

## ТРАНСФОРМАТОРЫ

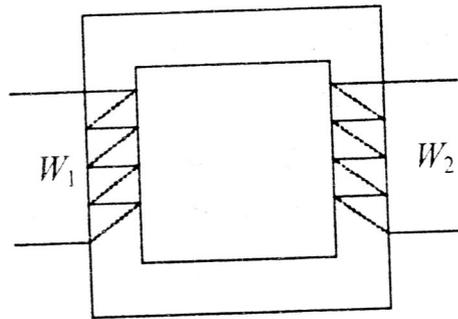
Трансформатор это статический электромагнитный аппарат, преобразующий напряжение и ток первичной обмотки в напряжения и токи вторичных обмоток при неизменной частоте питающего напряжения. В трансформаторе нет вращающихся частей, поэтому он не является машиной в обычном смысле этого слова. Однако преобразование электроэнергии в нем происходит на основе тех же законов электричества и магнетизма, что и в электрических машинах. В частности, на основе теории трансформаторов рассматривается теория асинхронных машин, поэтому трансформаторы составляют неотъемлемую часть курса электрических машин.

## Классификация трансформаторов

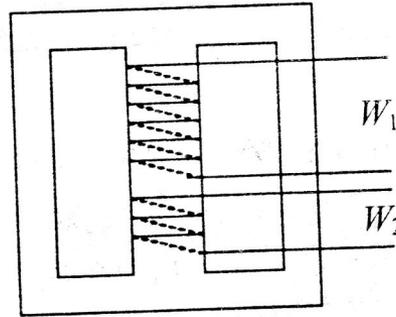
Трансформаторы различаются:

- по числу фаз питающей сети — на одно- и трехфазные;
- по соотношению напряжений первичной и вторичной обмоток — на повышающие  $U_2 > U_1$  и на понижающие  $U_2 < U_1$ , где  $U_1$  — напряжение питания первичной обмотки,  $U_2$  — напряжение, снимаемое со вторичной обмотки трансформатора;
- по назначению — на силовые и специальные (измерительные, согласующие, автотрансформаторы, сварочные, импульсные, печные и т.д.);
- по конструкции — на сухие и масляные. В сухих трансформаторах охлаждение осуществляется при естественной или принудительной конвенции воздуха, а в масляных — при естественной или принудительной циркуляции трансформаторного масла;

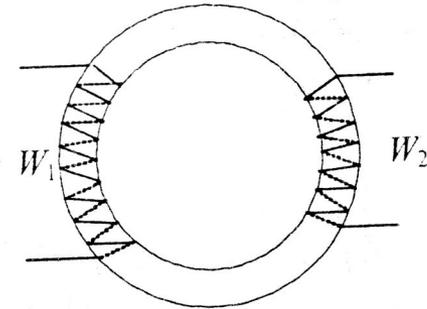
## Виды сердечников трансформаторов



Стержневой



Броневой



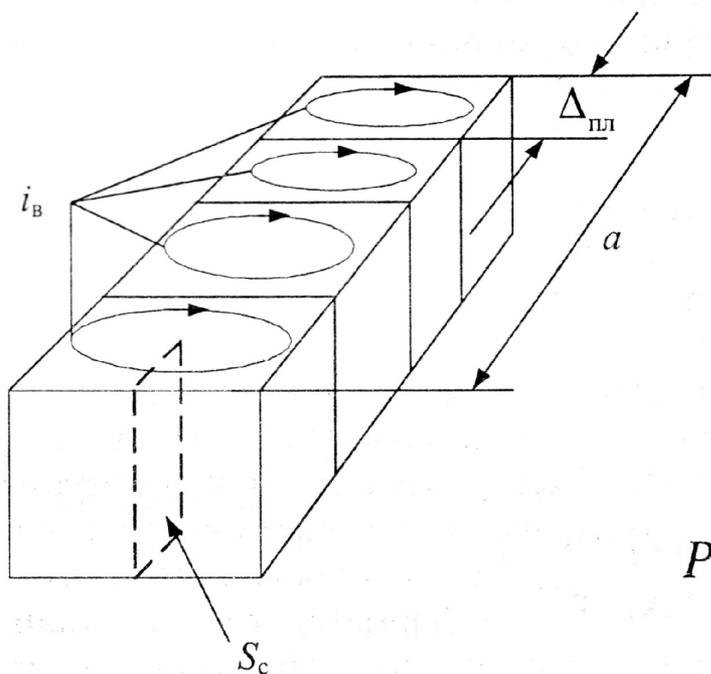
Тороидальный

**Зависимость толщины пластины сердечника трансформатора от частоты питающего напряжения**

Частота $f$ , Гц	50	400	1000	10000
$\Delta_{пл}$ (толщина пластины), мм	0,5	0,35	0,1–0,2	0,05

# Устройство однофазного трансформатора

## Вихревые токи в шихтованном сердечнике

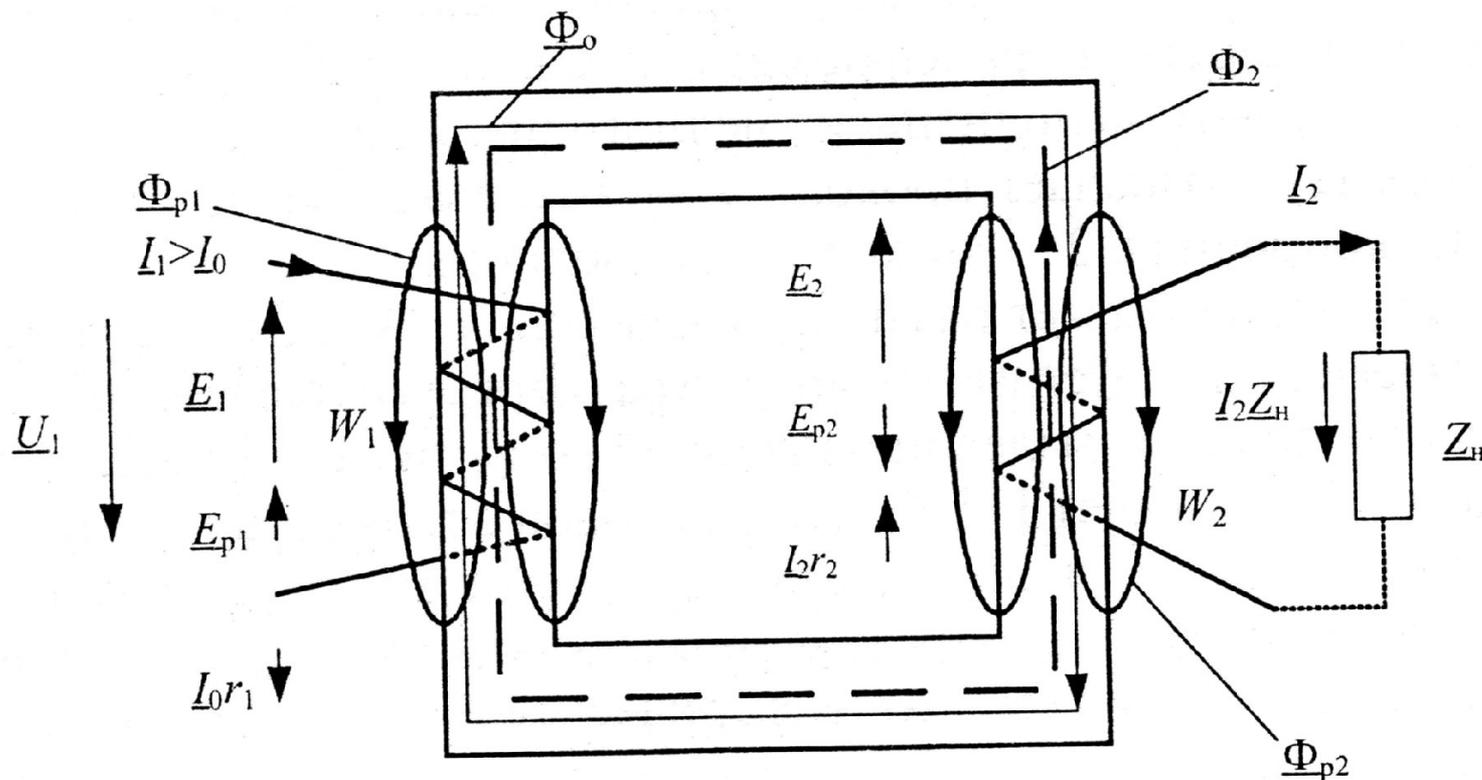


$$P_B = I_B^2 \cdot R_B = \frac{E^2}{R_B},$$

$$P'_B = \frac{(E/n_{\text{ПЛ}})^2 \cdot n_{\text{ПЛ}}}{n_{\text{ПЛ}} \cdot R_B} = \frac{E^2}{n_{\text{ПЛ}}^2 \cdot R_B},$$

Принцип действия трансформатора основан на законе электромагнитной индукции: если обмотка пронизывается изменяющимся во времени магнитным потоком, то в ней индуцируется ЭДС, пропорциональная числу витков обмотки и скорости изменения магнитного потока:

$$e = -W \frac{d\Phi}{dt}.$$



$$\Phi_0 = \Phi_m \cdot \sin(\omega \cdot t).$$

$$e_1 = -W_1 \cdot \frac{d\Phi_0}{dt} = -W_1 \cdot \Phi_m \frac{d \sin(\omega \cdot t)}{dt} =$$

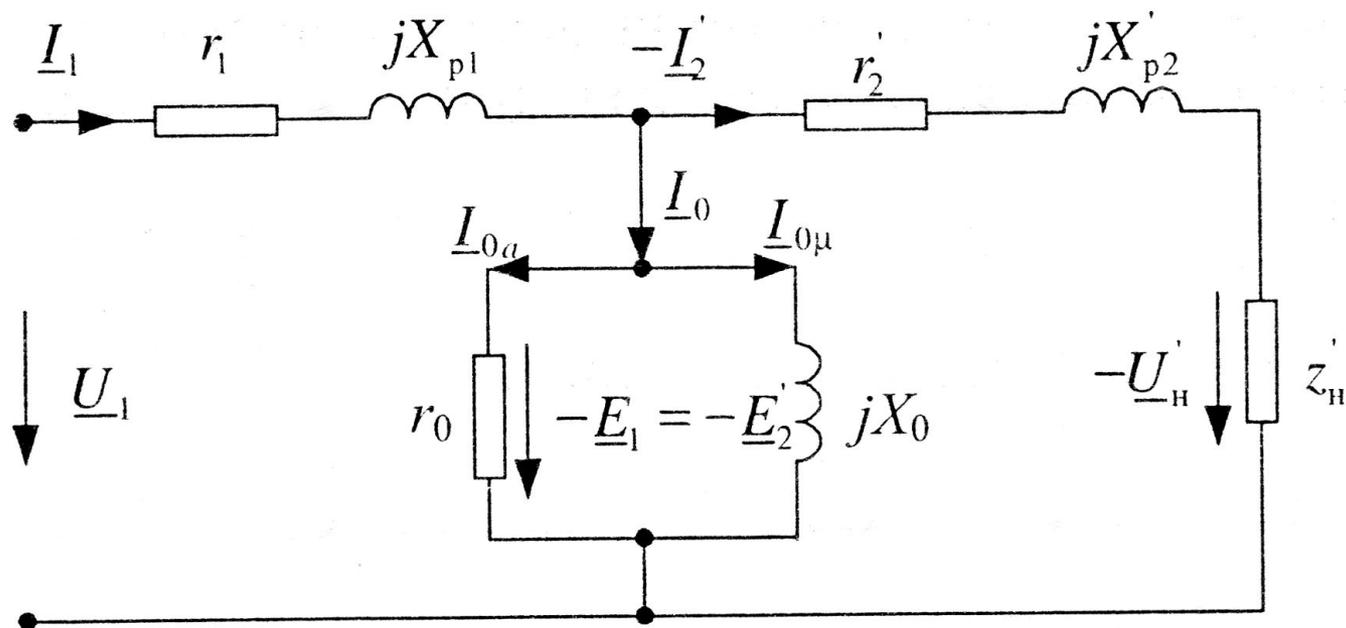
$$= -W_1 \cdot \omega \cdot \Phi_m \cdot \cos(\omega \cdot t) = W_1 \cdot \omega \cdot \Phi_m \cdot \sin\left((\omega \cdot t) - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$E_1 = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{W_1 \cdot \omega \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{W_1 \cdot 2\pi \cdot f \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 \cdot W_1 \cdot f \cdot \Phi_m,$$

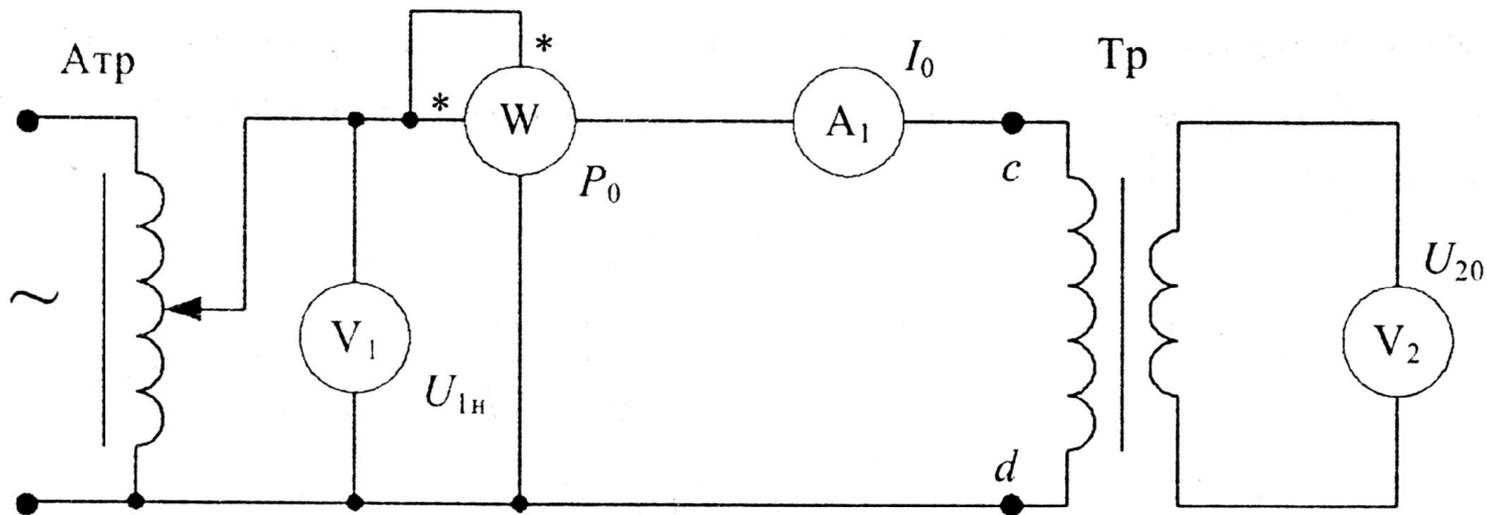
$$E_2 = 4,44 \cdot W_2 \cdot f \cdot \Phi_m.$$

$$K = \frac{W_1}{W_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_{1H}}{U_{20}}$$

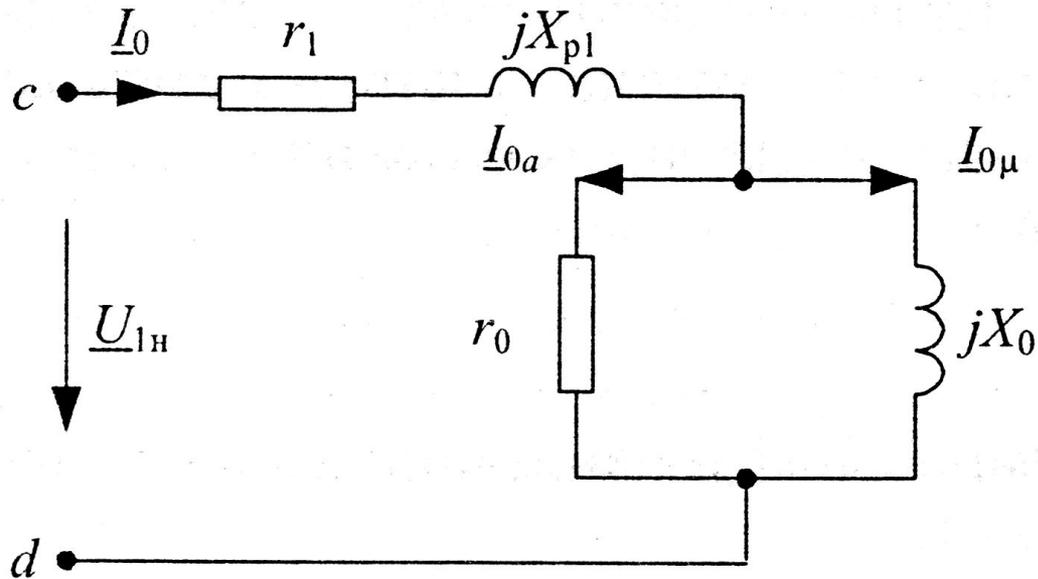
# T-образная схема замещения трансформатора



# Схема проведения опыта холостого хода



## Схема замещения трансформатора в опыте холостого хода



$$P_0 = \frac{U_{1H}^2}{r_0} \rightarrow r_0 = \frac{U_{1H}^2}{P_0}, \quad z_0 = \frac{U_{1H}}{I_0}, \quad I_{0\mu} = \sqrt{I_0^2 - I_{0\alpha}^2}.$$

$$X_0 = \frac{U_{1H}}{I_{0\mu}}, \quad K \approx \frac{U_{1H}}{U_{20}}, \quad \cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{1H} I_0}, \quad I_{0\alpha} = \frac{U_{1H}}{r_0}.$$

# Опыт короткого замыкания

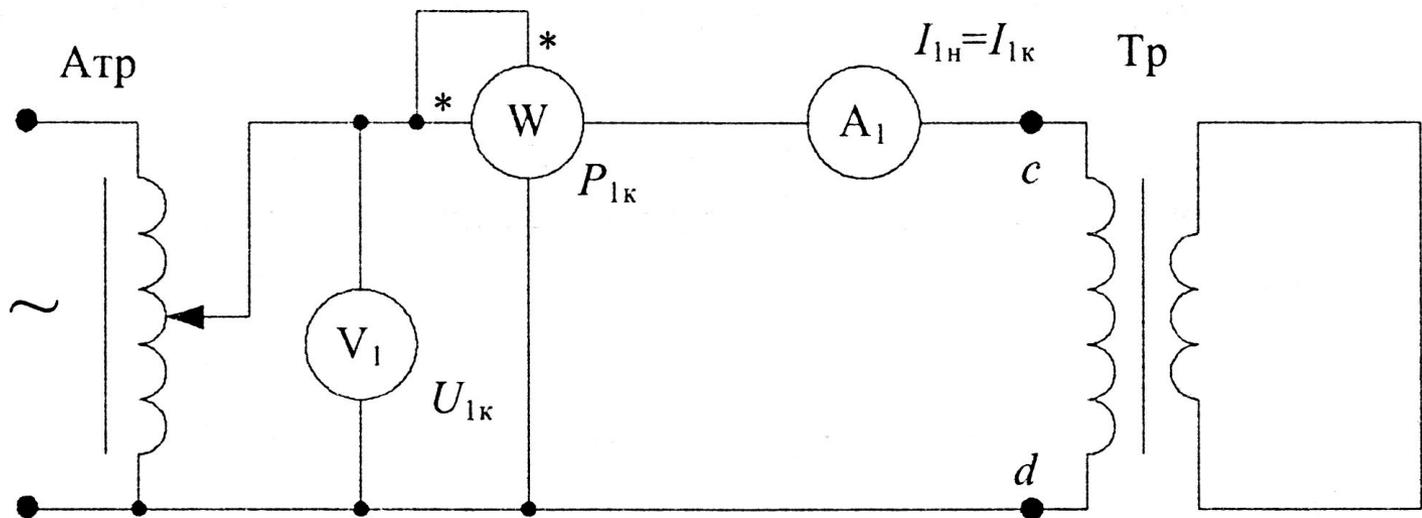
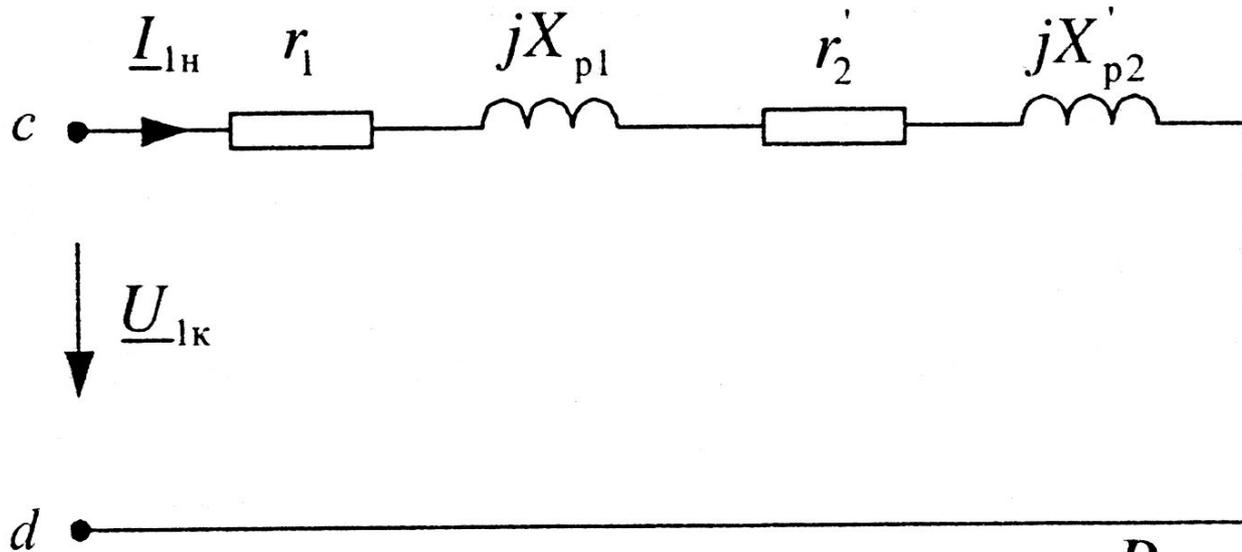


Схема замещения для опыта короткого замыкания



$$r_k = r_1 + r_2', \quad X_{pk} = X_{p1} + X_{p2}' \quad r_k = \frac{P_{1K}}{I_{1H}^2}$$

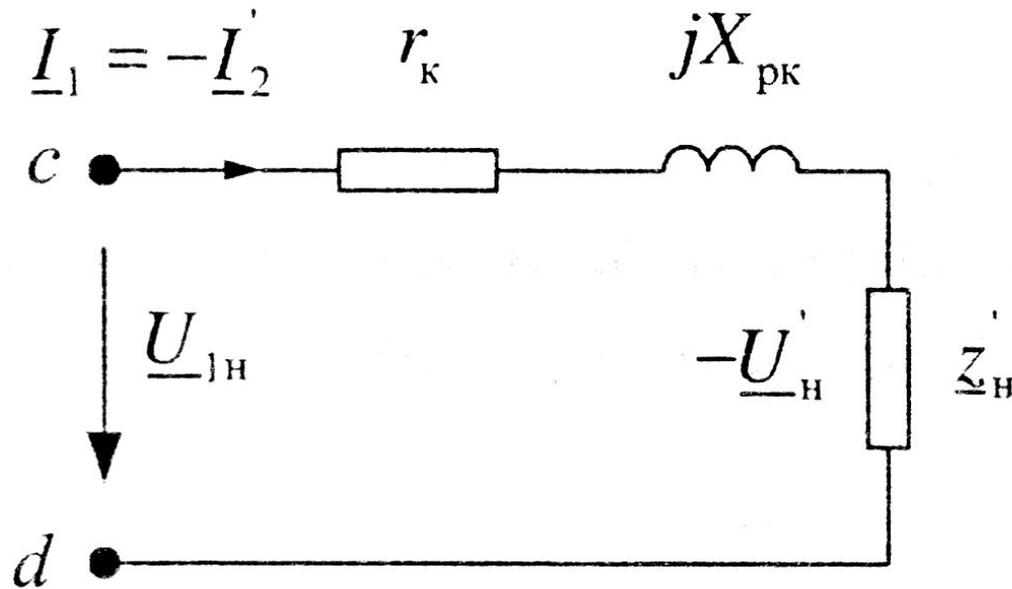
$$z_k = \frac{U_{1K}}{I_{1H}} \quad X_{pk} = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} \quad \cos \varphi_k = \frac{P_{1K}}{U_{1K} I_{1H}}$$

$$r_1 \approx r_2' \approx \frac{r_k}{2}, \quad X_{p1} \approx X_{p2}' \approx \frac{X_{pk}}{2}$$

## Внешняя характеристика трансформатора

Внешняя характеристика трансформатора — это зависимость напряжения на нагрузке от тока вторичной обмотки  $U_H(I_2)$  либо  $U'_H(I'_H)$ . От одной зависимости можно легко перейти к другой, используя формулы:

$$U'_H = K \cdot U_H, \quad I'_2 = \frac{I_2}{K}, \quad I'_2 = I'_H.$$





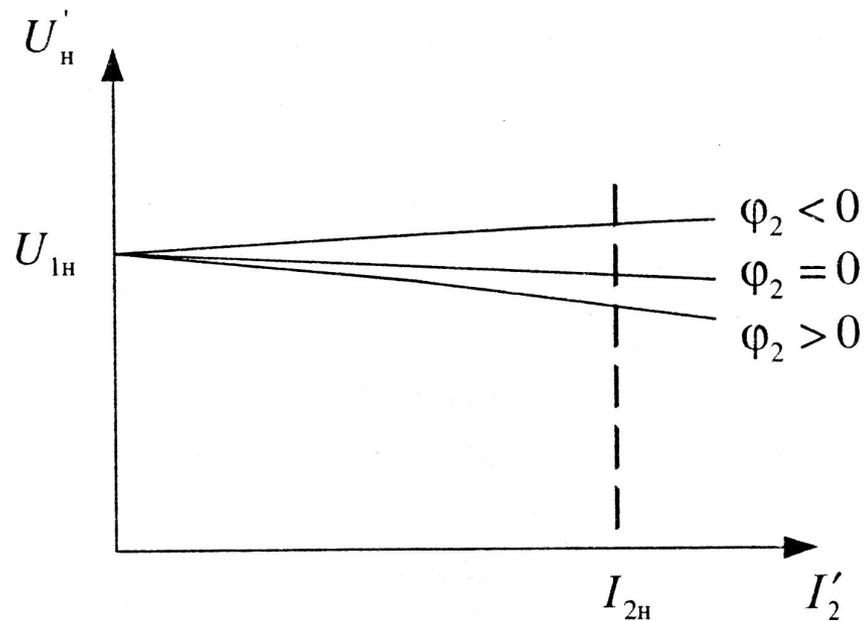
Из векторной диаграммы можно записать:

$$OA = OC - (AB + BC),$$

где  $OA = \underline{U}'_H$ ,  $AB = \underline{I}'_2 \cdot r_K \cdot \cos \varphi_2$ ,  $BC = \underline{I}'_2 \cdot X_{PK} \cdot \sin \varphi_2$ ,  $OC \approx \underline{U}_{1H}$ , так как угол  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  мал.

$$\text{Тогда } U'_H = U_{1H} - I'_2 \cdot (r_K \cdot \cos \varphi_2 + X_{PK} \cdot \sin \varphi_2).$$

Проанализируем эту зависимость. Если нагрузка активная, то  $\varphi_2 = 0$ ,  $\cos \varphi_2 = 1$ , а  $\sin \varphi_2 = 0$ . Тогда  $U'_H = U_{1H} - I'_2 \cdot r_K$ ,



КПД трансформатора

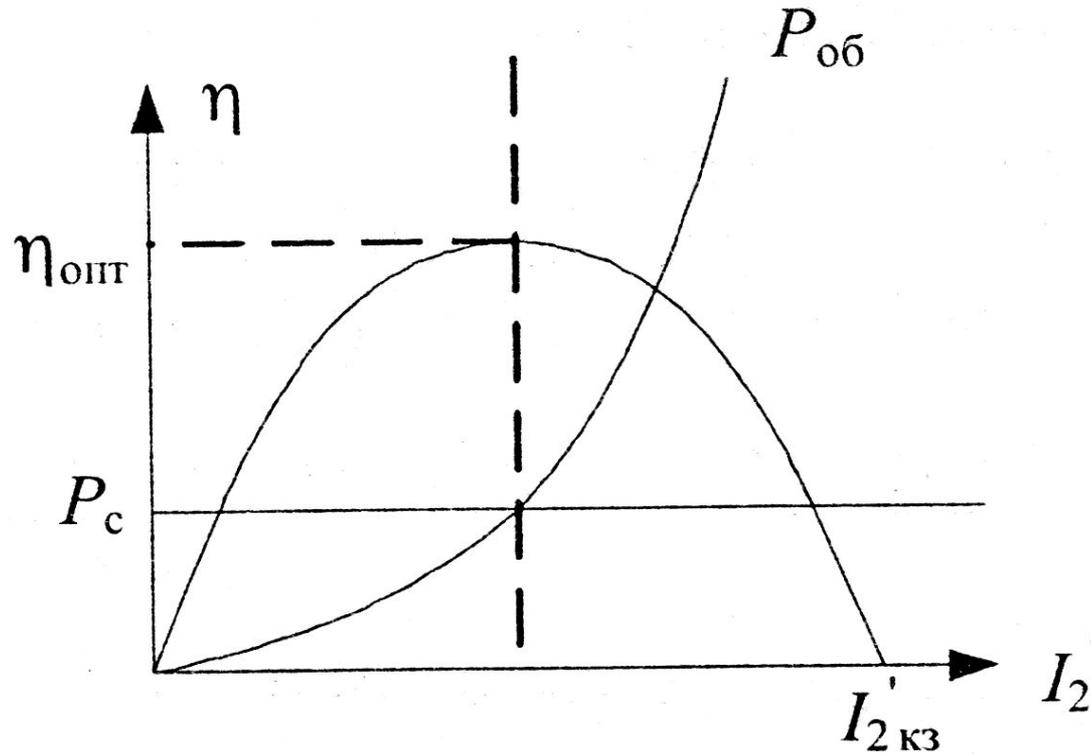
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_c - P_{\text{об}}}{P_1} \approx \frac{U_1 \cdot I_2' \cdot \cos \varphi_1 - P_c - I_2'^2 \cdot r_K}{U_1 \cdot I_2' \cdot \cos \varphi_1}.$$

$$\frac{d\eta}{dI_2'} = \frac{(U_1 \cos \varphi_1 - 2I_2' r_K)(U_1 I_2' \cos \varphi_1)}{(U_1 I_2' \cos \varphi_1)^2} -$$

$$\frac{U_1 \cos \varphi_1 (U_1 I_2' \cos \varphi_1 - P_c - I_2'^2 r_K)}{(U_1 I_2' \cos \varphi_1)^2} = 0.$$

$$P_c - I_2'^2 \cdot r_K = 0 \rightarrow P_c = I_2'^2 \cdot r_K,$$

Качественная зависимость КПД трансформатора  
от тока вторичной обмотки



$$P_c = K_{\text{обр}} \cdot p_{\text{уд}} \cdot M \left( \frac{B_m}{1 \text{ Тл}} \right)^2 \left( \frac{f}{50 \text{ Гц}} \right)^{1,5}$$

где  $K_{\text{обр}}$  — коэффициент обработки, равный 2–2,4, который учитывает увеличение потерь за счет частичного перемагничивания пластин, например из-за заусенцев;  $p_{\text{уд}}$ , Вт/кг — удельные потери мощности для данной марки стали при амплитуде магнитной индукции  $B_m = 1$  Тл и частоте  $f = 50$  Гц (данная величина обычно приводится в справочниках);  $M$ , кг — масса сердечника.