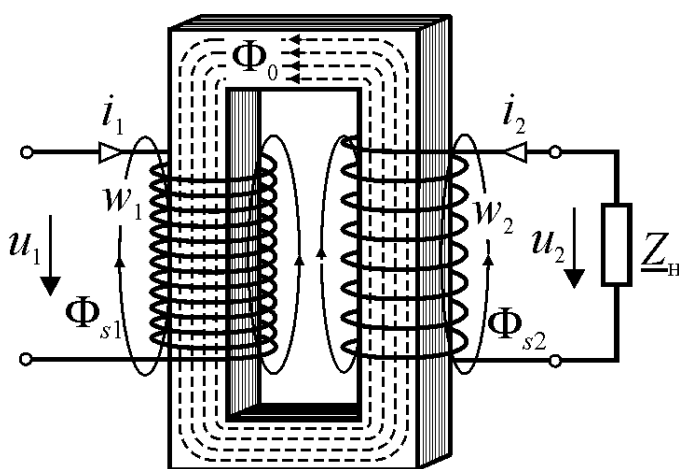


Рис. 9.1

Простейший трансформатор состоит из замкнутого магнитопровода и двух обмоток в виде цилиндрических катушек (рис. 9.1).

Одна из обмоток подключается к источнику переменного синусоидального тока с напряжением u_1 и называется первичной обмоткой. К другой обмотке подключается нагрузка трансформатора. Эта обмотка называется вторичной обмоткой.

Переменный синусоидальный ток i_1 , протекающий по первичной обмотке трансформатора, возбуждает

в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ_0 , который пронизывает витки обеих обмоток и наводит в них ЭДС e_1 и e_2 с амплитудами пропорциональными числам витков w_1 и w_2 (см. выражение (8.2)). Величина ЭДС первичной обмотки E_1 практически равна напряжению питания U_1 и действует почти в противофазе. Поэтому величина тока в первичной обмотке определяется разностью $U_1 - E_1$. При подключении нагрузки ко вторичной обмотке в ней под действием ЭДС e_2 возникает переменный синусоидальный ток i_2 , который возбуждает в магнитопроводе магнитный поток, направленный встречно по отношению к магнитному потоку, создаваемому первичной обмоткой. В результате поток в магнитопроводе Φ_0 уменьшается, что приводит к уменьшению ЭДС E_1 и увеличению разности $U_1 - E_1$. Вследствие чего ток первичной обмотки I_1 увеличивается и восстанавливает величину магнитного потока Φ_0 . Таким образом, посредством ЭДС первичной обмотки в магнитопроводе трансформатора автоматически поддерживается постоянный магнитный поток.

По отношению к нагрузке вторичная обмотка трансформатора является источником электрической энергии с ЭДС e_2 . Пренебрегая потерями во вторичной обмотке можно считать, что напряжение в нагрузке $U_2 \approx E_2$, а т.к. $U_1 \approx E_1$ и ЭДС обмоток пропорциональны числам витков, то соотношение напряжений питания трансформатора и нагрузки также определяется соотношением чисел витков обмоток, т.е.

$$U_1 / U_2 \approx E_1 / E_2 = w_1 / w_2 = k. \quad (9.1)$$

Величина k называется *коэффициентом трансформации*. Следовательно, для получения требуемого напряжения в нагрузке нужно изготовить трансформатор с заданным соотношением чисел витков первичной и вторичной обмоток, т.е. с заданным коэффициентом трансформации. Если на одном магнитопроводе разместить несколько обмоток с разными числами витков, то каждая из них будет отдельным источником питания с напряжением, определяемым числом её витков. Если число витков вторичной обмотки меньше числа витков первичной $w_2 < w_1$, то $k > 1$ и напряжение в нагрузке будет меньше напряжения на входе трансформатора. Такой трансформатор называется *понижающим*. В противном случае, т.е. при $k < 1$, трансформатор называется *повышающим*.

Электрическая цепь вторичной обмотки трансформатора изолирована от цепи первичной обмотки. Энергия от источника питания передаётся в нагрузку посредством магнитного поля, возбуждаемого в магнитопроводе и единого для обеих обмоток. Таким образом, с помощью трансформатора можно не только создать любое напряжение в нагрузке, но и гальванически разделить электрические цепи переменного тока друг от друга.

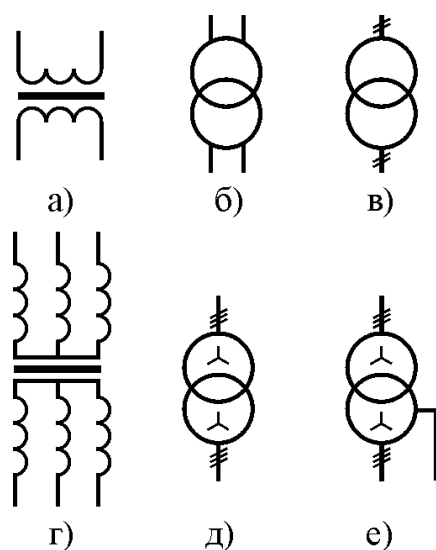


Рис. 9.2

Помимо потока в магнитопроводе, называемого *основным магнитным потоком*, протекающие по обмоткам токи создают потоки рассеяния Φ_{s1} и Φ_{s2} (рис. 9.1). Эти потоки незначительны по величине и не участвуют в процессе передачи энергии в нагрузку, т.к. сцепляются только с одной из обмоток трансформатора. Однако они вызывают дополнительное потребление трансформатором реактивной мощности, расходуемой на их формирование.

Трансформатор является очень эффективным техническим устройством. Правильно рассчитанный, изготовленный и эксплуатируемый трансформатор мощностью выше нескольких десятков киловатт имеет коэффициент полез-

ного действия более 95%

На рис. 9.2 показаны условные обозначения однофазных (*а, б, в*) и трёхфазных (*г, д, е*) трансформаторов.

Вопросы для самопроверки

1. Для чего предназначен трансформатор?
2. Как устроен трансформатор?
3. Что такое коэффициент трансформации?
4. Какие магнитные потоки различают в трансформаторе?
5. Чем отличается основной магнитный поток трансформатора от потоков рассеяния?
6. Каким образом стабилизируется основной магнитный поток в трансформаторе?

9.2. Математическая модель трансформатора

9.2.1. Уравнение магнитодвижущих сил и токов

В случае протекания токов в обеих обмотках МДС F , создающая основной магнитный поток, равна сумме МДС каждой из обмоток

$$F = F_1 + F_2 = i_1 w_1 + i_2 w_2 \quad (9.2)$$

При постоянном напряжении и частоте питания магнитный поток остаётся практически постоянным. Поэтому постоянной будет и результирующая МДС F во всех режимах работы трансформатора. В том числе и в режиме холостого хода, когда нагрузка отключена и ток вторичной обмотки равен нулю, т.е.

$$i_1 w_1 + i_2 w_2 = i_0 w_1 \approx \text{const}, \quad (9.3)$$

где i_0 – ток первичной обмотки трансформатора в режиме холостого хода.

Разделив обе части уравнения (9.3) на w_1 , получим

$$i_1 + i_2 w_2 / w_1 = i_0.$$

Обозначая $i_2 w_2 / w_1 = i_2 / k = i'_2$, получим уравнение токов трансформатора

$$i_0 = i_1 + i'_2 \Leftrightarrow \underline{I}_0 = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 \quad (9.4)$$

9.2.2. Уравнения электрического состояния

Уравнение Кирхгофа для контура первичной обмотки:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_{s1} \frac{di_1}{dt} - e_1,$$

где R_1 и L_{s1} – активное сопротивление провода и индуктивность рассеяния первичной обмотки, e_1 – ЭДС, наводимая в первичной обмотке основным магнитным потоком. В комплексной форме это уравнение имеет вид

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{s1} \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \quad (9.5)$$

Для вторичной обмотки также можно составить уравнение Кирхгофа

$$e_2 = R_2 i_2 + L_{s2} \frac{di_2}{dt} + u_2$$

где R_2 и L_{s2} – активное сопротивление провода и индуктивность рассеяния вторичной обмотки; e_2 – ЭДС, наводимая во вторичной обмотке основным магнитным потоком; u_2 – падение напряжения в нагрузке трансформатора. Отсюда в комплексной форме:

$$\underline{E}_2 = R_2 \underline{I}_2 + jX_{s2} \underline{I}_2 + \underline{U}_2, \quad (9.6)$$

9.3. Схема замещения

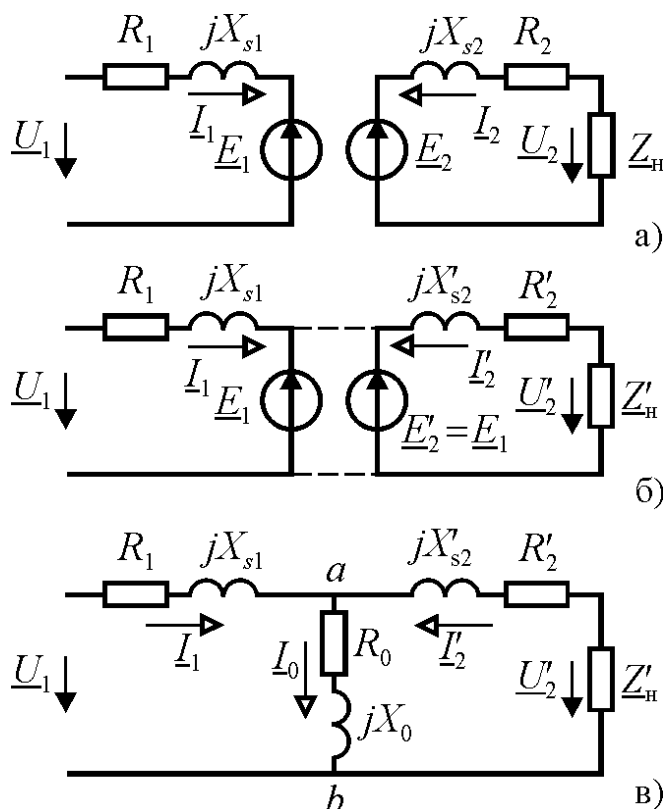


Рис. 9.3

Уравнения (9.5) и (9.6) соответствуют двум электрически несвязанным цепям рис. 9.3, а. Связать эти цепи можно, если ЭДС источников \underline{E}_1 и \underline{E}_2 одинаковы. Тогда их можно заменить одним общим для обеих цепей источником. Величина ЭДС \underline{E}_2 определяется числом витков вторичной обмотки $E_2 = 4,44 w_2 f \Phi_{0m}$. Умножив уравнение (9.6) на коэффициент трансформации, получим

$$k \underline{E}_2 = k R_2 \underline{I}_2 + j k X_{s2} \underline{I}_2 + k \underline{U}_2,$$

где

$$k E_2 = E'_2 = \frac{w_1}{w_2} 4,44 w_2 f \Phi_{0m} = E_1.$$

Таким образом, после умножения ЭДС источника вторичной

обмотки становится равной ЭДС источника первичной обмотки.

Математически операция умножения на k уравнения (9.6) вполне корректна, но после этого уравнение соответствует электрической цепи с другими значениями активной и реактивной мощности. Действительно, $kR_2I_2^2 \neq R_2I_2^2$; $kX_{s2}I_2^2 \neq X_{s2}I_2^2$ и для выполнения условия инвариантности мощности нужно умножить и разделить первые два слагаемых в правой части уравнения на k и отнести делитель к значению тока. Тогда $k^2R_2(I_2/k)^2 = R_2I_2^2$; $k^2X_{s2}(I_2/k)^2 = X_{s2}I_2^2$ и уравнение (9.6) примет вид

$$\underline{E}'_2 = \underline{E}_1 = R'_2\underline{I}'_2 + jX'_{s2}\underline{I}'_2 + \underline{U}'_2, \quad (9.7)$$

где $R'_2 = k^2R_2$; $X'_{s2} = k^2X_{s2}$; $\underline{Z}'_n = k^2\underline{Z}_n$; $\underline{I}'_2 = I_2/k$; $\underline{U}'_2 = k\underline{U}_2$ – *приведённые параметры и величины электрической цепи вторичной обмотки*. Это уравнение называется уравнением вторичной обмотки приведённого трансформатора.

Схема замещения, соответствующая уравнению (9.7), показана на рис. 9.3, б. Два одинаковых источника ЭДС можно заменить одним, если объединить точки их подключения. В результате образуется ветвь, в которой в соответствии с уравнением (9.4) должен протекать ток \underline{I}_0 , равный току первичной обмотки в режиме холостого хода (рис. 9.3, в). Чтобы учесть в схеме тепловые потери в магнитопроводе и энергию магнитного поля в эту ветвь нужно включить активное и реактивное сопротивления R_0 и X_0 , аналогичные сопротивлениям катушки с ферромагнитным сердечником. При этом значения сопротивлений должны удовлетворять условию $\underline{U}_{ab} = -\underline{E}_1 = j\omega w_1 \underline{\Phi}_0 = \underline{I}_0(R_0 + jX_0)$. Таким образом, ток I_0 определяет основной магнитный поток и называется поэтому *намагничивающим током*. Мощность $R_0I_0^2$, рассеиваемая активным сопротивлением R_0 , будет равна мощности тепловых потерь в магнитопроводе, а реактивная мощность $X_0I_0^2$ – мощности, расходуемой на возбуждение поля, образующего поток в магнитопроводе. Следует заметить, что намагничивающий ток не является реальным током, протекающим между узлами ab электрической цепи рис. 9.3, в. Этот ток, как и вся схема замещения, является расчётным эквивалентом электромагнитных процессов в трансформаторе. Он представляет собой часть тока первичной обмотки, расходуемую на возбуждение магнитного поля и компенсацию тепловых потерь в магнитопроводе. Намагничивающий ток выделяется из тока первичной обмотки аналогично разделению тока в электрической цепи на активную и реактивную составляющие.

Таким образом, схема замещения рис. 9.3, в соответствует уравнениям токов и состояния электрических цепей обмоток трансформатора и учитывает все электромагнитные процессы, связанные с его работой. При этом в результате приведения параметров, тока, напряжения и ЭДС вторичной обмот-

ки к числу витков первичной вместо магнитной связи между обмотками трансформатора в схеме замещения появилась эквивалентная электрическая связь.

Вопросы для самопроверки

1. При каком условии получают уравнение токов трансформатора?
2. При каком условии осуществляют приведение параметров вторичной обмотки?
3. Для чего параметры вторичной обмотки приводят к числу витков первичной обмотки?
4. Что такое намагничивающий ток?
5. Как связаны между собой реальные и приведённые параметры цепи вторичной обмотки?

9.4. Векторная диаграмма

Векторная диаграмма даёт наглядное представление о соотношениях между различными величинами, характеризующими работу трансформатора. С её помощью можно проследить влияние величины и характера нагрузки в различных режимах.

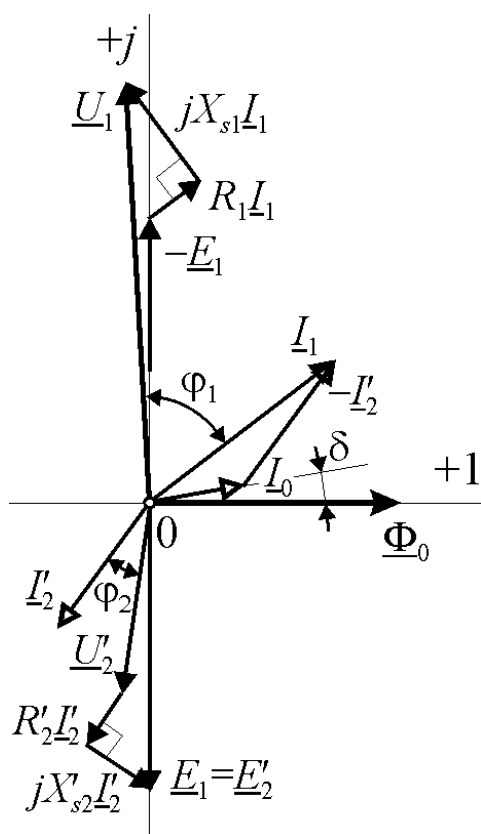


Рис. 9.4

Построение диаграммы лучше начинать с векторов независимых от режима работы трансформатора. Такими векторами являются векторы основного магнитного потока Φ_0 , тока холостого хода I_0 и ЭДС E_1 и E'_2 , наводимых основным магнитным потоком в первичной и вторичной обмотках.

Начальную фазу основного магнитного потока можно принять равной нулю и построить на вещественной оси вектор Φ_0 , а затем вектор I_0 , опережающий основной поток на угол магнитных потерь δ .

Вектор ЭДС основного потока первичной обмотки E_1 и равный ему вектор приведённой ЭДС вторичной обмотки E'_2 отстают по фазе от потока Φ_0 на 90° и располагаются на мнимой оси в отрицательном направлении.

Полагая нагрузку трансформатора активно-индуктивной, строим вектор тока вторичной обмотки I'_2 с отставанием по фазе

на некоторый угол от E'_2 . Теперь, в соответствии с (9.4), можно построить

вектор тока в первичной обмотке \underline{I}_1 , как разность векторов тока холостого хода \underline{I}_0 и тока \underline{I}'_2 .

Определив положение векторов ЭДС и токов, можно строить векторы, соответствующие уравнениям (9.5) и (9.7). Для построения вектора напряжения на входе трансформатора \underline{U}_1 суммируем вектор ЭДС $-\underline{E}_1$, вектор падения напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки $R_1\underline{I}_1$, совпадающий по направлению с вектором тока \underline{I}_1 , и вектор падения напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния $jX_{s1}\underline{I}_1$, опережающий вектор тока на 90° .

Вектор напряжения в нагрузке получается вычитанием из вектора ЭДС \underline{E}'_2 вектора падения напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния $jX'_{s2}\underline{I}'_2$, опережающего вектор тока \underline{I}'_2 на 90° , и вектора падения напряжения на активном сопротивлении вторичной обмотки $R'_2\underline{I}'_2$, совпадающего по направлению с вектором тока \underline{I}'_2 .

Следует заметить, что на рис. 9.4 векторы $R_1\underline{I}_1$, $jX_{s1}\underline{I}_1$, $R'_2\underline{I}'_2$ и $jX'_{s2}\underline{I}'_2$ показаны в сильно увеличенном масштабе для того, чтобы проследить их положение относительно других векторов. На самом деле эти напряжения приблизительно на порядок меньше ЭДС основного магнитного потока.

9.5. Режим холостого хода

Режимом холостого хода трансформатора называется режим при разомкнутой цепи вторичной обмотки.

Полагая в уравнениях (9.4)-(9.6) $\underline{I}_2 = 0$, получим

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0; \underline{U}_1 = R_1\underline{I}_0 + jX_{s1}\underline{I}_0 - \underline{E}_1; \underline{E}_2 = \underline{U}_2.$$

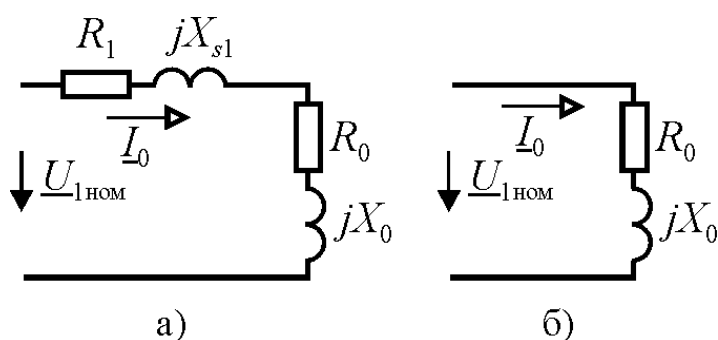


Рис. 9.5

В режиме холостого хода трансформатор по существу является катушкой с ферромагнитным сердечником. Поэтому процессы и явления, рассмотренные в разделе 8.1, полностью соответствуют этому режиму, включая векторную диаграмму и схему замещения (рис. 9.5, а).

При номинальном напряжении питания ток первичной обмотки в режиме холостого хода составляет 3...10% от тока при номинальной нагрузке, причём меньшие значения соответствуют трансформаторам большей мощности. Поэтому падения на-

пряжения на активном сопротивлении обмотки $R_1 I_0$ и на индуктивном сопротивлении потока рассеяния $X_{s1} I_0$ пренебрежимо малы и $U_1 \approx E_1$. В то же время, при разомкнутой цепи вторичной обмотки напряжение на её выводах в точности равно ЭДС, наводимой основным магнитным потоком $U_2 = E_2$. Следовательно, отношение напряжений на первичной и вторичной обмотках в режиме холостого хода будет наилучшим приближением к значению коэффициента трансформации

$$k = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad (9.8)$$

Активная мощность, потребляемая трансформатором из сети P_0 , расходуется на покрытие тепловых потерь в первичной обмотке P_1 и в магнитопроводе $P_{ст}$ (мощность потерь в «стали»)

$$P_0 = P_1 + P_{ст} = R_1 I_0^2 + P_{ст},$$

но потери в обмотке от тока холостого хода пренебрежимо малы, т.к. этот ток очень мал по сравнению с номинальным током. Поэтому потребляемая мощность практически соответствует потерям энергии в магнитопроводе $P_0 \approx P_{ст}$.

С учётом этого, а также соотношения магнитных потоков $\Phi_0 \gg \Phi_{s1} \Rightarrow X_0 \gg X_{s1}$, схема замещения трансформатора в режиме холостого хода может быть представлена двумя элементами рис. 9.5, б.

Ток холостого хода трансформатора содержит активную и реактивную составляющие. Они соответствуют активной и реактивной мощности, потребляемой трансформатором. Обычно активная мощность не превышает 10% реактивной мощности и угол магнитных потерь составляет $\delta < 5^\circ$.

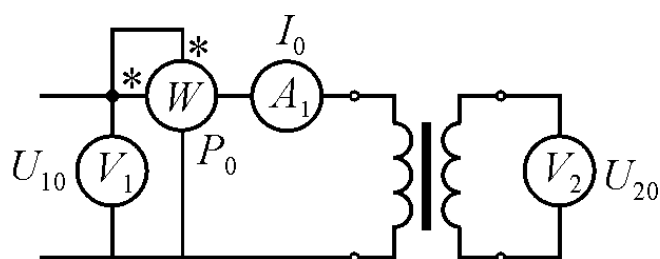


Рис. 9.6

Опыт холостого хода. Для определения потерь в магнитопроводе и параметров схемы замещения проводится опыт холостого хода. Он выполняется по схеме рис. 9.6. На первичную обмотку подаётся номинальное напряжение $U_{10} = U_{1ном}$, а ко вторичной обмотке подключается

вольтметр V_2 с возможно большим входным сопротивлением так, чтобы $I_2 \approx 0$.

По результатам измерений по выражению (9.8) определяют коэффициент трансформации, а также активное сопротивление цепи

$$R_{10} = R_1 + R_0 = P_0 / I_0^2 \approx R_0$$

и индуктивное сопротивление цепи

$$X_{10} = X_{s1} + X_0 = \sqrt{(U_{10}/I_{10})^2 - R_{10}^2} \approx X_0.$$

Напряжение на вторичной обмотке трансформатора в опыте холостого хода считается номинальным напряжением $U_{20} = U_{2\text{ном}}$ и указывается в справочных данных.

Вопросы для самопроверки

1. Какой режим трансформатора называют режимом холостого хода?
2. Почему отношение напряжений на первичной и вторичной обмотках трансформатора в режиме холостого хода является наилучшим приближением к значению коэффициента трансформации?
3. На что расходуется активная мощность, потребляемая трансформатором в режиме холостого хода?
4. Как выглядит схема замещения трансформатора в режиме холостого хода?
5. Как соотносятся между собой величины активной и реактивной мощностей, потребляемых трансформатором в режиме холостого хода, и почему?
6. Как проводится опыт холостого хода? Нарисуйте схему опыта.
7. Как на основании опыта холостого хода определяются параметры ветви намагничивания схемы замещения трансформатора?

9.6. Режим короткого замыкания

Режим короткого замыкания это режим, при котором выводы вторичной обмотки замкнуты между собой. Такой режим при номинальном или близком к номинальному напряжению питания является аварийным и может привести к разрушению трансформатора, но при пониженном напряжении его используют для определения параметров обмоток. В этом случае он называется *опытом короткого замыкания* и является, наряду с опытом холостого хода, обязательным при испытаниях трансформатора.

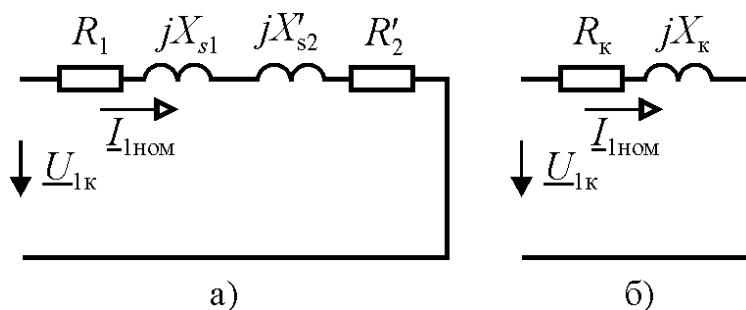


Рис. 9.7

В опыте короткого замыкания на первичную обмотку трансформатора подают напряжение $U_{1к}$, при котором ток в ней равен номинальному значению $I_{1к} = I_{\text{ном}}$. Это напряжение составляет 5...10% от номинального, поэтому примерно во столько же раз

снижается основной магнитный поток, а намагничивающий ток, вследствие выхода материала сердечника из режима насыщения снижается практически до нуля $I_0 = I_{0к} \approx 0$. При этом уравнение токов (9.4) превращается в прибли-

жённое равенство $I_{1к} \approx -I'_{2к} = -I_{2к}/k$. Следовательно, в опыте короткого замыкания при номинальном токе в первичной обмотке ток вторичной обмотки будет также номинальным, а их отношение с хорошим приближением будет равно коэффициенту трансформации $k = I_{2к}/I_{1к}$. С учётом того, что $I_{0к} \approx 0$ схема замещения опыта короткого замыкания приобретает вид рис. 9.7, где $R_k = R_1 + R'_2$; $X_k = X_{s1} + X'_{s2}$.

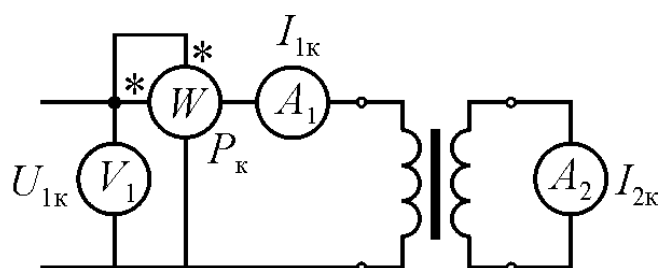


Рис. 9.8

Опыт короткого замыкания проводится по схеме рис. 9.8. Во вторичную обмотку включают амперметр A_2 с возможно меньшим входным сопротивлением так, чтобы $U_2 \approx 0$. Напряжение на первичной обмотке постепенно увеличивают от нуля до тех пор,

пока ток первичной обмотки не станет равным номинальному. В этом режиме измеряют напряжение на первичной обмотке $U_{1к}$, а также потребляемую мощность и токи в обмотках.

Отношение напряжение на первичной обмотке в опыте короткого замыкания к номинальному значению, выраженное в процентах,

$$u_k \% = (U_{1к} / U_{1ном}) \cdot 100 \quad (9.9)$$

называется *напряжением короткого замыкания* и указывается в справочных данных. В соответствии со схемой замещения рис. 9.7, б, это напряжение можно разделить на активную и реактивную составляющие

$$u_{ак} \% = (R_k I_{1ном} / U_{1ном}) \cdot 100; \quad u_{рк} \% = (X_k I_{1ном} / U_{1ном}) \cdot 100.$$

Активная мощность, потребляемая трансформатором в опыте короткого замыкания, практически полностью расходуется на компенсацию тепловых потерь в обмотках, поэтому её называют также мощностью потерь в «меди»:

$$P_{1к} = R_1 I_1^2 + R'_2 I_2^2 = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2.$$

По данным опыта короткого замыкания можно определить также суммарное активное сопротивление обмоток

$$R_k = R_1 + R'_2 = P_k / I_{1ном}^2$$

и суммарное реактивное сопротивление

$$X_k = X_{s1} + X'_{s2} = \sqrt{(U_{1к} / I_{1ном})^2 - R_k^2}$$

В опыте короткого замыкания можно также проверить значение коэффициента трансформации, полученное в опыте холостого хода

$$k \approx I_{2к} / I_{1ном}.$$

Параметры схемы замещения и напряжение трансформатора в режиме короткого замыкания позволяют произвести оценку его работы под нагрузкой.

Вопросы для самопроверки

1. Какой режим трансформатора называют режимом короткого замыкания?
2. Чем отличается режим короткого замыкания от опыта короткого замыкания?
3. На что расходуется активная мощность, потребляемая трансформатором в опыте короткого замыкания?
4. Как выглядит схема замещения трансформатора в опыте короткого замыкания?
5. Как соотносятся между собой активная и реактивная мощности, потребляемых трансформатором в опыте короткого замыкания, и почему?
6. Как проводится опыт короткого замыкания? Нарисуйте схему опыта.
7. Что такое напряжение короткого замыкания?
8. Как на основании опыта короткого замыкания определяются параметры схемы замещения трансформатора?

9.7. Внешняя характеристика

Внешней характеристикой называется зависимость вторичного напряжения трансформатора от тока нагрузки $U_2 = f(I_2)$.

Эта характеристика имеет большое значение для эксплуатации трансформатора, т.к. стандартом на качество электроэнергии определяется допустимое отклонение напряжения в сети от номинального значения. Обычно оно не должно превышать $\pm 5\%$. Отклонение напряжения опасно для многих видов нагрузки трансформатора, поэтому нужно уметь произвести его оценку.

Для этого используют упрощённую схему замещения трансформатора рис. 9.9, а, в которой исключена цепь намагничи-

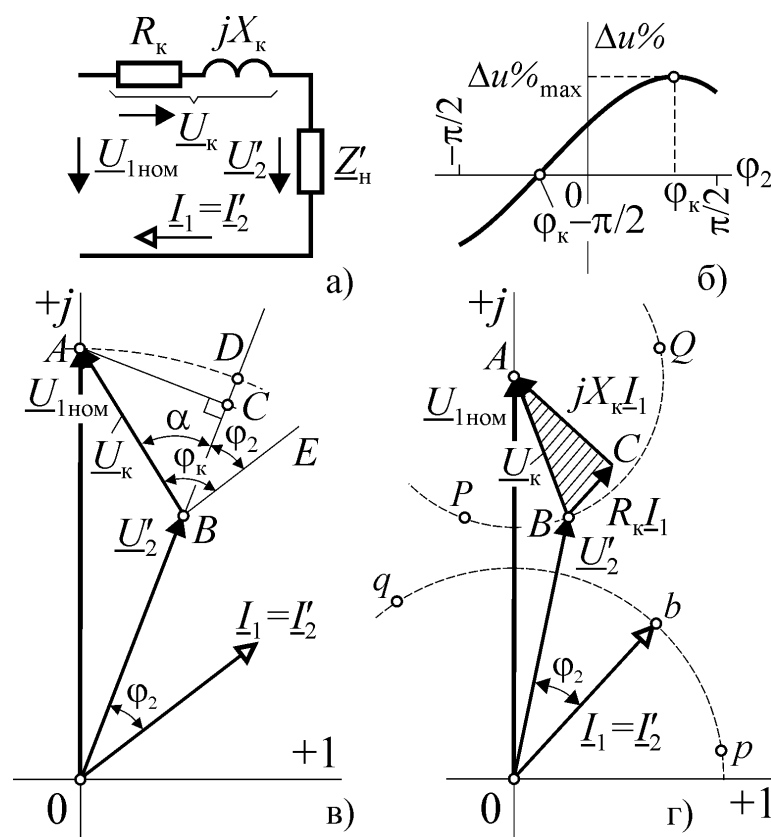


Рис. 9.9

вания. На практике это вполне допустимо, т.к. намагничивающий ток I_0 при номинальном напряжении на первичной обмотке составляет несколько процентов и существенно не влияет на результат вычисления. Изменение напряжения в нагрузке происходит за счёт падения напряжения U_k на активном и реактивном сопротивлениях обмоток трансформатора R_k и X_k .

Для оценки отклонения напряжения от номинального значения используется величина, называемая *процентным изменением напряжения трансформатора*

$$\Delta u\% = \frac{U_{2\text{НОМ}} - U_2}{U_{2\text{НОМ}}} \cdot 100 = \frac{U_{1\text{НОМ}} - U_2'}{U_{1\text{НОМ}}} \cdot 100. \quad (9.10)$$

Расчётную формулу для $\Delta u\%$ можно получить из векторной диаграммы рис. 9.9, в. На ней вектор напряжения первичной обмотки $\underline{U}_{1\text{НОМ}}$ совмещён с положительным направлением мнимой оси. Отклонение напряжения равно разности модулей векторов $\underline{U}_{1\text{НОМ}}$ и \underline{U}_2' , поэтому если от начала координат на линии продолжения вектора \underline{U}_2' построить отрезок $0D = 0A = m_u U_{1\text{НОМ}}$, то искомая величина в некотором масштабе m_u будет равна отрезку BD .

Напряжение U_k обычно не превышает 10...15% от номинального, поэтому угол между векторами $\underline{U}_{1\text{НОМ}}$ и \underline{U}_2' мал и отрезок BD приблизительно равен отрезку BC , отсекаемому перпендикуляром, опущенным из точки A на линию $0D$. Тогда

$$\Delta u\% = \frac{BD}{0D} \cdot 100 \approx \frac{BC}{0D} \cdot 100. \quad (9.11)$$

Проведём через точку B линию BE параллельно вектору тока \underline{I}_1 . Угол α прямоугольного треугольника ABC можно определить как $\alpha = \varphi_k - \varphi_2$, где $\varphi_k = \arctg(X_k / R_k)$. Отсюда.

$$BC = U_k \cos(\varphi_k - \varphi_2) \quad (9.12)$$

Падение напряжения U_k пропорционально величине тока нагрузки $U_k = I_2' Z_k = I_1 Z_k$. Введём понятие коэффициента нагрузки трансформатора как отношения тока вторичной обмотки к его номинальному значению $\beta = I_2 / I_{2\text{НОМ}} = I_2' / I_{2\text{НОМ}}'$. Тогда $U_k = \beta U_{k\text{н}}$, где $U_{k\text{н}}$ – напряжение U_k при номинальном токе, т.е. в опыте короткого замыкания. Отсюда с учётом выражений (9.9), (9.11) и (9.12) получим –

$$\Delta u\% = \beta \Delta u_k\% \cos(\varphi_k - \varphi_2). \quad (9.13)$$

Выражение (9.13) позволяет при известном относительном значении тока и характере нагрузки определить абсолютное значение напряжения на вторичной обмотке и построить внешнюю характеристику:

$$U_2 = U_{2\text{ном}} \left(1 - \frac{\Delta u\%}{100} \right). \quad (9.14)$$

Процентное изменение напряжения положительно, если $U_2 < U_{2\text{ном}}$. Из выражения (9.13) следует, что при активной и активно-индуктивной нагрузке с увеличением угла сдвига фаз φ_2 напряжение на вторичной обмотке трансформатора U_2 уменьшается, и достигает минимума при $\varphi_k - \varphi_2 = 0$, т.е. когда $\varphi_2 = \varphi_k$ и $\Delta u\% = \Delta u\%_{\text{max}}$ (рис. 9.9, б). В случае активно-ёмкостной нагрузки ($\varphi_2 < 0$) при условии $\varphi_2 = \varphi_k - \pi/2$ значение $\Delta u\%$ равно нулю (рис. 9.9, б), поэтому напряжение U_2 равно номинальному и не зависит от величины нагрузки. Дальнейшее уменьшение φ_2 ($\varphi_2 < \varphi_k - \pi/2$) приводит к изменению знака $\Delta u\%$, при этом напряжение U_2 будет больше напряжения холостого хода. Независимо от характера нагрузки, кроме случая $\varphi_2 = \varphi_k - \pi/2$, отклонение напряжения линейно возрастает с увеличением тока I_2 (рис. 9.10).

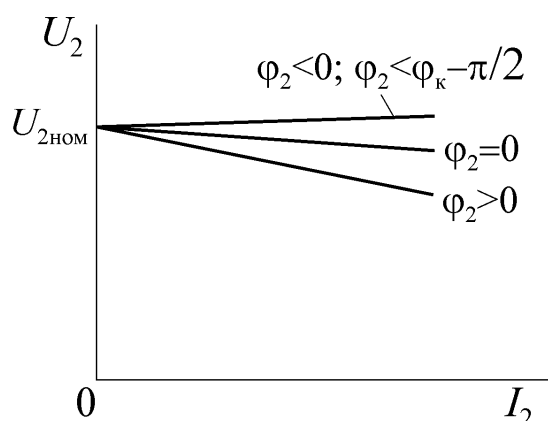


Рис. 9.10

Более наглядно зависимость выходного напряжения трансформатора от характера нагрузки можно проследить с помощью векторной диаграммы рис. 9.9, з. Если, сохраняя полное сопротивление $Z'_H = \text{const}$, изменять угол φ_2 , то конец вектора тока $\underline{I}_1 = \underline{I}'_2$ будет перемещаться по дуге окружности pq радиусом $|\underline{I}_1| = \text{const}$. Напряжение первичной обмотки $\underline{U}_{1\text{ном}} = \text{const}$, поэтому прямоугольный треугольник ABC , образованный векторами $R_k \underline{I}_1$, $jX_k \underline{I}_1$ и $\underline{U}_k = \underline{Z}_k \underline{I}_1$, при повороте вектора \underline{I}_1 будет вращаться в противоположную сторону относительно вершины A , сохраняя размеры, а точка B , соответствующая положению конца вектора приведённого напряжения нагрузки \underline{U}'_2 — скользить по дуге PQ окружности радиусом $Z_k I_1$. На рисунке отдельно показаны две пары точек $p-P$ и $q-Q$, соответствующие активно-индуктивной и активно-ёмкостной нагрузкам, по ним хорошо видно, что в первом случае $U'_{2p} \ll U_1$, а во втором — $U'_{2q} \gg U_1$.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое внешняя характеристика?
2. Нарисуйте упрощённую схему замещения трансформатора.
3. Как определяется процентное изменение напряжения трансформатора?
4. Как влияет коэффициент мощности нагрузки на изменение напряжения трансформатора?

5. Как построить внешнюю характеристику трансформатора, используя процентное изменение напряжения?
6. Чем объясняется возрастание напряжения на выходе трансформатора при увеличении тока в случае активно-ёмкостной нагрузки?

9.8. Потери энергии в трансформаторе

Уравнение баланса активной мощности для трансформатора имеет вид

$$P_1 = P_2 + \Delta P = P_2 + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{м}}, \quad (9.15)$$

где P_1 – активная мощность, получаемая от источника питания; $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$ – активная мощность нагрузки, подключённой к трансформатору; $\Delta P = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{м}} = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_1 + \Delta P_2$ – суммарная мощность потерь в трансформаторе, складывающаяся из мощности потерь в «стали» $\Delta P_{\text{ст}}$ и «меди» $\Delta P_{\text{м}}$ первичной и вторичной обмоток (ΔP_1 и ΔP_2). На рис. 9.11 приведена энергетическая диаграмма трансформатора, соответствующая уравнению (9.15).

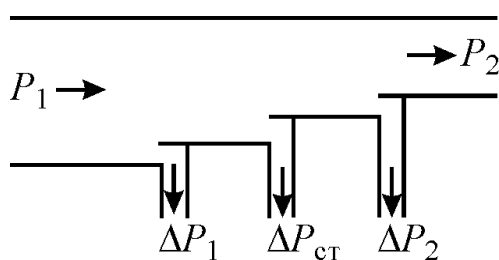


Рис. 9.11

Тепловые потери энергии в магнитопроводе $\Delta P_{\text{ст}} = P_0$ зависят от напряжения питания и частоты, а т.к. эти величины при нормальной эксплуатации трансформатора остаются постоянными, то потери в «стали» также сохраняют своё значение и называются *постоянными потерями*.

Потери в обмотках $\Delta P_{\text{м}}$ зависят от протекающего по ним тока и изменяются при изменении нагрузки. Поэтому этот вид потерь называется *переменными потерями*. Зависимость потерь в «меди» от тока квадратичная. Пользуясь коэффициентом нагрузки β и полагая, что опыт короткого замыкания проводится при номинальном токе первичной обмотки, их можно представить как $\Delta P_{\text{м}} = R_{\text{к}} I_{\text{к}}^2 = \beta^2 R_{\text{к}} I_{1\text{ном}}^2 = \beta^2 P_{\text{к}}$

Активная мощность потребляемая нагрузкой также зависит от тока, поэтому, пренебрегая изменением напряжения, её можно представить в виде $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \beta U_2 I_{2\text{ном}} \cos \varphi_2 = \beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2$, где $S_{\text{ном}} = U_{2\text{ном}} I_{2\text{ном}}$ – номинальная полная мощность трансформатора, приводимая в справочных данных.

Раскрывая выражения для составляющих активной мощности в уравнении (9.15), можно определить КПД трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{\text{к}}}. \quad (9.16)$$

Из выражения (9.16) следует, что КПД трансформатора зависит от характера и коэффициента нагрузки. Функция $\eta = f(\beta)$ имеет максимум при некотором оптимальном значении $\beta_{\text{опт}}$ –

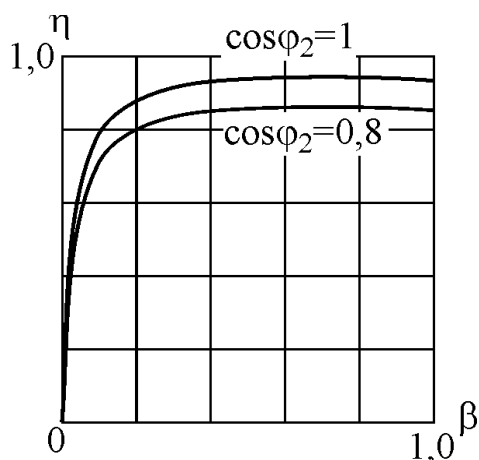


Рис. 9.12

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{P_0 / P_k} \quad (9.17)$$

Это означает, трансформатор будет работать с максимальным значением КПД при полной нагрузке ($\beta_{\text{опт}} = 1,0$) в том случае, если потери в «стали» равны потерям в «меди». Обычно значение $\beta_{\text{опт}}$ находится в пределах $\beta_{\text{опт}} = 0,5 \dots 0,7$, т.е. трансформатор работает с предельным КПД при нагрузке, составляющей 50...70% от номинальной. Типичная зависимость $\eta = f(\beta)$ для различных значений коэффициента мощности нагрузки приведена на рис. 9.12.

Трансформатор является высокоэффективным преобразователем. Коэффициент полезного действия мощных трансформаторов доходит до 99,5%.

Вопросы для самопроверки

1. Составьте уравнение баланса активной мощности трансформатора.
2. Почему потери в «стали» называют постоянными потерями, а потери в «меди» переменными?
3. Как зависят потери в «меди» от нагрузки трансформатора?
4. При каком условии КПД трансформатора будет максимальным при номинальной нагрузке?
5. Какому коэффициенту нагрузки соответствует максимум КПД реального трансформатора?

9.9. Трёхфазные трансформаторы

Вся электрическая энергия, производимая промышленным способом,

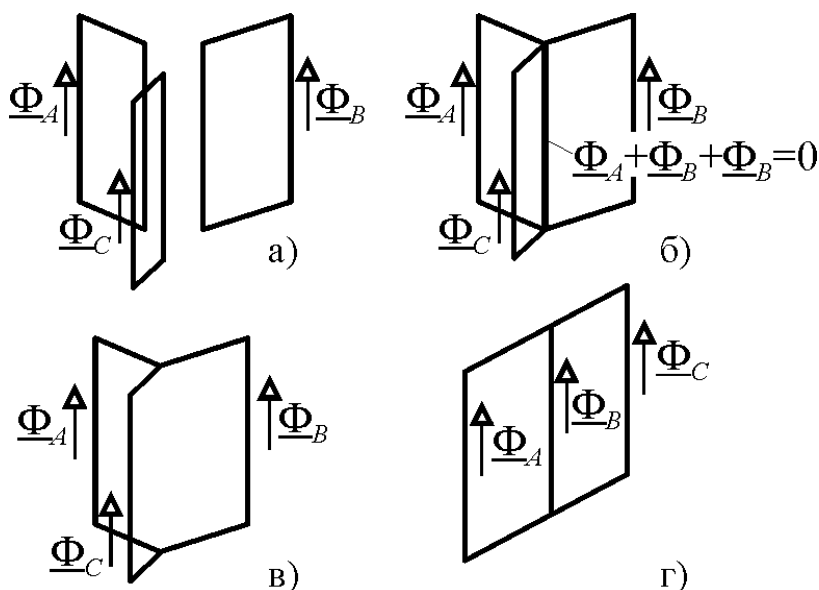


Рис. 9.13

передается и распределяется трёхфазными сетями. Преобразование напряжения в трёхфазной сети можно осуществлять тремя однофазными трансформаторами или специальным трансформатором, в котором магнитопроводы фаз объединены в общую магнитную систему. Такие трансформаторы на-

зываются *трёхфазными*.

На рис. 9.13, *а* схематично показаны три магнитопровода однофазных трансформаторов, работающих в трёхфазной сети. Симметричные фазные токи создают в магнитопроводах несвязанную симметричную систему магнитных потоков Φ_A, Φ_B, Φ_C . Если магнитопроводы объединить в один (рис. 9.13, *б*), то суммарный магнитный поток в центральном стержне по условию симметрии будет равен нулю и этот стержень можно удалить, не меняя режима работы магнитной цепи. В результате мы получим симметричный магнитопровод трёхфазного трансформатора (рис. 9.13, *в*), но изготавливать такую сложную пространственную конструкцию по многим причинам нецелесообразно. Поэтому стержни магнитопровода располагают в одной плоскости (рис. 9.13, *г*) и магнитные цепи отдельных фаз становятся несимметричными, т.к. длина средней линии магнитопровода фаз *A* и *C* больше, чем фазы *B*. Однако эта асимметрия существенно не влияет на работу трансформатора, и все трёхфазные трансформаторы изготавливаются с несимметричными магнитопроводами. Объединение магнитопроводов в трёхфазных трансформаторах создаёт помимо электрической связи магнитную связь между фазами, которая должна учитываться при анализе электромагнитных процессов.

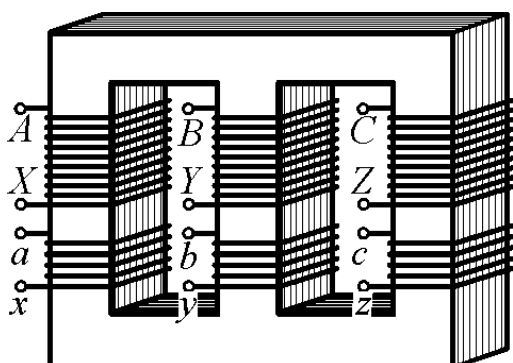


Рис. 9.14

Трёхфазные трансформаторы легче и дешевле группы из трёх однофазных, однако, в сетях большой мощности для преобразования напряжений используют и групповое решение. Это связано с тем, что изготовление и доставка крупного трёхфазного трансформатора может быть сложнее, чем трёх однофазных, или просто быть невозможной. Кроме того, выход из строя одной фазы в трансформаторной группе не требует замены или ремонта всего преобразователя. Это повышает надёжность системы, т.к. для устранения неисправности достаточно иметь резервный однофазный трансформатор, а повреждение нескольких фаз одновременно маловероятно.

Обмотки трёхфазного трансформатора маркируются следующим образом: начала фаз высшего напряжения обозначаются прописными латинскими буквами *A, B* и *C*, а концы – *X, Y* и *Z* (рис. 9.14). Обмотки фаз низшего напряжения обозначаются теми же буквами, но строчными, т.е. *a, b, c* и *x, y, z*. Обмотки фаз высшего и низшего напряжения могут объединяться в систему соединением звездой или треугольником. В первом случае соединение обозначается знаком Y , а во втором – Δ . Наличие вывода нулевой точки соединения в обозначении указывается индексом – Y_0 . Например, обозначение Y_0/Δ соответствует соединению обмоток высшего напряжения звездой с нулевым проводом, а обмоток низшего напряжения треугольником.

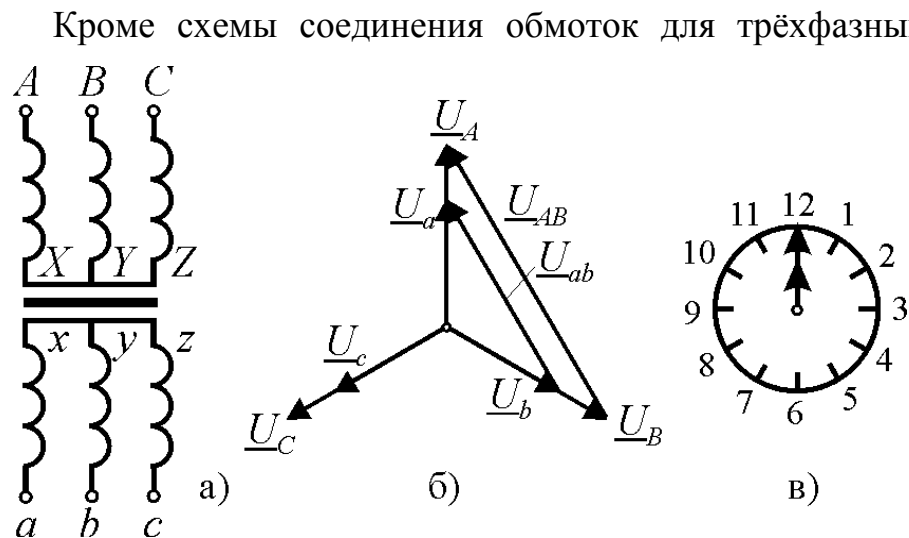


Рис. 9.15

Кроме схемы соединения обмоток для трёхфазных трансформаторов указывается угол сдвига фаз между линейными напряжениями высшего и низшего напряжения. По величине этого угла соединения делят на группы. При разных схемах угол сдвига фаз может быть раз-

личным, но кратным 30° , поэтому для обозначения группы соединения используют шкалу часов, совмещая вектор высшего линейного напряжения с двенадцатичасовым положением или нулём шкалы. Тогда вектор низшего линейного напряжения может занимать на шкале положения, соответствующие часам, которые и указывают в обозначении.

Например, при соединении обмоток Y/Y, т.е. «звезда-звезда», векторы линейных напряжений высшего и низшего напряжений имеют одинаковые направления (рис. 9.15, б). Поэтому, если совместить вектор \underline{U}_{AB} с положением часовой стрелки в 12(0) часов, то такое же положение займёт вектор низшего напряжения \underline{U}_{ab} и это соединение будет отнесено к нулевой группе с обозначением Y/Y-0.

В случае соединения обмоток по схеме Y/Δ (рис. 9.16). Вектор низшего напряжения $\underline{U}_{ab} = -\underline{U}_b$ будет смещён на 30° в сторону опережения по отношению к вектору \underline{U}_{AB} (рис. 9.16, б), т.е. займёт на шкале положение соответ-

ствующее 11 часам. Поэтому соединение будет отнесено к группе 11 и обозначено Y/Δ-11. Несмотря на то, что различными соединениями обмоток можно получить все группы, стандартом преду-

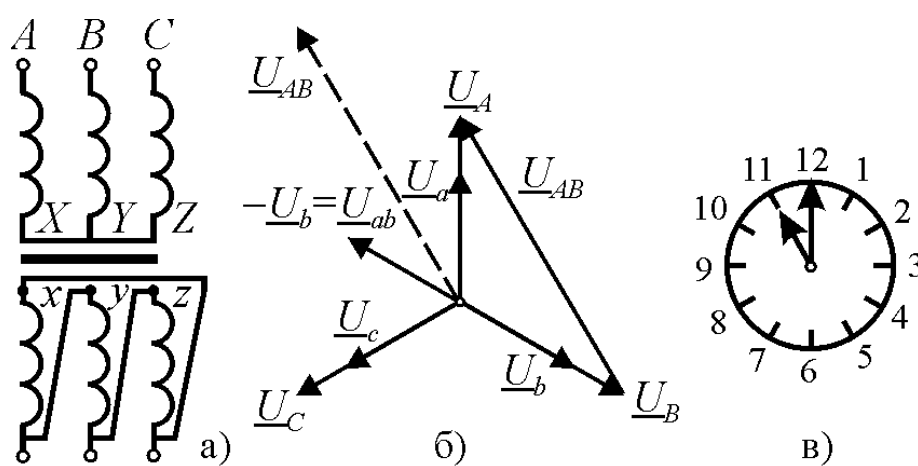


Рис. 9.16

смотрено только две из них – 0 и 11. На практике группе 0 соответствует один вид соединения Y/Y_0-0 , используемый в трансформаторах с высшим напряжением до 35 кВ и низшим 230 В или 400 В, а группе 11 – два соединения $Y/\Delta-11$ и $Y_0/\Delta-11$, используемых для мощных трансформаторов при более высоких напряжениях.

9.10. Автотрансформаторы

Автотрансформатор – это вид трансформатора, в котором между первичной и вторичной обмотками кроме магнитной существует также электрическая связь. Обычный трансформатор можно включить по схеме автотрансформатора, если к концу первичной обмотки подключить начало вторичной или если нагрузку подключить к имеющимся отводам первичной обмотки. Однако при этом не будут в полной мере использованы те преимущества, которые имеет автотрансформатор.

Электромагнитная схема понижающего и повышающего автотрансформаторов приведена на рис. 9.17 а и б.

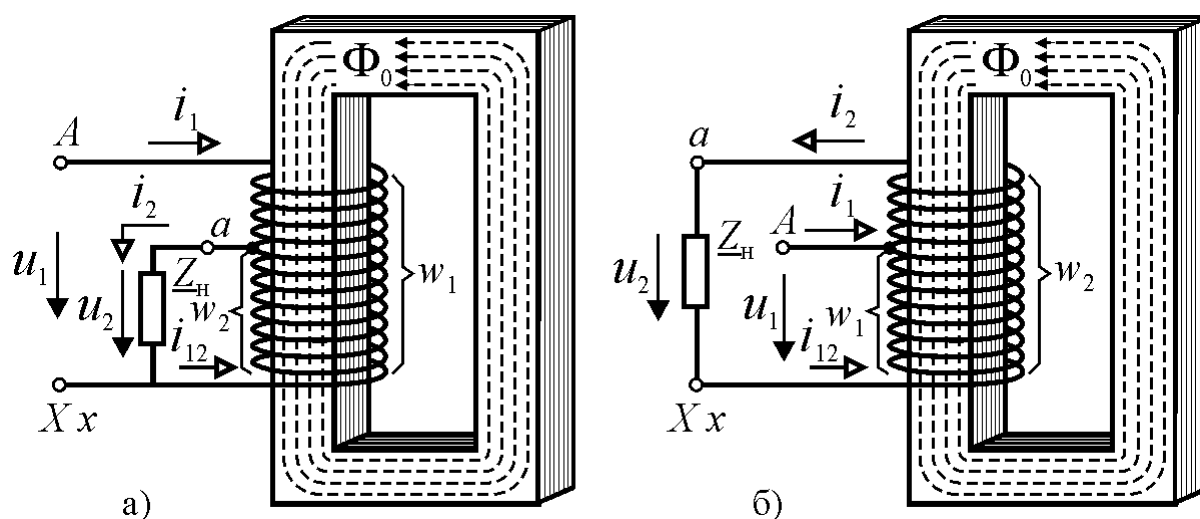


Рис. 9.17

Рассмотрим в качестве примера работу понижающего автотрансформатора рис. 9.17 а. Обмотка ax является вторичной и одновременно частью первичной обмотки Ax . Пренебрегая током намагничивания, для точки a можно записать

$$I_{12} = I_2 - I_1, \quad (9.18)$$

т.е. в витках вторичной обмотки протекает ток, равный разности токов первичной обмотки и нагрузки. Токи и ЭДС обмоток автотрансформатора связаны такими же соотношениями, как в трансформаторе

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}.$$

Поэтому при небольших значениях k ток в обмотке ax $I_{12} = I_1(k - 1)$ существенно меньше, чем ток I_1 , протекающий в части обмотки Aa , и её можно вы-

полнить проводом меньшего сечения, снизив тем самым стоимость и массу изделия.

Полная мощность автотрансформатора $S_{\text{пр}} = U_2 I_2$ называется *проходной мощностью*. Пользуясь выражением (9.18) её можно разделить на две составляющие

$$S_{\text{пр}} = U_2 I_2 = U_2 (I_1 + I_{12}) = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = S_3 + S_p \quad (9.19)$$

Здесь $S_3 = U_2 I_1$ – мощность, передаваемая в нагрузку электрическим путём за счёт гальванической связи между обмотками; $S_p = U_2 I_{12}$ – *расчётная мощность*, называемая так потому, что она определяет расчётные параметры магнитопровода. Расчётная мощность представляет собой мощность, передаваемую в нагрузку посредством магнитного поля. В обычном трансформаторе проходная мощность является расчётной. В автотрансформаторе расчётная мощность составляет только часть проходной, поэтому сечение магнитопровода можно уменьшить, снизив за счёт этого массу, габариты и стоимость.

Уменьшение объёма магнитопровода и тока во вторичной обмотке снижает потери в «стали» и в «меди» автотрансформатора по сравнению с трансформатором той же мощности, поэтому КПД автотрансформатора выше и достигает 99,7%. Однако с увеличением коэффициента трансформации эти преимущества теряются. Поэтому автотрансформаторы используют для преобразования напряжений с $k \leq 2$.

Главной причиной недостатков автотрансформаторов, как и его достоинств, является наличие электрической связи между обмотками. Она существенно ужесточает требования к изоляции обмотки и к подготовке обслуживающего персонала, т.к. на стороне низшего напряжения между проводами и землёй существует такое же напряжение как на стороне высшего напряжения. Кроме того, при коротком замыкании понижающего автотрансформатора ток существенно выше, т.к. он ограничивается только витками части первичной обмотки $w_1 - w_2$, что требует принятия особых мер защиты.

Автотрансформаторы применяются в линиях передачи и распределения энергии для связи сетей с близкими значениями напряжений. Они применяются также для снижения тока при пуске мощных двигателей. Широкое распространение имеют автотрансформаторы с плавным регулированием коэффициента трансформации, называемые *лабораторными автотрансформаторами* (ЛАТР). Регулирование напряжения в них осуществляется за счёт подключения нагрузки с помощью скользящего контакта, при перемещении которого число витков w_2 меняется в пределах $0 \leq w_2 \leq w_1$.

9.11. Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы напряжения и тока применяются: 1) для отделения цепей измерительных приборов и защитной аппаратуры от цепей с высоким напряжением с целью обеспечения безопасности обслужива-

ния и снижения требований к изоляции приборов; 2) для преобразования напряжения и тока к величинам, доступным измерению стандартными приборами.

Трансформаторы напряжения включаются в цепь по схеме рис. 9.18, а. Поскольку сопротивление вольтметра очень велико, то они работают в режиме близком к холостому ходу.

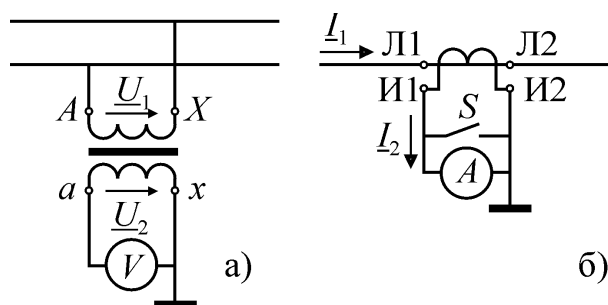


Рис. 9.18

Погрешность, вносимая в измерение трансформатором, определяется величиной полных сопротивлений его обмоток. Чем меньше эти сопротивления, тем меньше погрешность, поэтому при проектировании измерительных трансформаторов стремятся уменьшить эти величины. Измерительные трансформаторы напряжения являются приборами с нормированной погрешностью и изготавливаются с классами точности 0,2; 0,5; 1,0 и 3,0. Вторичное напряжение большинства трансформаторов – 100 В.

Измеряемое напряжение U_1 определяется по показаниям вольтметра U_2 :

$$U_1 = \frac{w_1}{w_2} U_2 = k_U U_2,$$

где $k_U = w_1 / w_2$ – коэффициент трансформации.

Кроме погрешности измерения модуля напряжения измерительные трансформаторы создают фазовый сдвиг между напряжениями \underline{U}_1 и \underline{U}_2 – δ_U . Он измеряется в угловых минутах и считается положительным, если вторичное напряжение опережает по фазе первичное. Угловая погрешность трансформатора влияет на измерение мощности.

Ко вторичной обмотке измерительного трансформатора параллельно вольтметру могут подключаться обмотка напряжения ваттметра, обмотки защитных реле, входы различных приборов и др.

Трансформаторы тока включаются в разрыв цепи или линии аналогично включению амперметра (Л1-Л2 на рис. 9.18, б). В цепь вторичной обмотки (И1-И2) могут последовательно подключаться амперметр, токовая обмотка ваттметра, датчики тока, реле токовой защиты и др. Однако увеличение нагрузки вторичной цепи приводит к увеличению погрешности преобразования тока.

Входное сопротивление амперметра очень мало, поэтому трансформатор тока работает в режиме близком к режиму короткого замыкания. Для уменьшения погрешности трансформаторов тока стремятся проектировать их таким образом, чтобы ток намагничивания был минимально возможным. Тогда измеряемый ток I_1 можно определить выражением

$$I_1 = \frac{w_2}{w_1} I_2 = k_I I_2$$

где $k_I = w_2 / w_1$ – коэффициент трансформации, I_2 – значение тока по показаниям амперметра.

Трансформаторы тока изготавливаются с классами точности 0,2; 0,5; 1,0; 3,0 и 10,0. Для первых трёх классов устанавливается также допустимая угловая погрешность δ_I : 10', 40' и 80'. Для остальных классов угловая погрешность не нормируется.

При размыкании вторичной обмотки размагничивающее действие её тока исчезает, и магнитный поток возрастает в десятки и сотни раз. На выводах вторичной обмотки возникает опасное для жизни напряжение, а сам трансформатор тока может выйти из строя вследствие разрушения изоляции или перегрева от увеличения потерь в магнитопроводе. Поэтому в цепь вторичной обмотки обязательно вводится шунтирующий ключ S , который должен замыкаться до того, как отключается амперметр.

Вопросы для самопроверки

1. В чём преимущество трёхфазных трансформаторов по сравнению с тремя однофазными?
2. В каких случаях вместо трёхфазных трансформаторов используют группу из трёх однофазных трансформаторов?
3. Как маркируются обмотки трёхфазных трансформаторов?
4. Какие группы соединений обмоток трёхфазных трансформаторов предусмотрены стандартом?
5. Что такое автотрансформатор?
6. Что такое проходная и расчётная мощность автотрансформатора?
7. За счёт чего автотрансформатор имеет меньшие массогабаритные показатели по сравнению с трансформатором той же мощности?
8. За счёт чего автотрансформатор имеет более высокий КПД по сравнению с трансформатором той же мощности?
9. Укажите достоинства, недостатки и область применения автотрансформаторов.
10. Для чего используют измерительные трансформаторы?
11. Как включают в цепь трансформаторы напряжения (тока)?
12. Как по показаниям вольтметра (амперметра), подключенного ко вторичной обмотке измерительного трансформатора, определяют значение напряжения (тока)?
13. Для чего параллельно вторичной обмотке трансформатора тока присоединяют ключ?
14. Что такое угловая погрешность измерительного трансформатора и на что она оказывает влияние?