

Московский государственный строительный
университет
Кафедра электротехники и электропривода

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Часть 2. Трансформаторы и электрические машины

Лекция 9. Трансформаторы

Электронные лекции
Составитель:
профессор И.Г. Забора
Москва – 2014 г.

Лекцию читает

**профессор кафедры «Электротехника и
электропривод» МГСУ**

Забора Игорь Георгиевич

E-mail: izabora@yandex.ru

Оглавление

-  Лекция 9. Трансформаторы
-  Лекция 10. Трехфазные асинхронные двигатели
-  Лекция 11. Электродвигатели постоянного тока
-  Лекция 12. Трехфазные синхронные генераторы
-  Лекция 13. Генераторы постоянного тока

Трансформаторы



Общие сведения о трансформаторах

Трансформатором называется статический (без подвижных частей) электромагнитный аппарат, служащий для преобразования посредством магнитного поля переменного (синусоидального) напряжения одной величины в переменное напряжение другой величины той же частоты.

Трансформаторы применяются в энергетических установках систем энергоснабжения при передаче и распределении электрической энергии.

По назначению трансформаторы делятся на *силовые* и *специального назначения*.

Силовые трансформаторы используются:

- в системах передачи и распределения электроэнергии;
- в установках со статическими преобразователями (ионными или полупроводниковыми) при преобразовании переменного тока в постоянный (выпрямители) или постоянного в переменный (инверторы);
- для получения требуемых напряжений в цепях управления электроприводами, в цепях местного освещения, для питания электробытовой техники и др.

Трансформаторы



Общие сведения о трансформаторах

В свою очередь *трансформаторы специального назначения* подразделяются на:

- печные, сварочные и др.;
- измерительные – для включения электрических измерительных приборов в сети высокого напряжения или сильного тока;
- испытательные – для получения высоких и сверхвысоких напряжений, необходимых при испытаниях на электрическую прочность электроизоляционных изделий;
- радиотрансформаторы – применяемые в устройствах радио- и проводной связи, в системах автоматики и телемеханики для получения требуемых напряжений, согласования сопротивлений.

Трансформаторы выполняются *двухобмоточными* (на одну фазу) и *многообмоточными* (одна первичная и две или более вторичных обмоток), а *по конструкции обмоток – с concentрическими и чередующимися обмотками*.

На рис. 1 представлены различные конструкции однофазных и трехфазных трансформаторов.

Трансформаторы



Общие сведения о трансформаторах

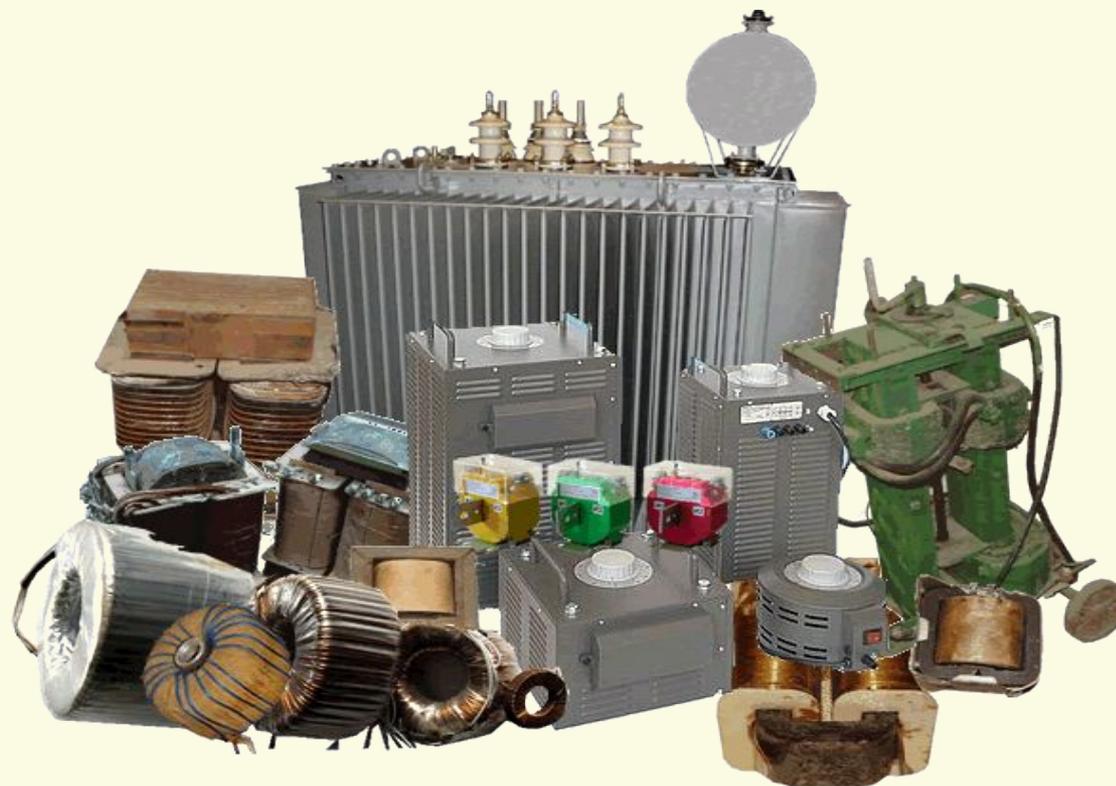


Рис. 1. Различные конструкции трансформаторов

Трансформаторы



Однофазный трансформатор

Устройство однофазного трансформатора

Преобразование напряжения в простейшем *однофазном двухобмоточном трансформаторе* осуществляется *переменным магнитным потоком*, пронизывающим витки обеих обмоток. Обмотка с числом витков W_1 , подключенная к сети, называется *первичной обмоткой*, обмотка с числом витков W_2 , к которой подключена нагрузка Z_H , называется *вторичной обмоткой*. Подаваемое на первичную обмотку трансформатора напряжение U_1 называют *первичным напряжением (или напряжением питания)*. Снимаемое напряжение U_2 со вторичной обмотки трансформатора – *вторичным напряжением*. (см. рис. 2).

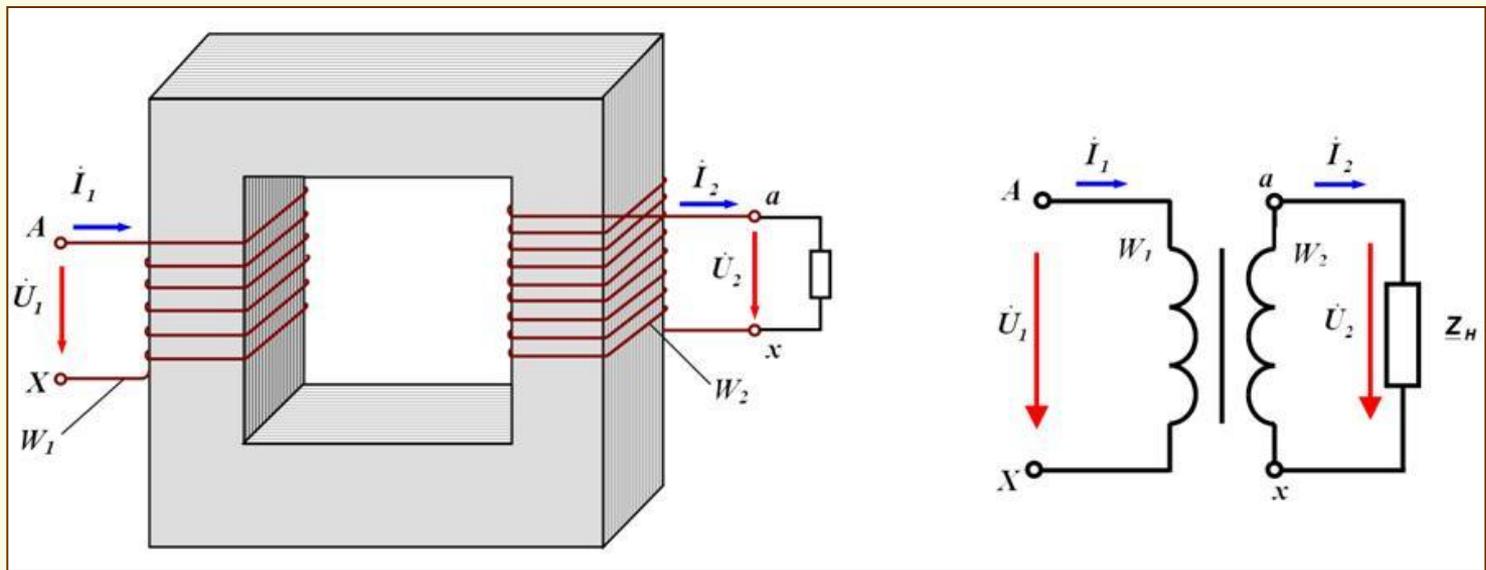
Сами обмотки выполняются в виде катушек из медного изолированного провода. Для усиления индуктивной (магнитной) связи между обмотками их помещают на *ферромагнитный сердечник* из электротехнической стали, называемый *магнитопроводом*. (см. рис. 3).

Для уменьшения магнитных потерь на вихревые токи сердечник трансформатора набирается из отдельных штампованных пластин электротехнической стали (толщиной 0,5 мм), с двух сторон покрытых тонким слоем изоляции или оксидной пленки.

Трансформаторы



Однофазный трансформатор



а)

б)

Рис. 2. Однофазный двухобмоточный трансформатор
а – конструктивная схема; б – принципиальная схема

Трансформаторы



Однофазный трансформатор

Устройство однофазного трансформатора

Магнитопроводы трансформаторов малой мощности изготавливают из ленты холоднокатаной стали.

В трансформаторах больших мощностей магнитопроводы собирают из полос стали.

Магнитопроводы маломощных трансформаторов с недавних пор стали выполнять из прессованных магнитомягких композиционных материалов (см. рис. 3,5).

В зависимости от формы магнитопровода и расположения обмоток на нем трансформаторы могут быть *стержневыми* и *броневыми* (см рис. 3 и рис. 4). *Магнитопровод стержневого однофазного трансформатора* имеет два стержня (рис. 3,1), на которых помещены его обмотки (рис 4,2, рис. 4,3). Эти стержни соединены ярмом с двух сторон так, что магнитный поток замыкается по стали. *Магнитопровод броневого однофазного трансформатора* (рис. 3,2, рис. 3,4) имеет один стержень, на котором помещены обмотки трансформатора (рис. 4,1, рис. 4,4, рис. 4,5).

Трансформаторы



Однофазный трансформатор

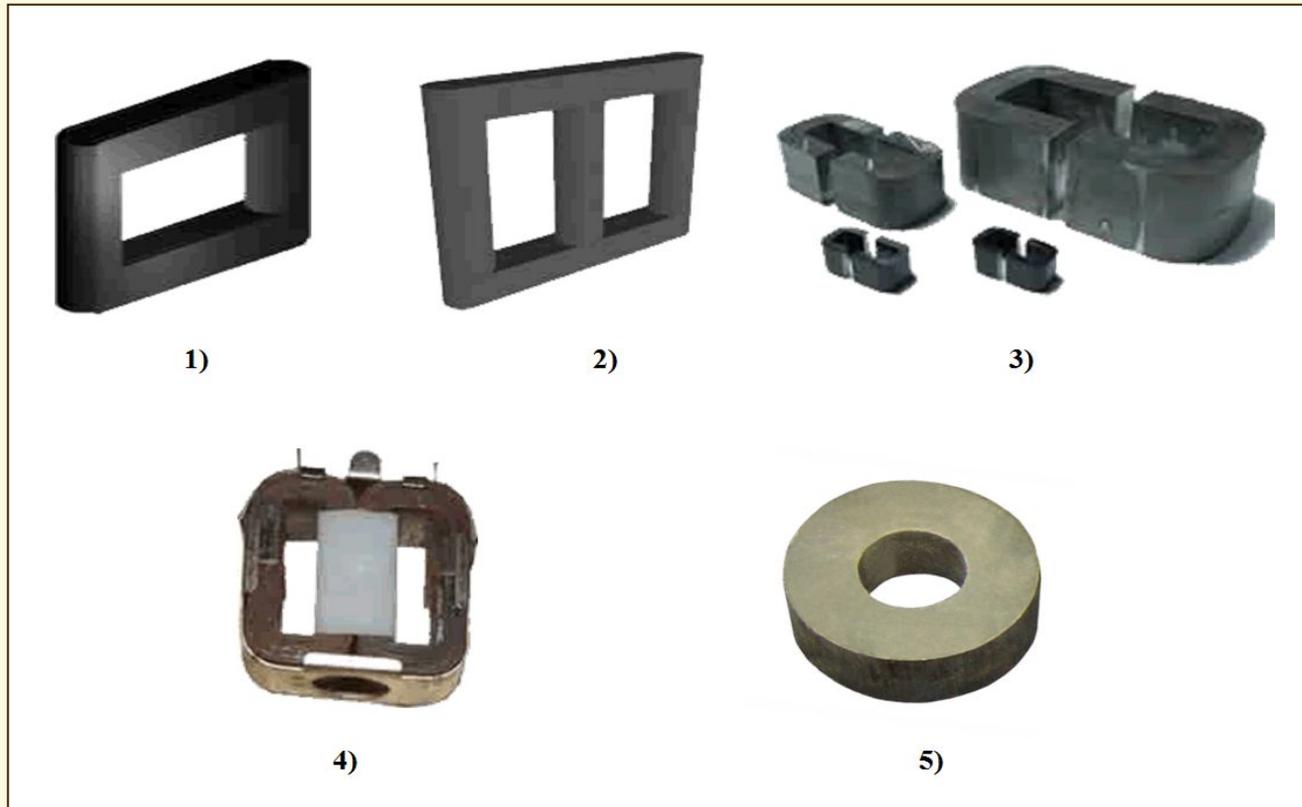


Рис. 3. Конструкции магнитопроводов однофазных трансформаторов
1 – пластинчатый стержневой; 2 – пластинчатый броневой; 3 – ленточный стержневой; 4 – ленточный броневой; 5 – прессованный тороидальный

Трансформаторы



Однофазный трансформатор

Устройство однофазного трансформатора

Стержневая конструкция имеет наибольшее распространение, особенно в трансформаторах большой и средней мощности. Достоинства этой конструкции – технологичность изоляции обмоток, лучшие условия охлаждения трансформатора, простота замены обмоток при ремонте трансформатора.

Однофазные трансформаторы малой мощности чаще выполняются броневыми, что позволяет уменьшить габариты трансформатора. Кроме того, боковые ярма защищают обмотку от механических повреждений; это важно для трансформаторов малой мощности, которые часто не имеют защитного кожуха и располагаются вместе с другим электрооборудованием на общей панели или в общем шкафу.

На рис. 4. показаны различные конструкции однофазных трансформаторов малой мощности.



Трансформаторы

Однофазный трансформатор



Рис. 4. Конструкции однофазных трансформаторов
1 – трансформатор с ленточным броневым сердечником;
2, 3 – трансформаторы с ленточным стержневым сердечником;
4, 5 – трансформаторы с пластинчатым броневым сердечником

Трансформаторы



Однофазный трансформатор

Устройство однофазного трансформатора

Трансформаторы малой мощности имеют большую удельную поверхность охлаждения, и поэтому *естественное воздушное охлаждение* является для них вполне достаточным (см. рис. 3). Трансформаторы большой мощности устраивают *с масляным охлаждением* (см. рис. 5), для чего их помещают в металлические баки, наполненные минеральным маслом. Наиболее широко распространено естественное охлаждение стенок бака трансформатора. Для увеличения охлаждающей поверхности в стенки баков вваривают стальные трубы или радиаторы.

Силовые масляные трансформаторы выпускаются в диапазоне мощностей от 10 кВА до 630000 кВА, *трансформаторы сухого исполнения* – от единиц ВА до 1600 кВА. Силовые однофазные трансформаторы, мощностью 4 кВА и ниже и трехфазные – 5 кВА и ниже относят, к *трансформаторам малой мощности*. Такие трансформаторы широко используются в преобразовательной, бытовой технике, радиоэлектронной аппаратуре и др.

Трансформаторы



Общие сведения о трансформаторах



Рис. 5. Масляный трехфазный трансформатор ТМ-630
мощностью 630 кВА

Трансформаторы



Однофазный трансформатор

Режимы работы трансформатора

Если напряжение на вторичной обмотке выше, чем на первичной ($u_2 > u_1$), то такой *трансформатор называется повышающим*. При снижении величины преобразуемого напряжения в трансформаторе ($u_2 < u_1$) он называется *понижающим*.

В зависимости от значения сопротивления нагрузки различают три режима работы трансформатора.

В *режиме холостого хода*, когда вторичная обмотка разомкнута, можно считать, что сопротивление нагрузки $Z_H = \infty$ (*ненагруженный трансформатор*).

При сопротивлении нагрузки $Z_H = 0$, когда вторичная обмотка замкнута накоротко, устанавливается *режим короткого замыкания*.

При сопротивлении нагрузки $0 < Z_H < \infty$ считается, что трансформатор работает *в режиме под нагрузкой (нагруженный трансформатор)*.



Трансформаторы

Однофазный трансформатор

Принцип действия. Режим холостого хода трансформатора

Преобразование напряжения в трансформаторе, основанное на явлении **электромагнитной индукции** (см. лекцию 7), рассмотрим для режима холостого хода (см. рис. 6). Если первичную обмотку трансформатора с числом витков W_1 подключить к источнику синусоидального напряжения u_1 частотой f , то переменный ток i_{10} с действующим значением I_{10} , называемый **током холостого хода**, создает в магнитопроводе **основной переменный магнитный поток** Φ_0 той же частоты:

$$\Phi_0 = \Phi_{0m} \sin$$

где Φ_{0m} , Вб – амплитуда переменного магнитного потока;
 $\omega = 2\pi f$, рад/с – угловая частота пульсирующего магнитного потока, равная угловой частоте напряжения питания.

Трансформаторы



Однофазный трансформатор

Режим холостого хода трансформатора

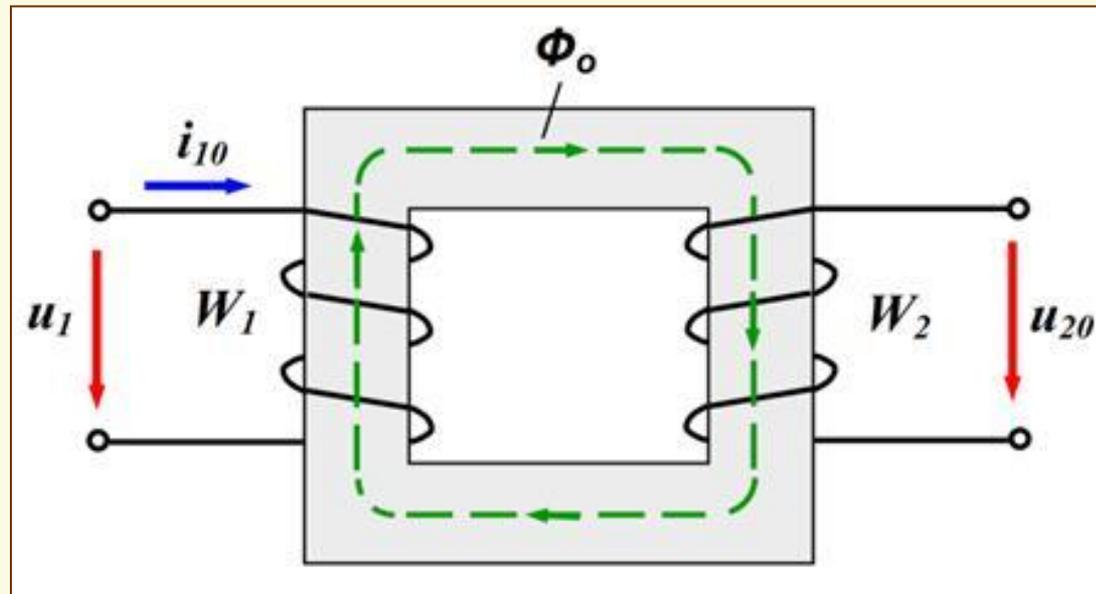


Рис. 6. Однофазный двухобмоточный трансформатор в режиме холостого хода



Трансформаторы

Однофазный трансформатор

Режим холостого хода трансформатора

Магнитный поток Φ_0 пронизывает витки первичной W_1 и вторичной W_2 обмоток трансформатора (сцепляется с ними) и за счет электромагнитной индукции *наводит* (*индуктирует*) в них соответствующие *электродвижущие силы* (ЭДС):

$$e_{1t} = \pi W_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = E_{1m} \sin(\omega t - \pi/2)$$

$$e_{2t} = \pi W_2 \frac{d\Phi_0}{dt} = E_{2m} \sin(\omega t - \pi/2),$$

где E_{1m} и E_{2m} – амплитудные значения наводимых ЭДС в первичной и вторичной обмотках, причем

$$\frac{E_{2m}}{E_{1m}} = 2 \frac{W_2}{W_1} \sin \alpha$$

Из этих выражений видно, что ЭДС в обмотках E_{1m} , E_{2m} отстают от магнитного потока Φ_0 на угол $\pi/2$.



Трансформаторы

Однофазный трансформатор

Режим холостого хода трансформатора

После проведения дифференцирования и перехода к действующим значениям величины ЭДС, наводимые в первичной и вторичной обмотках трансформатора, будут иметь следующий вид:

$$E_1 = 4,44fW_1\Phi_{0m};$$

$$E_2 = 4,44fW_2\Phi_{0m}.$$

Из этих формул следует, что *величина синусоидальной ЭДС в обеих обмотках прямо пропорциональна амплитуде магнитного потока Φ_{0m} , его частоте f (скорости изменения магнитного потока во времени) и числу витков W соответствующей обмотки.*

*Явление электромагнитной индукции [1], [2] применительно к трансформатору приводит к тому, что отношение ЭДС обмоток, сцепленных с одним и тем же переменным магнитным потоком, равно отношению их чисел витков, которое называется **коэффициентом трансформации К**:*

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = K.$$



Трансформаторы

Однофазный трансформатор

Режим холостого хода трансформатора

В режиме холостого хода из **второго закона Кирхгофа** следует, что величина напряжения на концах разомкнутой вторичной обмотки равна величине наведенной в ней ЭДС и векторы этих величин – противоположно направлены:

$$\dot{U}_{20} = -\dot{E}_2$$

Напряжение питания первичной обмотки определяется из уравнения электрического равновесия для этой обмотки:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_{10} + jX_1 \dot{I}_{10},$$

где I_{10} – ток первичной обмотки при разомкнутой вторичной обмотке, называемый **током холостого хода**; R_1 – **активное сопротивление провода** первичной обмотки, X_1 – **индуктивное сопротивление рассеяния** этой обмотки, обусловленное небольшим **магнитным потоком рассеяния** $\Phi_{1\sigma}$.

Исходя из этих уравнений, на **рис. 7** построена **векторная диаграмма** трансформатора для режима холостого хода



Трансформаторы

Однофазный трансформатор

Режим холостого хода трансформатора

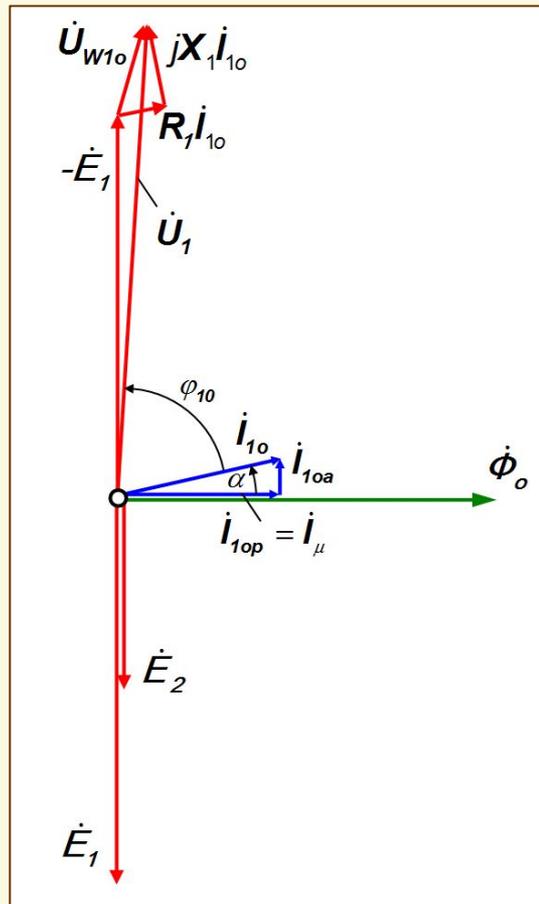


Рис. 7. Векторная диаграмма трансформатора в режиме холостого хода

Трансформаторы



Однофазный трансформатор

Режим холостого хода трансформатора

Можно считать, что величина напряжения первичной обмотки U_1 приближенно равна величине ЭДС E_1 (см. рис. 7) $U_1 \approx E_1$, если пренебречь относительно малым (несколько процентов) падением напряжения на первичной обмотке U_{w10} ($U_{w10} = Z_1 I_{10}$) от тока холостого хода I_{10} на сопротивлении первичной обмотки $Z_1 = R_1 + jX_1$:

$$U_{w10} \ll U_1 \approx E_1.$$

Поэтому *коэффициент трансформации* трансформатора, с достаточной для практики точностью, можно определить опытным путем из режима холостого хода через отношение напряжений на первичной W_1 и вторичной W_2 обмотках трансформатора:

$$\hat{E} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}}.$$

Из этого выражения видно, что *для повышающего трансформатора* ($U_{20} > U_1$) *коэффициент трансформации К меньше единицы, а для понижающего* ($U_{20} < U_1$) *наоборот – К больше единицы.*



Трансформаторы

Однофазный трансформатор

Режим холостого хода трансформатора

При прохождении переменного магнитного потока по магнитопроводу трансформатора в нем возникают **магнитные потери** мощности $P_{\text{МАГ}}$, затраченные на перемагничивание стального сердечника (**потери на гистерезис**) $P_{\text{МГ}}$ и **магнитные потери** $P_{\text{МВ}}$, связанные с нагревом магнитопровода **вихревыми токами**, наводимыми в сердечнике пульсирующим магнитным потоком (**потери от вихревых токов**):

$$P_{\text{МАГ}} = P_{\text{МГ}} + P_{\text{МВ}}$$

Магнитные потери в стали сердечника $P_{\text{МАГ}}$ зависят от марки стали, из которой выполнен сердечник, от частоты сети и магнитной индукции в сердечнике (см. лекцию 7 «Электромагнетизм и магнитный цепи»). Так как частота сети и магнитная индукция в сердечнике остаются неизменными при работе трансформатора, то и **потери в стали не зависят от нагрузки и остаются постоянными**.

Трансформаторы



Однофазный трансформатор

Режим холостого хода трансформатора

В режиме холостого хода потерями мощности в первичной обмотке P_{w10} от прохождения небольшого тока I_{10} по активному сопротивлению R_1 этой обмотки можно пренебречь:

$$P_{w10} = I_{10}^2 R_1 \approx 0.$$

Поэтому активная мощность P_0 , потребляемая трансформатором в этом режиме, называемая *потерями холостого хода*, идет в основном на покрытие магнитных потерь в сердечнике трансформатора:

$$P_0 \approx P_{\text{МАГ}}$$

Мощность потерь в трансформаторах средней и большой мощности при холостом ходе мала. Например, при номинальной полной мощности трансформатора 30 кВ·А его мощность потерь в режиме холостого хода составляет лишь 1,1% номинальной, а для трансформатора номинальной полной мощности 10 МВ·А – только 0,3%.

Трансформаторы



Однофазный трансформатор

Режим холостого хода трансформатора

Ток холостого хода I_{10} , как видно из векторной диаграммы (см. рис. 7), содержит активную I_{10a} и реактивную I_{10p} составляющие:

$$I_{10} = \sqrt{I_{10a}^2 + I_{10p}^2}.$$

Активная составляющая тока холостого хода I_{10a} обусловлена магнитными потерями $P_{\text{МАГ}}$ в трансформаторе и может быть рассчитана по формуле:

$$I_{10a} = \frac{P_i \text{ в вт}}{U_1}$$

Реактивная составляющая тока холостого хода I_{10p} , создающая магнитный поток, называется **током намагничивания** I_{μ} . Ток холостого хода трансформатора I_{10} сравнительно мал и составляет 4–10% номинального значения тока в первичной обмотке $I_{1\text{ном}}$ нагруженного трансформатора. При этом с увеличением номинальной мощности трансформатора относительное значение тока холостого хода уменьшается.

В режиме холостого хода можно опытным путем определить зависимости потерь холостого хода P_0 и тока холостого хода I_{10} от величины напряжения U_1 , подаваемого на первичную обмотку трансформатора.

Трансформаторы



Однофазный трансформатор

Эти зависимости называются *характеристиками холостого хода* трансформатора. Как видно из рис. 8, насыщение сердечника трансформатора приводит к тому, что ток I_{10} растет быстрее, чем увеличивается напряжение U_1 [1].

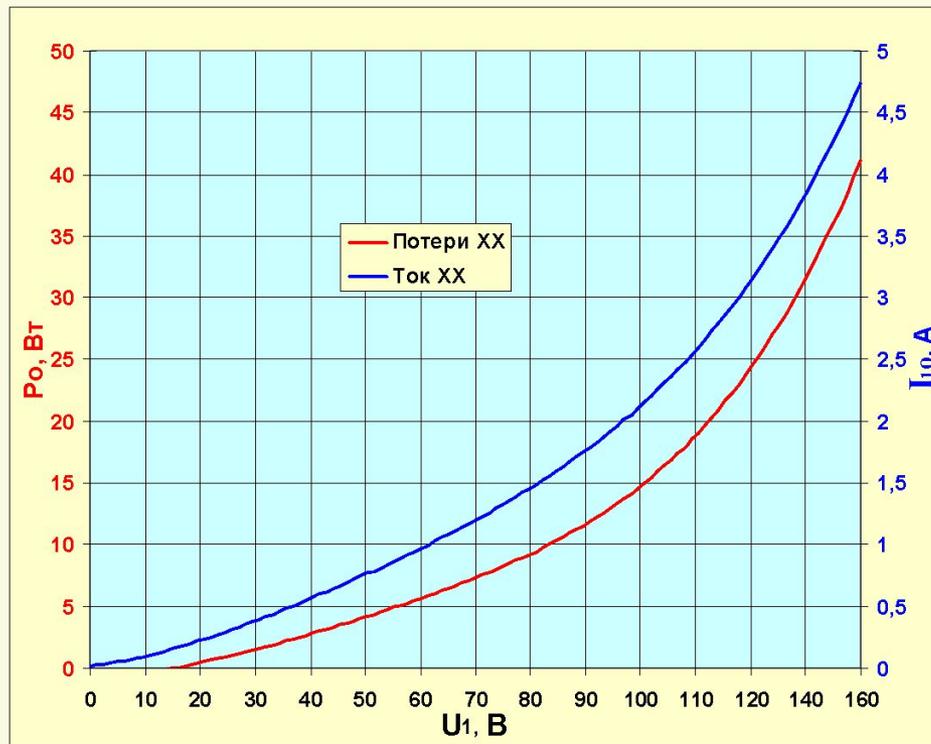


Рис. 8. Характеристики холостого хода трансформатора

Трансформаторы



Однофазный трансформатор

Режим и опыт короткого замыкания трансформатора

Замыкание накоротко вторичной обмотки трансформатора в процессе эксплуатации приводит к *аварийному режиму короткого замыкания*. При наступлении режима короткого замыкания и подаче на первичную обмотку трансформатора номинального напряжения U_1 , в первичной и вторичной обмотках возникают весьма значительные *токи короткого замыкания* $I_{1К}$, $I_{2К}$ (в десятки и сотни раз выше номинальных). Эти токи вызовут очень большие тепловые потери $P_{1К}$ и $P_{2К}$ в активных сопротивлениях R_1 , R_2 проводов обеих обмоток трансформатора:

$$P_{1К} = I_{1К}^2 R_1;$$

$$P_{2К} = I_{2К}^2 R_2.$$

Под действием этих потерь обмотки очень быстро разогреются до высокой температуры, их изоляция обуглится, произойдет закорачивание витков обмоток, уменьшение их активных сопротивлений R_1 и R_2 , еще больший рост токов короткого замыкания, дальнейшее увеличение потерь в обмотках и их нагрев и т.д.

Трансформаторы



Однофазный трансформатор

Режим и опыт короткого замыкания трансформатора

Этот лавинообразный процесс аварийного режима короткого замыкания происходит до тех пор, пока провод одной из обмоток не расплавится, и произойдет разрыв в первичной или вторичной цепях обмоток трансформатора. После этого токи в обеих обмотках уменьшатся до нуля. В результате такого аварийного режима короткого замыкания, длительность которого составляет доли секунды, трансформатор выходит из строя.

В отличие от вышеописанного аварийного режима короткого замыкания, *опыт короткого замыкания совершенно безопасен*. При проведении опыта короткого замыкания с замкнутой накоротко вторичной обмоткой к первичной обмотке трансформатора подводится низкое напряжение такой величины, чтобы токи короткого замыкания в обмотках $I_{1К}$ и $I_{2К}$ были равны номинальным токам:

$$I_{1К} = I_{1НОМ};$$

$$I_{2К} = I_{2НОМ}.$$



Трансформаторы

Однофазный трансформатор

Опыт короткого замыкания

При опыте короткого замыкания напряжение, подводимое к первичной обмотке, сравнительно мало ($U_{1К} = (0,05 \div 0,1)U_{1НОМ}$), т.е.

$$U_{1К} \approx E_{1К} \ll U_{1НОМ}$$

Магнитный поток в опыте короткого замыкания $\Phi_{0Км}$ прямо пропорционален ЭДС $E_{1К}$:

$$\hat{\Phi}_{0\hat{E}_m} = \frac{E_{1К}}{4,44W_1f}$$

и, следовательно, этот поток будет значительно меньше, чем при холостом ходе и в номинальном режиме.

Поэтому *магнитная индукция* в сердечнике, определяемая выражением $B_m = \Phi_{0Км} / S$ (где S – площадь поперечного сечения сердечника) будет также мала. Следует учесть, что *магнитные потери* в сердечнике трансформатора прямо пропорциональны квадрату амплитуды магнитной индукции B_m .

Трансформаторы



Однофазный трансформатор

Режим работы нагруженного трансформатора

В режиме работы под нагрузкой (см. рис. 9) ко вторичной обмотке W_2 трансформатора подключена нагрузка с величиной полного сопротивления Z_H :

$$Z_H = \sqrt{R_H^2 + X_H^2},$$

где R_H и X_H – соответственно, активная и реактивная составляющие сопротивления нагрузки.

По первичной обмотке W_1 проходит ток I_1 , который, как известно (см. лекцию 7), создает *магнитодвижущую силу* (МДС) F_1 этой обмотки и, тем самым, магнитный поток Φ_1 :

$$F_1 = I_1 W_1.$$

Во вторичной обмотке W_2 и нагрузке Z_H будет протекать ток I_2 , образуя МДС этой обмотки F_2 :

$$F_2 = I_2 W_2.$$

Трансформаторы



Однофазный трансформатор

Режим работы нагруженного трансформатора

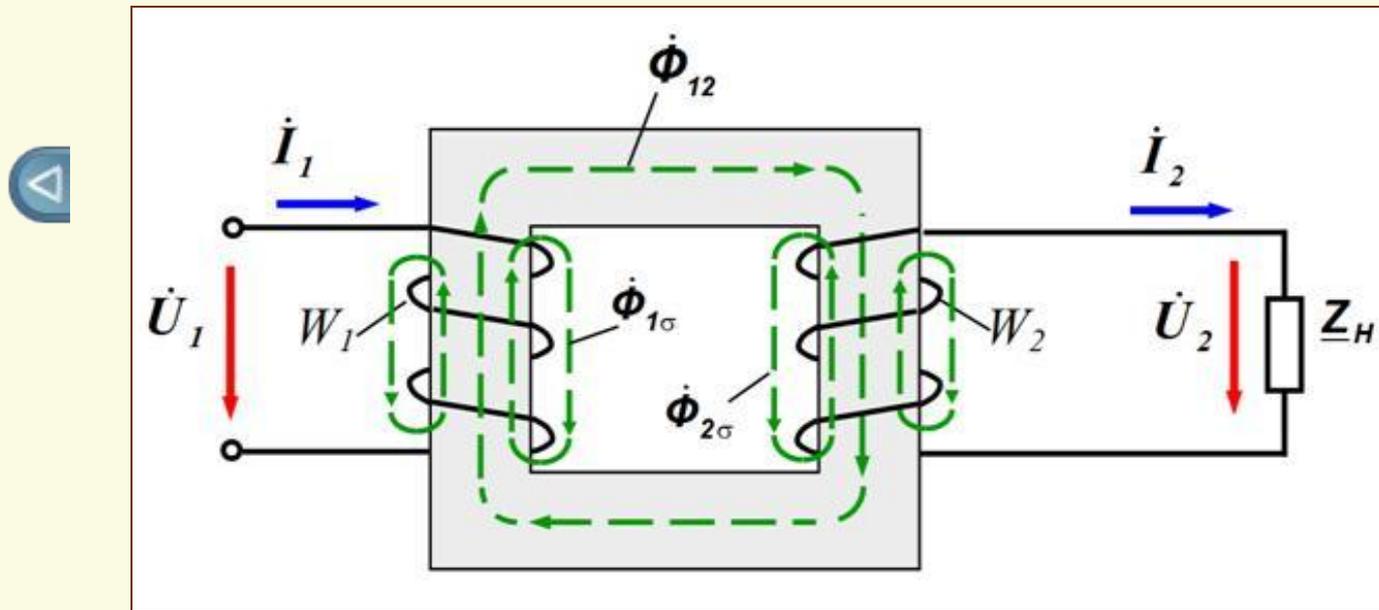


Рис. 9. Однофазный двухобмоточный трансформатор в режиме под нагрузкой

Трансформаторы



Однофазный трансформатор

Режим работы нагруженного трансформатора

МДС создаст свой магнитный поток Φ_2 , который будет складываться с магнитным потоком Φ_1 , создаваемый МДС F_1 в первичной обмотке W_1 , образуя общий магнитный поток Φ_{12} в трансформаторе, сцепляющийся с витками обеих обмоток (см. рис. 10,б):

$$\Phi_{12} = \Phi_1 + \Phi_2.$$

Индукционный ток I_2 , образуемая им МДС F_2 и создаваемый магнитный поток Φ_2 подчиняются *правилу Ленца* (см. Лекцию. 7), которое применительно к магнитным потокам ненасыщенного трансформатора заключается в том, что поток Φ_2 стремится компенсировать магнитный поток Φ_1 так, чтобы общий магнитный поток Φ_{12} в трансформаторе оставался постоянным и примерно равным потоку Φ_0 в режиме холостого хода (см. рис. 10,а). Это равенство соблюдается, если пренебречь магнитными потоками рассеяния $\Phi_{1\sigma}$ и $\Phi_{2\sigma}$ ввиду их малости по сравнению с основным магнитным потоком Φ_0 , а также не учитывать влияние насыщения.

Трансформаторы



Однофазный трансформатор

Режим работы нагруженного трансформатора

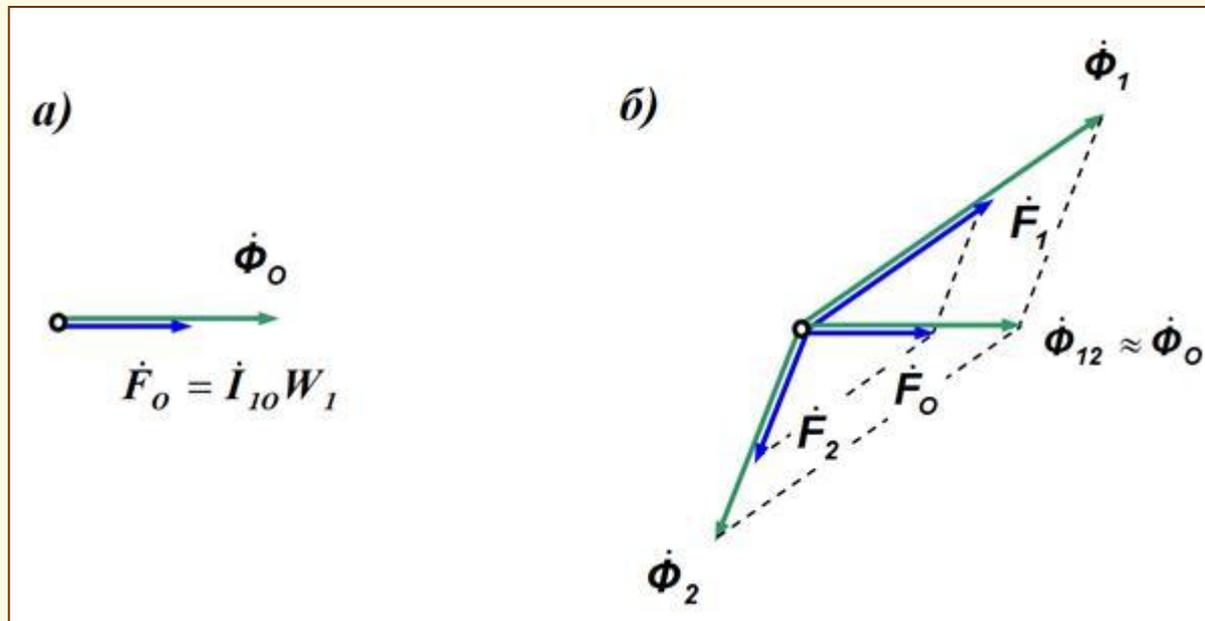


Рис. 10. Векторные диаграммы магнитных потоков и МДС обмоток
а – в режиме холостого хода трансформатора;
б – в режиме нагруженного трансформатора

Трансформаторы



Однофазный трансформатор

Режим работы нагруженного трансформатора

Для нагруженного трансформатора величины МДС обеих обмоток также можно сложить, заменив их сумму на эквивалентную МДС, равную МДС первичной обмотки в режиме холостого хода $F_0 = I_{10} W_1$

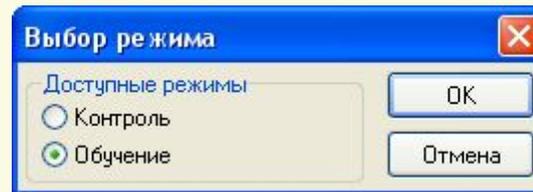
$$F_1 + F_2 = F_0$$

Трансформаторы



ТЕСТ – Трансформаторы

При нажатии на расположенную внизу кнопку-гиперссылку «ТЕСТ» запускается тестирующая программа и предоставляет пользователю выборку пяти вопросов и задач из общего количества 46 по теме раздела. При этом появляется окно *Выбор режима*.



В этом окне следует отметить пункт *Обучение* и после – нажать кнопку *Ок*, так как тестирование в настоящем пособии проводится только в режиме *Обучение*. При ошибочных ответах пользователя на вопросы теста приводятся подсказки в виде правильных ответов (в режиме контроля подсказки отсутствуют).



Трансформаторы



Литература и электронные средства обучения

Основная литература

1. Касаткин А.С. Электротехника: учеб. для вузов / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – 10-е изд. стер. – М.: Изд. Центр «Академия», 2007. – 544с.
2. К.Я. Вильданов, С.Т Гейдаров, И.Г. Забора и др. Электротехника и электроника. Элементы теории и задания к контрольным работам: Учебно-методическое пособие для студентов строительных специальностей. – М.: МГАКХиС, 2011. – 89 с.

Электронные средства обучения

1. А.С. Касаткин, М.В. Немцов. Электротехника. Электронная версия учебника по электротехнике и электронике, 2009. (формат – веб-страницы).
2. И.Г. Забора. Электротехника. Часть 2. Трансформаторы и электрические машины. Электронное учебное пособие по лабораторным работам, 2011. (формат – веб-страницы).



ЛЕКЦИЯ ОКОНЧЕНА

Благодарю за внимание!