

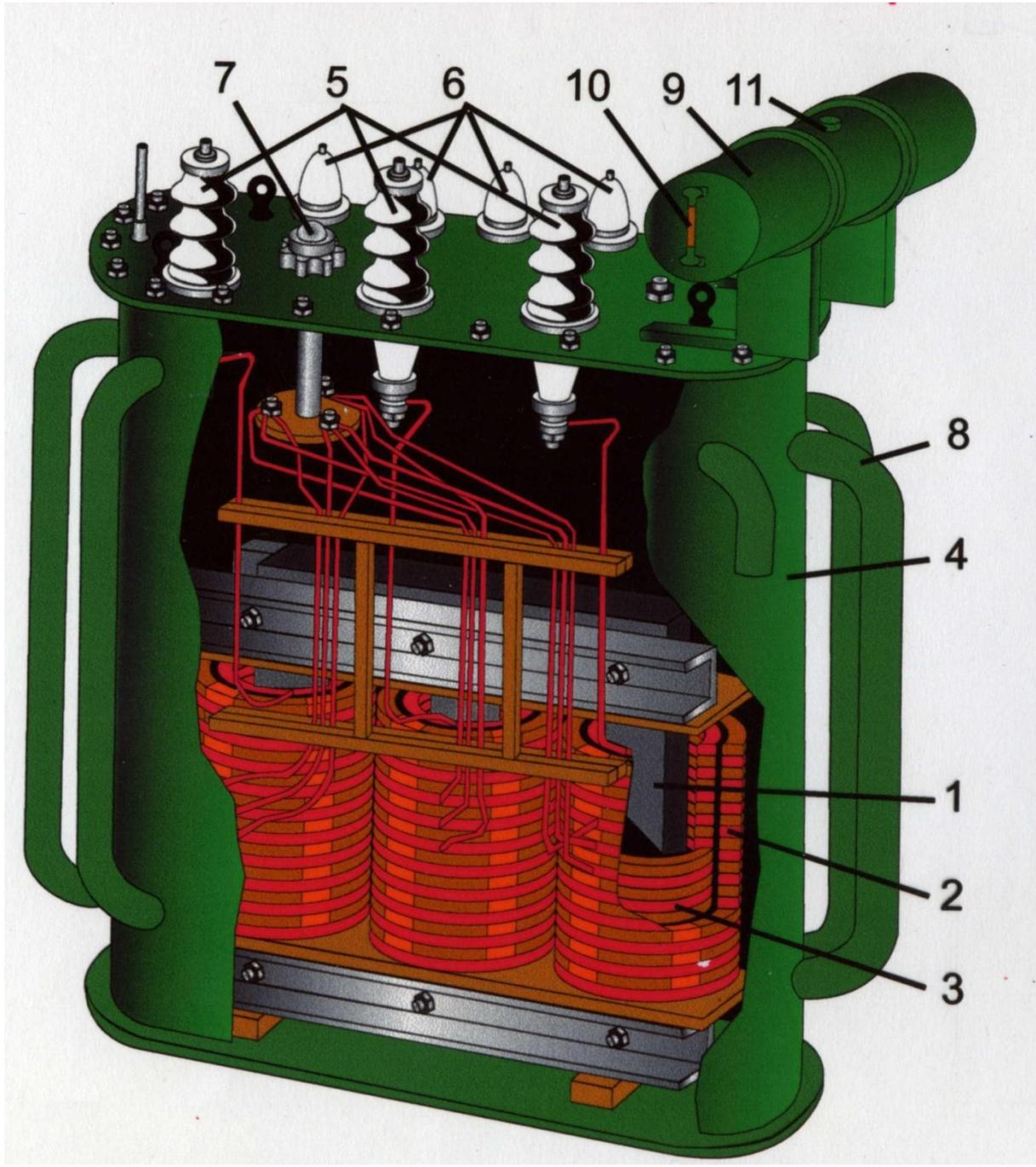
ТРАНСФОРМАТОРЫ

● **Трансформатор** — это статический электромагнитный аппарат, имеющий две или более индуктивно связанные обмотки и предназначенный для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока (ГОСТ Р 52002-2003).

Таким образом, трансформатор осуществляет преобразование напряжения переменного тока из одной величины в другую и/или гальваническую развязку в самых различных областях применения - электроэнергетике, электронике и радиотехнике.



Получение и распределение энергии



ИСТОРИЯ ПОЯВЛЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

- Столетов Александр Григорьевич (профессор МУ) сделал первые шаги в этом направлении — обнаружил петлю гистерезиса и доменную структуру ферромагнетика (в начале 80-х IX века).
- В 1831 году английским физиком Майклом Фарадеем было открыто явление электромагнитной индукции, лежащее в основе действия электрического трансформатора, при проведении им основополагающих исследований в области электричества.
- Схематичное изображение будущего трансформатора впервые появилось в 1831 году в работах Фарадея и Генри. Однако ни тот, ни другой не отмечали в своём приборе такого свойства трансформатора, как изменение напряжений и токов, то есть трансформирование переменного тока.
- В 1848 году французский механик Г. Румкорф изобрёл индукционную катушку особой конструкции. Она явилась прообразом трансформатора.
- **30 ноября 1876 года**, дата получения патента **Яблочковым Павлом Николаевичем**, считается датой рождения первого трансформатора. Это был трансформатор с разомкнутым сердечником, представлявшим собой стержень, на который наматывались обмотки.

- Первые трансформаторы с замкнутыми сердечниками были созданы в Англии в 1884 году братьями Джоном и Эдуардом Гопкинсон.
- В 1885 г. венгерские инженеры фирмы «Ганц и К°» Отто Блати, Карой Циперновский и Микша Дери изобрели трансформатор с замкнутым магнитопроводом, который сыграл важную роль в дальнейшем развитии конструкций трансформаторов.
- Большую роль для повышения надежности трансформаторов сыграло введение масляного охлаждения (конец 1880-х годов, Д. Свинберн). Свинберн помещал трансформаторы в керамические сосуды, наполненные маслом, что значительно повышало надежность изоляции обмоток.
- 1928 год можно считать началом производства силовых трансформаторов в СССР, когда начал работать Московский трансформаторный завод (впоследствии — Московский электрозавод).
- В начале 1900-х годов английский исследователь-металлург Роберт Хедфилд провёл серию экспериментов для установления влияния добавок на свойства железа. Лишь через несколько лет ему удалось поставить заказчикам первую тонну трансформаторной стали с добавками кремния.
- Следующий крупный скачок в технологии производства сердечников был сделан в начале 30-х годов XX в, когда американский металлург Норман П. Гросс установил, что при комбинированном воздействии прокатки и нагревания у кремнистой стали появляются незаурядные магнитные свойства в направлении прокатки: магнитное насыщение увеличивалось на 50 %, потери на гистерезис сокращались в 4 раза, а магнитная проницаемость возрастала в 5 раз.
- С изобретением трансформатора возник технический интерес к переменному току.

КЛАССИФИКАЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

1. По назначению

1. **Силовые** - используются для передачи и распределения электрической энергии с наилучшими технико-экономическими показателями.
2. **Трансформаторы питания** - маломощные трансформаторы, предназначенные для питания электрической аппаратуры и бытовых устройств.
3. **Измерительные** - работают в комплексе с измерительными приборами и расширяют их пределы измерения.
4. **Импульсные** - работают при несинусоидальном токе, а в импульсном режиме.
5. **Пик-трансформаторы** - вырабатывают пикообразное напряжение при включении в цепь синусоидального тока.
6. **Испытательные** - предназначены для испытания электрической прочности изоляции.

2. По числу фаз.

1. Однофазные трансформаторы

2. Трёхфазные трансформаторы

Трансформаторы с числом фаз более трёх встречаются только в некоторых специальных схемах.

3. По числу обмоток.

1. Двухобмоточный трансформатор.

2. Многообмоточный трансформатор.

3. Однообмоточный трансформатор (автотрансформатор).

4. По форме магнитопровода

1. Стержневые

2. Броневые

3. Торoidальные

5. По системе охлаждения

1. Естественное воздушное охлаждение.

Обмотки, магнитопровод и другие части трансформатора имеют непосредственное соприкосновение с окружающим воздухом, поэтому их охлаждение происходит путём излучения и естественной конвекции воздуха.

2. Естественное масляное охлаждение.

Активная часть трансформатора помещается в бак, заливаемый трансформаторным маслом. В некоторых случаях бак заливается другим жидким диэлектриком.

3. Масляное охлаждение с дутьём.

Поверхность бака обдувается вентиляторами при имеющемся масле внутри. Этот вид охлаждения позволяет увеличить теплоотдачу в 1,5 - 1,6 раза.

4. Масляное охлаждение с принудительной циркуляцией масла.

Масло из бака откачивается насосом, прогоняется через водяной или воздушный теплообменник и охлаждённое возвращается в бак.

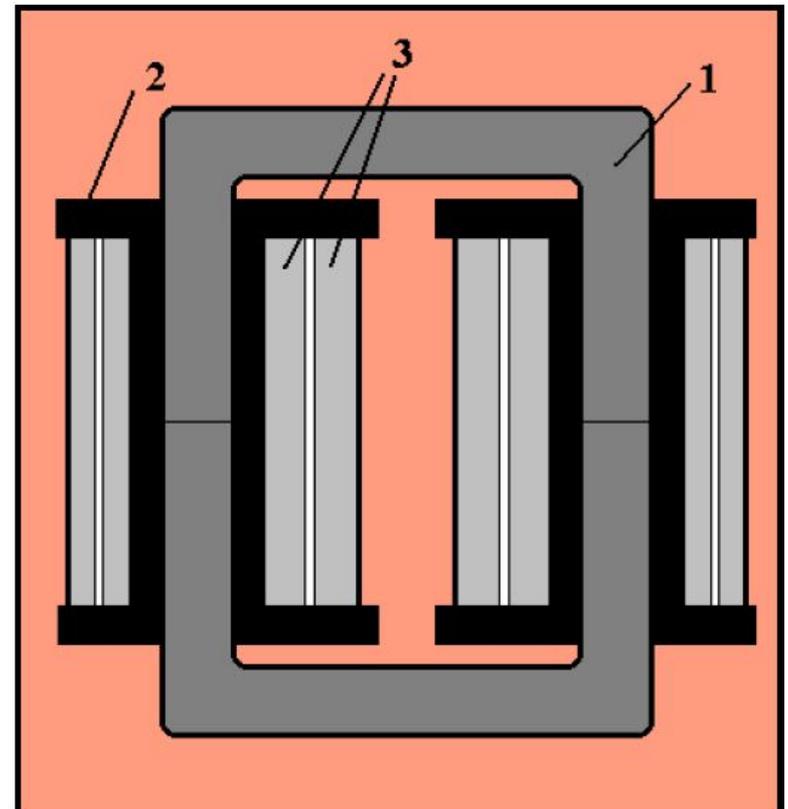
ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Конструкция однофазного трансформатора

Основными частями однофазного трансформатора являются:

- 1. магнитопровод**
- 2. изоляционный каркас**
- 3. обмотки**

Конструктивно трансформатор может состоять из одной (автотрансформатор) или нескольких изолированных проволочных, либо ленточных обмоток (катушек), охватываемых общим магнитным потоком, намотанных, как правило, на магнитопровод



Конструкция однофазного трансформатора

Магнитопровод (1) выполняется из ферромагнитного материала и предназначен для локализации магнитного потока и усиления электромагнитной связи обмоток.

Магнитопровод изготавливается из магнитомягких материалов (листовой или ленточной электротехнической стали, листового или ленточного пермалоя, монолитного феррита) с узкой *петлёй гистерезиса*. Чем уже петля, тем легче материал перемагничивается, т.е. меньше затраты энергии на перемагничивание, следовательно *Меньше потери на перемагничивание (или потери на «гистерезис»)*.

Магнитопровод собирается из отдельных пластин, изолированных друг от друга или навивается из ленты, т.к. при проведении магнитного потока в поперечной к нему плоскости возникают токи Фуко (*вихревые токи*). Изоляционные промежутки между листами или слоями ленты уменьшают вихревые токи и, соответственно, *потери мощности в магнитопроводе*.

Конструкция однофазного трансформатора

Обмотка (З) - это совокупность витков, образующих электрическую цепь, в которой суммируются ЭДС витков.

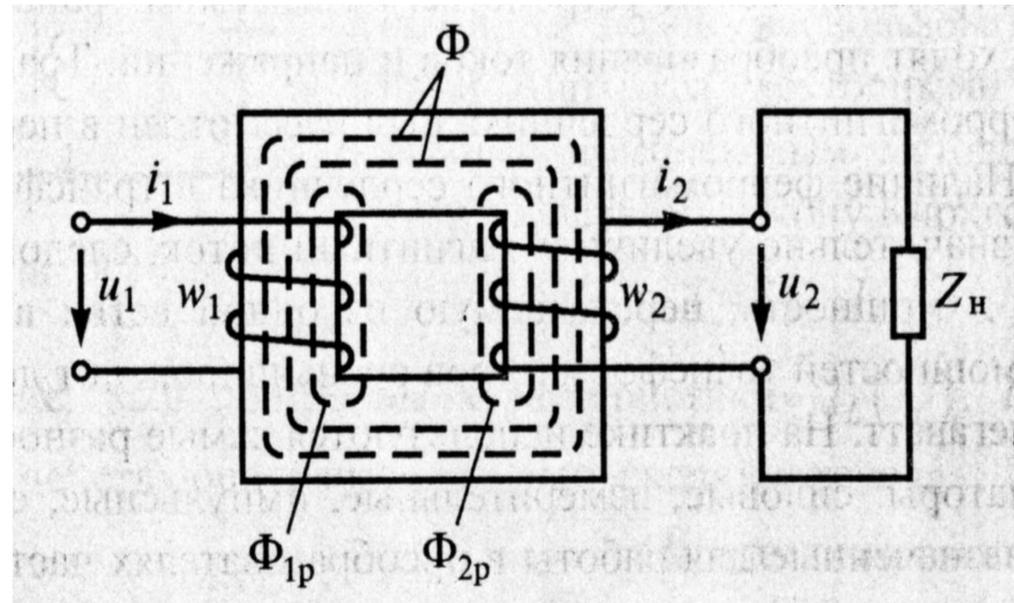
Виток - это деталь из электрического проводника однократно охватывающая часть магнитопровода, является основным элементом обмотки. Обмотки осуществляют электромагнитное преобразование энергии, выполняются из электропроводящих и изоляционных материалов. При протекании тока по обмотке, возникают электрические потери на активном сопротивлении. Для уменьшения электрических потерь используют высокопроводящий материал (медь, алюминий, серебро).

Работа трансформатора основана на двух базовых принципах:

- Изменяющийся во времени электрический ток создаёт изменяющееся во времени магнитное поле (электромагнетизм)
- Изменение магнитного потока, проходящего через обмотку, создаёт ЭДС в этой обмотке (электромагнитная индукция)

Принцип действия

- На одну из обмоток, называемую первичной обмоткой, подаётся напряжение от внешнего источника. Протекающий по первичной обмотке переменный ток создаёт переменный магнитный поток в магнитопроводе. В результате электромагнитной индукции, переменный магнитный поток в магнитопроводе создаёт во всех обмотках, в том числе и в первичной, ЭДС индукции, пропорциональную первой производной магнитного потока, при синусоидальном токе сдвинутой на 90° в обратную сторону по отношению к магнитному потоку.

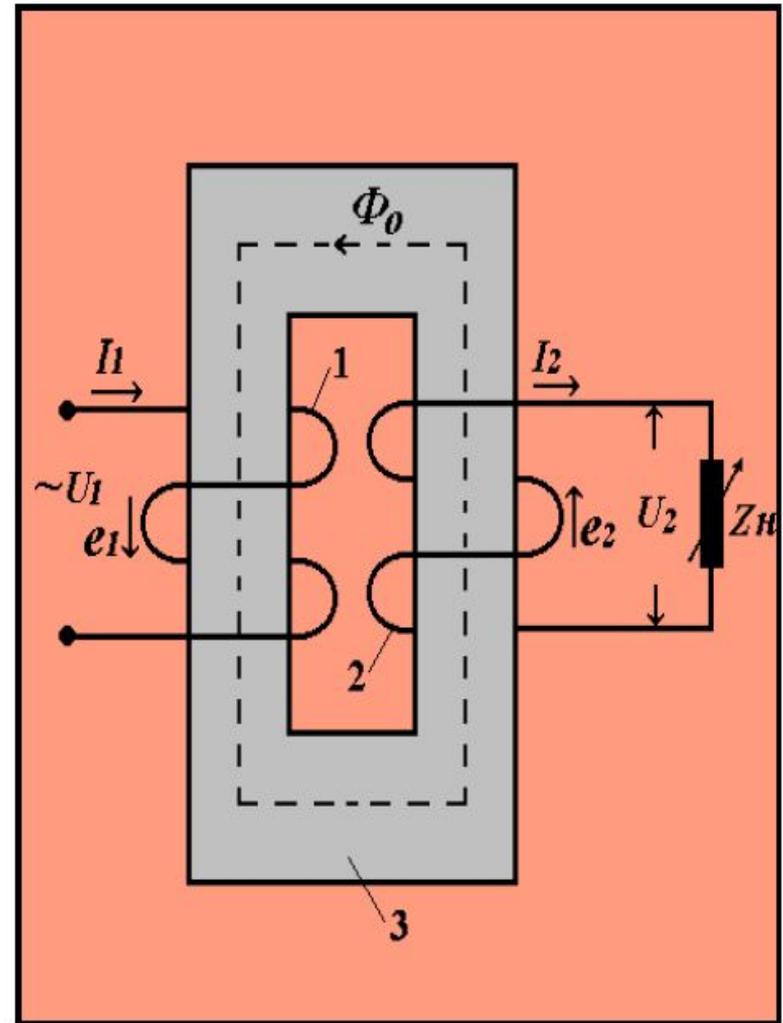


- Внешний источник
- Первичная обмотка
- Вторичная обмотка
- Сердечник (магнитопровод) состоит из изолированных листов электротехнической стали и служит для усиления магнитной связи между обмотками.
- Нагрузка
- Система охлаждения

Принцип действия однофазного трансформатора

Электромагнитная система однофазного двухобмоточного трансформатора состоит из двух обмоток, расположенных на магнитопроводе.

Первичная обмотка (1) с числом витков w_1 включена в однофазную сеть переменного тока с напряжением U_1 , а вторичная обмотка (2) с числом витков w_2 замкнута на сопротивление нагрузки Z_H .



Принцип действия однофазного трансформатора

Под действием приложенного напряжения U_1 по первичной обмотке протекает ток I_1 , создающий мдс первичной обмотки $F_1 = I_1 \cdot w_1$, которая приводит к появлению в сердечнике переменного магнитного потока.

Основная часть потока Φ_0 замыкается по магнитопроводу (3), сцепляется с обеими обмотками и наводит в них эдс e_1 и e_2 . Небольшая часть потока Φ_1 , называемая потоком рассеивания $\Phi_{\sigma 1}$ первичной обмотки, замыкается по воздуху непосредственно вокруг этой обмотки.

Во вторичной обмотке эдс e_2 вызывает ток I_2 , на сопротивлении нагрузки Z_n снимается выходное напряжение $U_2 = I_2 \cdot Z_n$ и выходная мощность $P_2 = U_2 \cdot I_2$. Одновременно ток I_2 создаёт мдс вторичной обмотки $F_2 = I_2 \cdot w_2$, направление которой в контуре магнитопровода определяется по правилу Ленца.

Значение потока Φ_0 , замыкающегося по сердечнику и называемого Потокom взаимoиндукции, или основным магнитным потоком, определяется результирующим воздействием мдс F_1 и F_2 .

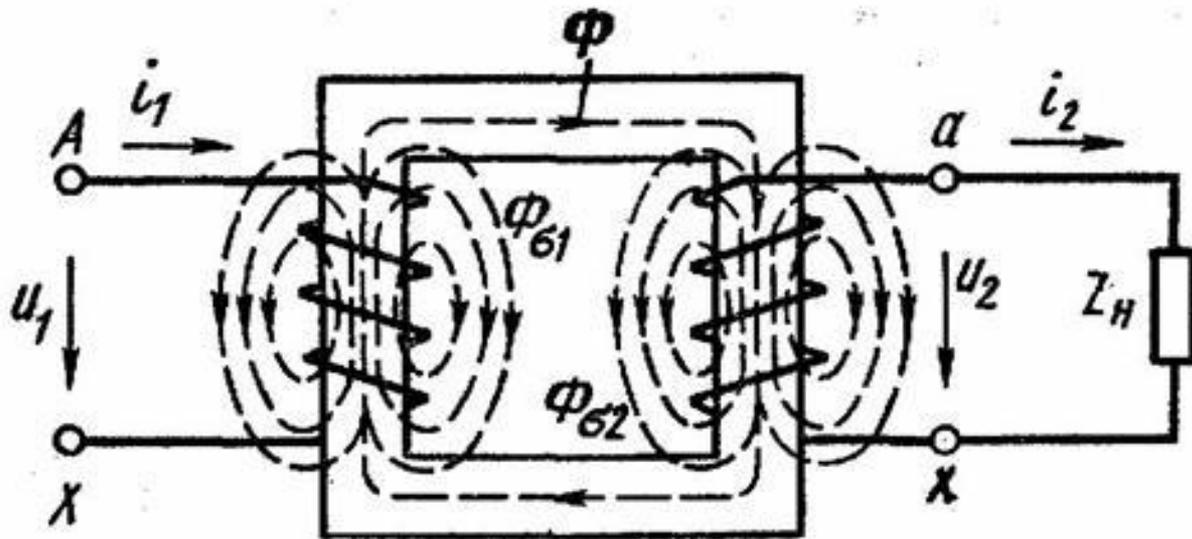
В обеих обмотках эдс взаимoиндукции определяются в соответствии с законом электромагнитной индукции: $e_1 = -w_1 d\Phi_0/dt$; $e_2 = -w_2 d\Phi_0/dt$.

Комплексные уравнения и векторная диаграмма реального трансформатора

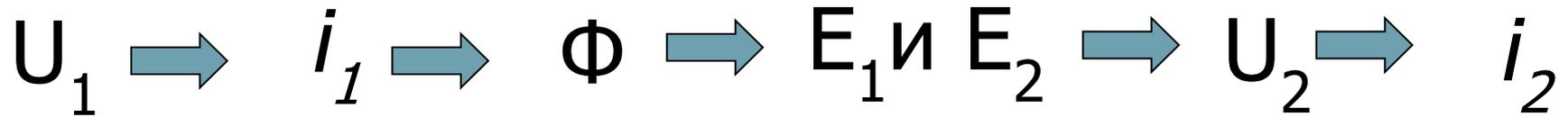
В реальном трансформаторе помимо основного магнитного потока Φ , замыкающегося по магнитопроводу и сцепленного со всеми обмотками трансформатора, имеются также потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$, которые сцеплены только с одной из обмоток. Потоки рассеяния не участвуют в передаче энергии, но создают в каждой из обмоток соответствующие ЭДС самоиндукции

$$E_{\sigma 1} = 4,44 f w_1 \Phi_{\sigma 1 m}$$

$$E_{\sigma 2} = 4,44 f w_2 \Phi_{\sigma 2 m}$$



Условная схема работы трансформатора



$$\Phi_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega W_1 \cos \omega t$$

$$e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

W_1 и W_2 – число витков в первичной и вторичной обмотках

Получим действующее значение Э.Д.С.

$$\Phi_1 = 4.44 W_1 f \cos \omega t$$

$$\Phi_2 = 4.44 W_2 f \cos \omega t$$

Отношение э.д.с. обмотки высшего напряжения к э.д.с. обмотки низшего напряжения называется коэффициентом трансформации

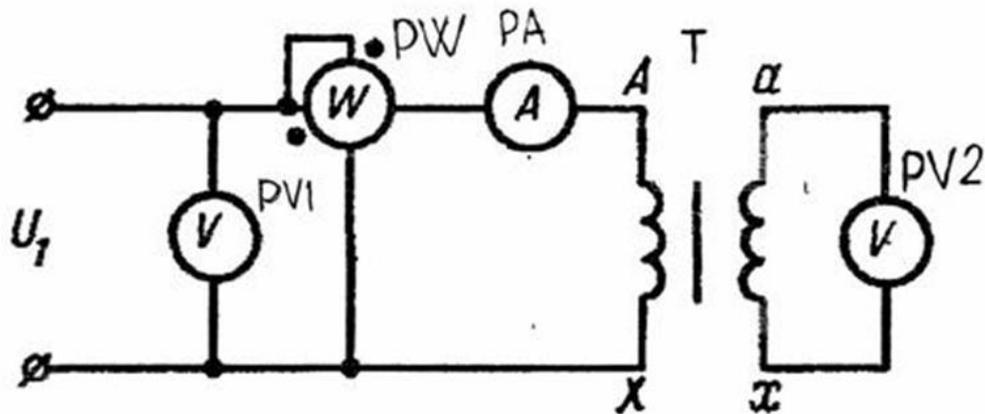
$$k = E_1 / E_2 = W_1 / W_2$$

Учитывая, что $S_1 \approx S_2$ или $U_{1H} I_{1H} \approx U_{2H} I_{2H}$

$$k \approx U_{1H} / U_{2H} \approx I_{2H} / I_{1H}$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

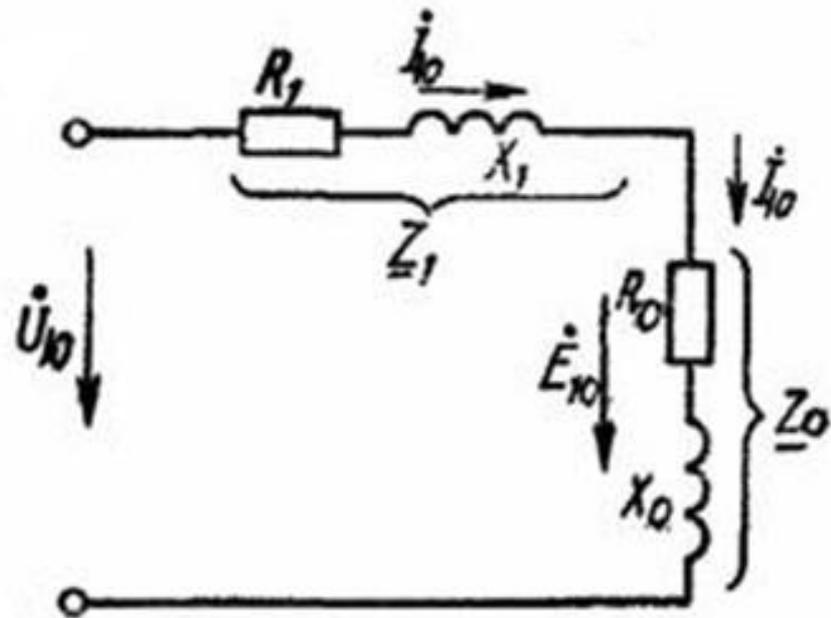
Опыт холостого хода



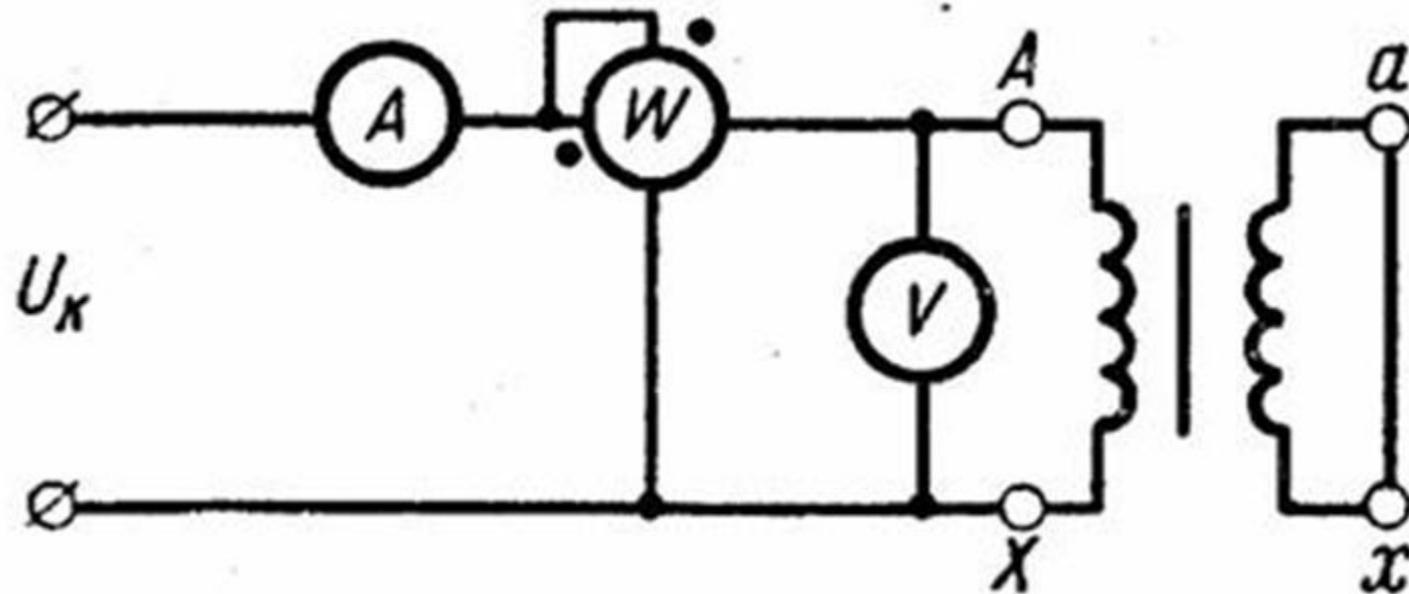
$$Z_{\text{BX X}} = U_{10} / I_{10};$$

$$R_1 + R_0 = P_{10} / I_{10}^2;$$

$$X_1 + X_0 = \sqrt{Z_{\text{BX X}}^2 - (R_1 + R_0)^2},$$



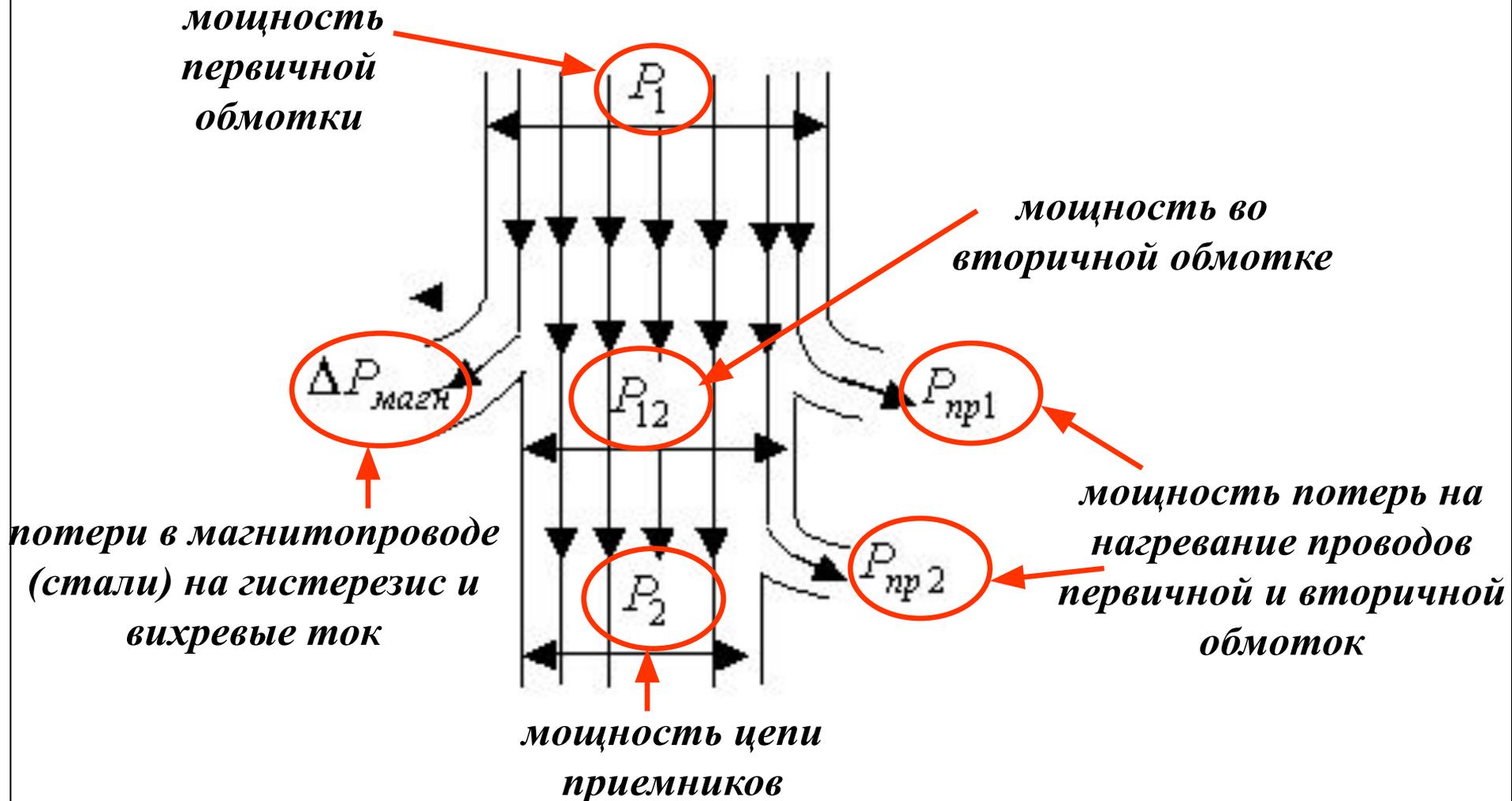
Опыт короткого замыкания



$$\left. \begin{aligned} Z_K &= U_K / I_{1\text{НОМ}}; \\ R_K &= R_1 + R'_2 = P_K / I_{1\text{НОМ}}^2; \\ X_K &= X_1 + X'_2 = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}; \end{aligned} \right\}$$

Потери мощности и КПД ТР-РА

Энергетическая диаграмма трансформатора



Т.к. $\Phi_m = const$



$$\Delta P_{\text{магн}} = P_x$$

$$\Delta P_{\text{эл}} = P_{\text{пр1}} + P_{\text{пр2}} = R_K I_1^2 = \beta^2 P_K$$

$$S_{\text{ном}} = U_2 I_{2\text{ном}}$$

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cos \varphi_2 = \beta \cdot S_{\text{ном}} \cos \varphi_2$$

$$P_K = R_K \cdot I_{1\text{ном}}^2$$

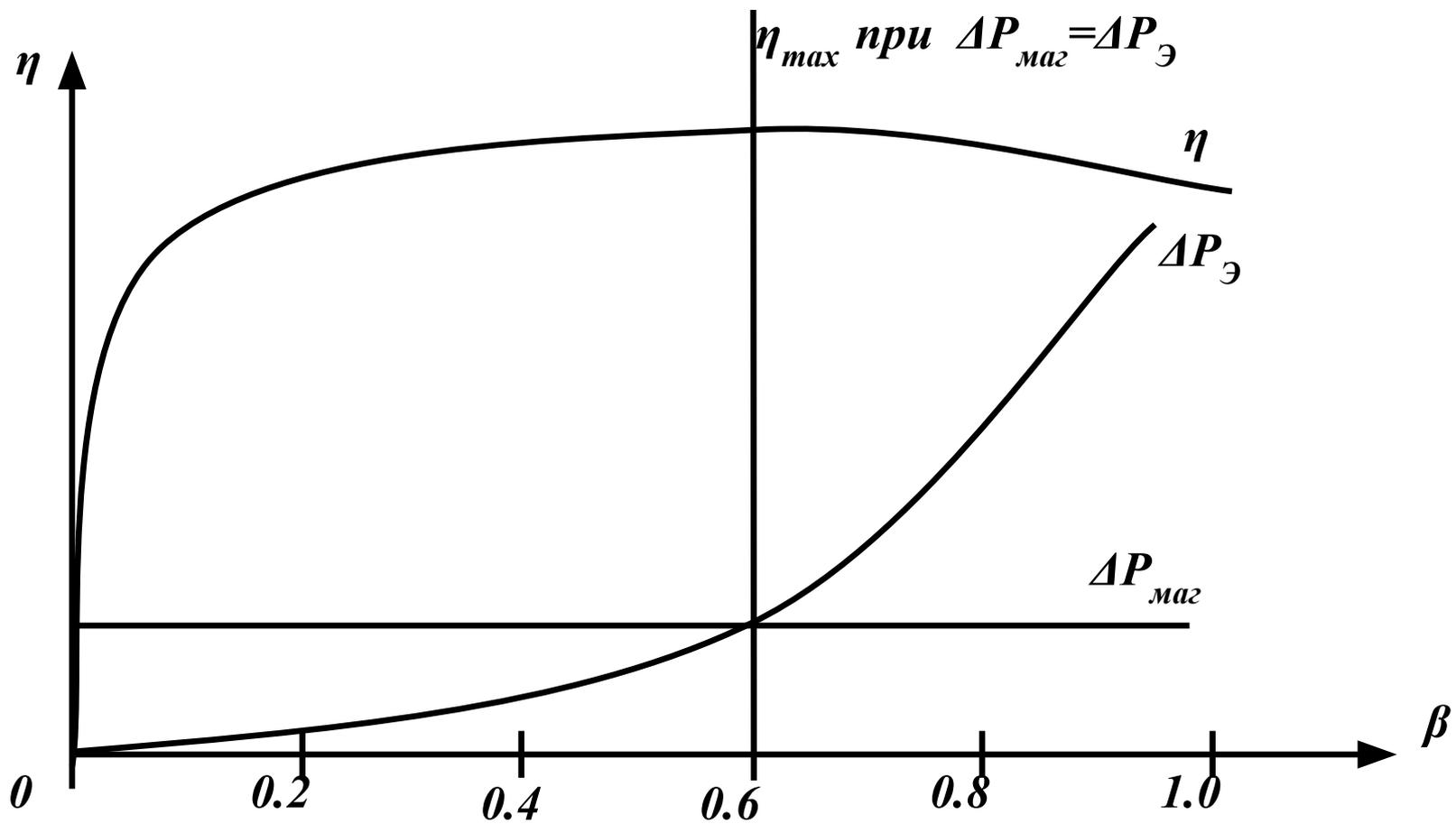
коэффициент
нагрузки ТР

$$\beta = \frac{I_1}{I_{1\text{ном}}}$$

КПД определяют по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_{\text{магн}}} = \frac{\beta \cdot S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + \beta^2 \cdot P_K + P_x}$$

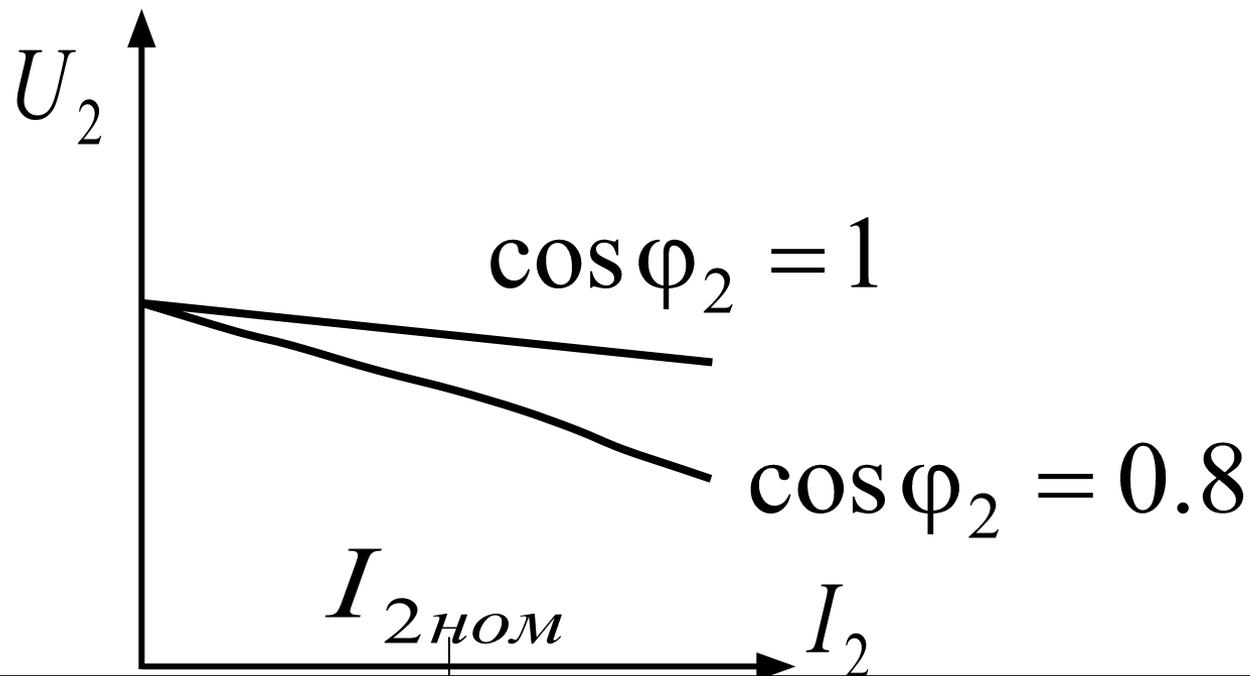
Зависимость магнитных, электрических потерь и КПД от коэффициента нагрузки ТР



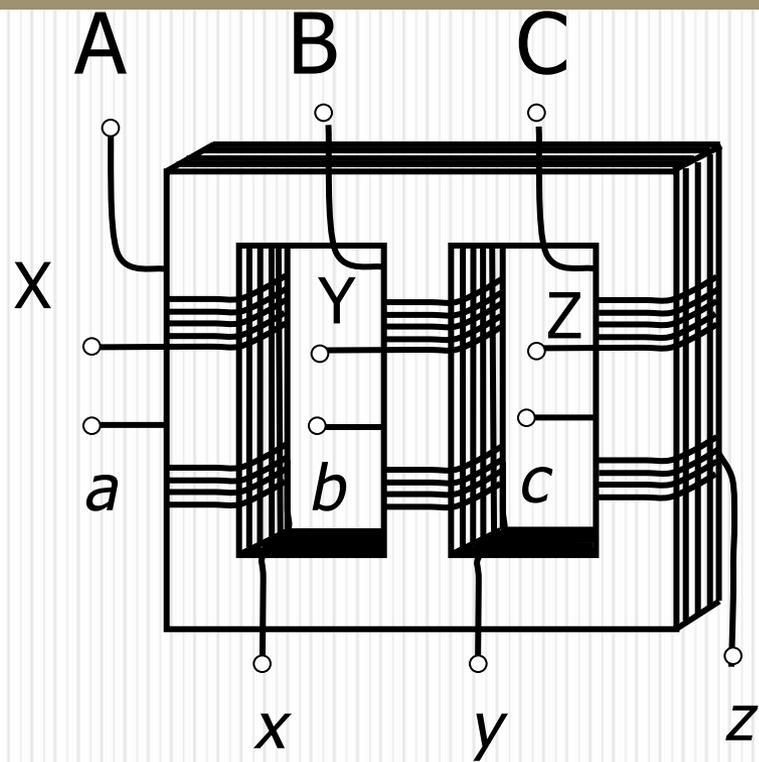
Внешняя характеристика трансформатора

Для трансформатора очень важной является его *внешняя характеристика*, т. е. $U_2 = f(I_2)$ зависимость вторичного напряжения от тока нагрузки при фиксированном напряжении U_1 и постоянном коэффициенте мощности приемника $\cos\varphi$.

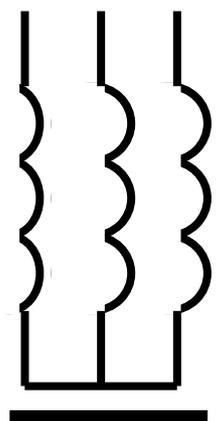
Чем больше ток нагрузки I_2 , тем больше падение напряжения на сопротивлении обмоток трансформатора и, значит, тем меньше напряжение U_2 .



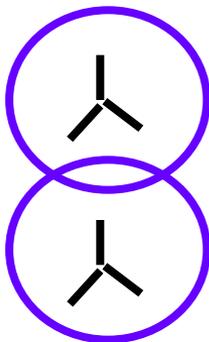
Трехфазные трансформаторы



A B C

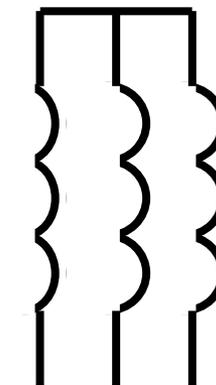


$$U_{\mathcal{L}1} = \sqrt{3}U_{\Phi 1}$$

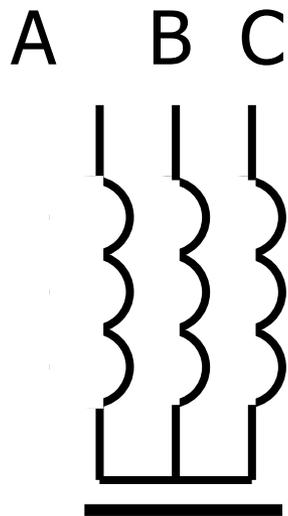


$$n_{\Phi} = n_{\mathcal{L}} = \frac{U_{\mathcal{L}1}}{U_{\mathcal{L}2}} = \frac{U_{\Phi 1}}{U_{\Phi 2}}$$

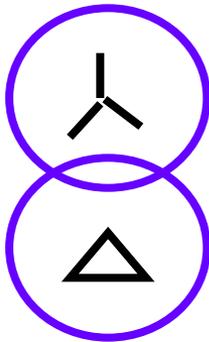
a B c



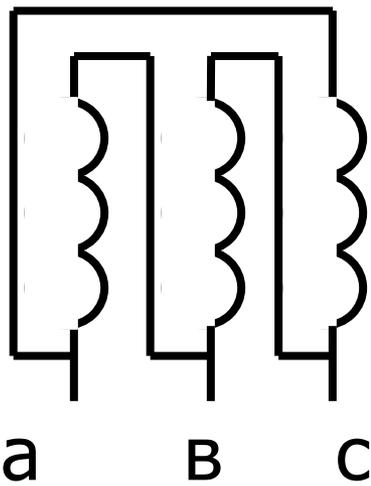
$$U_{\mathcal{L}2} = \sqrt{3}U_{\Phi 2}$$



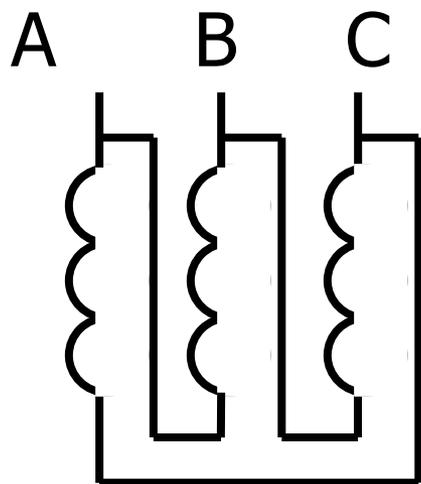
$$U_{\mathcal{L}1} = \sqrt{3}U_{\Phi 1}$$



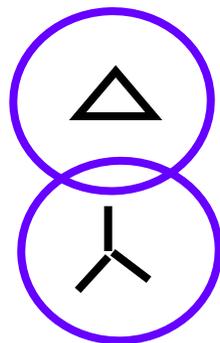
$$n_{\Phi} = \frac{U_{\Phi 1}}{U_{\Phi 2}} = \frac{U_{\mathcal{L}1}}{\sqrt{3}U_{\mathcal{L}2}}$$



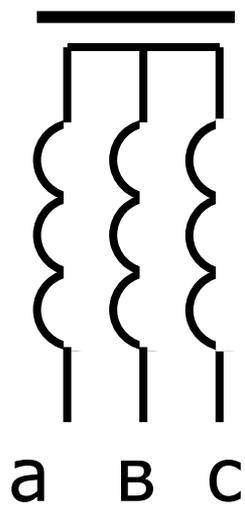
$$U_{\mathcal{L}2} = U_{\Phi 2}$$



$$U_{\mathcal{L}1} = U_{\Phi 1}$$



$$n_{\Phi} = \frac{U_{\Phi 1}}{U_{\Phi 2}} = \sqrt{3} \frac{U_{\mathcal{L}1}}{U_{\mathcal{L}2}}$$



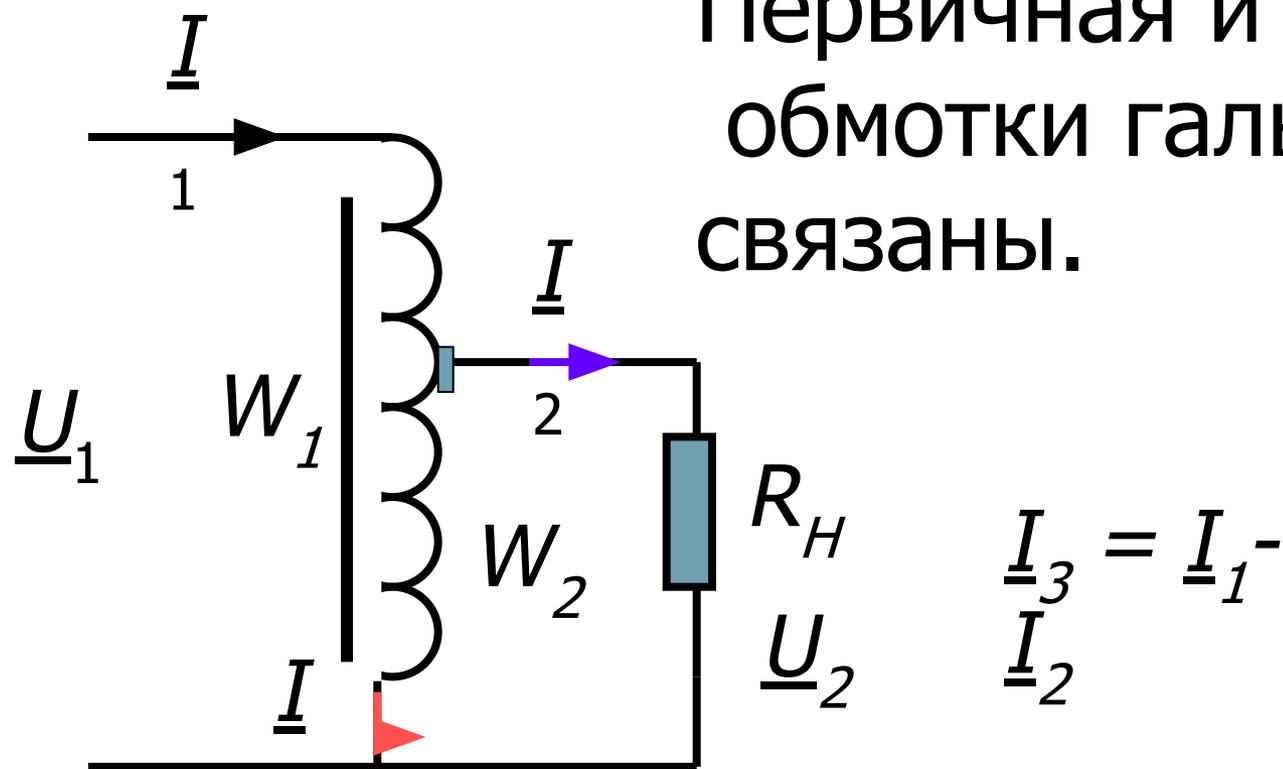
$$U_{\mathcal{L}2} = \sqrt{3} U_{\Phi 2}$$

Специальные трансформаторы

- К специальным трансформаторам относятся: автотрансформаторы, измерительные трансформаторы, сварочные трансформаторы и т.д.
- Автотрансформаторы предназначены для регулирования напряжения в сетях
- Измерительные трансформаторы служат для включения в сеть измерительных приборов, элементов автоматики и т.д.
- Сварочные трансформаторы используются в технологиях соединения или разъединения металлов и др.

Автотрансформатор

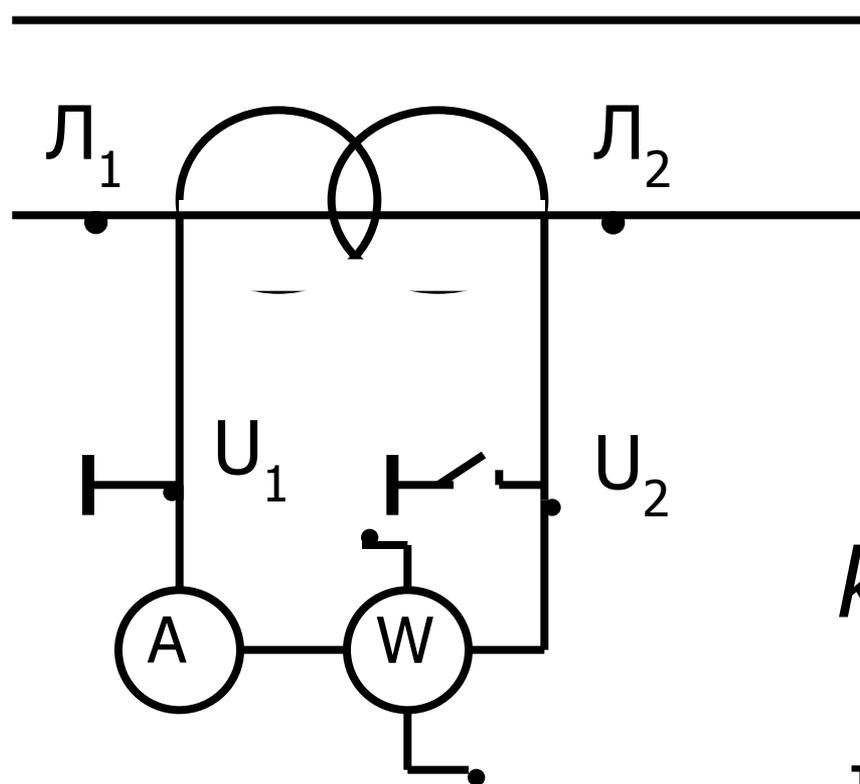
Первичная и вторичная обмотки гальванически связаны.



$$\underline{I}_3 = \underline{I}_1 - \underline{I}_2$$

$$k = W_1 / W_2 \approx \underline{I}_2 / \underline{I}_1 \approx \underline{U}_1 / \underline{U}_2$$

Трансформатор тока

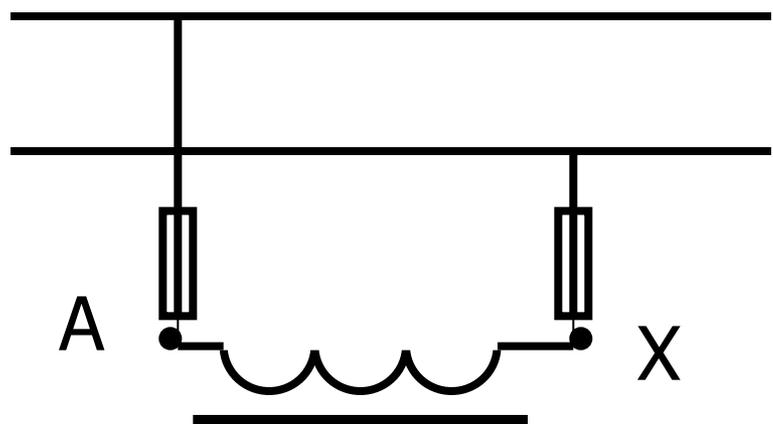


Это повышающий тр-р, работающий в режиме КЗ

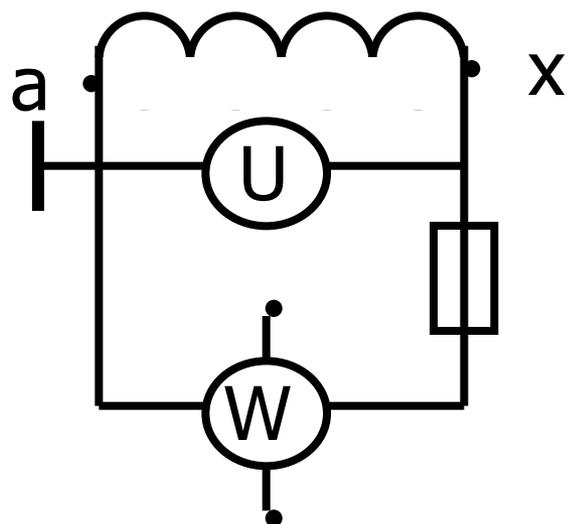
$$k = I_1 / I_2 \longrightarrow I_1 = kI_2$$

$$I_2 \leq 5 \text{ А}$$

Трансформатор напряжения



Это понижающий тр-р,
работающий в режиме
близком к ХХ.



$$U_1/U_2 = k \rightarrow U_1 = kU_2$$

$$U_2 \leq 100 \text{ В}$$

Сварочный трансформатор

