

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

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

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

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

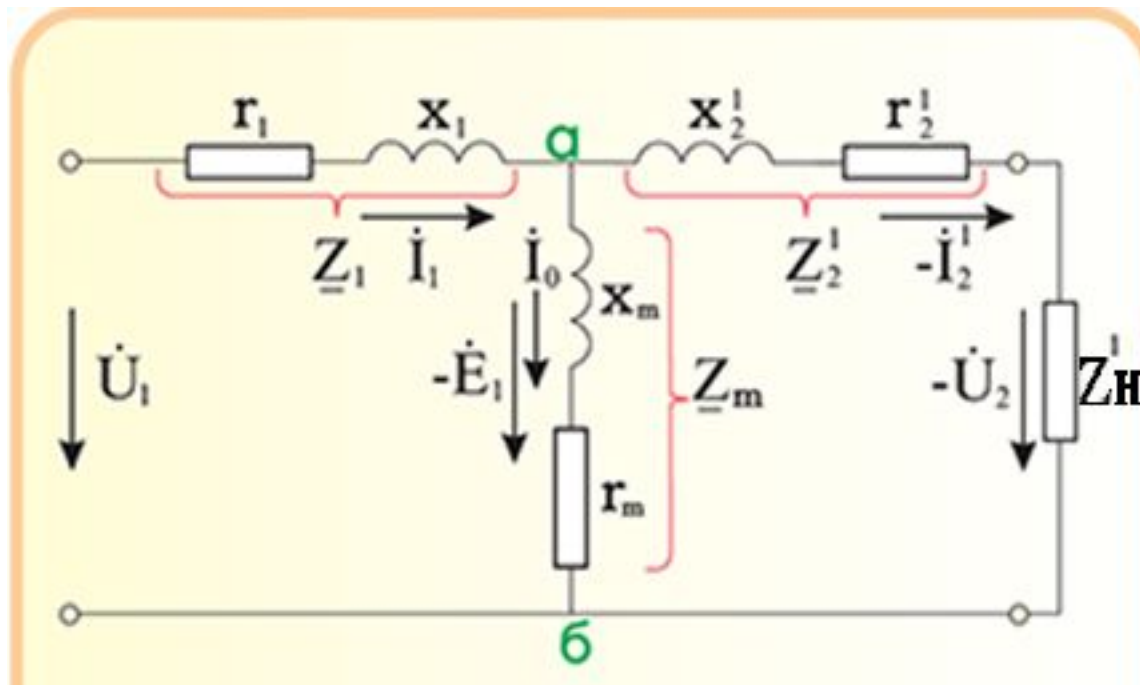
Данные уравнения устанавливают аналитическую связь между параметрами трансформатора во всем диапазоне нагрузок от режима х.х. до номинальной.

## Схема замещения трансформатора

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

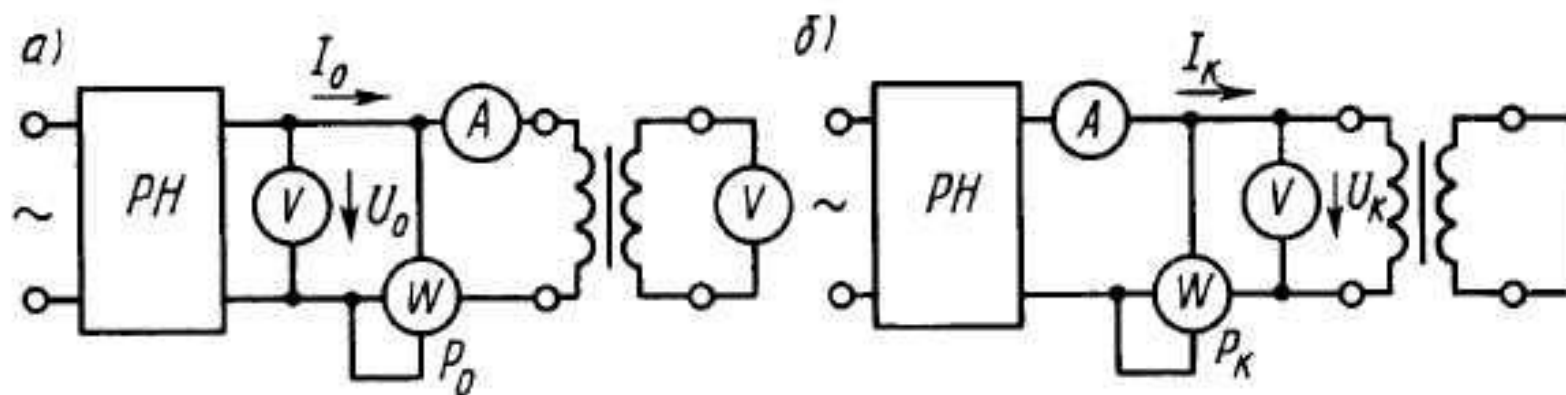
Схема замещения трансформатора - сочетание двух схем замещения — первичной и вторичной обмоток, соединенных между собой. В цепи первичной обмотки включены сопротивления  $R_1$  и  $X_1$ , в цепи вторичной  $R'_2$  и  $X'_2$ . Участок схемы замещения между точками  $a$  и  $b$ , по которому проходит ток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

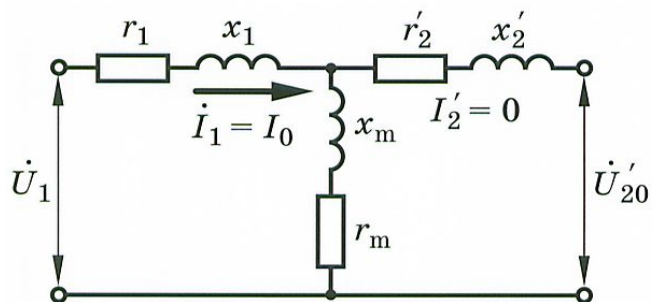
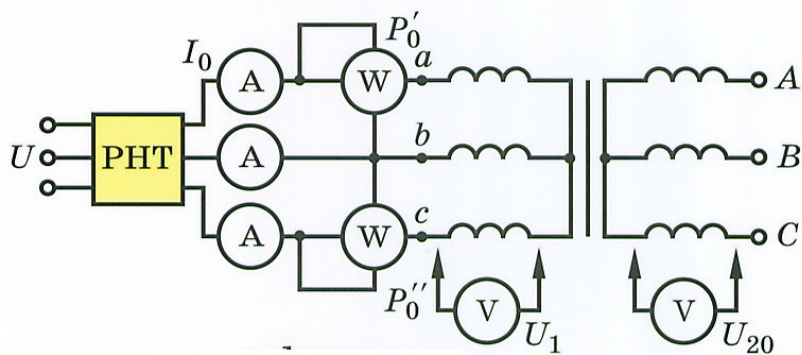


Схема замещения трансформатора в режиме х.х.

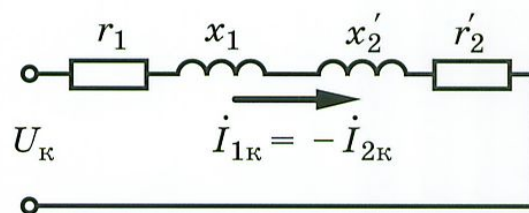
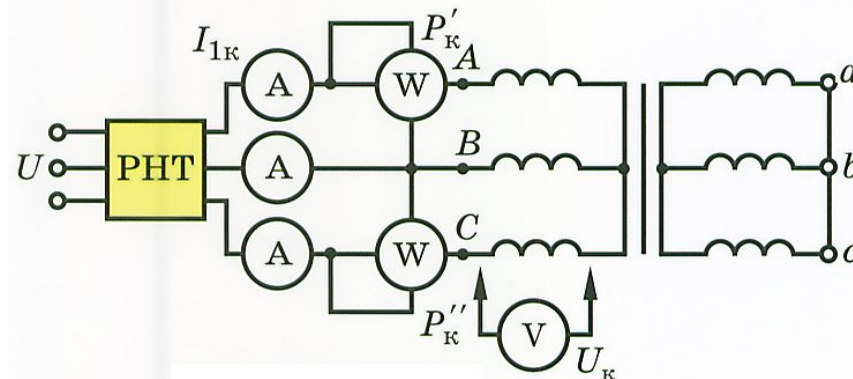


Схема замещения трансформатора в режиме к.з.



## Опыт холостого хода

К зажимам одной из обмоток посредством регулятора напряжения ( $PH$ ) 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  $\Phi$ , а  $X_1$  — потоком рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$ , который во много раз меньше  $\Phi$ .

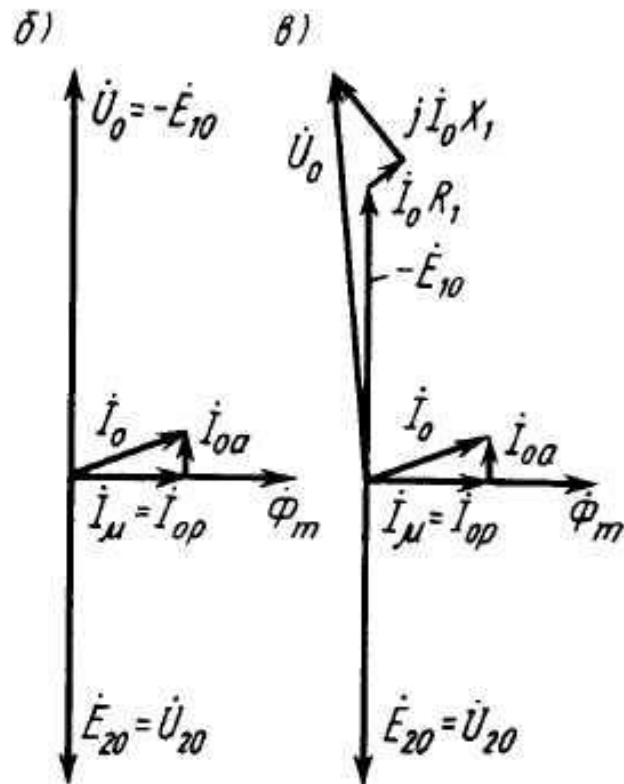
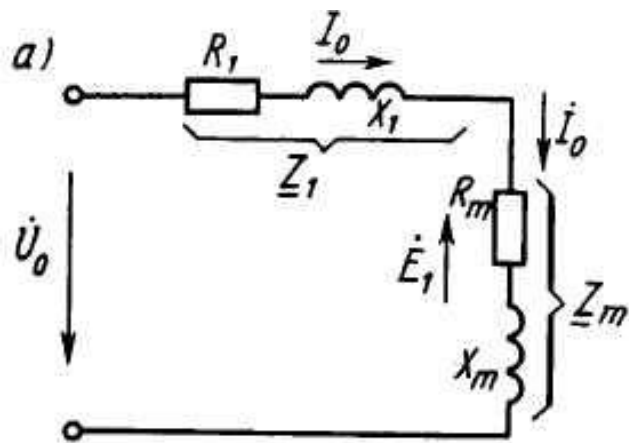
Следовательно

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

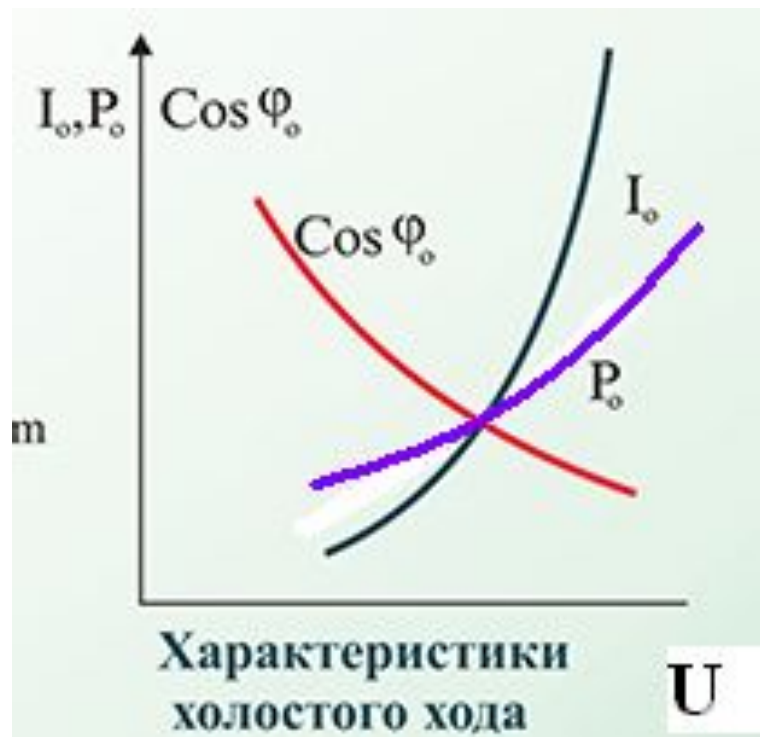
Измерив напряжения  $U_0$  и  $U_{20}$  первичной и вторичной обмоток, определяют коэффициент трансформации

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

# 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  $\Phi$ , 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  $X_m$

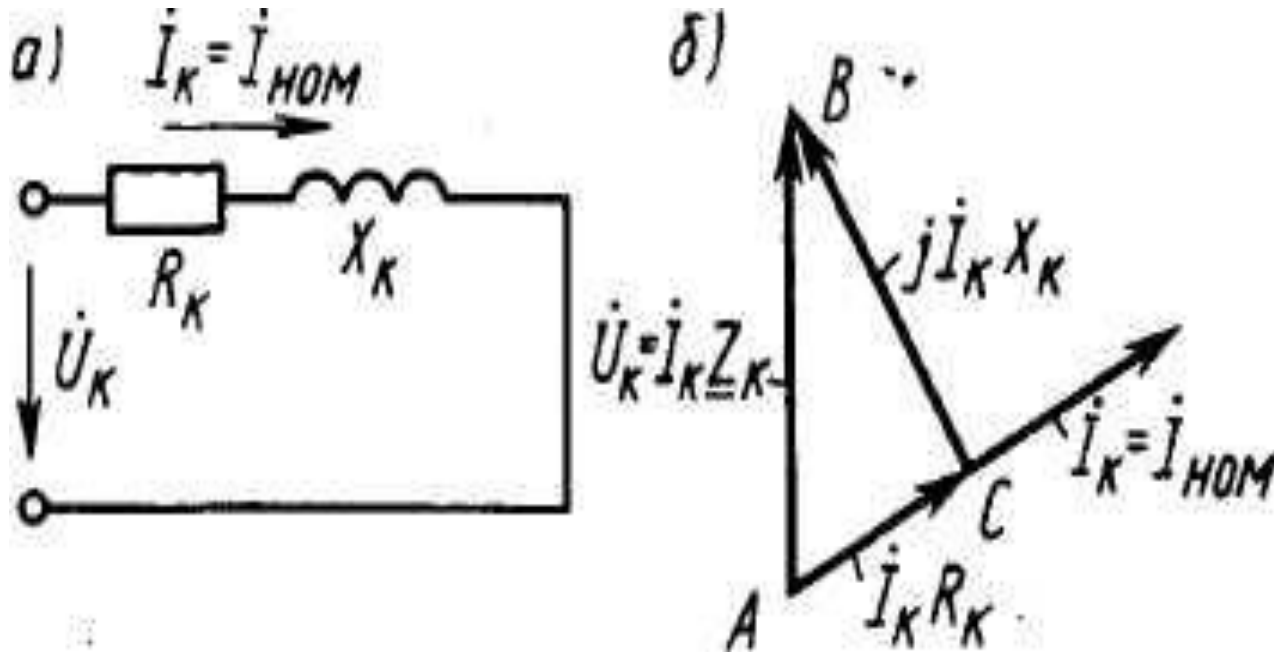
$$\left. \begin{aligned} \mathbf{Z}_k &= \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}'_2 = U_k / I_{\hat{u}} \ ; \\ \mathbf{R}_k &= \mathbf{R}_1 + \mathbf{R}'_2 = P_k / I_{\hat{u}}^2 \ ; \\ \mathbf{X}_k &= \mathbf{X}_1 + \mathbf{X}'_2 = \sqrt{\mathbf{Z}_k^2 - \mathbf{R}_k^2} . \end{aligned} \right\}$$

Обычно принимают схему замещения симметричной, полагая  $Z_1 = Z'_2 = 0,5Z_{к/}$

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  $u_k \%$ .