

Параметры первичной обмотки трансформатора отличаются от параметров вторичной обмотки, что при больших коэффициентах трансформации затрудняет расчеты и построение векторных диаграмм. Указанные затруднения устраняются приведением всех параметров трансформатора к одинаковому числу витков, обычно к числу витков первичной обмотки w_1 . Для этого величины, характеризующие вторичную цепь трансформатора, пересчитывают на число витков w_1 первичной обмотки.

Вместо реального трансформатора с коэффициентом трансформации $k = w_1/w_2$ получают эквивалентный трансформатор с $k=w_1/w'_2=1$, где $w'_2=w_1$. Такой трансформатор называют *приведенным*.

Приведение вторичных параметров трансформатора не должно отразиться на его энергетических показателях: все мощности и фазовые сдвиги во вторичной обмотке приведенного трансформатора должны остаться такими, как и в реальном трансформаторе.

Электромагнитная мощность вторичной обмотки реального трансформатора $E_2 I_2$ должна быть равна электромагнитной мощности вторичной обмотки приведенного трансформатора:

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

Соответственно для остальных электрических величин:

$$E'_2 = \frac{I_2}{I'_2} E_2 = \frac{I_2}{I_2} \frac{W_1}{W_2} E_2 = E_2 \frac{W_1}{W_2}.$$

$$U'_2 \approx U_2 (W_1 / W_2).$$

Из условия равенства потерь в активном и реактивном сопротивлении вторичной обмотки имеем

$$I_2^2 r_2 = I'^2_2 r'_2$$

$$r'_2 = r_2 (I_2 / I'_2)^2 = r_2 (W_1 / W_2)^2.$$

$$x'_2 = x_2 (W_1 / W_2)^2.$$

Приведенное полное сопротивление вторичной обмотки трансформатора

$$Z'_2 = r'_2 + jx'_2 = (r_2 + jx_2) (W_1 / W_2)^2 = Z_2 (W_1 / W_2)^2.$$

Приведенное полное сопротивление нагрузки

$$Z'_H = Z_H (w_1 / w_2)^2.$$

Уравнения напряжений и токов для приведенного трансформатора имеют вид

$$U_1 = (-E_1) + I_1 Z_1 = (-E_1) + jI_1 x_1 + I_1 r_1;$$

$$U_2' = E_2' - I_2' Z_2' = E_2' - jI_2' x_2' - I_2' r_2';$$

$$I_1 = I_0 + (-I_2').$$

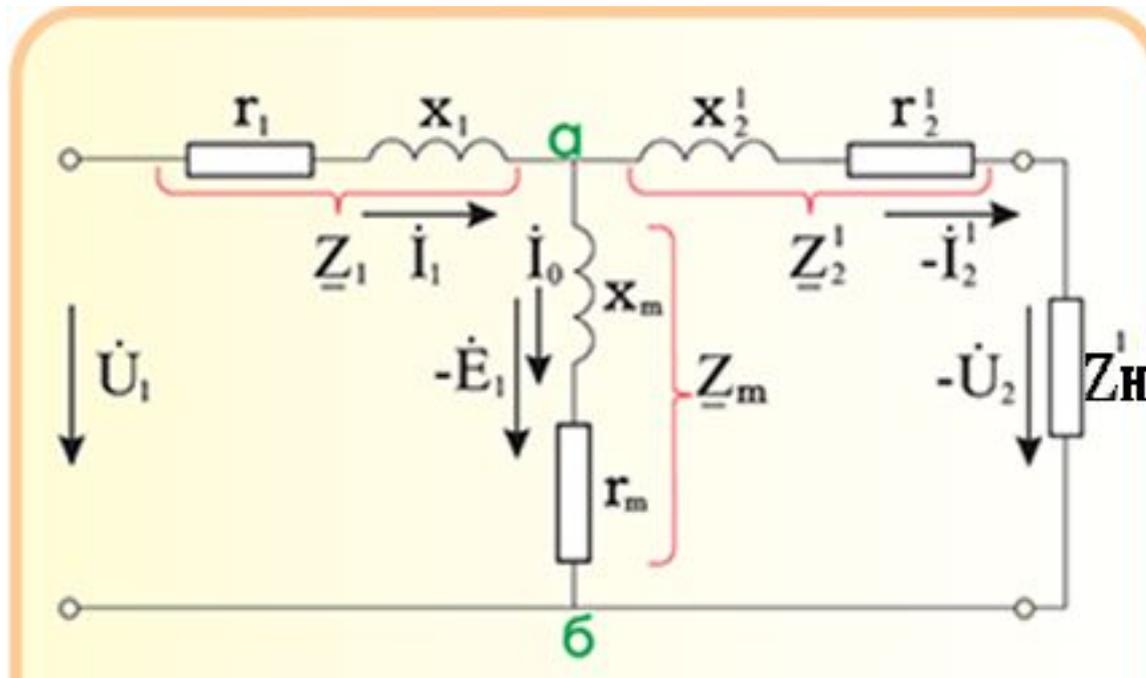
Данные уравнения устанавливают аналитическую связь между параметрами трансформатора во всем диапазоне нагрузок от режима х.х. до номинальной.

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.

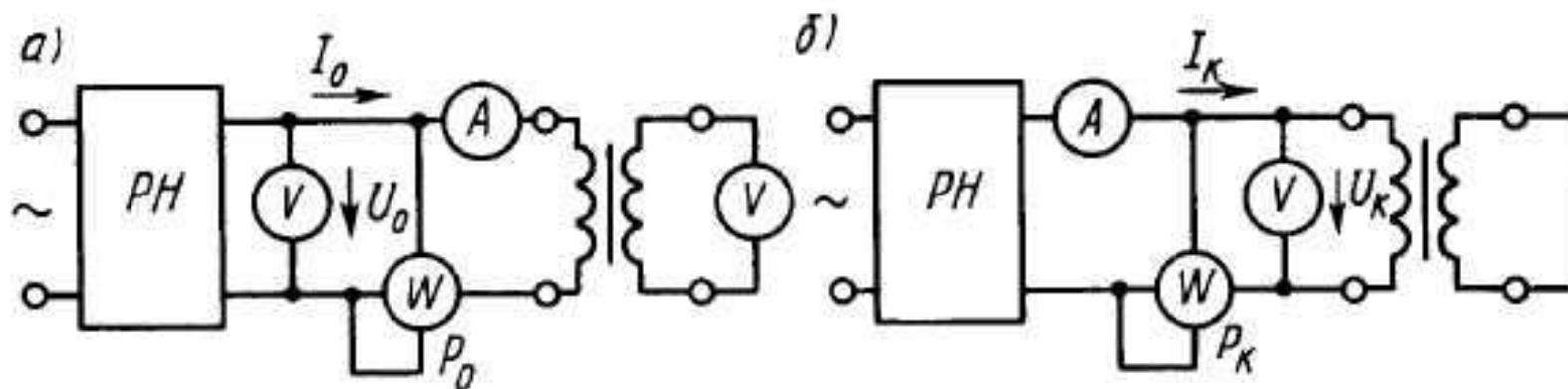
Схема замещения трансформатора - сочетание двух схем замещения — первичной и вторичной обмоток, соединенных между собой. В цепи первичной обмотки включены сопротивления R_1 и X_1 , в цепи вторичной R'_2 и X'_2 . Участок схемы замещения между точками a и b , по которому проходит ток I_0 , называют *намагничивающим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

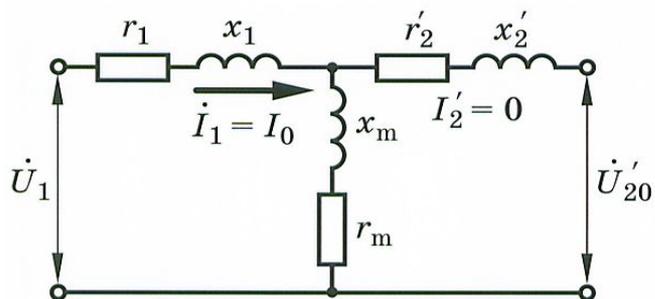
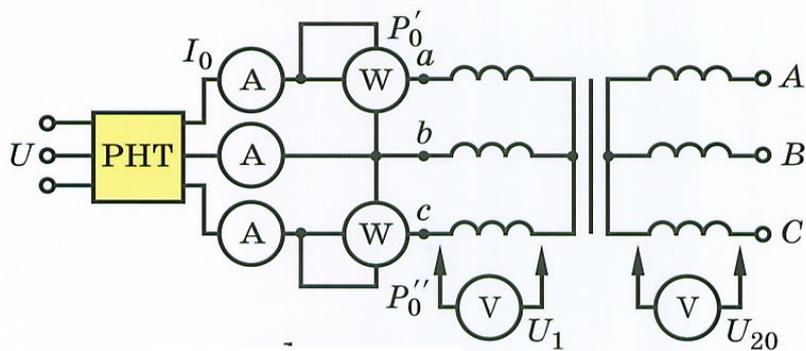


Схема замещения трансформатора в режиме х.х.

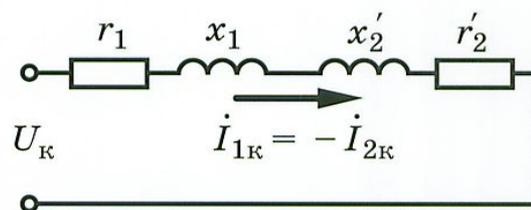
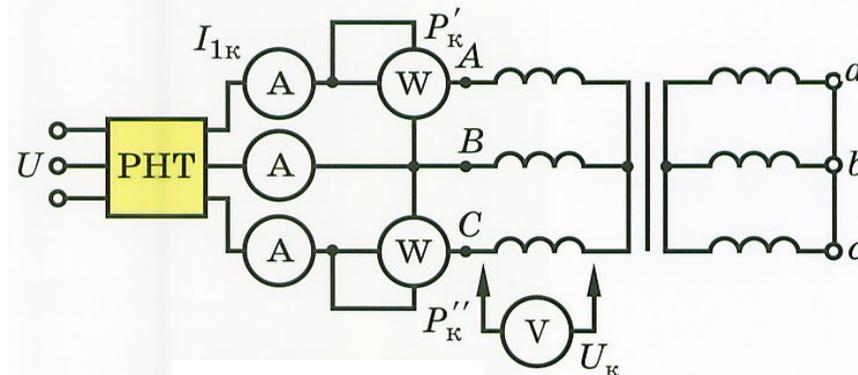


Схема замещения трансформатора в режиме к.з.

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 .

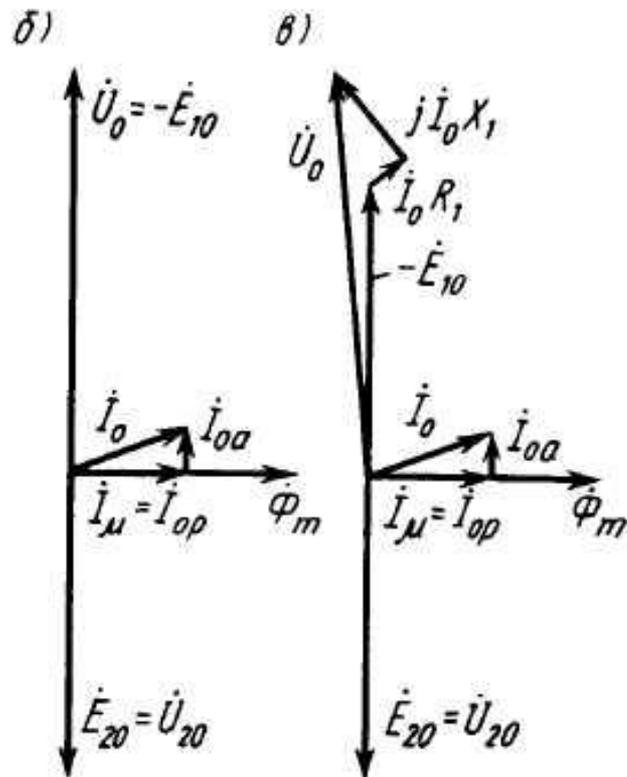
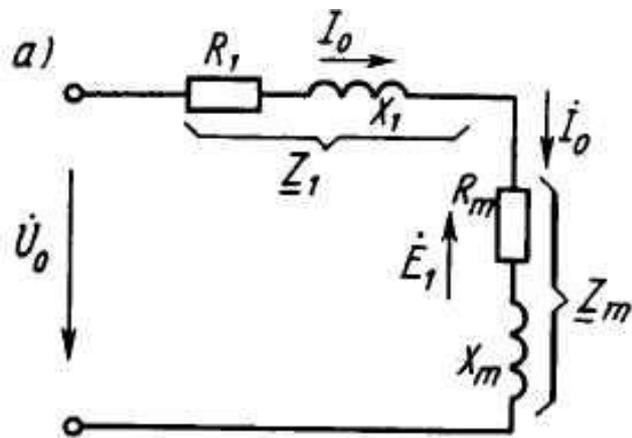
Следовательно

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

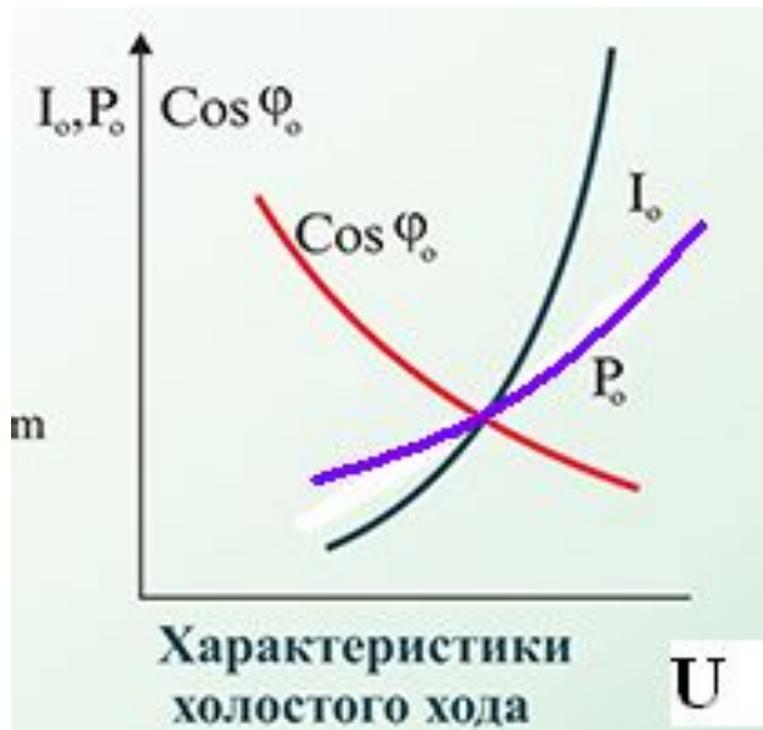
Измерив напряжения U_0 и U_{20} первичной и вторичной обмоток, определяют коэффициент трансформации

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

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 $U_{\text{ном}}$.

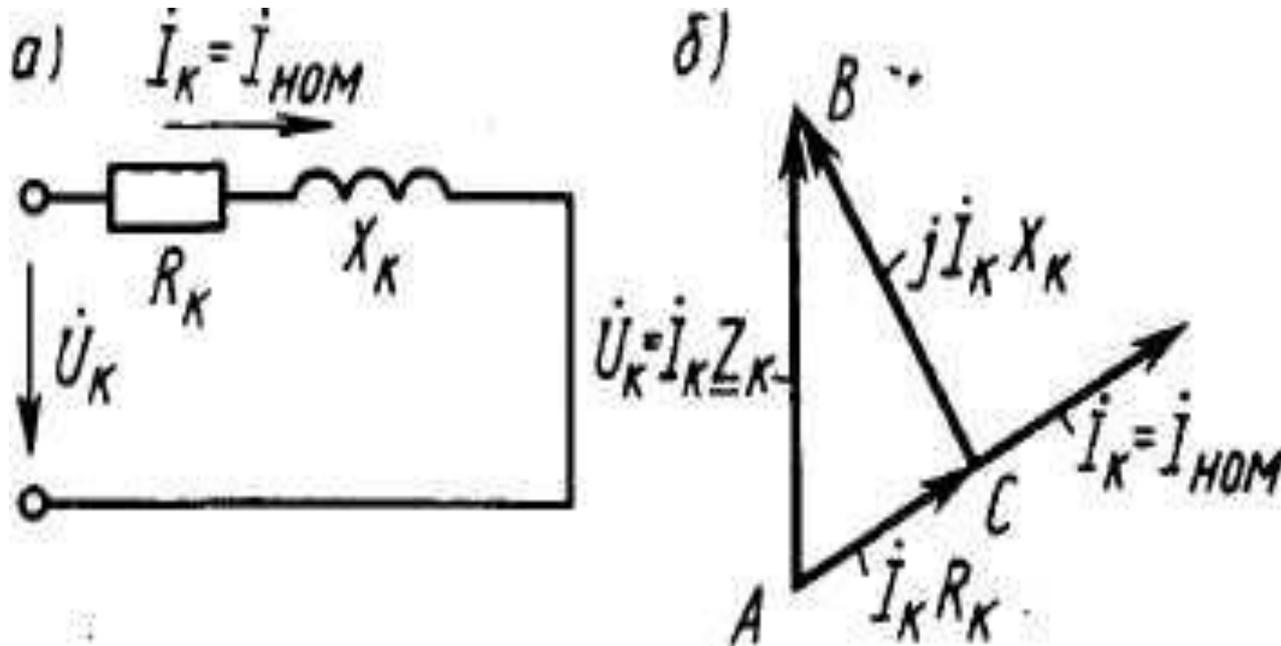
Так как Φ , зависит от U_1 , а магнитные потери в стали квадрату индукции, т. е. квадрату магнитного потока, то ввиду малости U_k пренебрегают магнитными потерями в стали и током хх. Из схемы замещения исключают сопротивления R_m и X_m

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

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 $u_k \%$.