

# Тема 8. Трансформаторы



## Вопросы темы

1. Устройство и принцип работы трансформатора.
2. Потери в трансформаторе.
3. Режимы работы и коэффициент полезного действия трансформатора.
4. Трехфазные трансформаторы.
5. Автотрансформатор.
6. Измерительные трансформаторы.

## 1. Устройство и принцип работы трансформатора

*Трансформатор* (рис. 1) - статический электромагнитный аппарат, служащий для преобразования электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока того же или иного напряжения при неизменной частоте.

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

Простейший однофазный трансформатор состоит из стального сердечника и двух обмоток — *первичной* и *вторичной* (рис. 1). Если к первичной обмотке трансформатора подвести переменное напряжение  $u_1$ , то в ней появится некоторый ток  $i_1$ , который создаст в сердечнике переменный магнитный поток  $\Phi$ .

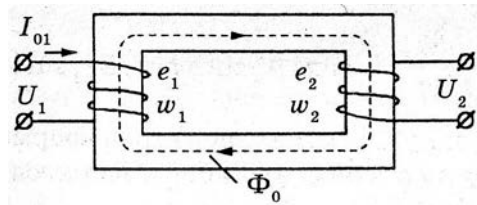


Рис. 1

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

$$e_1 = E_{1m} \sin \omega t = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

$$e_2 = E_{2m} \sin \omega t = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

где  $w_1$  и  $w_2$  -

число витков в первичной и вторичной обмотках соответственно.

Эти дифференциальные уравнения позволяют найти зависимость между ЭДС обмотки и магнитным потоком в магнитопроводе. Из первого уравнения

$$d\Phi = -\frac{E_{1m}}{w_1} \sin \omega t dt, \quad (2)$$

$$\Phi = \frac{E_{1m}}{\omega w_1} \cos \omega t + C. \quad (3)$$

Здесь постоянная интегрирования  $C=0$ , так как синусоидальная ЭДС не может создать постоянную составляющую магнитного потока.

Подставив в последнее равенство  $E_{1m} = \sqrt{2}E_1$  и  $\omega = 2\pi f$ , получим

$$\Phi = \frac{\sqrt{2}E_1}{2\pi f w_1} \cos \omega t = \frac{E_1}{4,44 f w_1} \cos \omega t = \Phi_m \cos \omega t \quad (4)$$

откуда

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m \quad (5)$$

и аналогично

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m \quad (6)$$

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

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

$$\left| \frac{u_1}{u_2} \right| = \frac{e_1}{e_2}, \text{ или } \left| \frac{U_1}{U_2} \right| = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k, \quad (7)$$

где  $k$  — коэффициент трансформации.

Мы видим, что *отношение напряжений на вторичной и первичной обмотках трансформатора равно отношению чисел витков в этих обмотках*. Отметим, что формула (7) выполняется точно только для идеального трансформатора или в режиме холостого хода.

Таким образом, трансформатор преобразует подведенное к нему напряжение в соответствии с отношением числа витков его обмоток. Векторная диаграмма идеального трансформатора показана на рис. 2.

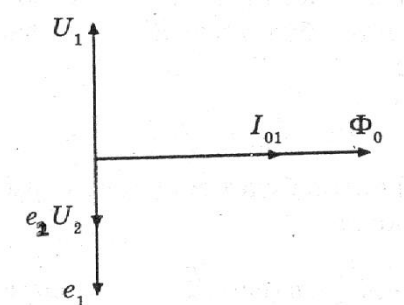


Рис. 2

Учитывая высокий КПД трансформатора, можно полагать, что  $S_1 \approx S_2$ , где  $S_1 = U_1 I_1$  - мощность, потребляемая из сети;  $S_2 = U_2 I_2$  - мощность, отдаваемая в нагрузку. Таким образом,  $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$ , откуда

$$\frac{I_2}{I_1} \approx \frac{U_1}{U_2} = k. \quad (8)$$

Отношение токов вторичной и первичной обмоток приближённо равно коэффициенту трансформации, поэтому ток  $I_2$  во столько раз увеличивается (уменьшается), во сколько раз уменьшается (увеличивается)  $U_2$ .

На рис. 3 изображён внешний вид малогабаритного силового трансформатора, а на рис. 4 – условное графическое обозначение трансформатора с одной первичной и двумя вторичными обмотками (с отводами).



Рис. 3. Трансформатор

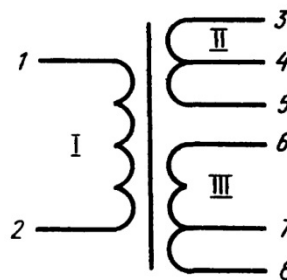


Рис. 4. Условное графическое обозначение трансформатора на схеме

## 2. Потери в трансформаторе

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

Как известно, ферромагнитные материалы состоят из небольших областей самопроизвольного намагничивания, которые называются доменами. Если ферромагнетик поместить в переменное магнитное поле, создаваемое переменным током, то ферромагнетик будет циклически перемагничиваться с частотой переменного тока. При этом домены будут менять свою ориентацию с такой же частотой. При переориентациях доменов совершается работа из-за внутреннего трения доменов друг о друга. Как известно, в ферромагнетике, подвергнутом циклическому перемагничиванию, магнитный поток связан с током зависимостью, выражаемой петлей гистерезиса. При этом при каждом перемагничивании сердечника затрачивается работа, пропорциональная площади петли гистерезиса. Эта работа вследствие внутреннего трения идет на нагревание сердечника. Для уменьшения потерь на *гистерезис* сердечники трансформаторов изготавливают из специальной трансформаторной стали.

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

*Потоки рассеяния* в сердечнике трансформатора создаются той частью магнитного потока, которая замыкается не через магнитопровод, а через воздух в непосредственной близости от витков. Потоки рассеяния составляют около 1 % от основного магнитного потока трансформатора.

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

### 3. Режимы работы и коэффициент полезного действия трансформатора

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

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

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% \quad (9)$$

где  $P_1$  - мощность, потребляемая из сети;

$P_2$  - мощность, отдаваемая нагрузке.

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

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{СТ} + P_M} \quad (10)$$

где  $P_{СТ}$  - потери в стали (сердечнике);

$P_M$  - потери в меди (в обмотках).

Потери в стали и меди измеряют в опытах холостого хода и короткого замыкания соответственно.

В опыте *холостого хода*, в котором на первичную обмотку подают номинальное напряжение, а вторичную обмотку оставляют разомкнутой, определяют потери в стали, т. е. потери на *гистерезис и вихревые токи*. Так как при номинальном напряжении на первичной обмотке магнитный поток практически постоянен, то независимо от того, нагружен трансформатор или нет, потери в стали для него являются постоянной величиной. Таким образом, можно считать, что в режиме холостого хода энергия, потребляемая трансформатором из сети, расходуется только на потери в стали, поэтому мощность этих потерь измеряют ваттметром, включенным в цепь первичной обмотки. При этом, правда, не учитываются потери на нагревание провода первичной обмотки током холостого хода. Но этот ток невелик, и потери от него также невелики. В этом опыте определяют также коэффициент трансформации  $k$  и ток холостого хода  $I_0$ .

Если вторичную обмотку трансформатора замкнуть *накоротко*, а на первичную обмотку подать такое пониженное напряжение, при котором токи в обмотках не превышают номинальных значений, то энергия, потребляемая трансформатором из сети, расходуется в основном на тепловые *потери в проводах* обмоток трансформатора. В самом деле, при короткозамкнутой вторичной обмотке к первичной подводится пониженное напряжение, поэтому магнитный поток очень мал и потери в стали, зависящие от значения магнитного потока, также малы. Этот опыт называют опытом

подсоединяется вольтметр. Поскольку сопротивление вольтметра велико, то по вторичной обмотке течет небольшой ток, и можно считать, что трансформатор напряжения работает в режиме холостого хода, т. е. изменения вторичного напряжения пропорциональны изменениям первичного при постоянном коэффициенте трансформации. Все трансформаторы напряжения изготавливают таким образом, чтобы номинальное напряжение вторичной обмотки было равно 100 В.

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

### **Вопросы для повторения**

1. Объясните устройство и принцип действия трансформатора.
2. Перечислите потери в трансформаторе и объясните их физическую природу.
3. Почему сердечник трансформатора собирают из тонких листов трансформаторной стали, изолированных друг от друга?
4. Что называется коэффициентом трансформации?
5. Какой режим работы трансформатора называется холостым ходом?
7. Как измеряют КПД трансформатора?
8. Каково устройство трехфазного трансформатора?
9. Как соединяются между собой обмотки трехфазных трансформаторов?
10. Объясните устройство автотрансформатора.
11. Как включают трансформатор тока и в каком режиме он работает?
12. Как включают трансформатор напряжения и в каком режиме он работает?