

Конспект лекций по электротехнике

Подготовлен:

Алтуниным Б.Ю., Степановым К.С.,

Беловой Л.В., Кралиным А.А.,

Панковой Н.Г

**Кафедра теоретической и общей
электротехники.**

Лекция 10

ТРАНСФОРМАТОРЫ

- Трансформатор – это электромагнитное устройство, которое предназначено для преобразования посредством магнитного поля электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения при сохранении частоты

- **Трансформатор** (от лат. *transformo* — преобразовывать) — статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока (ГОСТ Р 52002-2003).

- Трансформатор может состоять из одной ([автотрансформатор](#) Трансформатор может состоять из одной (автотрансформатор) или нескольких изолированных проволочных, либо ленточных обмоток (катушек), охватываемых общим магнитным потоком, намотанных, как правило, на [магнитопровод](#) Трансформатор

- Столетов Александр Григорьевич Столетов Александр Григорьевич (профессор МУ Столетов Александр Григорьевич (профессор МУ) сделал первые шаги в этом направлении — обнаружил петлю гистерезиса Столетов Александр Григорьевич (профессор МУ) сделал первые шаги в этом направлении — обнаружил петлю гистерезиса и доменную структуру ферромагнетика
- В 1831 году В 1831 году английским физиком Майклом Фарадеем было открыто явление электромагнитной индукции, лежащее в основе действия электрического трансформатора, при

- Схематичное изображение будущего трансформатора впервые появилось в [1831 году](#) Схематичное изображение будущего трансформатора впервые появилось в 1831 году в работах [Фарадея](#) Схематичное изображение будущего трансформатора впервые появилось в 1831 году в работах Фарадея и [Генри](#) 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

- 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

- С изобретением трансформатора возник технический интерес к переменному току. Русский электротехник [Михаил Осипович Доливо-Добровольский](#) С изобретением трансформатора возник технический интерес к переменному току. Русский электротехник Михаил Осипович Доливо-Добровольский в 1889 г. предложил [трёхфазную](#) С изобретением трансформатора возник технический интерес к переменному току. Русский электротехник Михаил Осипович Доливо-Добровольский в 1889 г. предложил трёхфазную систему

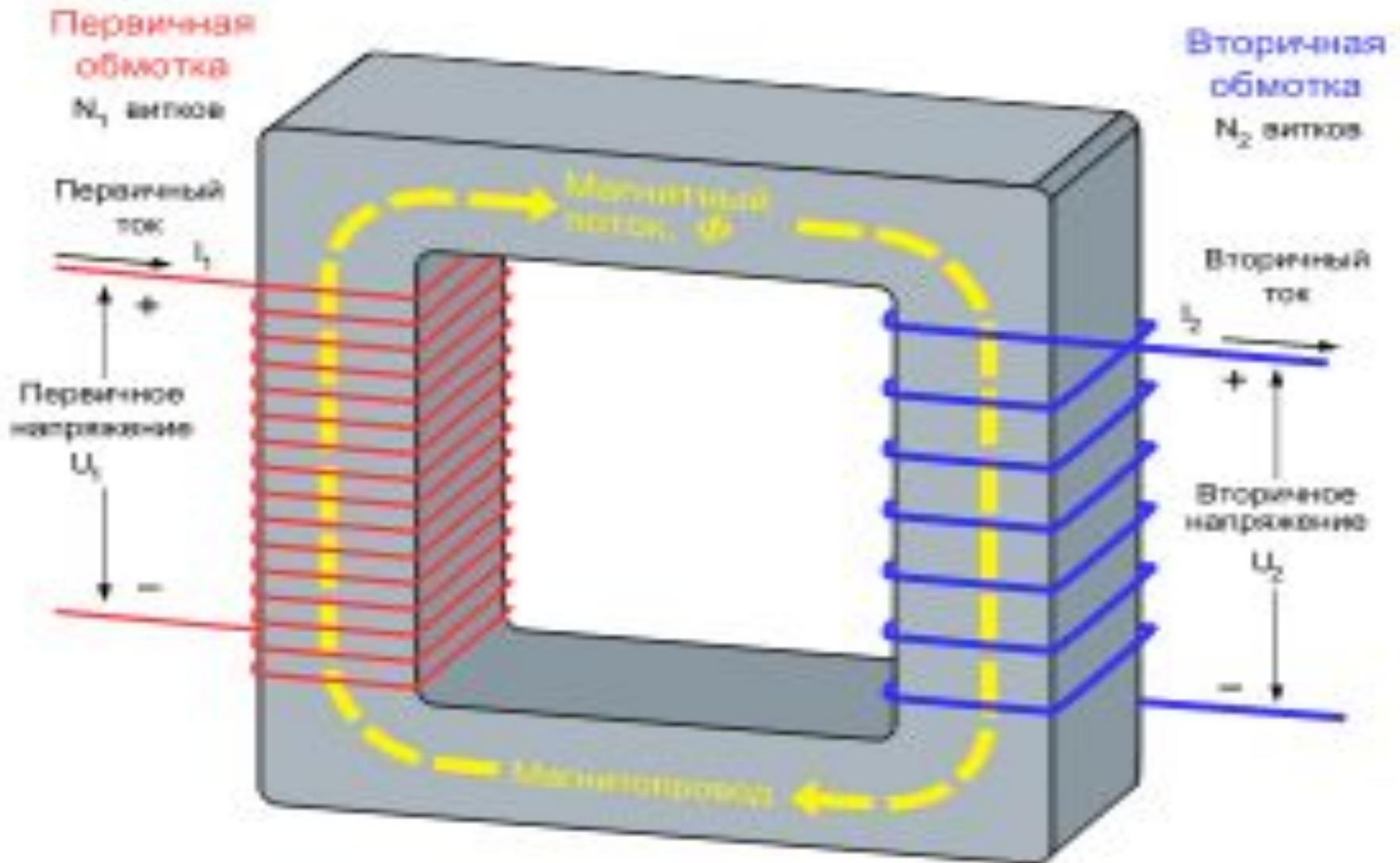
- В начале 1900-х годов английский исследователь-металлург [Роберт Хедфилд](#) В начале 1900-х годов английский исследователь-металлург Роберт Хедфилд провёл серию экспериментов для установления влияния добавок на свойства железа. Лишь через несколько лет ему удалось поставить заказчикам первую тонну трансформаторной стали с добавками кремния. [\[5\]](#)
- 1928 год можно считать началом производства силовых трансформаторов в СССР, когда начал работать Московский трансформаторный завод (впоследствии —

- 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

Виды трансформаторов

- Силовой трансформатор
- Автотрансформатор
- **Разделительный трансформатор**
- Пик-трансформатор
- Измерительные трансформаторы
- Трансформатор тока
- Трансформатор напряжения
- Импульсный трансформатор
- Сдвоенный дроссель

Устройство и принцип действия трансформатора.



- **Идеальный трансформатор** — трансформатор, у которого отсутствуют потери энергии на нагрев обмоток и потоки рассеяния обмоток [\[14\]](#) — трансформатор, у которого отсутствуют потери энергии на нагрев обмоток и потоки рассеяния обмоток [\[14\]](#). В идеальном трансформаторе все силовые линии проходят через все витки обеих обмоток, и поскольку изменяющееся магнитное поле порождает одну и ту же ЭДС в каждой витке, суммарная ЭДС, индуцируемая в обмотке, пропорциональна полному числу её витков [\[15\]](#). Такой трансформатор всю поступающую энергию из первичной цепи трансформирует в магнитное поле и, затем, в энергию вторичной цепи. В этом случае поступающая энергия равна преобразованной энергии:

Идеальный трансформатор

$$P_1 = I_1 \cdot U_1 = P_2 = I_2 \cdot U_2$$

P_1 — мгновенное значение поступающей на трансформатор мощности, поступающей из первичной цепи,

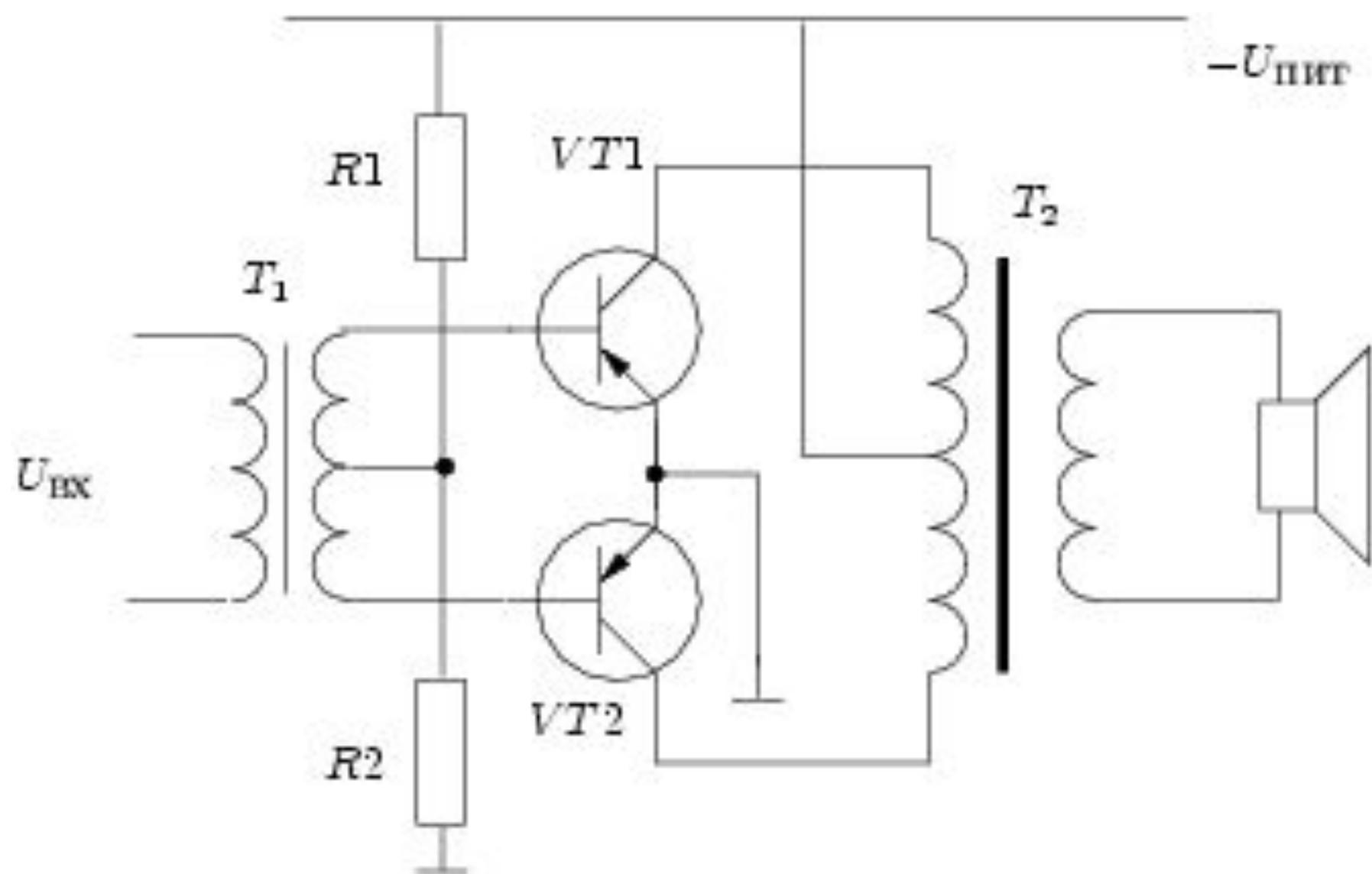
P_2 — мгновенное значение преобразованной трансформатором мощности, поступающей во вторичную цепь.

Идеальный трансформатор

- Соединив это уравнение с отношением напряжений на концах обмоток, получим уравнение идеального трансформатора:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$$





Уравнения линейного трансформатора.

- Пусть i_1, i_2 — мгновенные значения тока в первичной и вторичной обмотке соответственно, u_1 — мгновенное напряжение на первичной обмотке, R_H — сопротивление нагрузки. Тогда

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} + i_1 R_1$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + L_{12} \frac{di_1}{dt} + i_2 R_2 = -i_2 R_H$$

Уравнения линейного трансформатора.

- Если магнитный поток первичной обмотки полностью пронизывает вторичную, то есть если отсутствует поле рас

$$L_{12} = \sqrt{L_1 L_2}$$

- Индуктивности обмоток в первом приближении пропорциональны квадрату количества витков в них.

Уравнения линейного трансформатора.

- $U_1 = -j\omega L_1 I_1 - j\omega L_{12} I_2 + I_1 R_1$
- $-j\omega L_2 I_2 - j\omega L_{12} I_1 + I_2 R_2 = -I_2 Z_H$
- Метод комплексных амплитуд позволяет исследовать не только чисто активную, но и произвольную нагрузку, при этом достаточно заменить сопротивление нагрузки R_H её [импедансом](#) Z_H . Из полученных линейных уравнений можно легко выразить ток через нагрузку, воспользовавшись [законом Ома](#) — напряжение на нагрузке

Режим холостого хода

- Для выяснения физических процессов 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 подводится синусоидальное напряжение $u_1 = U_m \sin \omega t$, по этой обмотке проходит переменный ток, создающий переменный магнитный поток.
- Переменный поток наводит в обмотках трансформатора ЭДС $e_1 = -w_1 d\Phi/dt$; $e_2 = -w_2 d\Phi/dt$.

Цепь вторичной обмотки разомкнута и ток $i_2 = 0$.

При этом для контура первичной обмотки трансформатора

$$u_1 = i_1 r_1 + w_1 d\hat{O} / dt.$$

уравнение справедливо, если отсутствуют потери в стали магнитопровода (от вихревых токов и гистерезиса);

значение ЭДС $e_1 = - w_1 d\Phi/dt$

падение напряжения в активном сопротивлении первичной обмотки $i_1 r_1 \approx 0$, следовательно:

$$u_1 + e_1 = 0$$

$$U + E_1 = 0$$

Если питающее напряжение $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$, то магнитный поток также изменяется синусоидально, отставая по фазе от приложенного напряжения на угол 90° :

$$\Phi = \int \frac{u_1}{w_1} dt = \frac{U_{1m}}{w_1} \int \sin \omega t dt = -\Phi_m \cos \omega t = \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Связь между ЭДС и магнитным потоком определяется из уравнения:

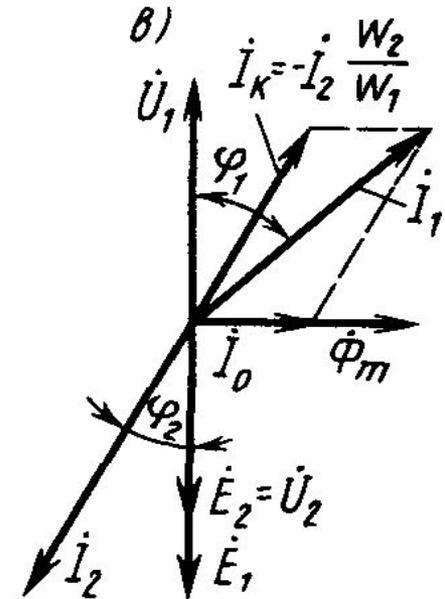
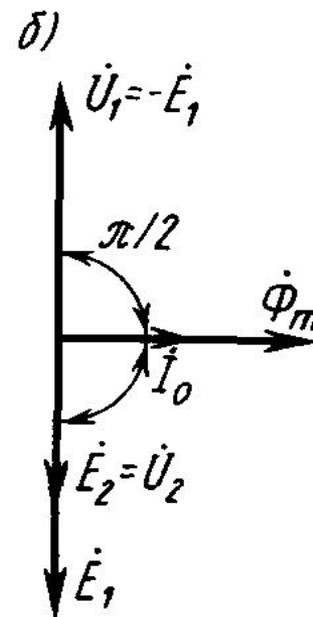
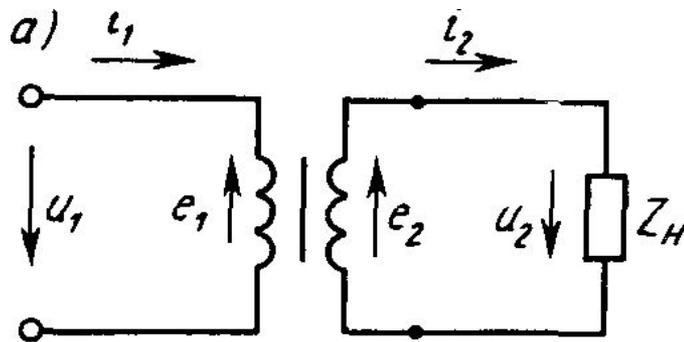
$$e_1 = -w_1 \frac{d}{dt} \left[\Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right] = -w_1 \omega \Phi_m \times$$
$$\times \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = 2\pi f w_1 \Phi_m \cos(\omega t - \pi/2)$$

амплитудное значения ЭДС

$$E_{1m} = 2\pi f w_1 \Phi_m,$$

действующее значение ЭДС

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m.$$



На векторной диаграмме идеализированного трансформатора в режиме холостого хода ток холостого хода I_0 изображен вектором, совпадающим по направлению с вектором магнитного потока Φ_m

На этой же диаграмме векторы ЭДС E_1 и напряжения U_1 в противофазе в соответствии с уравнением, а вектор магнитного потока опережает вектор ЭДС на 90° .

Вектора ЭДС, совпадают по фазе с вектором, так как ЭДС индуцируются одним магнитным потоком

Ток холостого хода

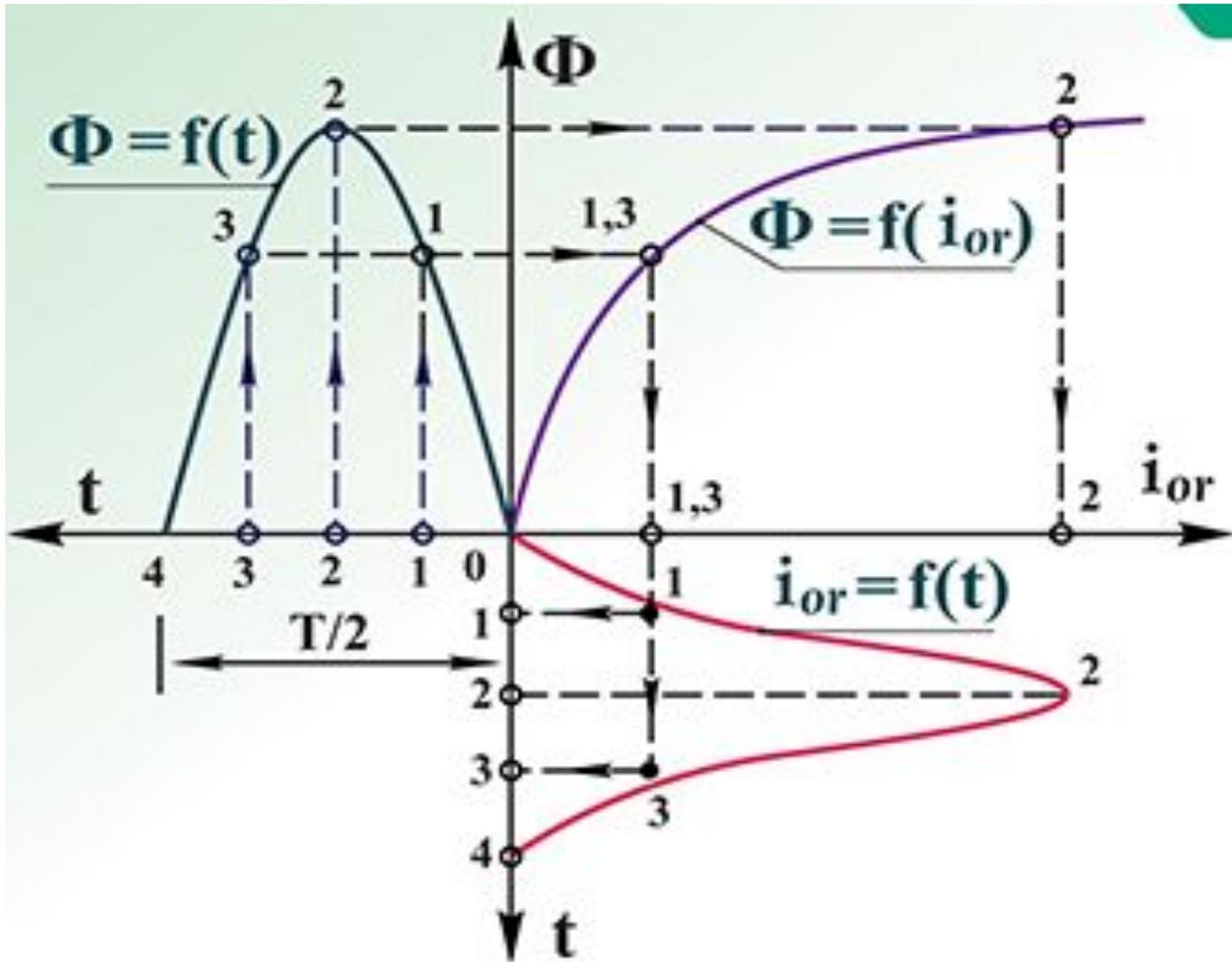
- Намагничивающий ток I_{μ} является главной составляющей тока холостого хода трансформатора I_0 .
- Этот ток является реактивным, т. е. $I_{\mu} = I_{0r}$.
- Реальный трансформатор в режиме холостого хода потребляет и активную мощность, которая обуславливает потери энергии от гистерезиса и вихревых токов (магнитные потери ΔP_M). Поэтому ток холостого хода I_0 должен иметь еще и активную составляющую $I_{0a} = \Delta P_M / U_1$.

$$I_0 = I_{\mu} + I_{0a}$$

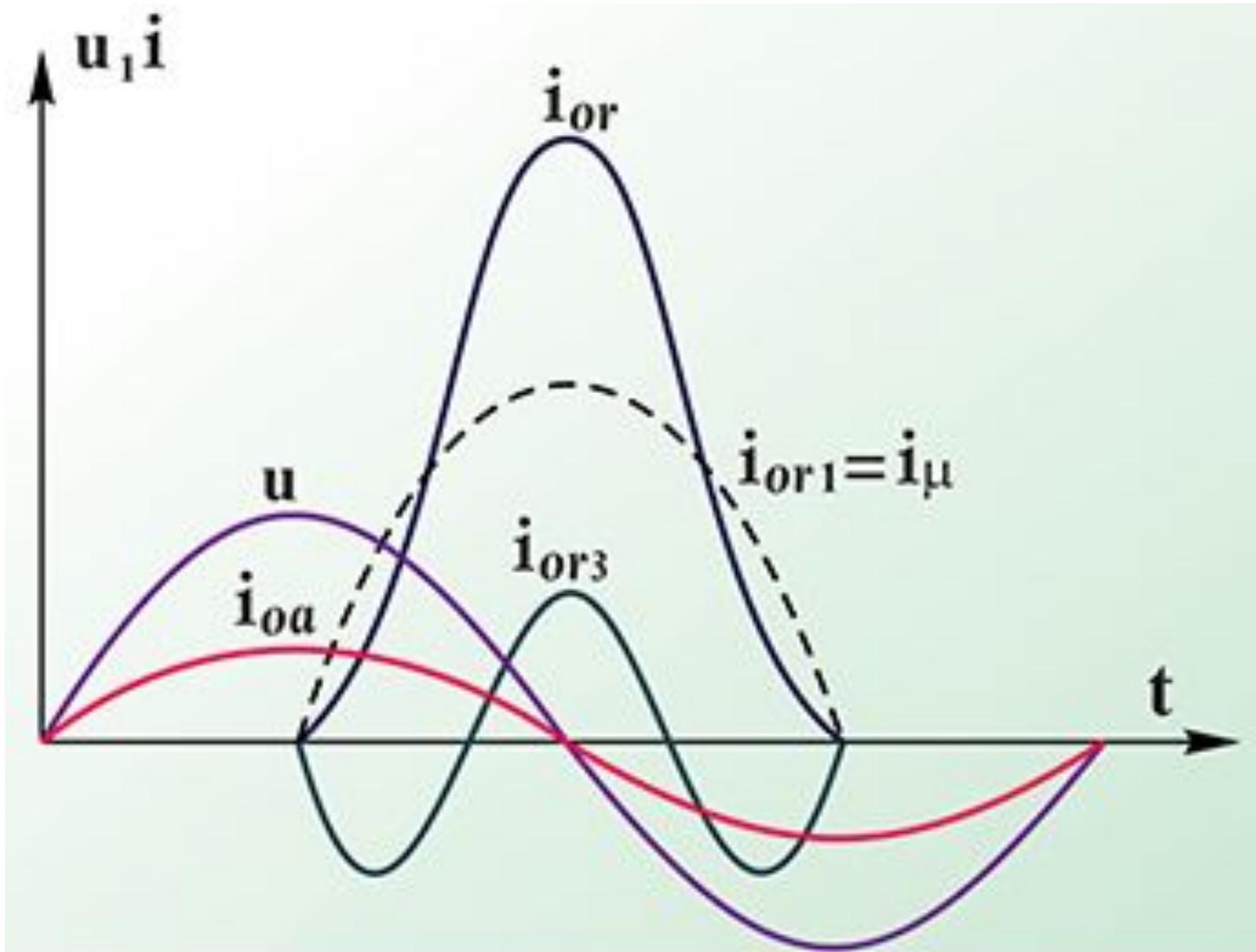
$$I_0 = \sqrt{I_{\mu}^2 + I_{0a}^2}$$

- Обычно активная составляющая тока I_{0a} не превышает 10% от тока I_0 , поэтому *она оказывает весьма малое влияние на значение тока холостого хода (изменяет его не более чем на 1%). Форма кривой тока холостого хода определяется в основном кривой намагничивающего тока.*
- В трансформаторах мощностью 100 кВ · А значение тока холостого хода составляет около 2,5% от номинального тока; при увеличении мощности до 100 000 кВ · А оно постепенно уменьшается до 0,3...0,5%.

Определение реактивной составляющей тока холостого хода



Реактивная составляющая тока холостого хода однофазного трансформатора



Характеристика намагничивания трансформатора

Нелинейная зависимость между потоком в магнитопроводе Φ и постоянным током i_0 в обмотке 1, называемая характеристикой на намагничивания трансформатора на постоянном токе. Она может быть построена на основании закона полного тока в интегральной форме

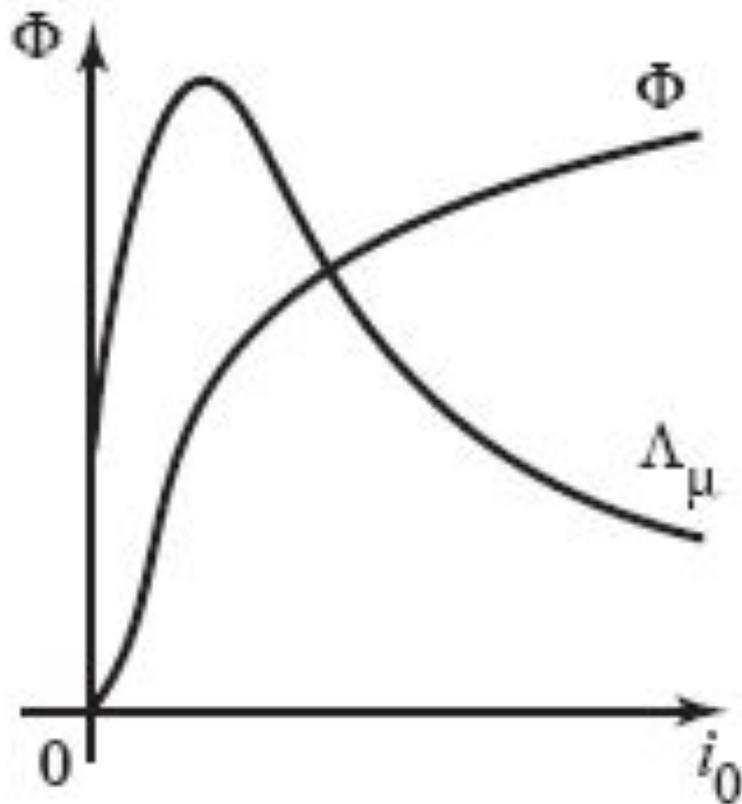
$$i_0 w_1 = \oint H_l \, dl.$$

или

$$i_0 w_1 = \oint H_l \, dl = \sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum_{k=1}^n \frac{B_k}{\mu_{ak}} l_k = \Phi \sum_{k=1}^n \frac{l_k}{\mu_{ak} \Pi_k} = \frac{\Phi}{\Lambda_\mu},$$

Где Λ_μ магнитная проводимость магнитопровода

Характеристика намагничивания трансформатора



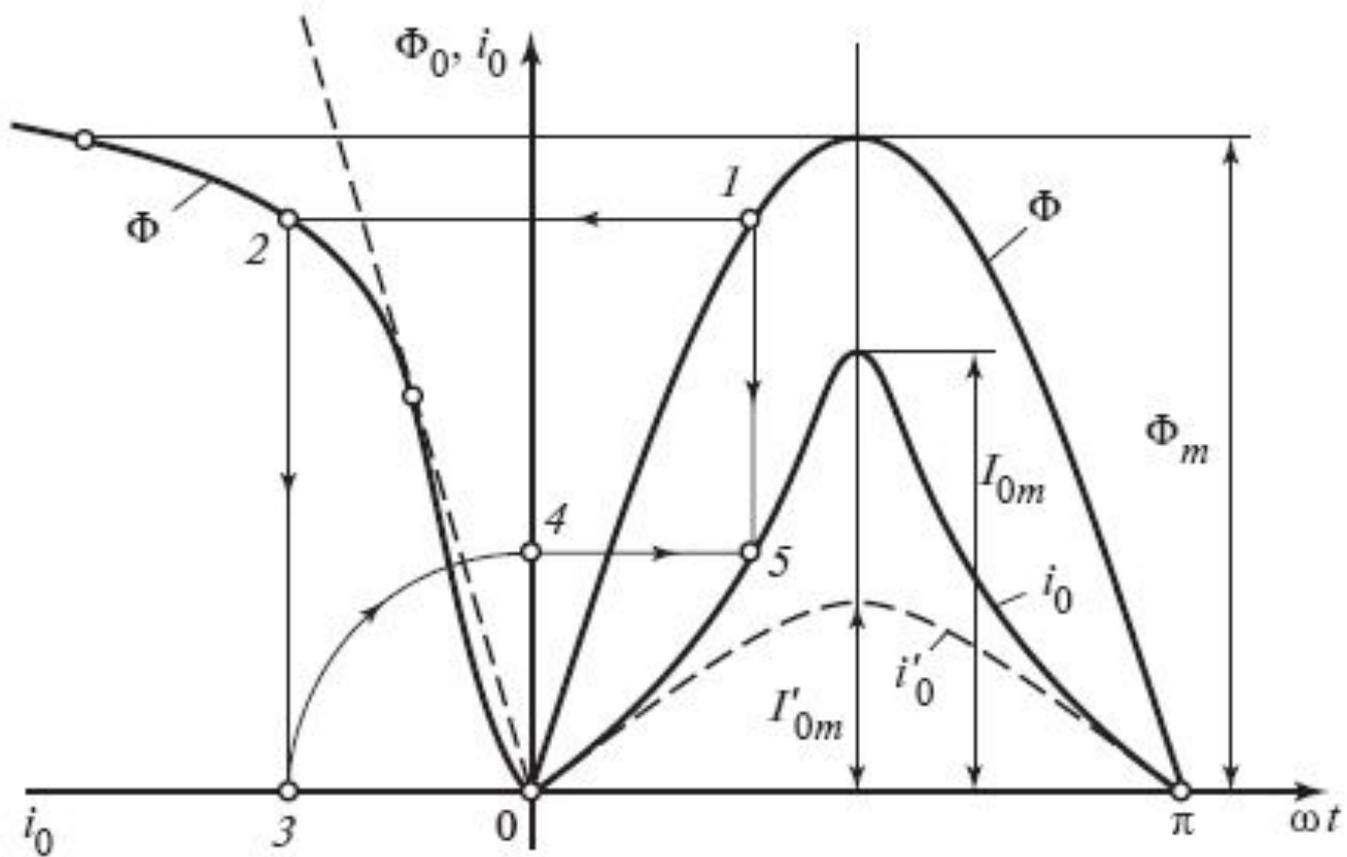
Определение формы тока i

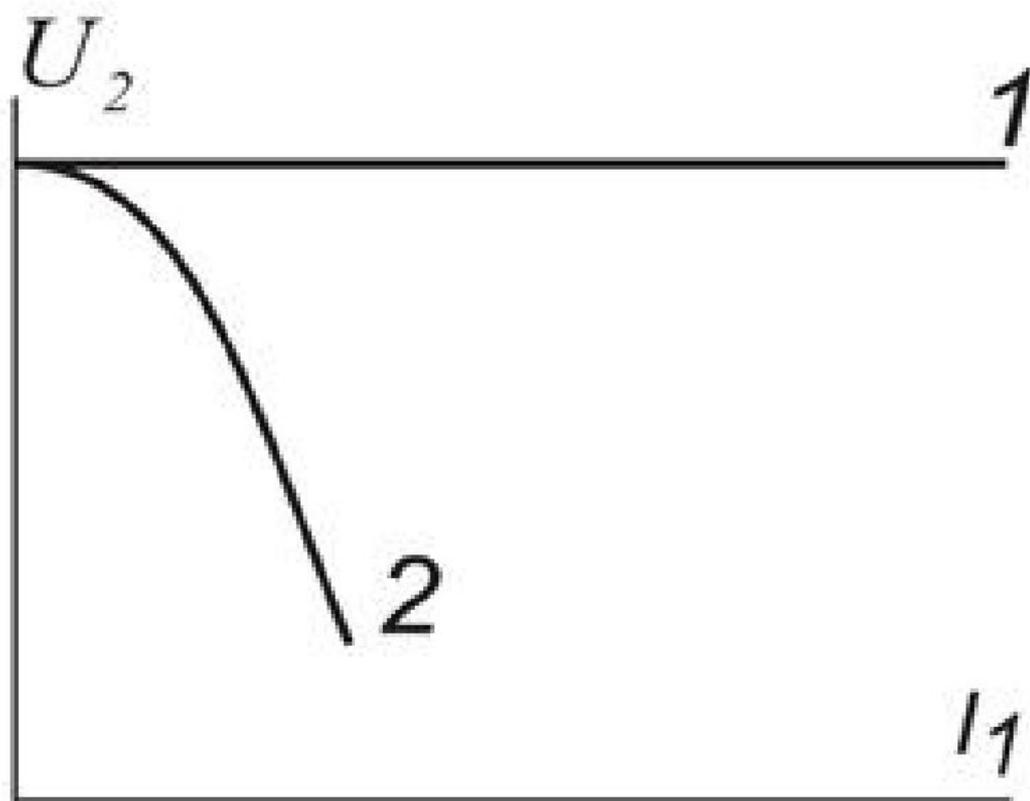
Магнитный поток Φ изменяется во времени синусоидально.

По характеристике намагничивания на постоянном токе $\Phi = f(i_0)$, можно найти кривую изменения тока холостого хода во времени $i_0 = f(t)$ или $f(\omega t)$.

Для этого нужно изобразить кривую изменения потока во времени $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ и для ряда значений потока определить соответствующие значения тока холостого хода.

Ток холостого хода





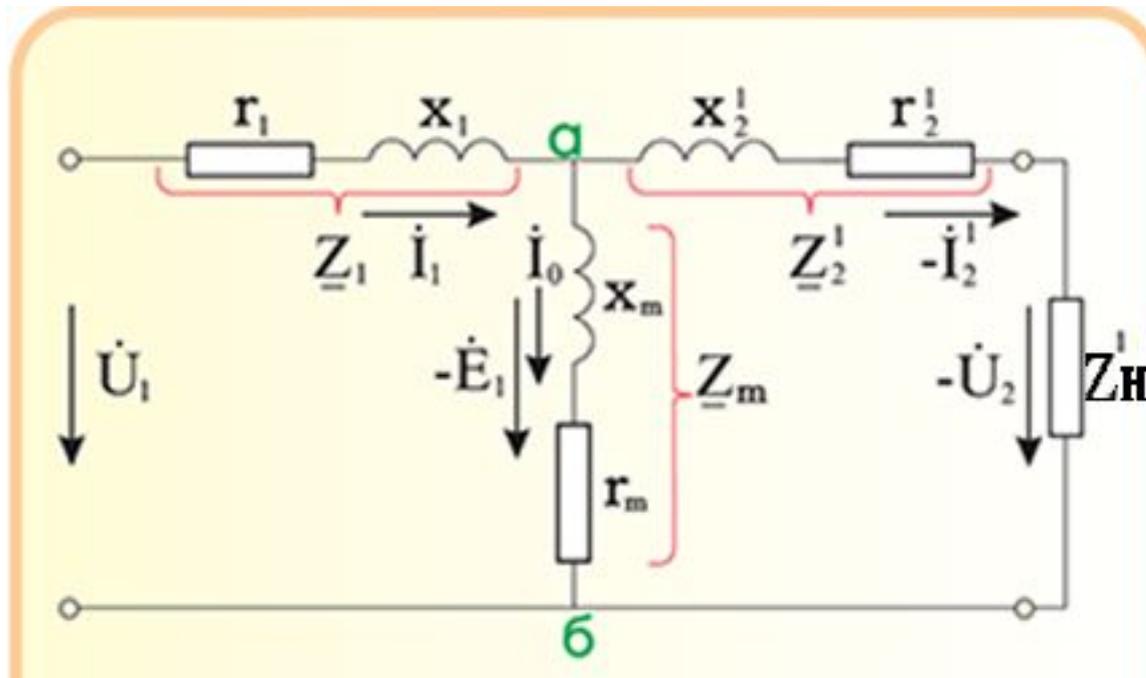
Внешняя характеристика при малом сопротивлении вторичной обмотки 1 и при повышенном сопротивлении вторичной обмотки 2.

Схема замещения трансформатора

Трансформатор можно представить электрической схемой замещения. По этой схеме определяют токи мощность P_1 , забираемую из сети, мощность потерь ΔP и т. п.

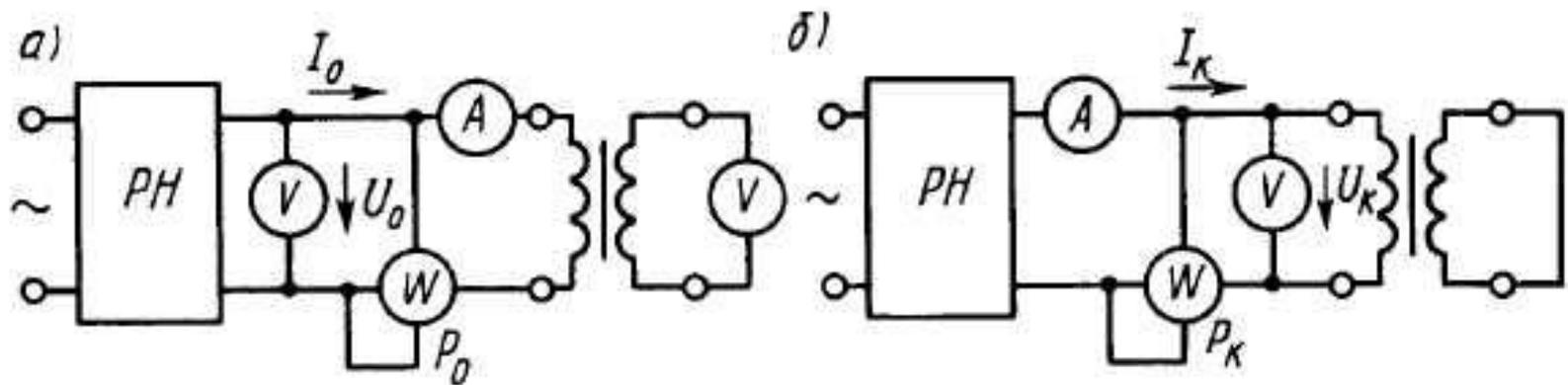
Схема замещения трансформатора - сочетание двух схем замещения — первичной и вторичной обмоток, соединенных между собой. В цепи первичной обмотки включены сопротивления R_1 и X_1 , в цепи вторичной R'_2 и X'_2 . Участок схемы замещения между точками a и b , по которому проходит ток I_0 , называют *намагничивающим контуром*. Схема замещения составляется по уравнениям представленным выше.

Все параметры схемы замещения, за исключением Z'_H являются постоянными для данного трансформатора и могут быть определены из опыта Х.Х. и опыта К.З.



Определение параметров схемы замещения

Параметры схемы замещения для любого трансформатора можно определить по данным опытов холостого хода (рис. а) и короткого замыкания (рис.б)



Опыт холостого хода и короткого замыкания

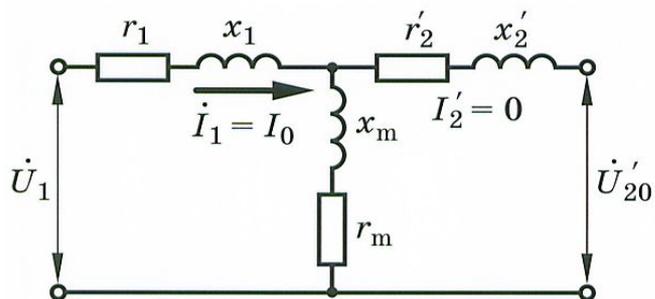
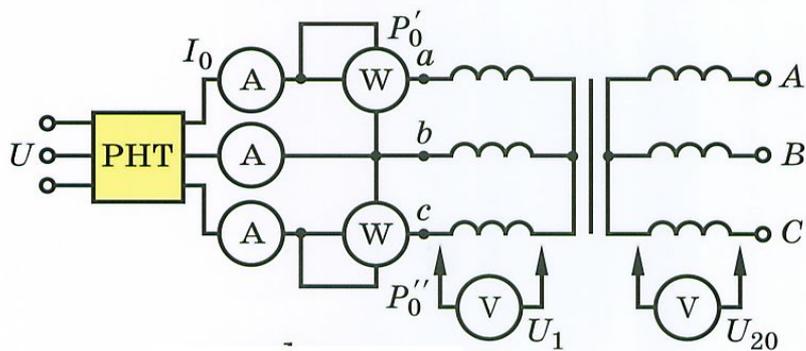


Схема замещения трансформатора в режиме х.х.

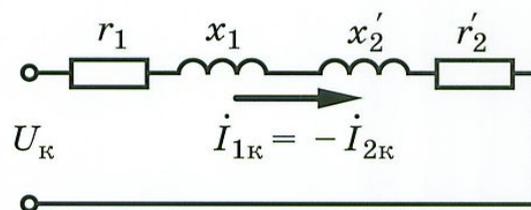
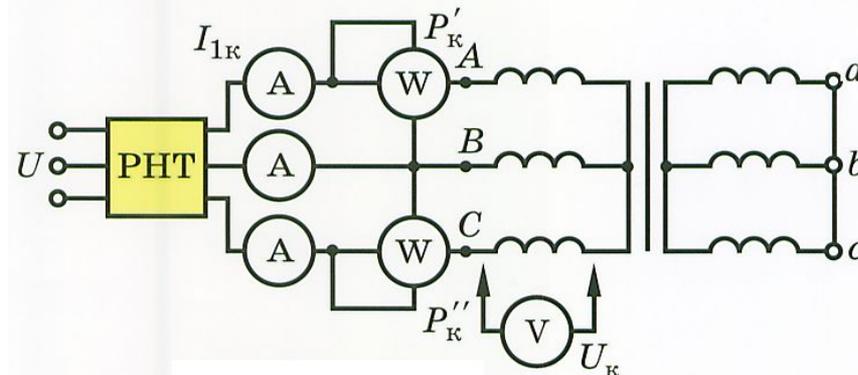


Схема замещения трансформатора в режиме к.з.

Опыт холостого хода

К зажимам одной из обмоток посредством регулятора напряжения ($РН$) подводят номинальное напряжение $U_0 = U_{ном}$. К другой обмотке подключают вольтметр (ее можно считать разомкнутой). Измерив ток холостого хода и мощность, потребляемую трансформатором, согласно схеме замещения находят

$$\left. \begin{aligned} Z_1 + Z_m &= U_0 / I_0; R_1 + R_m = P_0 / I_0^2; \\ X_1 + X_m &= \sqrt{(Z_1 + Z_m)^2 - (R_1 + R_m)^2}. \end{aligned} \right\}$$

Так как ток холостого хода мал по сравнению с номинальным током трансформатора, электрическими потерями пренебрегают и считают, что вся мощность, потребляемая трансформатором, расходуется на компенсацию магнитных потерь в стали магнитопровода. При этом

$$P_0 = I_0^2 (R_1 + R_m) \approx I_0^2 R_m,$$

$$R_m = P_0 / I_0^2.$$

Аналогично считают, что $X_1 + X_m \approx X_m$, так как сопротивление X_m определяется основным потоком трансформатора Φ , а X_1 — потоком рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$, который во много раз меньше Φ .

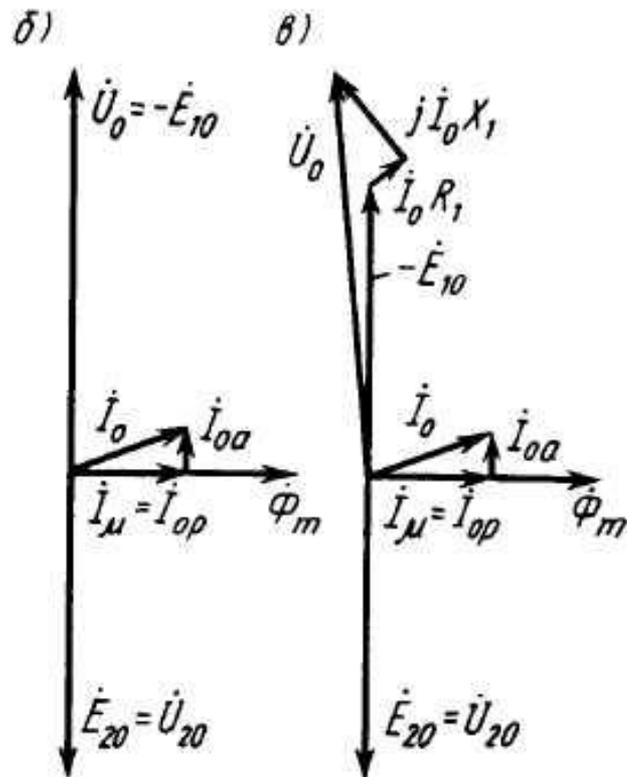
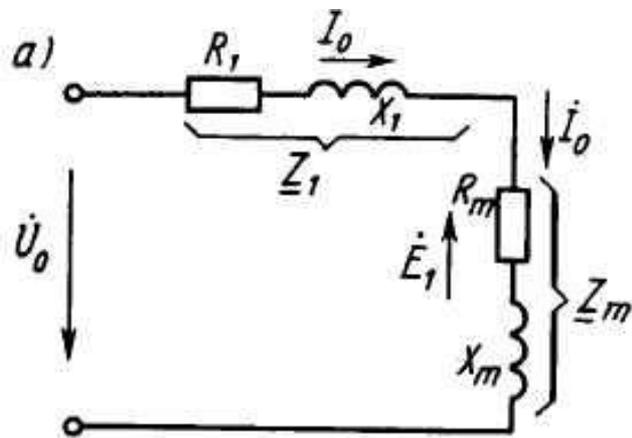
Следовательно

$$Z_m = U_0 / I_0; X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}.$$

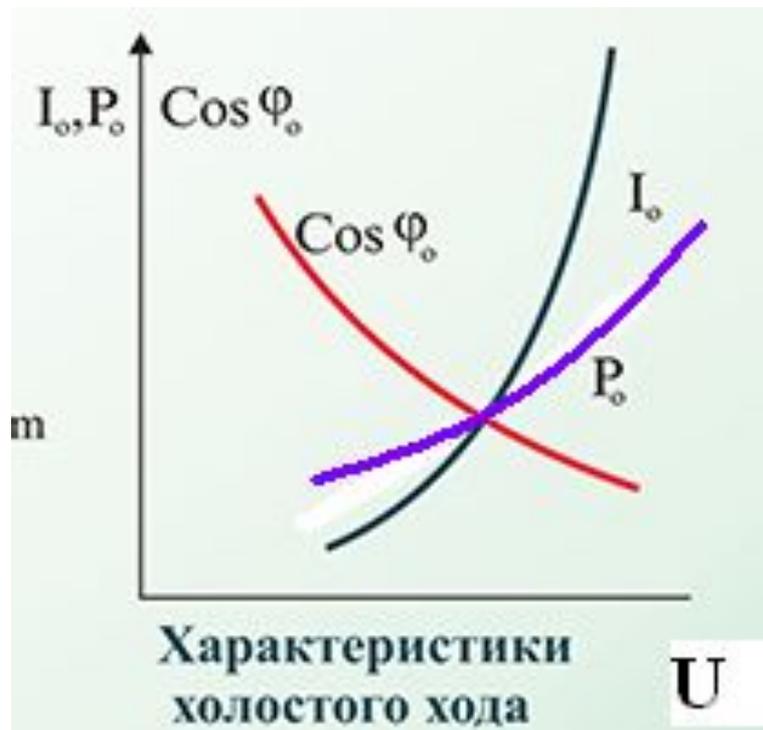
Измерив напряжения U_0 и U_{20} первичной и вторичной обмоток, определяют коэффициент трансформации

$$k = U_0 / U_{20}$$

Схема замещения и векторные диаграммы трансформатора в режиме ХХ



Характеристики холостого хода



- При увеличении первичного напряжения насыщение магнитопровода увеличивается, вследствие чего ток I_0 растет быстрее, чем U_0 . Поэтому Z_0 и X_0 с ростом U_0 уменьшаются. Так как $P_0 \sim E^2 \sim U^2$, а I_0^2 растет быстрее U_0^2 , то R_0 с ростом U_0 также уменьшается.

При ОКЗ к первичной обмотке подводят пониженное напряжение U_k , при котором по обмоткам проходит номинальный ток $I_{\text{ном}}$. В мощных силовых трансформаторах $U_k^{\text{ном}}$ при ОКЗ обычно составляет 5... 15% от номинального. В трансформаторах малой мощности напряжение U_k может достигать 25...50% от $U_{\text{ном}}$.

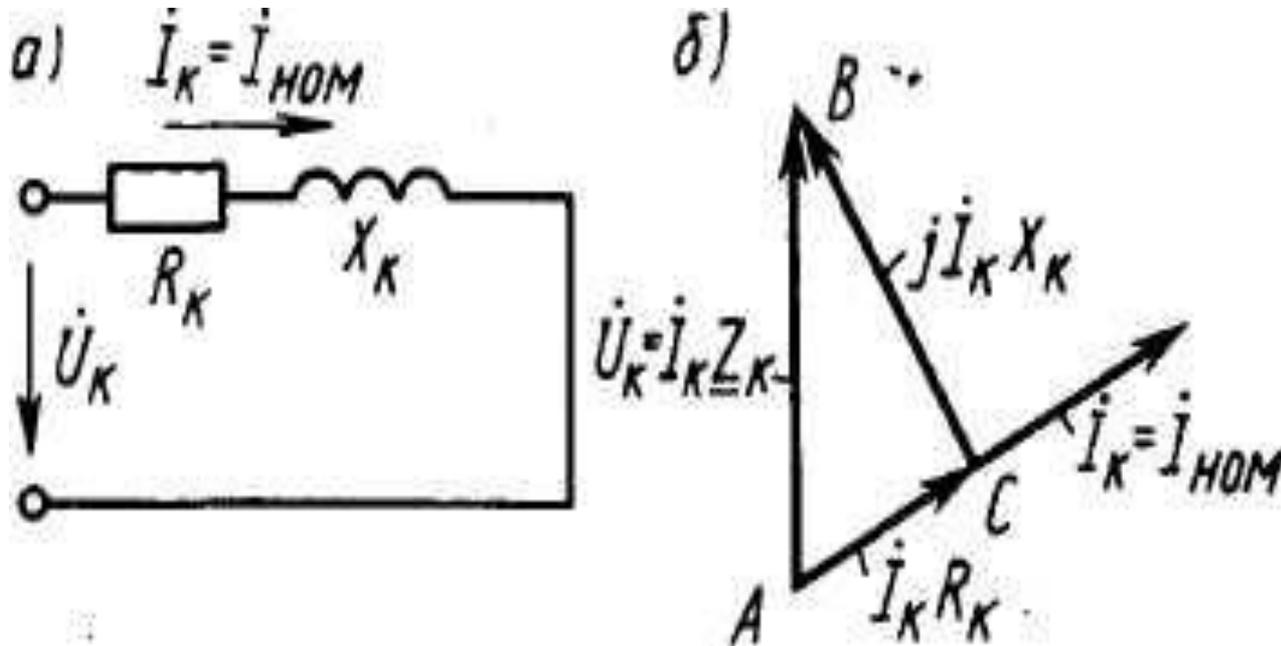
Так как Φ , зависит от U_1 , а магнитные потери в стали квадрату индукции, т. е. квадрату магнитного потока, то ввиду малости U_k пренебрегают магнитными потерями в стали и током хх. Из схемы замещения исключают сопротивления R_m и X_m

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{Z}_k &= \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}'_2 = \mathbf{U}_k / \mathbf{I}_{\hat{u}} \ ; \\ \mathbf{R}_k &= \mathbf{R}_1 + \mathbf{R}'_2 = P_k / \mathbf{I}_{\hat{u}}^2 \ ; \\ \mathbf{X}_k &= \mathbf{X}_1 + \mathbf{X}'_2 = \sqrt{\mathbf{Z}_k^2 - \mathbf{R}_k^2} . \end{aligned} \right\}$$

Обычно принимают схему замещения симметричной, полагая $\mathbf{Z}_1 = \mathbf{Z}'_2 = 0,5\mathbf{Z}_{к/}$

Треугольник ABC , образуемый векторами активного, реактивного и полного падений напряжения, называют *треугольником короткого замыкания* или *характеристическим треугольником*

Векторная диаграмма и схема замещения трансформатора для ОКЗ



Треугольник ABC , образуемый векторами активного, реактивного и полного падений напряжения, называют *треугольником короткого замыкания* или *характеристическим треугольником*. Катеты BC и AC называют соответственно *реактивной* и *активной составляющими* напряжения короткого замыкания.

В паспортах трансформаторов указывают относительное напряжение короткого замыкания при номинальном токе в процентах от номинального напряжения:

$$u_k \% = \left(I_{\text{н}} Z_k / U_{\text{н}} \right) 100.$$

- Можно выразить относительные значения его активной и реактивной составляющих

$$u_{k.v} \% = (I_{ном} R_k / U_{ном}) 100; u_{k.p} \% = (I_{ном} X_k / U_{ном}) 100.$$

$$u_{\hat{e}.\hat{a}} = u_k \cos \varphi_k; u_{k.p} = u_k \sin \varphi_k;$$

$$u_k = \sqrt{u_{k.a}^2 + u_{k.p}^2}.$$

- По известному значению $u_k \%$ можно определить установившийся ток КЗ при номинальном напряжении:

$$I_k = U_{ном} / Z_k = U_{ном} / [u_k \% U_{ном} / (100 I_{ном})] = 100 I_{ном} / u_k \%.$$

- Обычно в силовых трансформаторах большой и средней мощности значение $u_k \%$ составляет 5... 15%. Ток кз в в 7...20 раз превышает номинальный. Как правило, чем больше мощность и напряжение силового трансформатора, тем выше напряжение короткого замыкания $u_k \%$.

**Благодарю
за
внимание**