

Дисциплина: «Электрические машины и электропривод»

Лектор: профессор Харламов Виктор Васильевич

**Кафедра: «Электрические машины и
общая электротехника»
ауд. № 1-103**

Список литературы

Методические указания к лабораторным работам:

«Электрические машины». В.Д. Авилов и др. 2007 г.

Часть 1 - «Трансформаторы».

Часть 2 - «Машины постоянного тока».

Часть 3 - «Асинхронные машины».

Часть 4 - «Синхронные машины».

Методические указания к курсовой работе:

В.Д. Авилов, В.П. Беляев. «Расчет основных параметров трансформатора распределительных сетей». 2002 г.

Методические указания к самостоятельной работе:

В.Д. Авилов, В.П. Беляев. «Основы электропривода». 1998 г.

Учебники:

1. «Электрические машины». А.И. Вольдек. 1978 г, 1974 г, 1966 г.
2. «Электрические машины». А.И. Вольдек, В.В. Попов. 2008 г.
3. «Электрические машины» М.П. Костенко и Л.М. Пиотровский. 1972 г, 1964 г.
4. «Общий курс электропривода» М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер, 1984 г.
5. «Расчет трансформаторов». П.М. Тихомиров, 1986 г.

Введение

Электрическая машина (ЭМ) - электромеханическое устройство, осуществляющее взаимное преобразование механической и электрической энергий.

Генератор - электрическая машина, преобразующая механическую энергию в электрическую.

Электродвигатель - электрическая машина, преобразующая электрическую энергию в механическую.

Краткая историческая справка

1820 г. – **Ж. Био и Ф. Савар** сформулировали закон действия тока на магнит

1821 г. – **М. Фарадей** создал первый электрический двигатель

1831 г. – **М. Фарадей** открыл закон электромагнитной индукции

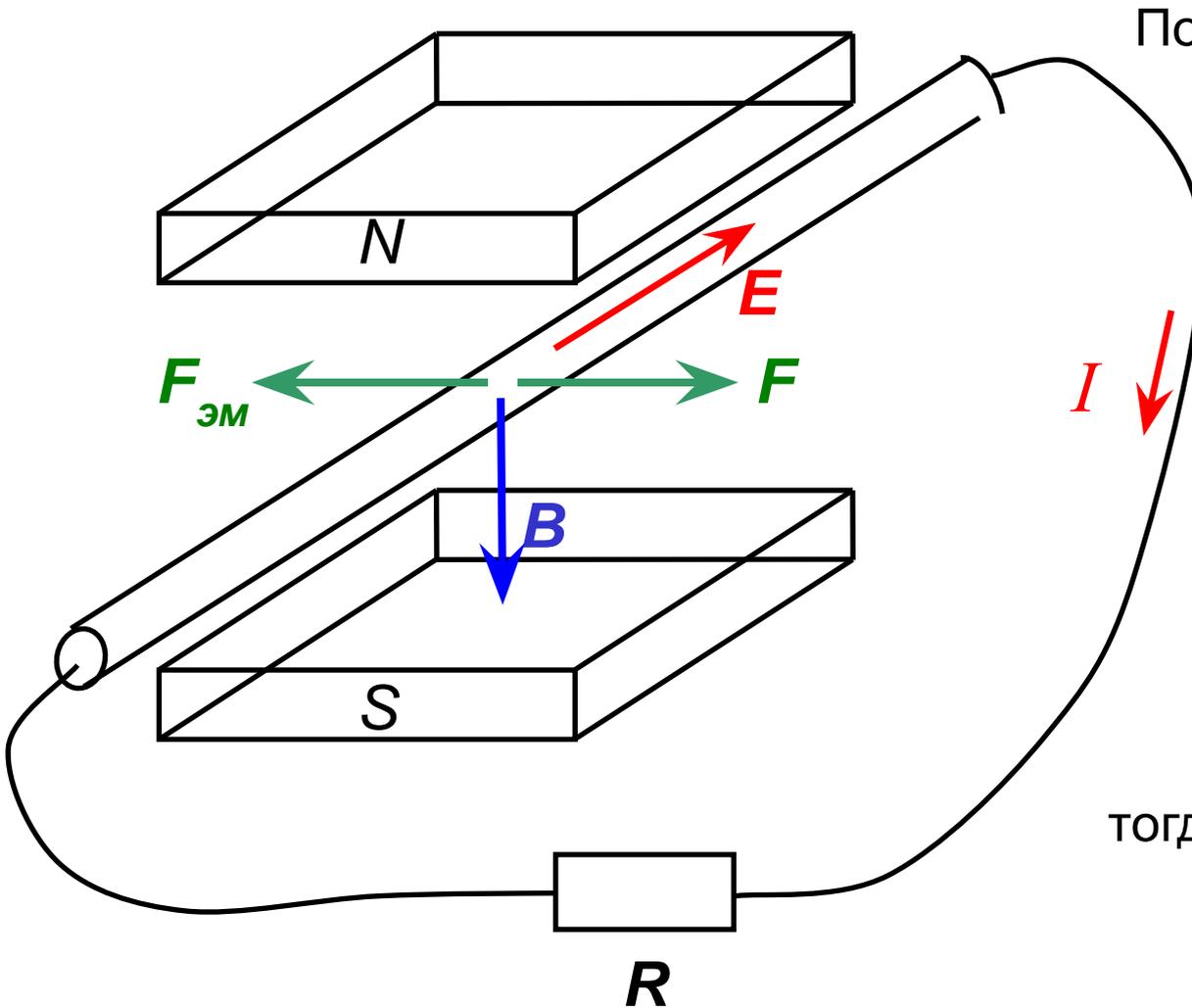
1832 г. – **Э. Ленц** сформулировал принцип обратимости электрических машин

1834 г. – **В.С. Якоби** – дальнейшее развитие идеи взаимного преобразования энергии

1876 г. – **П.Н. Яблочков** – первый реальный трансформатор

1889 г. – **М.О. Доливо-Добровольский** – первый трехфазный асинхронный двигатель

Принцип действия элементарного генератора



По закону электромагнитной индукции в проводнике наводится ЭДС

$$E = B \cdot l \cdot v$$

Электромагнитная сила

$$F_{эм} = B \cdot l \cdot I$$

При равномерном движении

$$F = F_{эм}$$

тогда

$$F \cdot v = F_{эм} \cdot v$$

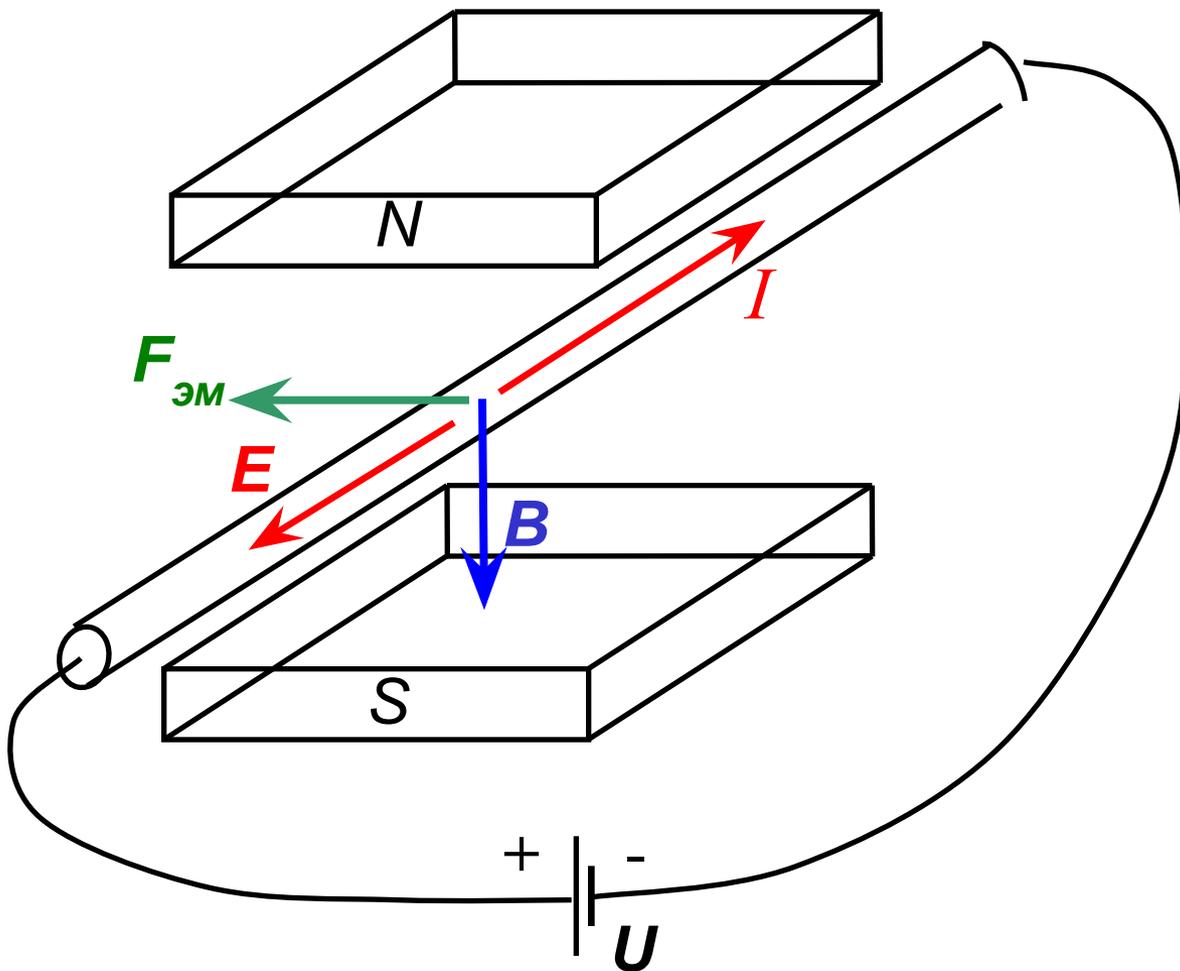
или $F \cdot v =$

$$B \cdot l \cdot I \cdot v$$

$$F \cdot v = E \cdot I$$

Т. о. в генераторе механическая мощность, затрачиваемая внешней силой, преобразуется в электрическую

Принцип действия элементарного двигателя



Электрическая мощность, поступающая в проводник, преобразуется в механическую мощность и частично расходуется на покрытие электрических потерь в проводнике

Электромагнитная сила

$$F_{эм} = B \cdot l \cdot I$$

В проводнике индуцируется ЭДС

$$E = B \cdot l \cdot v$$

Уравнение напряжений

$$U = E + I \cdot r$$

или $U \cdot I = E \cdot I + I^2 \cdot r$

Подставим $E = B \cdot l \cdot v$

$$U \cdot I = B \cdot l \cdot v \cdot I + I^2 \cdot r$$

$$U \cdot I = F_{эм} \cdot v + I^2 \cdot r$$

Выводы:

- 1) Для любой электрической машины обязательно наличие *электропроводящей среды* (проводников) и *магнитного поля*, имеющих возможность взаимного перемещения.
- 2) При работе электрической машины как в режиме генератора, так и в режиме двигателя *одновременно* наблюдаются *индуцирование ЭДС* в проводнике, пересекающем магнитное поле, и *возникновение силы*, действующей на проводник, находящийся в магнитном поле, при протекании по нему электрического тока.
- 3) *Взаимное преобразование* механической и электрической энергий в электрической машине может происходить *в любом направлении*, т. е. одно и та же электрическая машина может работать как в режиме *двигателя*, так и в режиме *генератора*. Это свойство электрических машин называют *обратимостью*.

Классификация электрических машин



ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трансформатор - статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно-связанные обмотки и предназначенное для преобразования посредством явления электромагнитной индукции одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока.

Классификация силовых трансформаторов общего назначения

По числу фаз: *однофазные и трехфазные.*

По конструкции магнитопровода: - *стержневые,*
- *броневые,*
- *бронестержневые,*
- *торроидальные.*

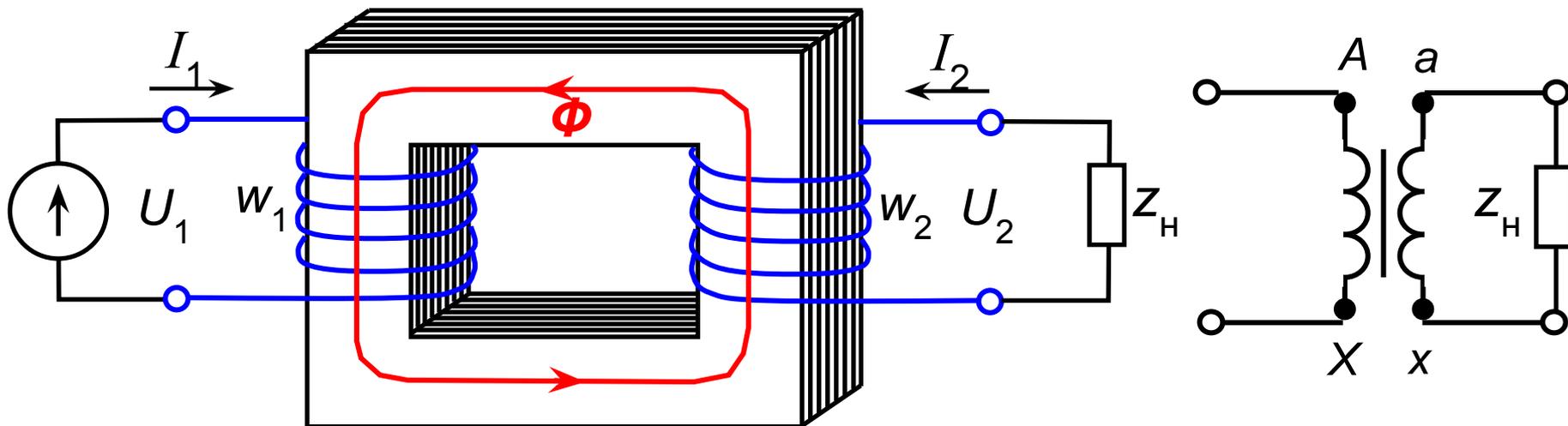
По способу охлаждения: *сухие и масляные.*

По числу обмоток: - *двухобмоточные,*
- *многообмоточные,*
- *автотрансформаторы.*

Трансформаторы специального назначения:

- печные и сварочные трансформаторы;
- трансформаторы устройств автоматики (пик-трансформаторы, импульсные, умножители частоты и т. п.);
- испытательные и измерительные трансформаторы.

Принцип действия трансформатора



$$U_1 \longrightarrow I_1 \longrightarrow I_1 w_1 \longrightarrow \Phi \longrightarrow E_2 \longrightarrow I_2 \longrightarrow U_2$$

$$\downarrow$$

$$E_1$$

Основной магнитный поток Φ индуцирует в первичной обмотке ЭДС

самоиндукции

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

и ЭДС взаимной индукции

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

во вторичной обмотке

Принцип действия трансформатора

Если $U_2 > U_1$ – повышающий трансформатор;

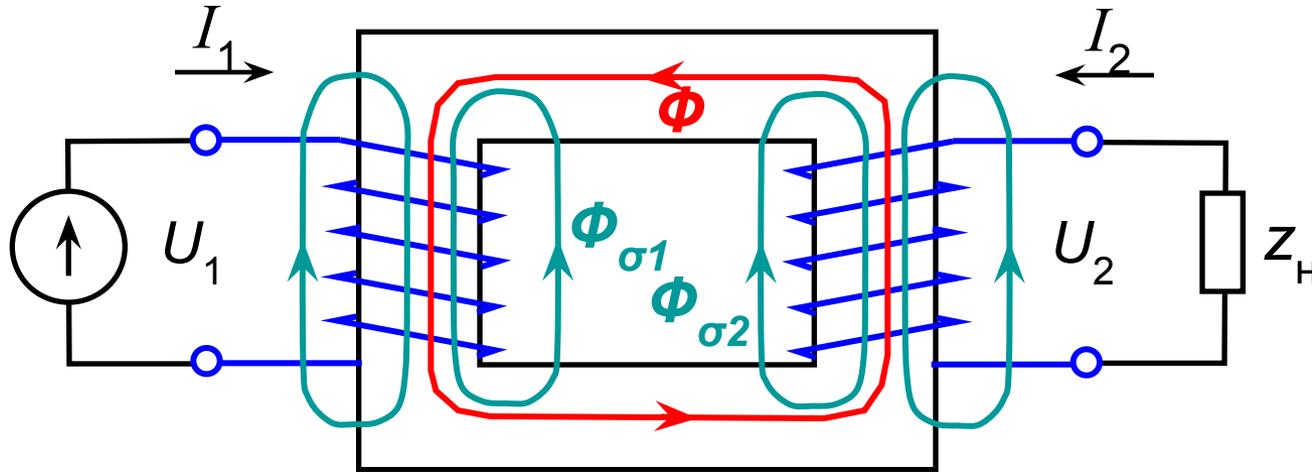
если $U_1 > U_2$ – понижающий трансформатор.

Обмотка, подключенная к сети с более высоким напряжением, называется *обмоткой высшего напряжения (ВН)*, а обмотка, соединенная с сетью меньшего напряжения – *обмоткой низшего напряжения (НН)*.

Коэффициентом трансформации называется отношение ЭДС обмотки высшего напряжения к ЭДС обмотки низшего напряжения

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

Уравнения напряжений трансформатора



Переменный магнитный поток Φ наводит в обмотках ЭДС:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} \qquad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

При синусоидальном магнитном потоке $\Phi = \Phi_{max} \sin \omega t$

$$e_1 = -\omega \cdot w_1 \cdot \Phi_{max} \cos \omega t$$

т.к. $\cos \omega t = -\sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$, то

$$e_1 = \omega \cdot w_1 \cdot \Phi_{max} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

ЭДС e_1 и e_2 отстают от магнитного потока Φ на угол $\pi/2$

$$e_2 = \omega \cdot w_2 \cdot \Phi_{max} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

Уравнения напряжений трансформатора

Максимальное значение ЭДС $E_{1max} = \omega \cdot W_1 \cdot \Phi_{max}$

Подставив $\omega = 2\pi f$, получим действующее значение ЭДС:

$$E_1 = \frac{E_{1max}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot W_1 \cdot f \cdot \Phi_{max}$$

$$E_1 = 4,44 \cdot W_1 \cdot f \cdot \Phi_{max}$$

и

$$E_2 = 4,44 \cdot W_2 \cdot f \cdot \Phi_{max}$$

Потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ сцеплены только с витками собственной обмотки и индуцируют в них ЭДС:

$$e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} \quad \text{и} \quad e_{\sigma 2} = -L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt}$$

Т. к. потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ замыкаются по воздуху, маслу, меди с постоянной магнитной проницаемостью, то можно считать, что $L_{\sigma 1}$ и $L_{\sigma 2}$ - *const*

Тогда действующие значения ЭДС рассеяния

$$E_{\sigma 1} = -j I_1 X_1$$

и

$$E_{\sigma 2} = -j I_2 X_2$$

Уравнения напряжений трансформатора

Для первичной цепи трансформатора по второму закону Кирхгофа

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} = \dot{I}_1 r_1$$

Выразив $\dot{E}_{\sigma 1}$ через $-j \dot{I}_1 x_1$ получим уравнение напряжений для первичной цепи трансформатора

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + j \dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1$$

Напряжение U_1 , подведенное к трансформатору, уравновешивается ЭДС E_1 , наведенной основным магнитным потоком, и падением напряжения от тока I_1 на индуктивном и активном сопротивлениях первичной обмотки.

Обычно $E_1 \gg I_1 x_1$ и $I_1 r_1$ поэтому с некоторым приближением

можно считать, что

$$\dot{U}_1 \approx (-\dot{E}_1)$$

Уравнения напряжений трансформатора

Для вторичной цепи трансформатора, замкнутой на нагрузку Z_H , по второму закону Кирхгофа получим:

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} = \dot{I}_2 r_2 + \dot{I}_2 z_H$$

Падение напряжения на нагрузке $\dot{I}_2 z_H$ представляет собой напряжение на выводах вторичной обмотки трансформатора: $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 z_H$

Выразим $\dot{E}_{\sigma 2}$ через $-j \dot{I}_2 x_2$ и приведем уравнение к виду, аналогичному уравнению для первичной цепи.

Получим уравнение напряжений для вторичной цепи трансформатора:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j \dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 r_2$$

Напряжение U_2 на выходе нагруженного трансформатора, отличается от ЭДС E_2 , наведенной основным магнитным потоком, на значение падения напряжения от тока I_2 на индуктивном и активном сопротивлениях вторичной обмотки.

Уравнения магнитодвижущих сил и токов

В режиме холостого хода $I_2 = 0$ и $I_1 = I_0$, где I_0 - ток холостого хода

В этом режиме основной магнитный поток Φ создается лишь МДС первичной обмотки $F_1 = I_0 w_1$:

$$\Phi_{max} = \frac{\sqrt{2} I_0 w_1}{R_M}$$

Если *трансформатор работает под нагрузкой*, основной магнитный поток Φ создается совместным действием МДС первичной $F_1 = I_1 w_1$ и вторичной обмотк $F_2 = I_2 w_2$:

$$\Phi_{max} = \frac{\sqrt{2} (I_1 w_1 + I_2 w_2)}{R_M}$$

С другой стороны $\Phi_{max} = \frac{E_1}{4,44 \cdot f \cdot w_1}$.

Принимая во внимание, что $U_1 \approx (-E_1)$ получим

$$\Phi_{max} \approx \frac{U_1}{4,44 \cdot f \cdot w_1}$$

Отсюда следует, что основной магнитный поток не зависит от нагрузки трансформатора

Уравнения магнитодвижущих сил и токов

Приравняв выражения для магнитного потока в режиме холостого хода и под нагрузкой получим уравнение МДС трансформатора:

$$I_0 W_1 = I_1 W_1 + I_2 W_2$$

Сумма МДС первичной $I_1 W_1$ и вторичной $I_2 W_2$ обмоток в режиме работы трансформатора под нагрузкой равна МДС холостого хода $I_0 W_1$, необходимой для наведения в магнитопроводе основного магнитного потока Φ_{max} .

Такое взаимодействие МДС $I_1 W_1$ и $I_2 W_2$ объясняется их **встречным направлением**, т.е. если МДС $I_1 W_1$ оказывает на магнитопровод **намагничивающее** воздействие, то МДС $I_2 W_2$ стремится **размагнитить его**.

При этом основной магнитный поток Φ_{max} в процессе работы трансформатора **остается практически неизменным**, т. к. во всем диапазоне изменений тока нагрузки МДС первичной обмотки $I_1 W_1$ оказывается больше МДС вторичной обмотки $I_2 W_2$ на величину МДС холостого хода $I_0 W_1$.

Уравнения магнитодвижущих сил и токов

Разделив уравнение МДС на число витков W_1 , получим:

$$I_0 = I_1 + I_2 \frac{W_2}{W_1} \quad \text{или} \quad \boxed{I_1 = I_0 + (-I_2')} \quad \text{Уравнение токов трансформатора}$$

$$I_2' = I_2 \frac{W_2}{W_1} \quad \text{- ток вторичной обмотки, приведенный к числу витков первичной обмотки}$$

Т.е. I_2' - это такой ток, который в обмотке с числом витков W_1 создает такую же МДС, что и ток I_2 во вторичной обмотке с числом витков W_2 т. е.:

$$I_2' W_1 = I_2 W_2.$$

Ток первичной обмотки I_1 представляет собой сумму двух составляющих, одна из которых I_0 создает МДС холостого хода $I_0 W_1$, необходимую для наведения в магнитопроводе основного магнитного потока Φ_{max} , а другая $-I_2'$ создает МДС $I_2' W_1$, компенсирующую размагничивающее действие МДС вторичной обмотки $I_2 W_2$,

Уравнения магнитодвижущих сил и токов

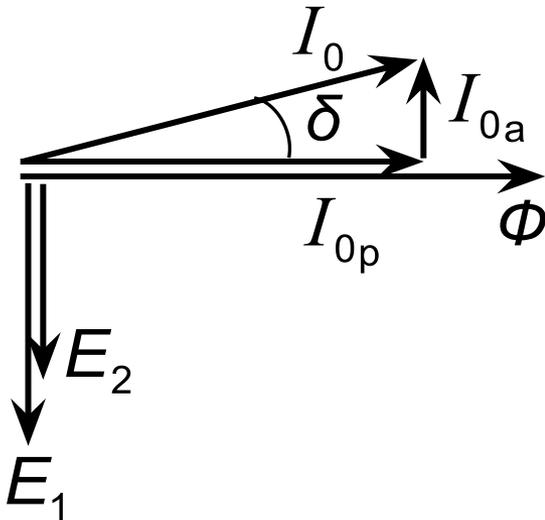
Основной магнитный поток Φ в трансформаторе – переменный, поэтому *магнитопровод трансформатора систематически перемагничивается.*

И, следовательно, в нем имеют место *магнитные потери от гистерезиса и вихревых токов*

Мощность магнитных потерь эквивалентна активной составляющей тока холостого хода

Т. о. ток холостого хода имеет *две составляющих:*

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}$$



I_{0a} - активная составляющая обусловленная магнитными потерями;

I_{0p} - реактивная составляющая – намагничивающий ток;

δ - угол магнитных потерь.

Уравнения магнитодвижущих сил и токов

Ток холостого хода I_0 в силовых трансформатора большой и средней мощности составляет 2 -10 % от номинального тока I_{1H}

Поэтому при нагрузках, близких к номинальной, пренебрегая током холостого хода I_0 , получим:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{W_2}{W_1}$$

Токи в обмотках трансформатора обратно пропорциональны числам витков в обмотках

Приведение параметров вторичной обмотки трансформатора

Для устранения затруднений в расчетах и построении векторных диаграмм, обусловленных разницей в параметрах первичной и вторичной обмоток (при $k_{\text{тр}} \gg 1$), *все величины, характеризующие вторичную цепь трансформатора, пересчитывают на число витков первичной обмотки w_1 .*

Т.о. *вместо реального трансформатора с $k_{\text{тр}} = w_1/w_2$ рассматривают эквивалентный трансформатор с $k_{\text{тр}} = w_1/w'_2$, где $w'_2 = w_1$. Такой трансформатор называют приведенным.*

При этом *все мощности и фазовые сдвиги во вторичной обмотке должны остаться такими же*, как и в реальном трансформаторе:

Электромагнитная мощность $E_2 I_2 = E'_2 I'_2$.

Учитывая, что $I'_2 = I_2 \frac{w_2}{w_1}$, получим

$$E'_2 = E_2 \frac{w_1}{w_2},$$

Полная мощность $U_2 I_2 = U'_2 I'_2$.

Отсюда

$$U'_2 = U_2 \frac{w_1}{w_2},$$

Приведение параметров вторичной обмотки трансформатора

Активная мощность $I_2^2 r_2 = (I_2')^2 r_2'$.

Отсюда

$$r_2' = r_2 \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2,$$

Реактивная мощность $I_2^2 x_2 = (I_2')^2 x_2'$.

Отсюда

$$x_2' = x_2 \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2,$$

Аналогично получим приведенное значение полного

сопротивления: $I_2^2 z_2 = (I_2')^2 z_2'$.

Отсюда

$$z_2' = z_2 \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2,$$

Уравнения напряжений и токов для приведенного трансформатора:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = (-\underline{E}_1) + j I_1 x_1 + I_1 r_1 \\ \underline{U}_2' = \underline{E}_2' - j I_2' x_2' - I_2' r_2' \\ I_1 = I_0 + (-I_2') \end{cases}$$

Эти уравнения устанавливают аналитическую связь между параметрами трансформатора во всем диапазоне нагрузок от режима холостого хода до номинальной.