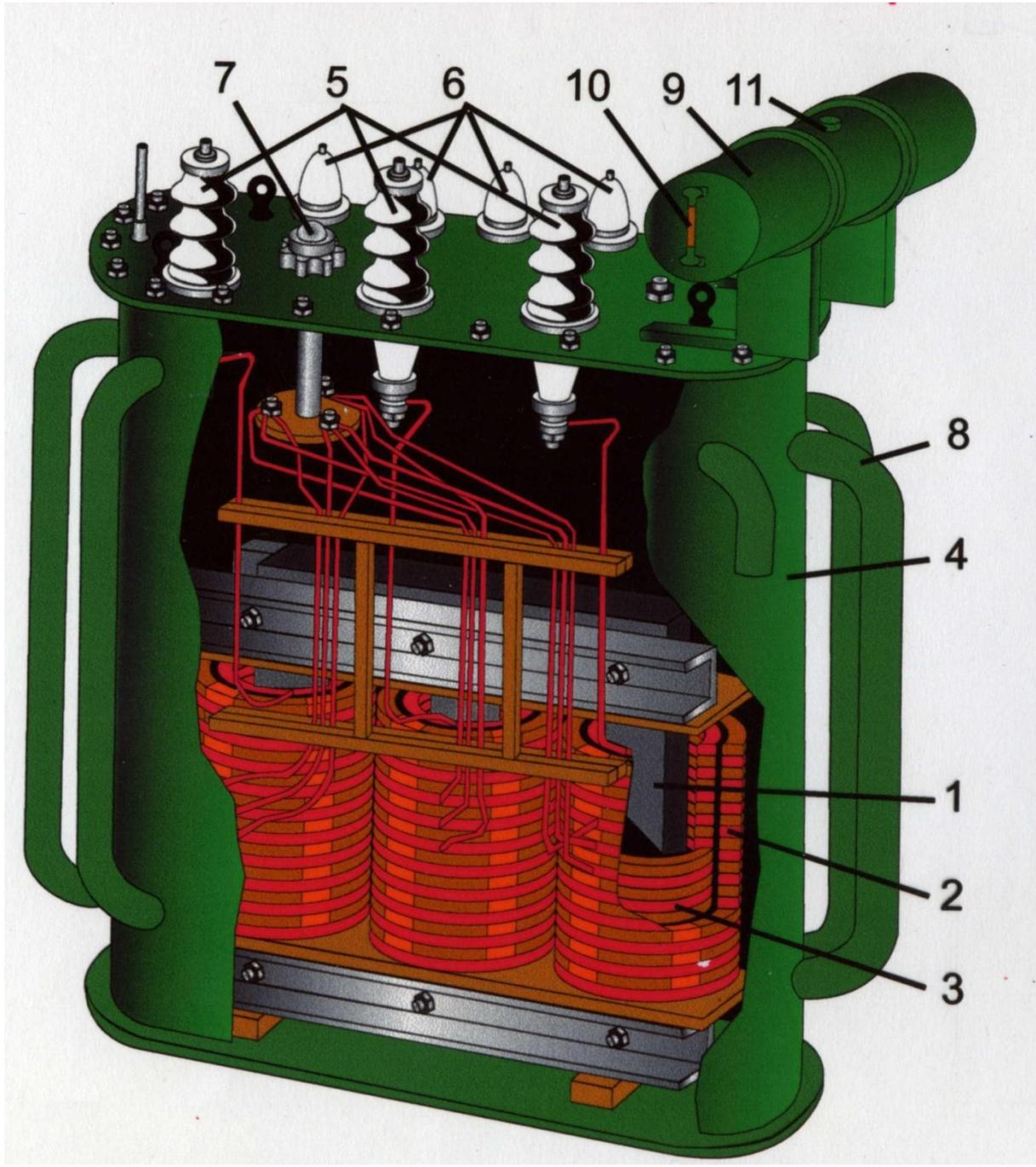


ТРАНСФОРМАТОРЫ

- **Трансформатор** — электрический 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).
- Трансформатор осуществляет преобразование напряжения переменного тока и/или гальваническую развязку в самых различных областях применения - электроэнергетике, электронике и радиотехнике.
- Конструктивно трансформатор может состоять из одной (автотрансформатор) или нескольких изолированных проволочных, либо ленточных обмоток (катушек), охватываемых общим магнитным потоком, намотанных, как правило, на магнитопровод (сердечник) из ферромагнитного магнито-мягкого материала.



Получение и распределение энергии



ИСТОРИЯ ПОЯВЛЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА И ИЗУЧЕНИЕ ЕГО СВОЙСТВ

- 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 нагрева 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.

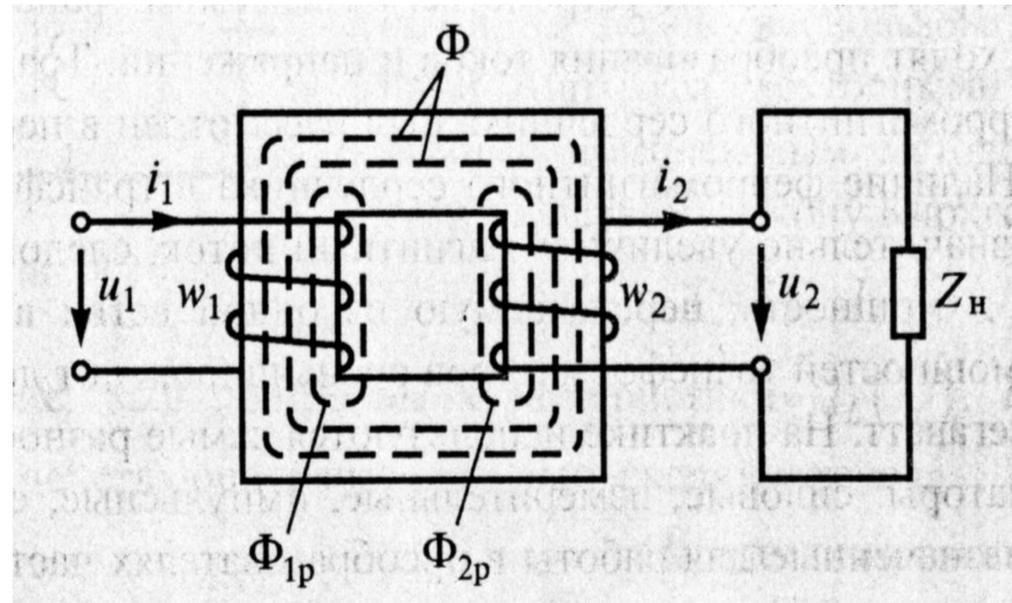
ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

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.

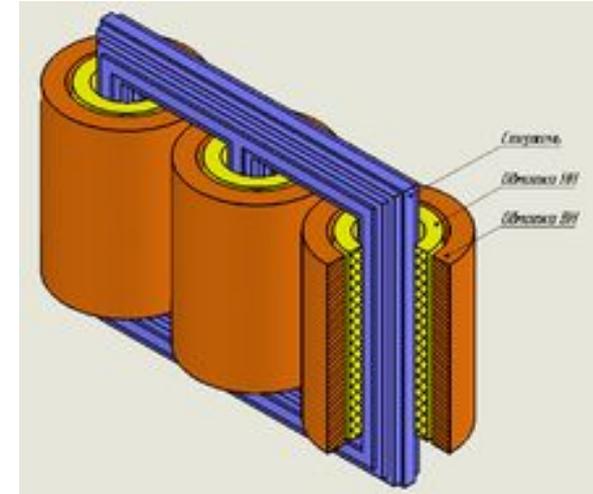


- Внешний источник
- Первичная обмотка
- Вторичная обмотка
- Сердечник (магнитопровод) состоит из изолированных листов электротехнической стали и служит для усиления магнитной связи между обмотками.
- Нагрузка
- Система охлаждения

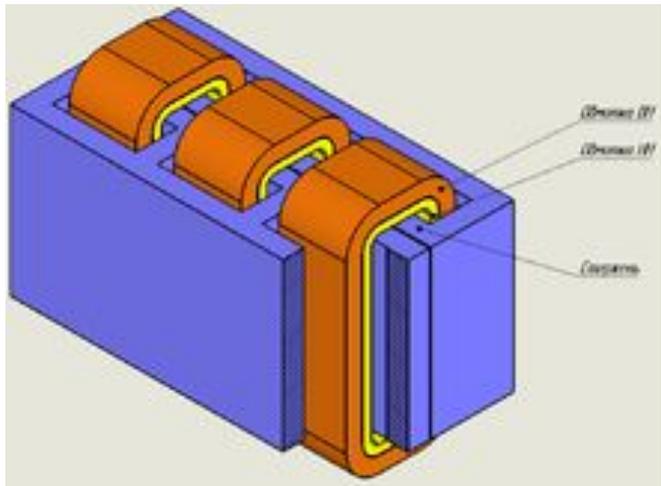
КЛАССИФИКАЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Концепция

Стержневой
тип



Броневой тип



Тороидальный
тип

Обмотки

```
graph TD; A[Обмотки] --- B[Первичная]; A --- C[Вторичная]
```

Первичная

Вторичная

Обмотки

```
graph TD; A[Обмотки] --- B[Высшего напряжения]; A --- C[Низшего напряжения]
```

Высшего
напряжения

Низшего
напряжения

По числу фаз

однофазные

трехфазные

многофазные

По способу охлаждения

сухие

масляные

По области применения

Силовые

Автотрансформаторы

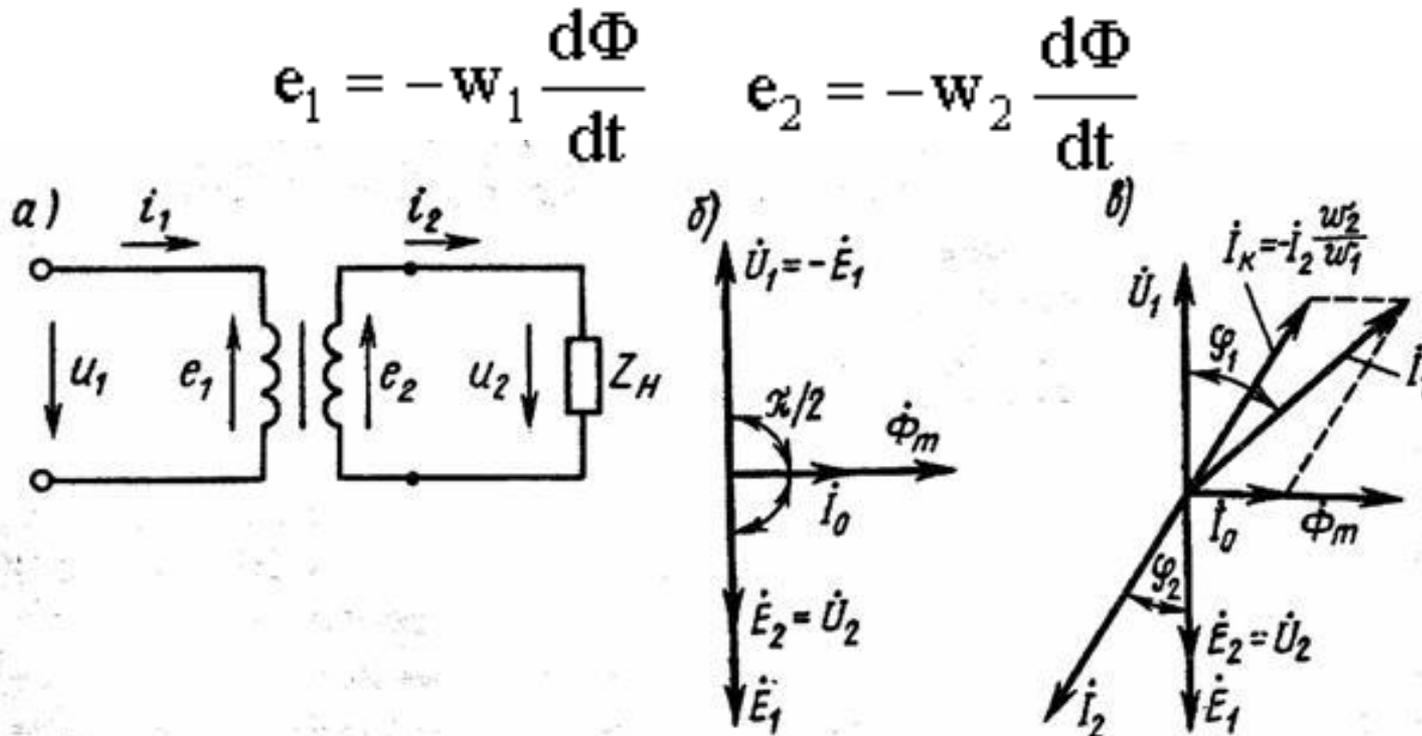
Измерительные

Специальные

идеализированный трансформатор

Для выяснения сущности физических процессов, происходящих в трансформаторе, рассмотрим идеализированный трансформатор, у которого магнитный поток Φ полностью замыкается по стальному магнитопроводу и сцеплен с обеими обмотками, а потери в стали отсутствуют.

К первичной обмотке трансформатора (а) подводится синусоидальное напряжение



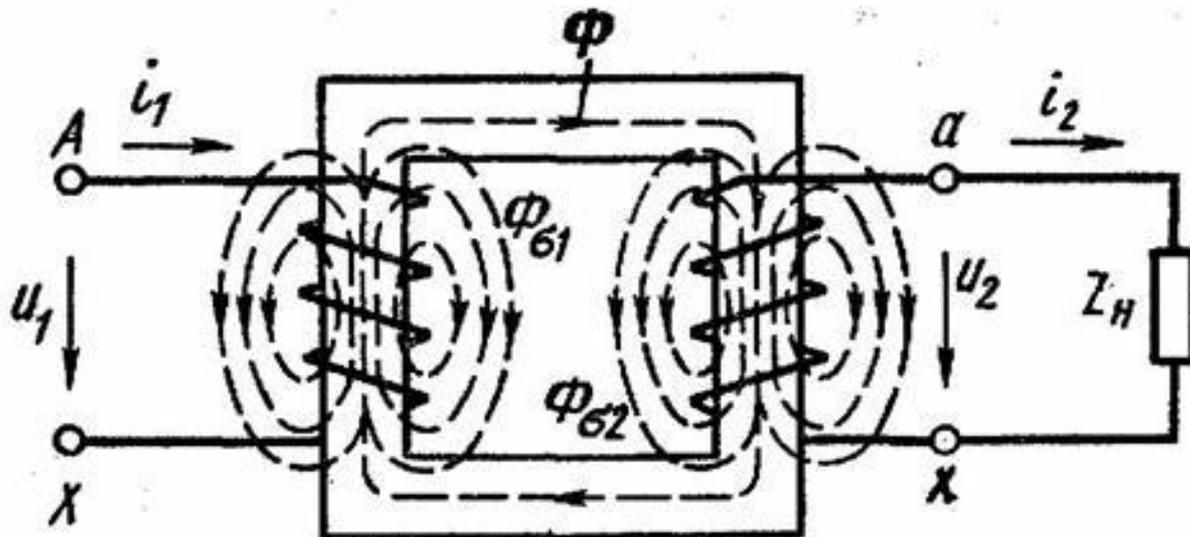
Векторная диаграмма идеализированного трансформатора, работающего без нагрузки (рис. б) и с нагрузкой (рис. в).

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

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

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

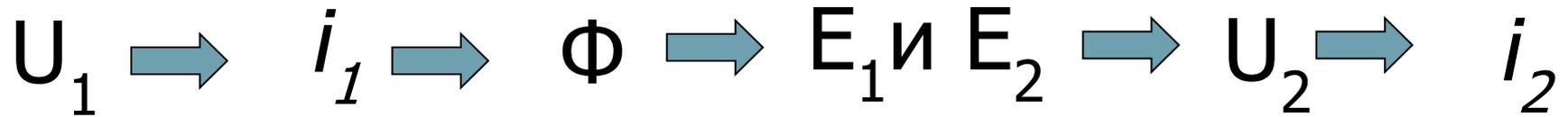


С учетом ЭДС самоиндукции и падений напряжения в активных сопротивлениях обмоток можно составить комплексные уравнения для первичной и вторичной обмоток трансформатора. Получим следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} &= \dot{I}_1 R_1; \\ \dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} &= \dot{I}_2 R_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}_H; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_{10} + \left(-\dot{I}_2 w_2 / w_1 \right) \end{aligned} \right\}$$

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Условная схема работы трансформатора



$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega W_1 t_m \cos \omega t$$

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

W_1 и W_2 – число витков в первичной и вторичной обмотках

Уравнения напряжения трансформатора

Пусть $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$.

Учитывая, что $\cos \omega t = -\sin(\omega t - \pi/2)$

$$e_1 = \omega W_1 t_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

По аналогии:

$$\Phi_2 = \omega W_2 t_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

Э.Д.С. e_1 и e_2 отстают по фазе от Φ на угол $\pi/2$

Амплитуда $E_{1m} = \omega W_1 \Phi_m$

При $E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}}$ и $\omega = 2\pi f$

Получим действующее значение Э.Д.С. $\Phi_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} W_1 f t_m$

или

$$\Phi_1 = 4.44 W_1 f t_m$$

Это трансформаторное э.д.с.

По аналогии

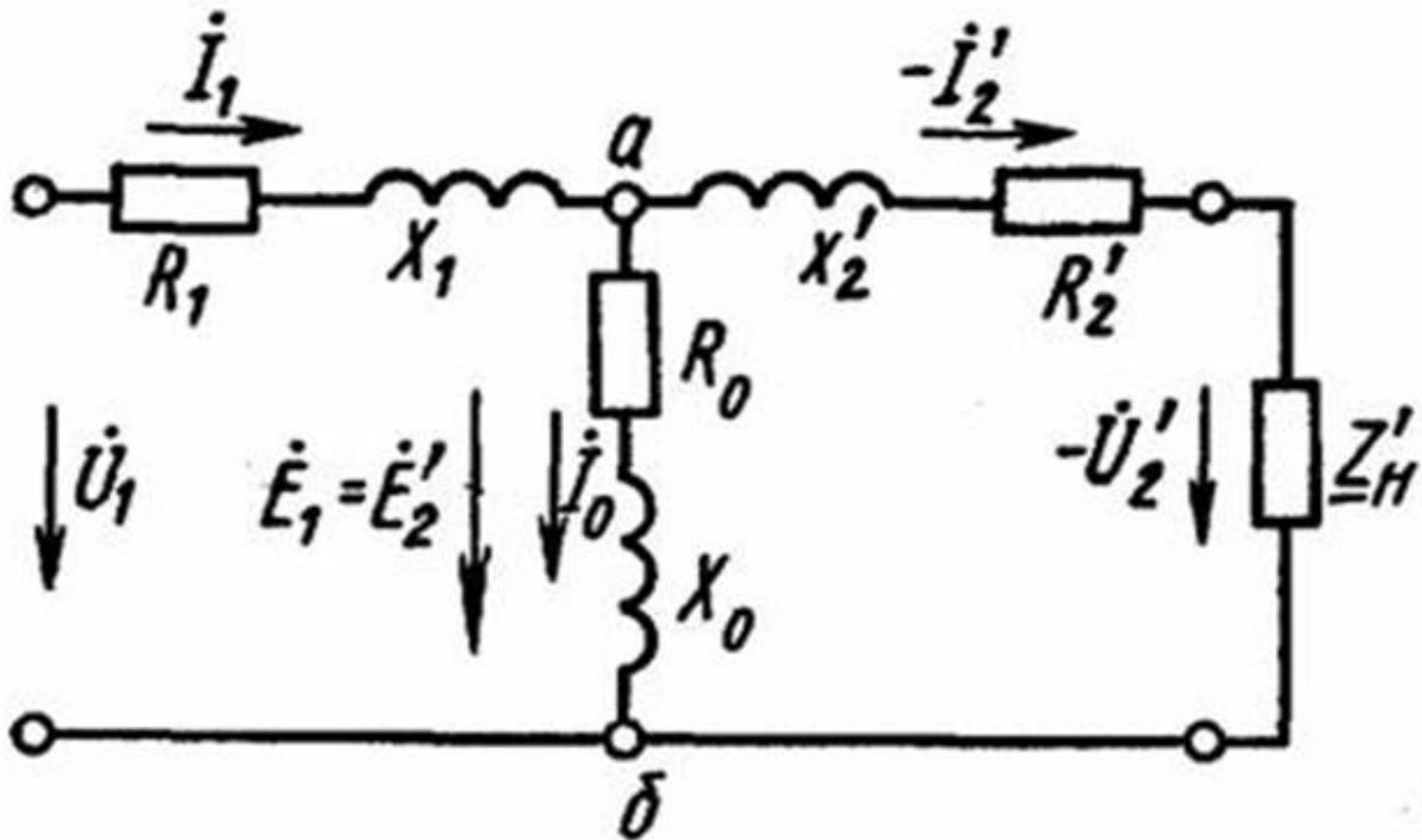
$$\Phi_2 = 4.44 W_2 f t_m$$

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

$$n_{12} = E_1 / E_2 = W_1 / W_2$$

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

$$n_{12} \approx U_{1H} / U_{2H} \approx I_{2H} / I_{1H}$$



Для вторичной обмотки (без вывода) можно записать:

$$\underline{E}_2 + \underline{E}_{02} = \underline{I}_2 R_2 + \underline{I}_2 Z_H, \quad \underline{U}_2 = \underline{I}_2 Z_H,$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - j \underline{I}_2 X_2 - \underline{I}_2 R_2$$

Баланс напряжений на вторичной обмотке:

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 Z_2 = \underline{I}_2 Z_H$$

Z_2 – мало, то $\underline{U}_2 \approx \underline{E}_2$

Из уравнения баланса м.д.с. можно записать

$$I_1 = I_0 - I_2 \frac{W_2}{W_1}$$

или
$$I_1 = I_0 + \left(-I_2 \frac{W_2}{W_1}\right) = I_0 + \left(-I_2 n_{21}\right)$$

$$I_1 = I_0 + I'_2$$

где приведенный ток $I'_2 = -I_2 n_{21}$

Ток в первичной цепи можно рассматривать как сумму двух токов

Эквивалентное сопротивление этой схемы

$$\underline{Z}_{\text{ЭКВ}} = \underline{Z}_1 + [\underline{Z}_0 (\underline{Z}'_{\text{Н}} + \underline{Z}'_2)] / [\underline{Z}_0 + (\underline{Z}'_{\text{Н}} + \underline{Z}'_2)],$$

где: $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$;

$$\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0 ;$$

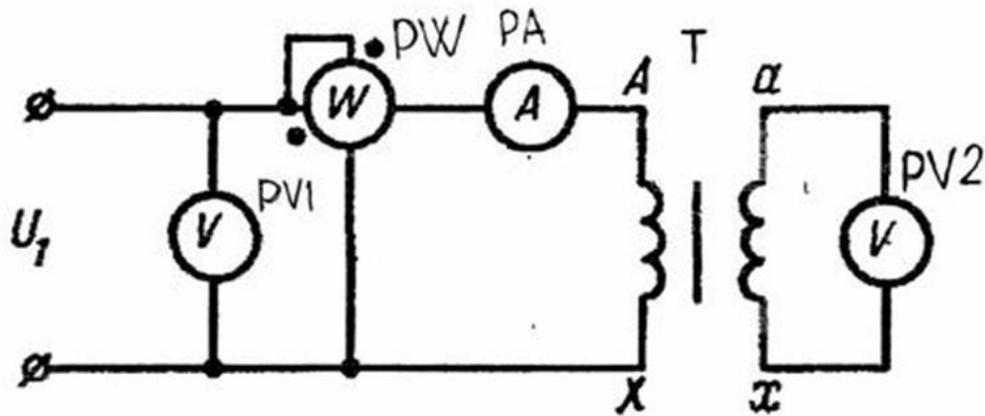
$$\underline{Z}'_2 = n^2 \underline{Z}_2 = n^2 (R_2 + jX_2) ;$$

$$\underline{Z}'_{\text{Н}} = n^2 \underline{Z}_{\text{Н}}.$$

$$n = \frac{E_{\text{ВН}}}{E_{\text{НН}}} = \frac{W_{\text{ВН}}}{W_{\text{НН}}}$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

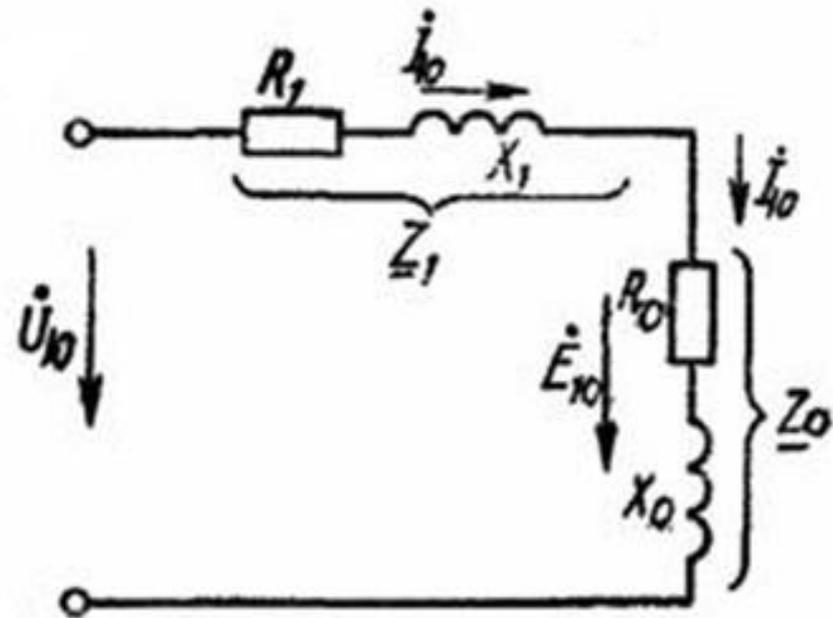
Опыт холостого хода



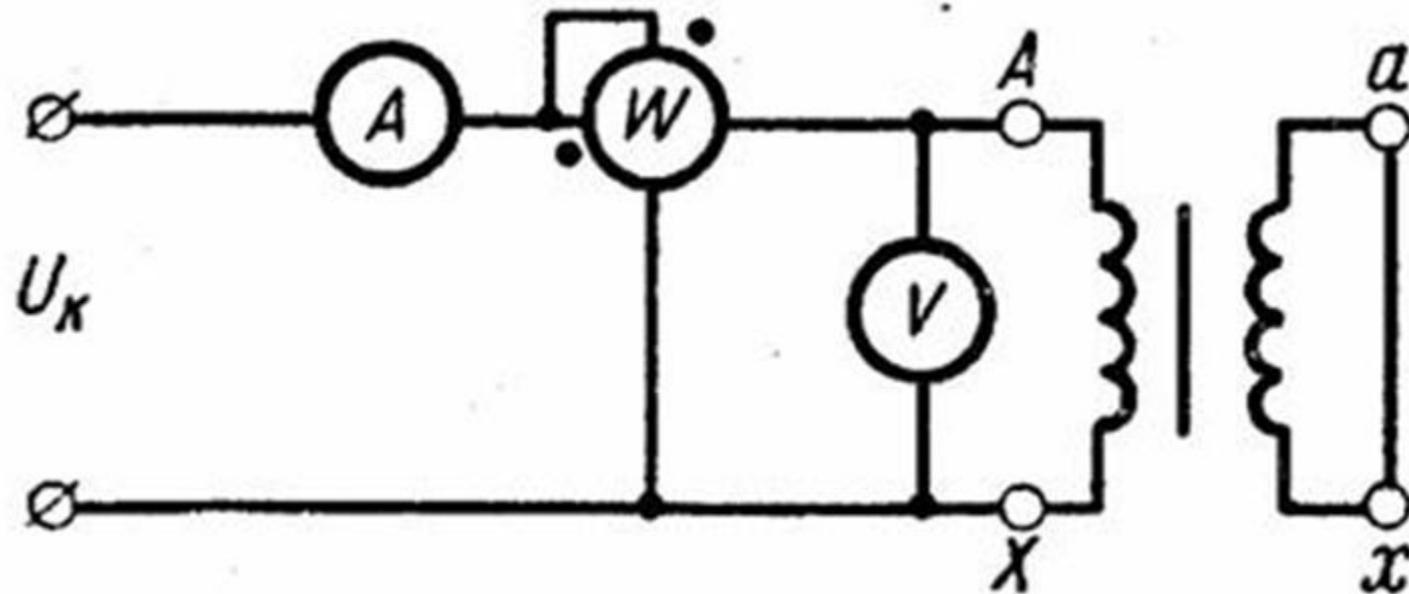
$$Z_{BX X} = U_{10} / I_{10};$$

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

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



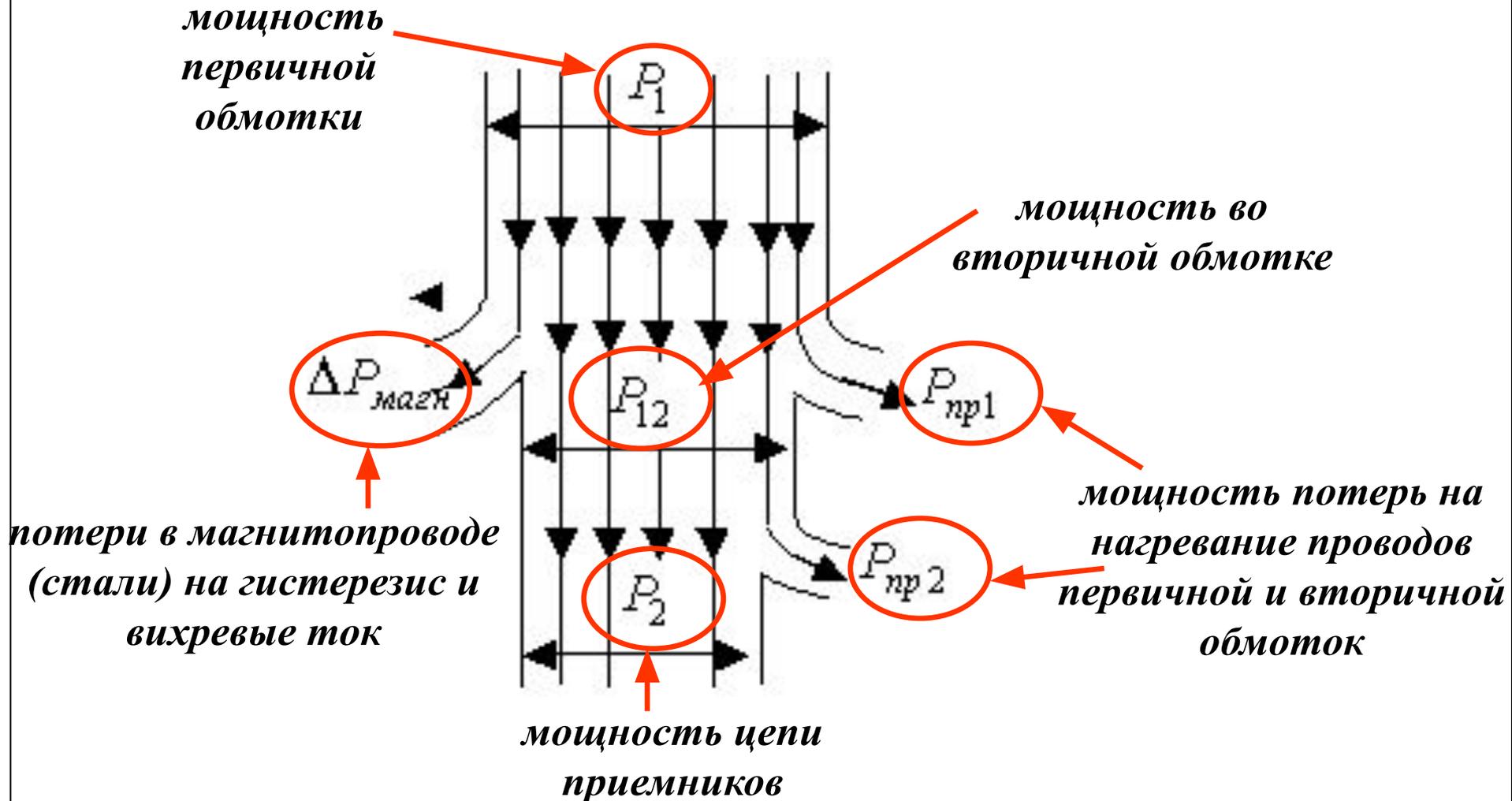
Опыт короткого замыкания



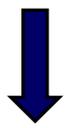
$$\left. \begin{aligned} Z_K &= U_K / I_{1\text{НОМ}}; \\ R_K &= R_1 + R'_2 = P_K / I_{1\text{НОМ}}^2; \\ X_K &= X_1 + X'_2 = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}; \end{aligned} \right\}$$

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

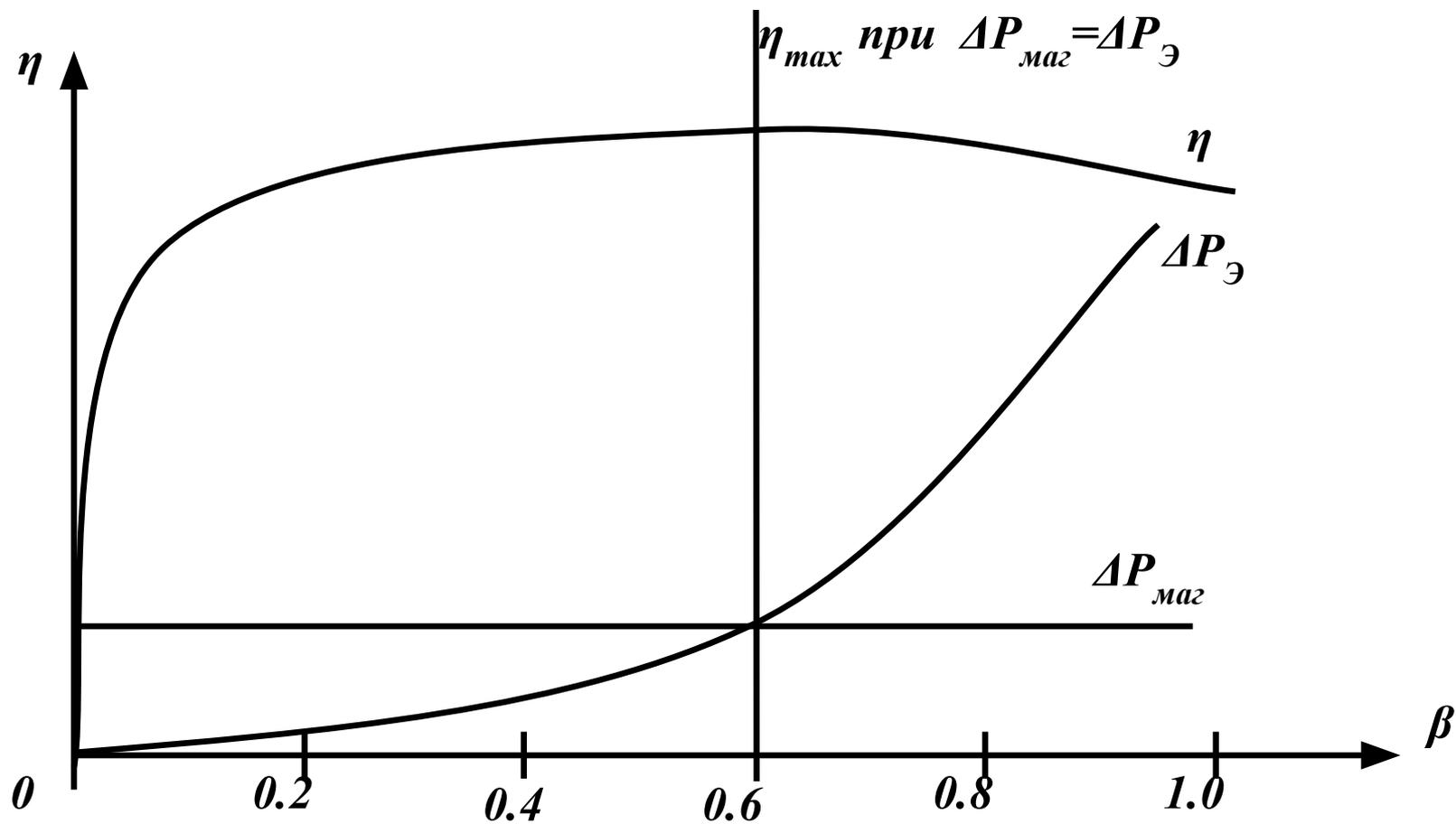
$$\beta = \frac{I_1}{I_{1\text{ном}}}$$

мощность потерь КЗ

КПД определяют по формуле:

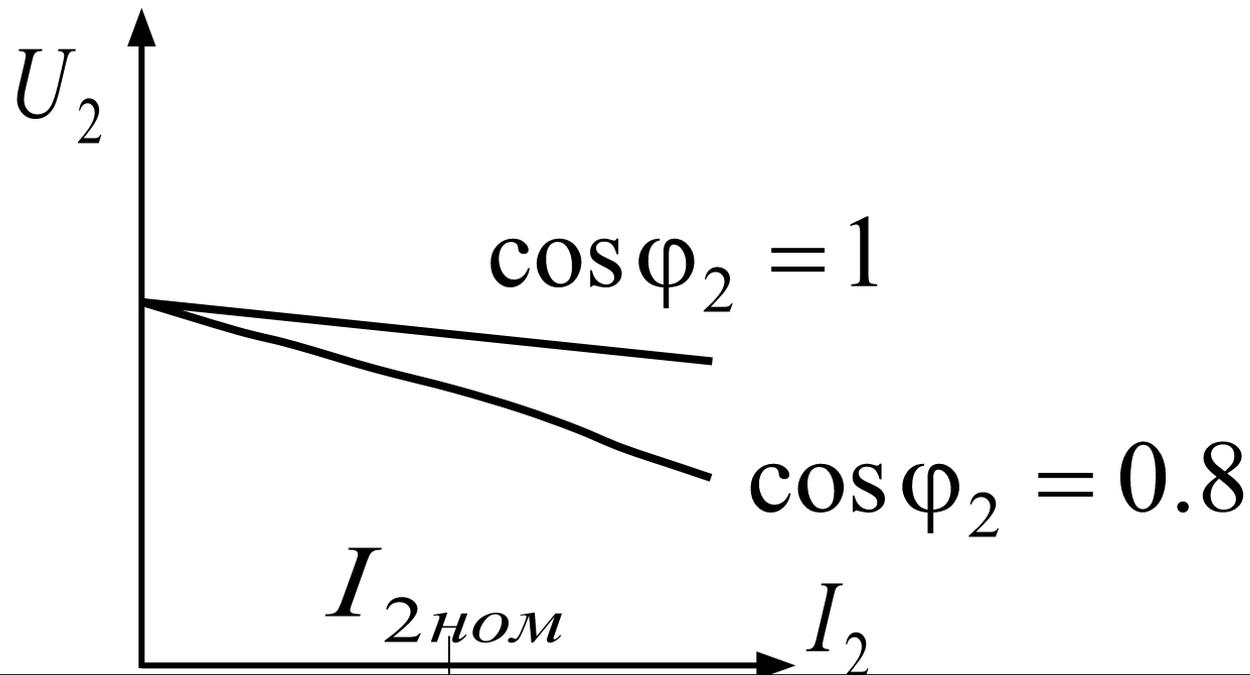
$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_{\text{магн}}} = \frac{\beta \cdot S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + \beta^2 \cdot P_K + P_x}$$

Зависимость магнитных, электрических потерь и КПД от коэффициента нагрузки ТР

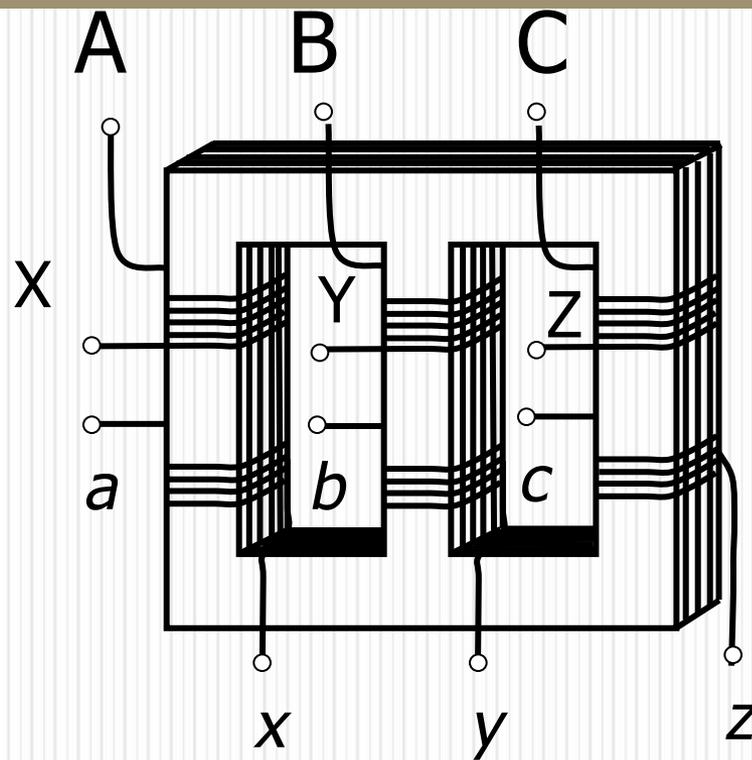


Внешняя характеристика трансформатора

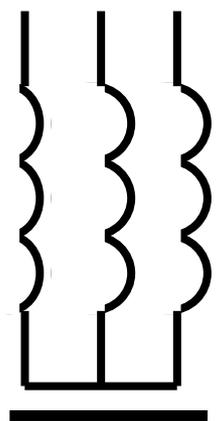
- Для трансформатора очень важной является его **внешняя характеристика**, т.е. $U_2 = f(I_2)$ зависимость вторичного напряжения от тока нагрузки при фиксированном напряжении U_1 и постоянном коэффициенте мощности приемника $\cos\varphi$.
- Чем больше ток нагрузки I_2 , тем больше падение напряжения на сопротивлении обмоток трансформатора и, значит, тем меньше напряжение U_2 .



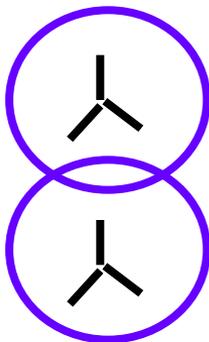
Трехфазные трансформаторы



A B C

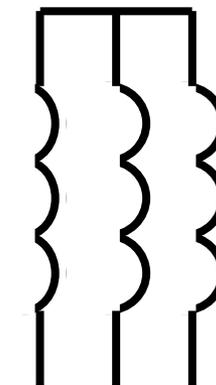


$$U_{Л1} = \sqrt{3}U_{\Phi1}$$

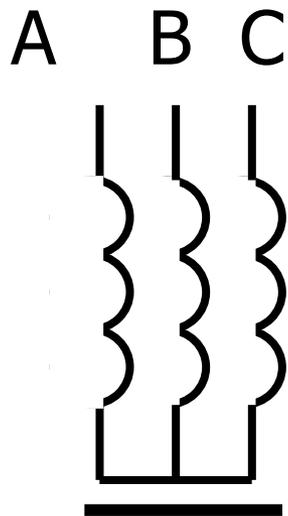


$$n_{\Phi} = n_{Л} = \frac{U_{Л1}}{U_{Л2}} = \frac{U_{\Phi1}}{U_{\Phi2}}$$

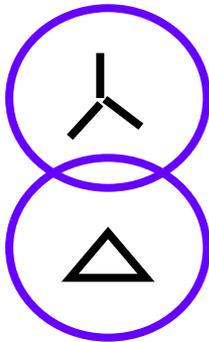
a B c



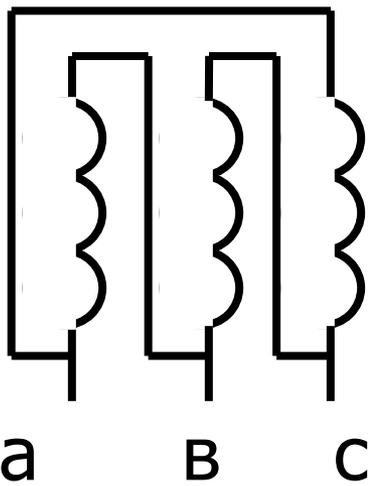
$$U_{Л2} = \sqrt{3}U_{\Phi2}$$



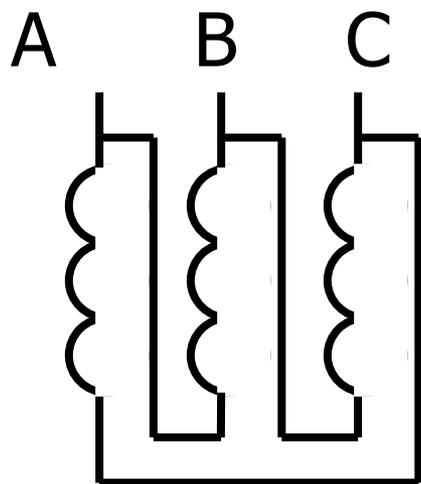
$$U_{\mathcal{L}1} = \sqrt{3}U_{\Phi1}$$



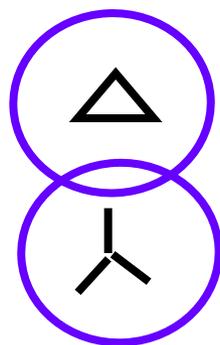
$$n_{\Phi} = \frac{U_{\Phi1}}{U_{\Phi2}} = \frac{U_{\mathcal{L}1}}{\sqrt{3}U_{\mathcal{L}2}}$$



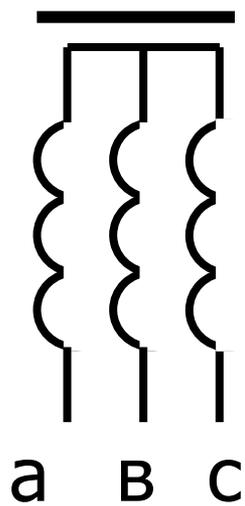
$$U_{\mathcal{L}2} = U_{\Phi2}$$



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



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



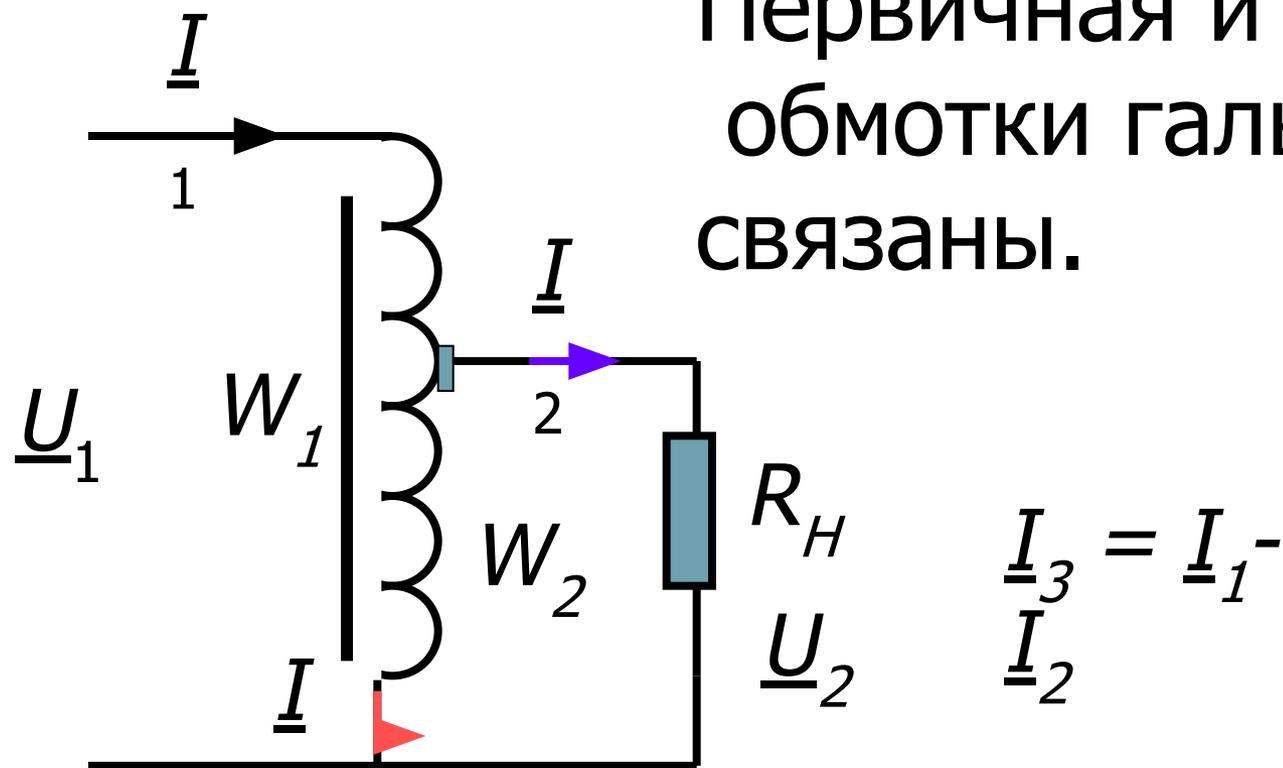
$$U_{\mathcal{L}2} = \sqrt{3} U_{\Phi 2}$$

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

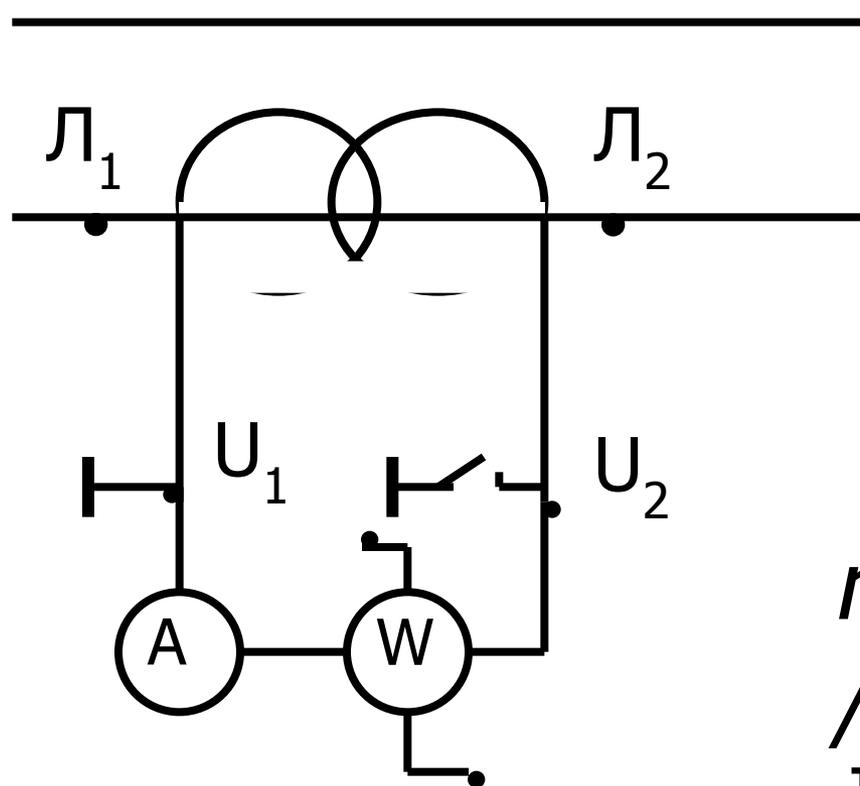
Первичная и вторичная обмотки гальванически связаны.



$$\frac{I_3}{I_2} = \frac{I_1}{I_2}$$

$$n = W_1 / W_2 \approx \frac{I_2}{I_1} \approx \frac{U_1}{U_2}$$

Трансформатор тока

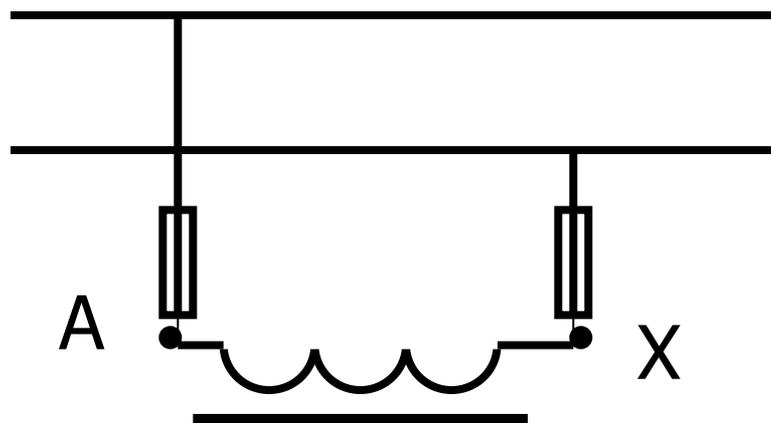


Это повышающий тр-р, работающий в режиме КЗ

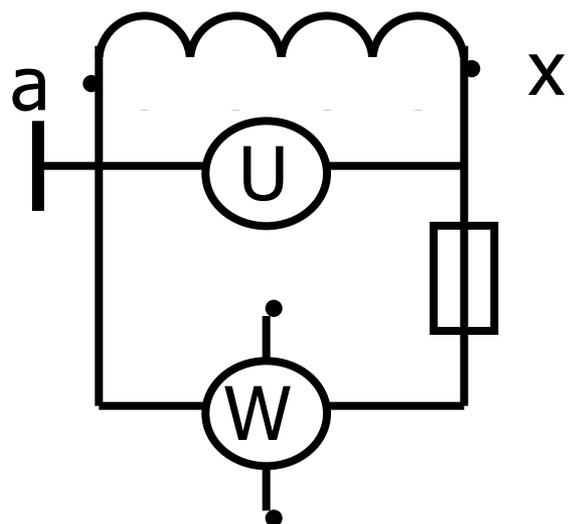
$$n = \frac{I_1}{I_2} \longrightarrow I_1 = nI_2$$

$I_2 \leq 5$
А

Трансформатор напряжения



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



$$U_1 / U_2 = n \rightarrow U_1 = n U_2$$

$$U_2 \leq 100 \text{ В}$$

Сварочный трансформатор

