

Трансформаторы

- Трансформатор – статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного электрического тока одного напряжения и определенной частоты в электрический ток другого напряжения и той же частоты. Работа любого трансформатора основана на явлении электромагнитной индукции, открытой Фарадеем.
- Для практических целей трансформатор впервые был применен в 1876 году П.Н. Яблочковым. Он использовался в цепи питания электрических свечей. Широкое применение трансформаторы получили после того, как М.О. Доливо-Добровольским была предложена трехфазная система передачи электроэнергии и разработана конструкция первого трехфазного трансформатора (1891г.).
- *Под трансформатором понимают статическое (т.е. без движущихся частей) электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного напряжения одной величины в переменное напряжение другой величины, но той же частоты.*
- Трансформатор – это статический магнитный прибор, который служит для изменения величины электрического напряжения в цепях переменного тока.
- Если трансформатор увеличивает напряжение – повышающий.
- Если трансформатор уменьшает напряжение – понижающий.

Классификация трансформаторов



трансформаторы

- Трансформаторы

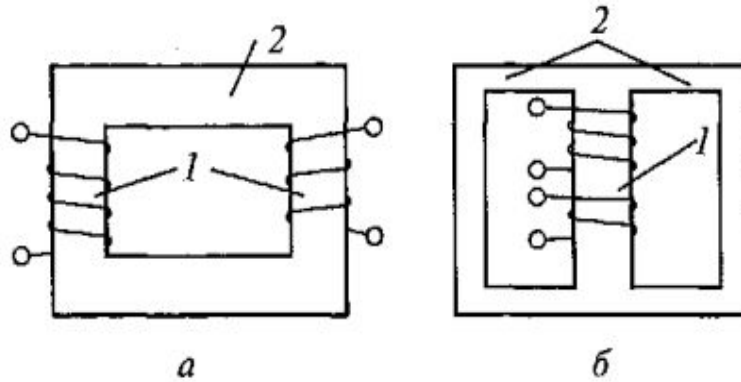
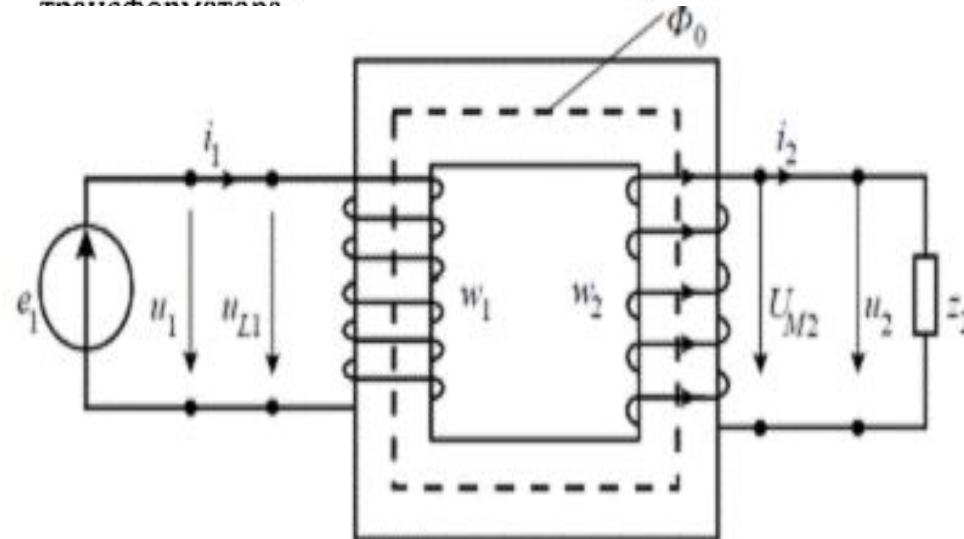


Рис. 6.1. Трансформаторы:

a — стержневого типа; *b* — броневое типа; *1* — стержни, на которых располагаются первичная и вторичная обмотки; *2* — ярмо, замыкающее магнитную цепь трансформатора



- Трансформатор содержит сердечник и как минимум две обмотки. Различают обмотку первичного напряжения и вторичного напряжения. Сердечник необходим для направления и усиления магнитного потока Φ . Он делается из тонких листов ферромагнитного материала. Каждая пластина покрыта электротехническим лаком для изоляции друг от друга. Это уменьшает потери от вихревых токов. Для уменьшения потерь на гистерезис магнитопровод делают из магнитомягкого материала.
- Принцип работы. При подключении первичной обмотки трансформатора с количеством витков ω_1 к напряжению U_1 по обмотке начинает проходить переменный ток i_1 , который создаёт в сердечнике переменный магнитный поток Φ . Магнитный поток, пронизывает витки вторичной
- обмотки ω_2 и индуцирует в ней ЭДС E_2 , которую можно использовать для питания нагрузки.
- Поскольку первичная и вторичная обмотки трансформатора пронизываются одним и тем же магнитным потоком Φ , выражения индуцируемых в обмотке ЭДС можно записать в виде
- $E_1 = 4,44 f \omega_1 \Phi$; $E_2 = 4,44 f \omega_2 \Phi$ Это формула трансформаторной э.д.с.

- где f — частота переменного тока; ω_1, ω_2 — число витков обмоток, Φ -магнитный поток.
- Соотношение E_1 к E_2 называется коэффициентом трансформации.
- **$K_{12} = E_1/E_2 = \omega_1/\omega_2 \approx U_1 / U_2 \approx I_2 / I_1$ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРА.**
- **Режим холостого хода.**
- Первичная обмотка трансформатора подключена к напряжению и U_1 по обмотке проходит переменный ток i_1 . Вторичная обмотка разомкнута. То есть $i_2=0, Z_H = \infty$. Трансформатор потребляет из сети энергию, которая расходуется только на потери.
- Коэффициент трансформации можно определить экспериментально при режиме холостого хода, измерив напряжения на входе и выходе ненагруженного трансформатора.
-
- **$K_{12} = E_1 / E_2 \approx U_1 / U_2$**
-
- Магнитный поток образуется только от тока в первичной обмотке $\Phi=\Phi_m$
- Величина магнитного потока пропорциональна приложенному напряжению U_1 .
- $E_1=4,44 f \omega_1 \Phi_m$
- *При этом ток в первичной обмотке $I_1=I_0=(1\%-10\%)I_{2ном}$.*
-
- *В этом режиме экспериментальным путем определяется коэффициент трансформации **K_{12}** и мощность потерь в магнитопроводе $\Delta P_{ст}$ (потери в стали) .*

На каждом трансформаторе указаны номинальные значения работы трансформатора в номинальном режиме.

- **Рабочий режим.**
- Первичная обмотка трансформатора подключена к напряжению $U_1 = U_{1ном}$ и по обмотке проходит переменный ток $i_1 = I_{1ном}$. К вторичной обмотке присоединена нагрузка $0 < Z_H < \infty$. При этом $U_2 = U_{2ном}$ и $i_2 = I_{2ном}$. Трансформатор потребляет из сети энергию, которая расходуется на нагрузку и на потери.
- Ток в первичной и ток во вторичной обмотке каждый создаёт свой магнитный поток Φ_1 и Φ_2 .
- Результирующий магнитный поток $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$
- При этом ток в первичной обмотке $I_1 = I_0 + I_2$, то есть зависит от тока нагрузки.
-
- **Номинальный режим** – это работа трансформатора в нормальных условиях при номинальном напряжении на первичной обмотке и обеспечении номинальной мощности на нагрузке $S_{ном}$. Номинальная мощность $S_{ном}$ – это полная мощность, которую трансформатор, установленный на открытом воздухе, может непрерывно отдавать в процессе службы (20-25 лет) при номинальном напряжении и средней температуре окружающей среды 40град С.

Тип	$U_{1н}$	$U_{2н}$	$S_{н}, \text{ВА}$
BV EI 481 1119	220 В	12 В	10

- Полная мощность трансформатора равна ?

- При увеличении тока во вторичной обмотке (увеличение нагрузки) ток в первичной обмотке увеличивается от I_{xx} до $I_{ном}$.
-
- Введено понятие коэффициента нагрузки $K_n = S / S_{ном}$. Он показывает насколько нагрузка отличается от номинальной. Трансформатор чаще работает с нагрузкой меньше номинальной.
-
- **Режим короткого замыкания.**
- Первичная обмотка трансформатора подключена к напряжению U_1 . Во вторичной обмотке при нагрузка $Z_n = 0$. При этом $U_2=0$ и $I_{2кз} \gg I_{2ном}$;
- Для большинства трансформаторов этот режим является аварийным. Очень большой ток во вторичной обмотке приводит к нагреву и разрушению.
- Мощные трансформаторы помещаются в металлический бак, заполненный специальным трансформаторным маслом, которое служит для изоляции и улучшения температурного режима при коротком замыкании.
-
- *В этом режиме экспериментальным путем определяется мощность потерь в обмотках трансформатора ΔP_m (потери в меди).*
-
- ***Коэффициент полезного действия трансформатора.***
-
- Преобразование электрической энергии в трансформаторе сопровождается потерями. В отличие от электрических машин трансформатор не имеет движущихся частей, поэтому механические потери отсутствуют. Имеющиеся потери обусловлены явлением гистерезиса, вихревыми токами, потоками рассеяния магнитного поля и активным сопротивлением обмоток.

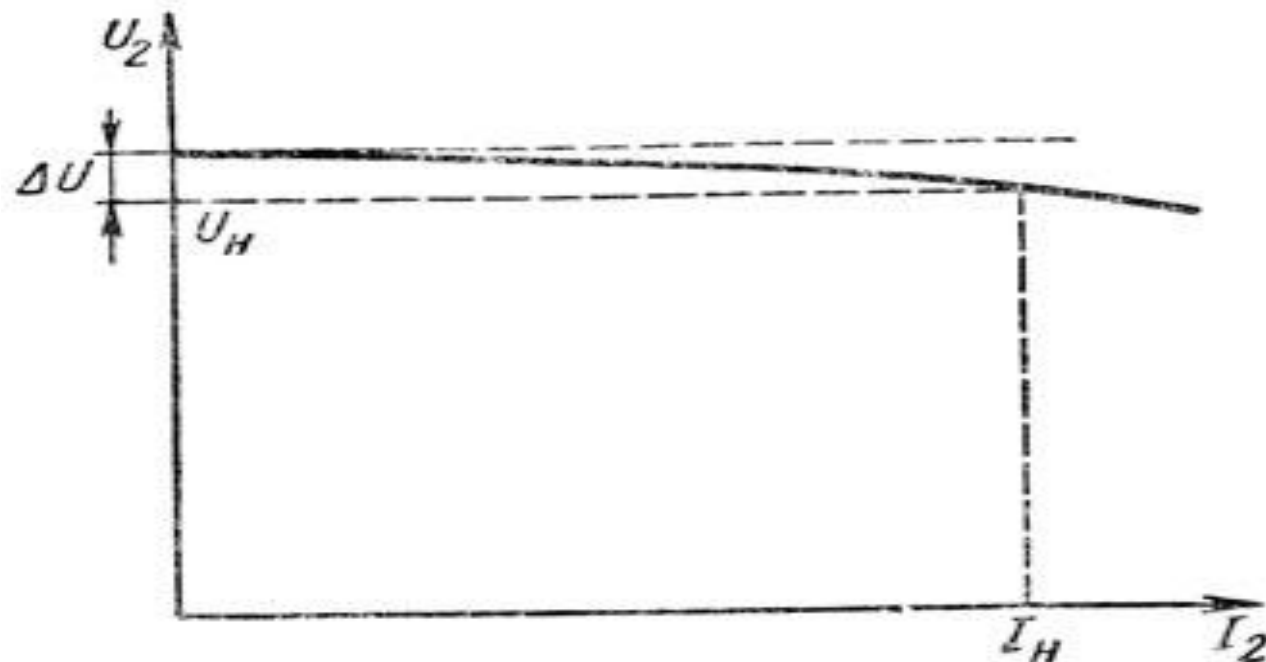
- Коэффициент полезного действия показывает, как отличается мощность на нагрузке от мощности, забираемой трансформатором из сети.
- $\eta = P_2 / P_1$, где P1 – мощность из сети, P2 – мощность потребителя (на нагрузке).
- При этом $P_1 = P_2 + P_m + P_{ст}$, где Pm – потери в меди (нагрев проводов трансформатора),
- Pст- потери в стали (вихревые токи в сердечнике).

$$\eta = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + \Delta P_m + \Delta P_{ст}} \qquad S_2 = U_2 \cdot I_2$$

- Где $P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2$ $\cos \varphi_2$ φ_2
- коэффициент мощности сдвиг по фазе между колебаниями напряжения U2 и тока I2.
-
- Вихревые токи, возникающие в сердечнике трансформатора, замыкаясь, нагревают его и приводят к потерям энергии.
- Сердечник трансформатора подвергается циклическому перемагничиванию. Магнитный поток связан с током зависимостью, выраженной петлёй гистерезиса. При этом, при каждом цикле перемагничивания сердечника затрачивается работа, пропорциональная площади петли гистерезиса. Эта работа идёт на нагревание. Выбирают магнитомягкий материал для сердечника, так как площадь петли гистерезиса у такого материала маленькая.

- Потери P_m и $P_{ст}$ определяют опытным путём, проводя два опыта.
- **Опыт холостого хода.** Показывает потери в стали.
- В режиме холостого хода энергия, потребления трансформатором, расходуется только на потери от вихревых токов и гистерезиса. Поэтому, если в режиме холостого хода включить в первичную цепь ваттметр, то он покажет величину этих потерь ($P_{ст}$).
- **Опыт короткого замыкания.** Показывает потери в меди.
- Если вторичную обмотку трансформатора замкнуть накоротко, а на первичную обмотку подать такое 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.
- То есть при этом опыте к первичной обмотке подводится пониженное напряжение. При этом магнитный поток очень мал. Потери в стали, зависящие от магнитного потока, тоже малы.
- Поэтому, если включить в первичную цепь ваттметр, то он покажет величину этих потерь (P_m).

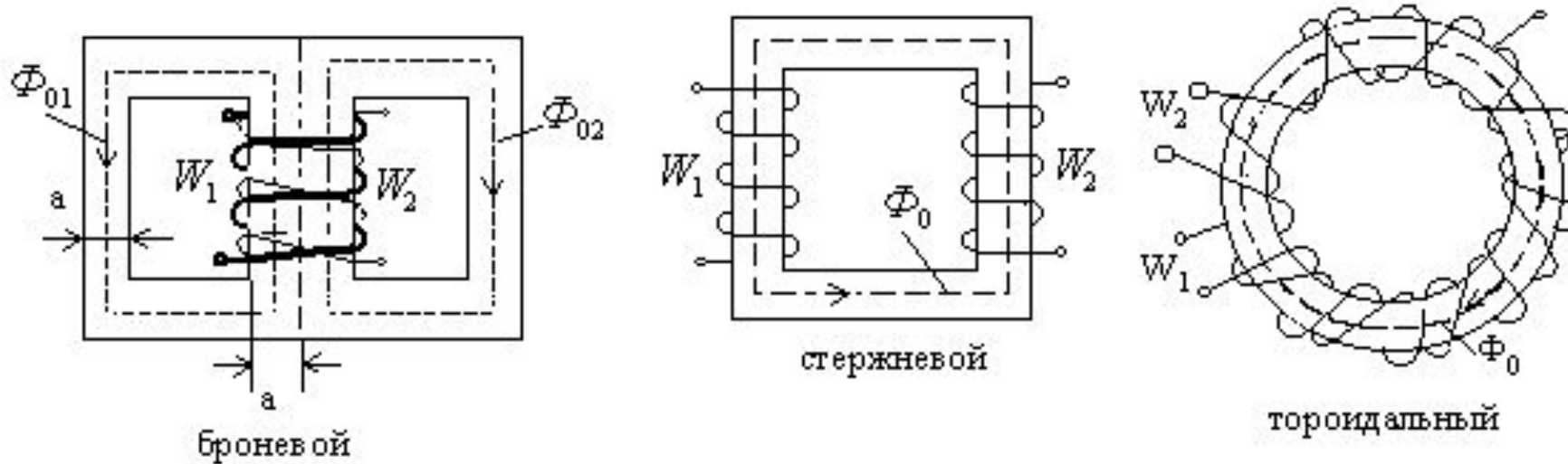
- ВНЕШНЯЯ ХАРАКТЕРИСТИКА.
- Это зависимость Внешнего напряжения от тока нагрузки. $U_2 = f(I_2)$



- При $I_2 = 0$ в режиме холостого хода напряжение во вторичной обмотке равно напряжению холостого хода $U_2 = U_{xh}$
- При увеличении тока нагрузки напряжение U_2 падает и может упасть до нуля в режиме короткого замыкания.
- U_H и I_H – это напряжение и ток при номинальной нагрузке

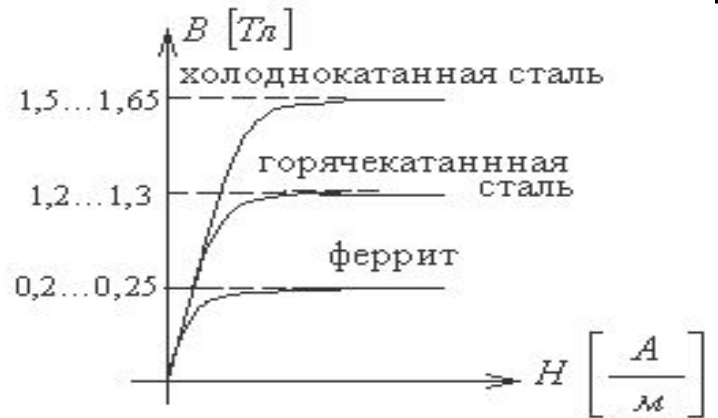
Конструктивные особенности трансформатора

- Однофазные трансформаторы классифицируются по типу магнитопровода на броневые, стержневые и тороидальные.



- Броневые сердечники используются при мощности менее 150 ВЧА и частота до 8 кГц, стержневые при мощности от 150 до 800 [ВЧА] и частоте до 8 кГц, тороидальные - при мощности 250 [ВЧА], частоте выше 8 кГц. В броневом сердечнике трансформатора основной магнитный поток раздваивается, что приводит к увеличению потока рассеяния. Расположение обмоток на одном (среднем) стержне трансформатора улучшает их сцепление и защищает обмотки от механических воздействий и электромагнитных помех. Такая конструкция обладает наибольшим рассеиванием основного потока (Φ_0), поэтому используется при малых мощностях.

- В стержневом сердечнике трансформатора для улучшения сцепления обмоток первичную и вторичную обмотки разводят по двум стержням и при намотке чередуют послойно. В такой конструкции поток рассеяния меньше, чем в броневом.
- Тороидальная конструкция сердечника трансформатора обладает наименьшим потоком рассеяния, благодаря круговому движению силовой линии основного магнитного потока Φ_0 и хорошему сцеплению обмоток (из-за намотки по всему тороиду). Ограничение по мощности связано с плохим охлаждением обмоток и технологическими трудностями изготовления тороида. Поперечное сечение тороида и стержней приближается к округлой форме, что позволяет экономить материал сердечника.
- Сердечники магнитопроводов изготавливаются в виде лент, пластин или прессуют из ферромагнитного порошка с добавлением кремния (небольшой процент, так как он придает хрупкость конструкции) для ограничения вихревых токов, перпендикулярных основному потоку. выполняются из холоднокатанной (анизотропной изотропной) стали а также горячекатанной стали.



- Холоднокатанная сталь обладает высокой магнитной проницаемостью и малыми удельными потерями на единицу веса, но является дорогостоящим металлом. В анизотропной холоднокатанной стали направление проката диктует направление силовой линии магнитного потока (Φ_0) потому, что в перпендикулярном направлении ухудшаются магнитные свойства материала. Горячекатанная сталь более экономичная, но имеет более высокие удельные потери и более низкую магнитную проницаемость (μ_d). В высокочастотных трансформаторах в качестве материала сердечника используют следующее: феррит, пермаллой, альсифер. Альсифер используется для дросселей сглаживающих фильтров, т.к. имеется запас по намагниченности, пермаллой подвержен механическим воздействиям. Феррит обладает широким диапазоном рабочих частот, поэтому широко используется в импульсных трансформаторах.
- Обмотки трансформатора изолируются друг от друга. В конструкции трансформатора они размещаются на каркасе и используется межвитковая, межслойная изоляция (лак, волокно, х/б нитки и.т.д.). Тип изоляции зависит от рабочей температуры. Провода для обмоток имеют прямоугольное или круглое сечение, прямоугольные используются при повышенных токах нагрузки. При проектировании трансформаторов вводится понятие плотности тока.

$$j = \frac{I_i}{S_{np}}$$

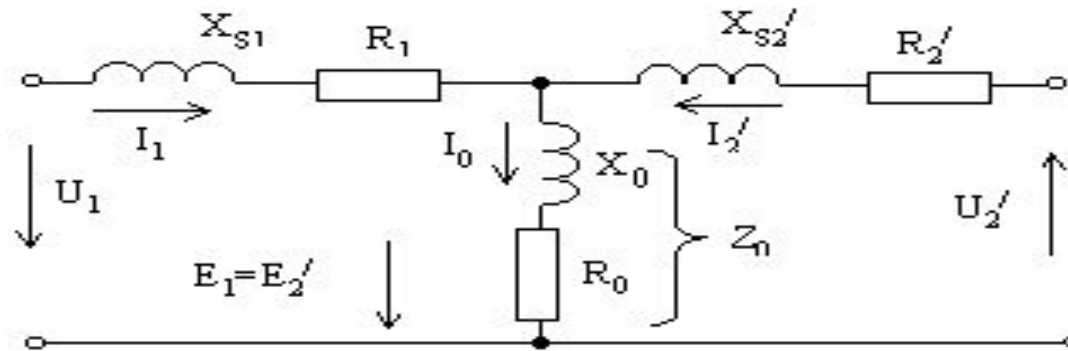
$$j = [2...8] \text{ A/mm}^2$$

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

- Выбор плотности тока зависят от расположения обмотки на магнитопроводе и типа магнитопровода.
- Для упрощения анализа электромагнитных процессов в трансформаторе вводится схема замещения, в которой магнитная связь заменяется электрической и коэффициент трансформации n

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

- Коэффициент трансформации является и коэффициентом приведения вторичной цепи к первичной. На рисунке показана схема замещения трансформатора:



- где введены такие обозначения:
- R_0 - учитывает потери в магнитопроводе (на вихревые токи и на гистерезис);
- X_0 - учитывает намагниченность материала сердечника и зависит от марки материала (в идеальном трансформаторе Z_0);
- R_1, R_2 - учитывают потери на нагрев обмоток первичной и вторичной цепей;
- X_{s1}, X_{s2} - индуктивности рассеяния основного потока в обмотках первичной и вторичной цепей;

- Для получения соотношения между реальными и приведенными параметрами, воспользуемся равенством полных мощностей, активных мощностей и углов

$$E_2 I_2 = E_2^{\prime} \cdot I_2^{\prime} \Rightarrow I_2^{\prime} = \frac{I_2}{n} \quad \Delta P_2 = U_2 I_2 = U_2^{\prime} I_2^{\prime} \Rightarrow U_2^{\prime} = n \cdot U_2 \quad \overline{S_2} = \overline{S_2^{\prime}} \quad \Delta P_2 = \Delta P_2^{\prime} \quad \varphi_2 = \varphi_2^{\prime}$$

$$\Delta P_2 = I_2^2 \cdot R_2 = (I_2^{\prime})^2 \cdot R_2^{\prime}$$

$$R_2^{\prime} = n^2 \cdot R_2$$

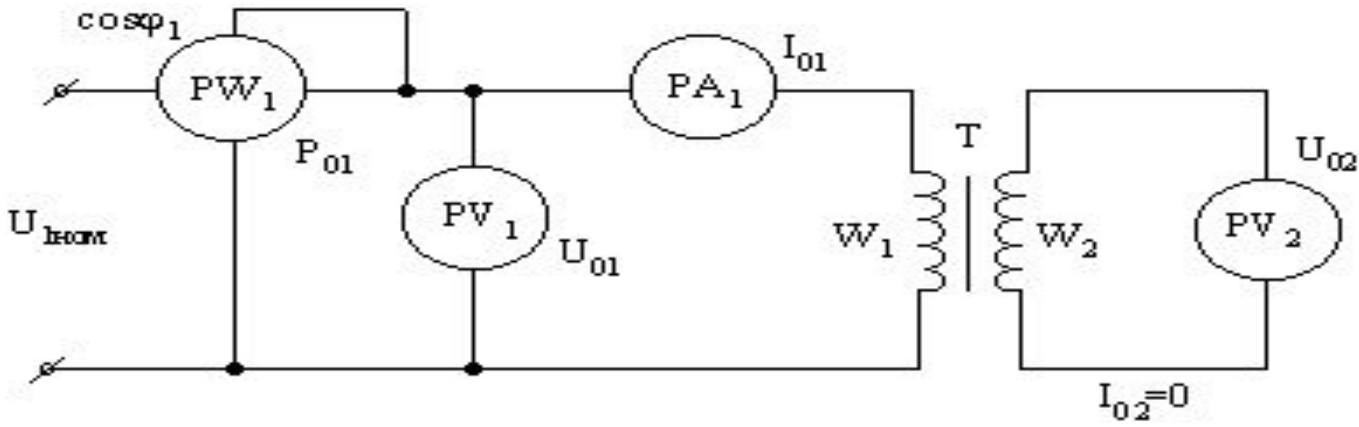
$$\varphi_2 = \varphi_2^{\prime}$$

$$\frac{X_{s2}}{R_2} = \frac{X_{s2}^{\prime}}{R_2^{\prime}} \Rightarrow X_{s2}^{\prime} = n^2 X_{s2}$$

- Запишем систему уравнений для схемы замещения:

$$\begin{cases} U_1 = -E_1 + I_1 Z_1 = -E_1 + I_1 \cdot (jX_{s1} + R_1) \\ U_2 = -E_2 - I_2 Z_2 = E_2^{\prime} - I_2^{\prime} \cdot (jX_{s2}^{\prime} + R_2^{\prime}) \\ I_1 + I_2^{\prime} = I_0 \end{cases}$$

- **Опыт холостого хода**
- **Условия проведения опыта:** на вход подается номинальное напряжение $U_{1ном}$, вторичная цепь размыкается.



- **Измеряемыми параметрами** являются номинальное напряжение вторичной цепи (U_{02}) и первичной цепи (U_{01}) (их называют напряжением холостого хода), ток первичной цепи (I_{01} - ток холостого хода), активная мощность или потери в магнитопроводе (P_{01}). Если устанавливаем измеритель коэффициента мощности, то активная мощность рассчитывается из соотношения

$$P_{01} = S_{01} \cdot \cos \varphi_1$$

- В этом опыте рассчитываются - коэффициент трансформации (n) и значение процентного соотношения тока холостого хода к номинальному току первичной цепи

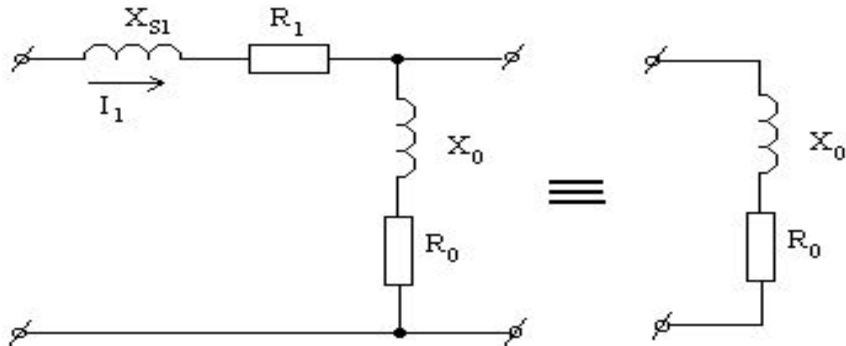
$$i_{01}(\%) = \frac{I_{01}}{I_{1ном}} \cdot 100\% < 30\%$$

Это значение нормируется в процентах в зависимости от области использования трансформатора, его мощности, частоты преобразования. Параметры схемы замещения поперечного плеча рассчитываются по соотношениям:

$$Z_0 = \frac{U_{01}}{I_{01}} \quad R_0 = \frac{P_{01}}{I_{01}^2} \quad x_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = Z_0 \cdot \sin \phi_1$$

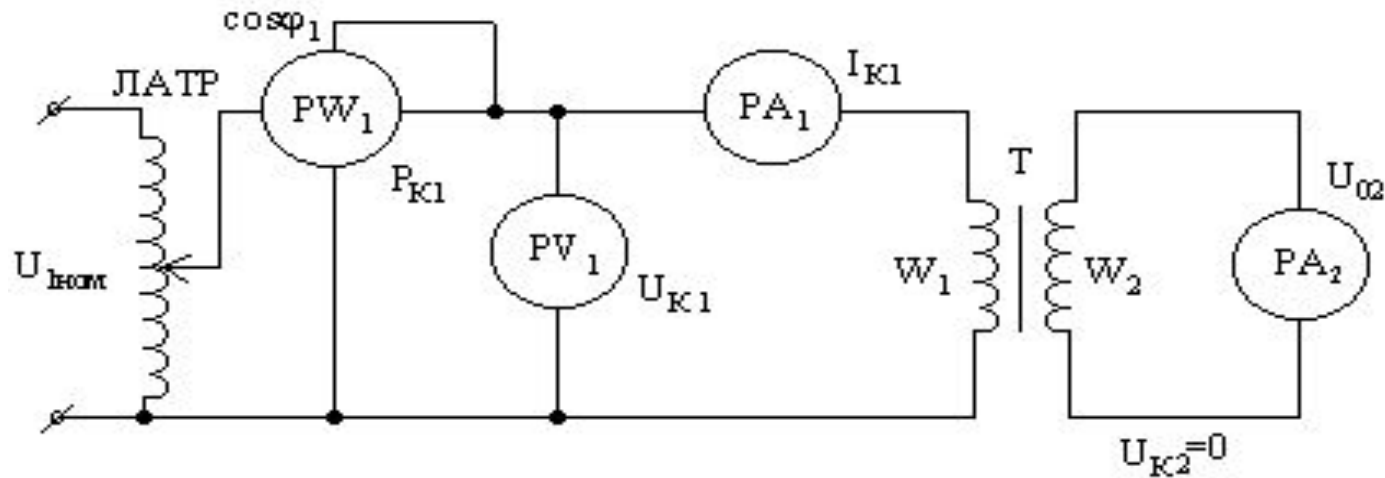
Если из опыта значение тока холостого хода получилось больше 30%, то значит завышено входное напряжение, или при проектировании завышена величина магнитной индукции. Для устранения этого потребуется изменить сечение магнитопровода или перемотать обмотки

- В опыте холостого хода схема замещения трансформатора принимает вид



Опыт короткого замыкания

- Так как параметры продольного плеча значительно меньше, чем параметры поперечного плеча схемы замещения и ток "холостого" хода значительно меньше номинального тока первичной цепи, то в схеме замещения трансформатора на "холостом" ходу пренебрегаем параметрами X_{S1} и R_1 .



Опыт "короткого" замыкания проводится при пониженном напряжении питания, так как ток в обмотках трансформатора может превысить номинальные значения при повышении напряжения. Необходимо плавно увеличивать напряжение на выходе ЛАТРА до достижения номинальных токов в цепях. Измеряемыми параметрами являются: номинальные токи в цепях I_{K1} , I_{K2} , напряжение короткого замыкания первичной цепи (U_{K1}) и потери в обмотках. При измерении коэффициента мощности потери определяются из выражения:

Внешняя характеристика трансформатора

- При измерении коэффициента мощности потери определяются из выражения:

$$P_{K1} = S_1 \cdot \cos \varphi_1 = U_{K1} \cdot I_{K1} \cdot \cos \varphi_1.$$

- Расчетными параметрами является процентное соотношение напряжения короткого замыкания по отношению к номинальному входному напряжению

$$U_{K1} (\%) = \frac{U_{K1}}{U_{1НОМ}} \cdot 100\% \leq (5...7)\%$$

- Внутреннее сопротивление трансформатора (сопротивление продольного плеча схема замещения) определяется из опыта "короткого" замыкания:

$$Z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1K}}$$

$$R_K = R_1 + R_2 = \frac{P_{K1}}{I_{K1}^2}$$

$$X_K = X_{S1} + X_{S2} = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}$$

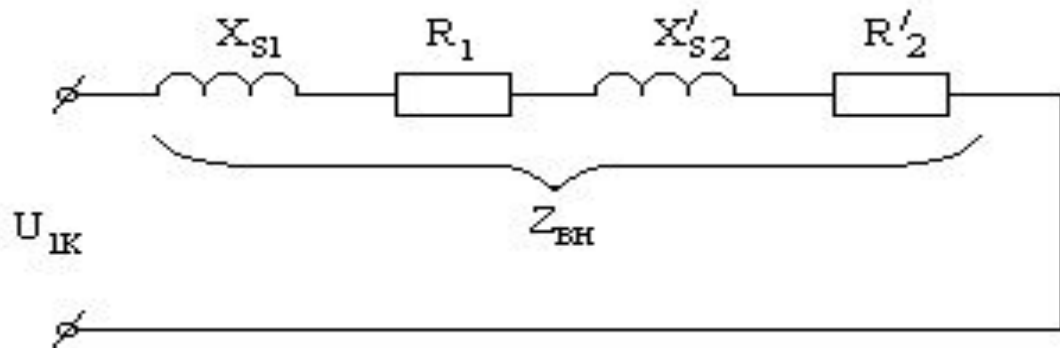
При переходе к реальным параметрам трансформатора принимается равенство:

- При переходе к реальным параметрам трансформатора принимается равенство

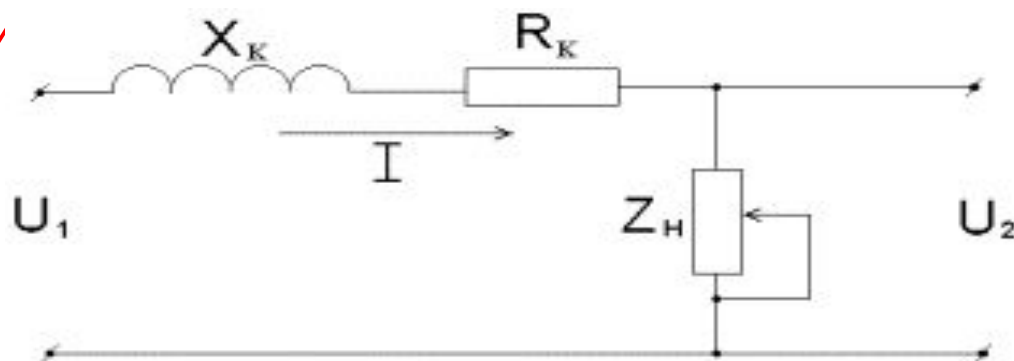
$$R_1 = R_2 = R_K / 2$$

$$X_{s1} = X'_{s2} = X_K / 2$$

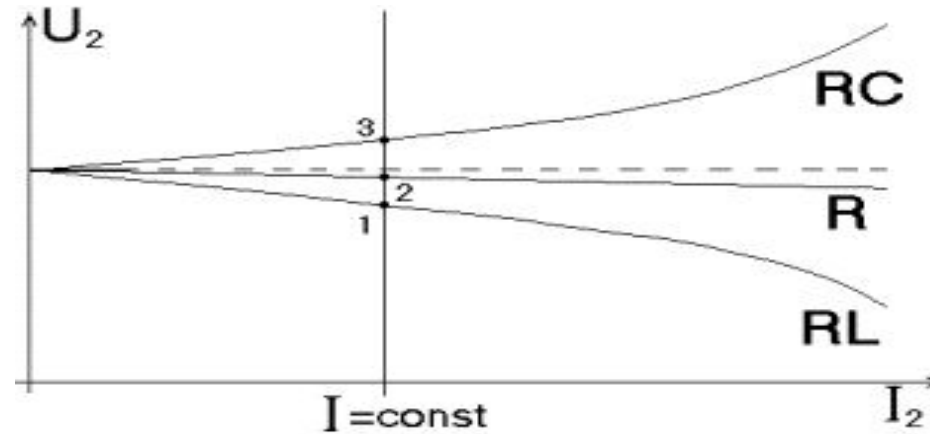
- Схема замещения трансформатора в опыте "короткого" замыкания приводится в виде:



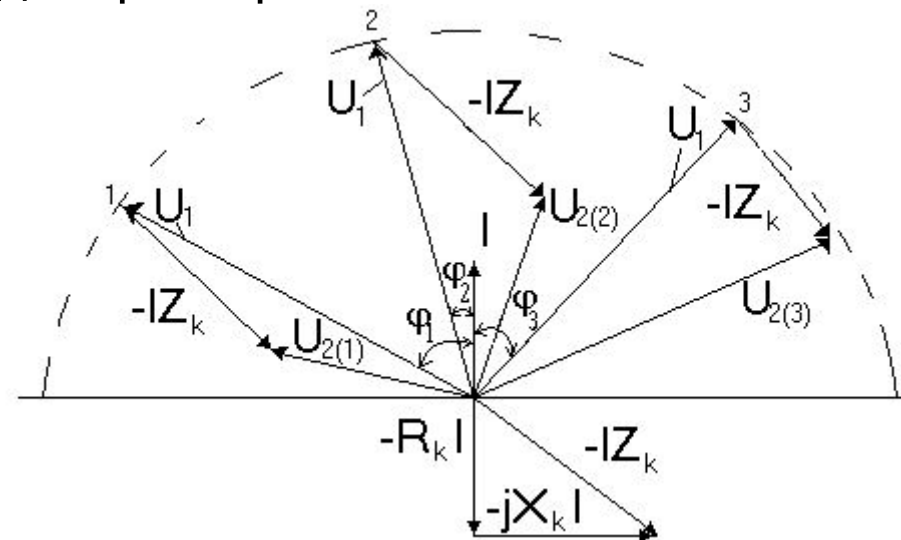
- Под внешней характеристикой понимается зависимость выходного напряжения от тока нагрузки с учетом его характера (активная - R, активно-емкостная - RC, активно-индуктивная - RL). Схема замещения трансформатора при



- По второму закону Кирхгофа запишем уравнение для схемы замещения трансформатора: $U_2 = U_1 - IZ_k = U_1 - I(jX_k + R_k)$.



- Для объяснения закона внешних характеристик для различных видов нагрузок построим векторную диаграмму для фиксированного значения тока нагрузки $I = \text{const}$.



- При построении векторной диаграммы принимается такая условность: по часовой стрелке отставание вектора тока от вектора напряжения. При индуктивной нагрузке ток отстает от напряжения на угол j_1 , поэтому вектор напряжения U_1 повернут против часовой стрелки по отношению к вектору тока I ; при емкостной нагрузке напряжение U_1 отстает от тока I_1 на угол j_3 , поэтому вектор напряжения U_1 повернут по часовой стрелки по отношению к вектору тока I .
- При активной нагрузке вектор напряжения U_1 повернут против часовой стрелки по отношению к вектору тока I на небольшой угол j_2 из-за малой величины индуктивности нагрузки. Вектор $(-R_k I)$ противоположен по направлению к вектору тока I . Так как X_k - индуктивность рассеяния трансформатора, то вектор $(-jX_k I)$ перпендикулярен по отношению к вектору $(-R_k I)$ и имеет поворот против часовой стрелки.
- Каждый из векторов $U_{2(1)}$, $U_{2(2)}$, $U_{2(3)}$ получается в результате суммирования двух векторов U_1 и $(-I Z_k)$. Из векторной диаграммы видно, что при активной и индуктивной нагрузках происходит уменьшение напряжения во вторичной цепи трансформатора с увеличением тока I . Если нагрузка имеет емкостной характер, то напряжение увеличивается. При проектировании трансформатора необходимо учитывать характер нагрузки. Например, индуктивная нагрузка требует увеличивать количество витков во вторичной цепи с учетом понижения напряжения при работе под нагрузкой. Конденсаторы используются для компенсации реактивной составляющей в трансформаторах, они включаются в трехфазных трансформаторах параллельно в каждой фазе или между фазами, как показано на рисунке.