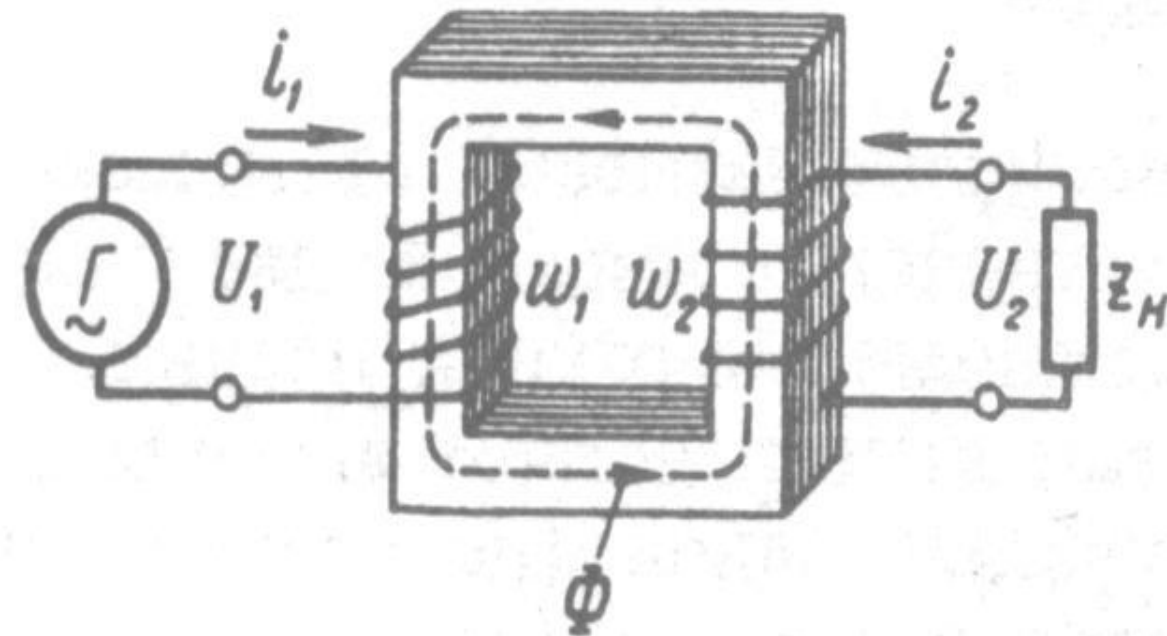


# Трансформаторы

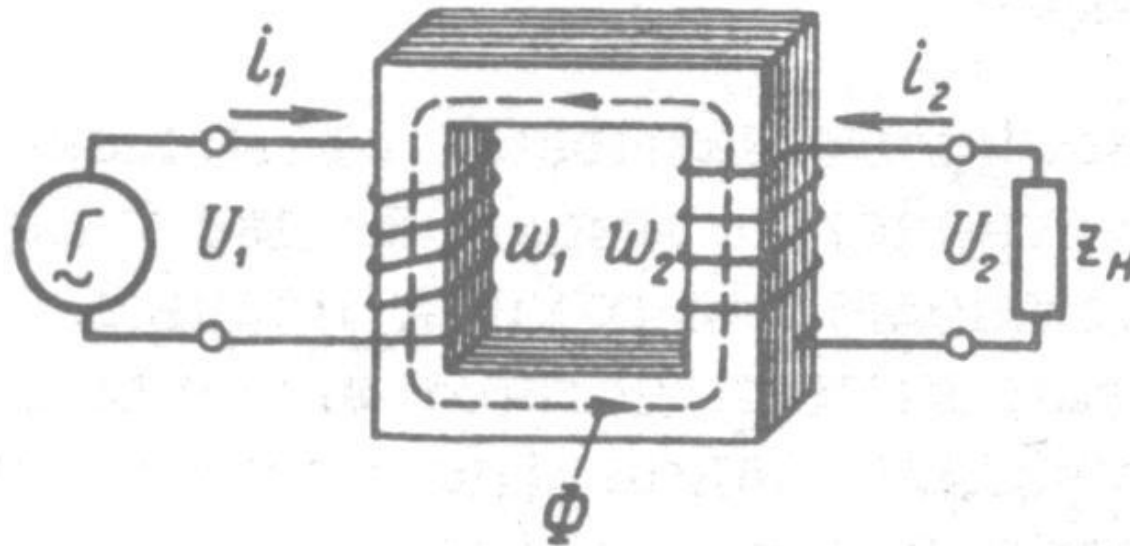
**Трансформатор** – статическое электромагнитное устройство, имеющее две (или более) индуктивно связанные обмотки, и предназначенное для преобразования посредством явления электромагнитной индукции одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока.



$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

# Идеализированный трансформатор



## Режим холостого

хода  
 $\frac{d\Phi}{dt}$

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$U_1 = i_1 r_1 + w_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\Phi = \Phi_M \sin \omega t$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$U_1 = i_1 r_1 - e_1$$

$$U_1 + e_1 = 0$$

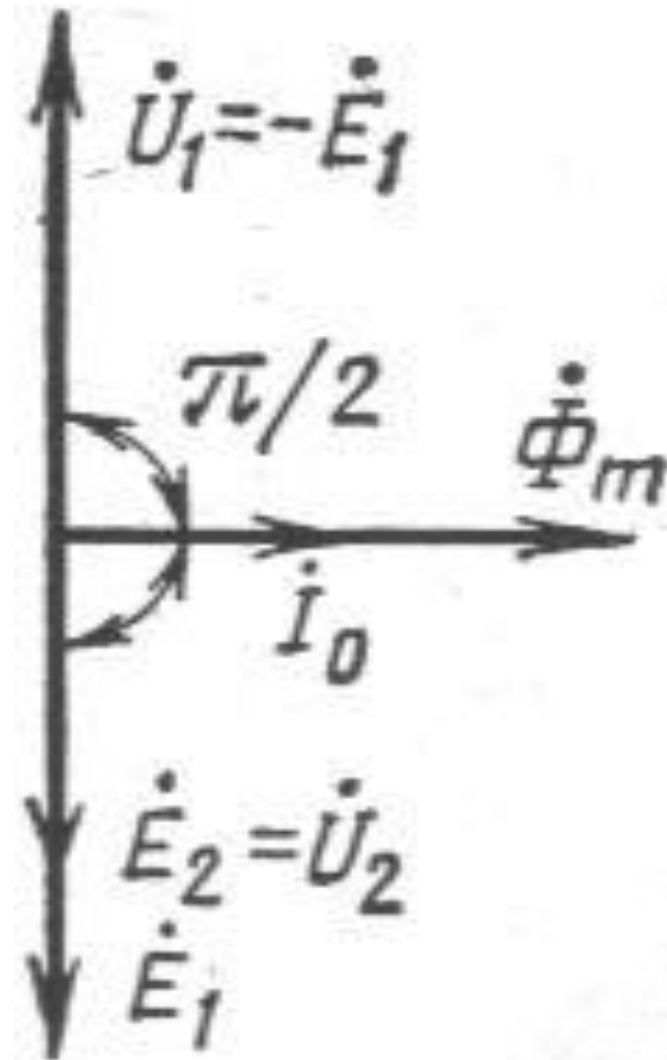
$$e_1 = -\omega \cdot w_1 \Phi_M \cdot \cos \omega t = 2\pi f w_1 \Phi_M \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$e_2 = -\omega \cdot w_2 \Phi_M \cdot \cos \omega t = 2\pi f w_2 \Phi_M \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$\left[ \begin{array}{l} E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_1 \Phi_M = 4,44 f w_1 \Phi_M \\ E_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_2 \Phi_M = 4,44 f w_2 \Phi_M \end{array} \right]$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \quad \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k$$

$$\dot{U} + \dot{E} = 0$$



# Режим

## нагрузки

$$U_1 = w_1 \frac{d\Phi_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi_2}{dt} = w_1 \frac{d}{dt} (\Phi_1 + \Phi_2)$$

$$e_1 = -w_1 \frac{d}{dt} (\Phi_1 + \Phi_2)$$

$$U_1 + e_1 = 0$$

$$\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_0$$

$$\dot{\Phi}_{M1} + \dot{\Phi}_{M2} = \dot{\Phi}_{M0}$$

**Магнитодвижущая сила (МДС)** – намагничивающая сила – характеристика способности источников магнитного поля (эл. токов) создавать магнитные потоки.

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0$$

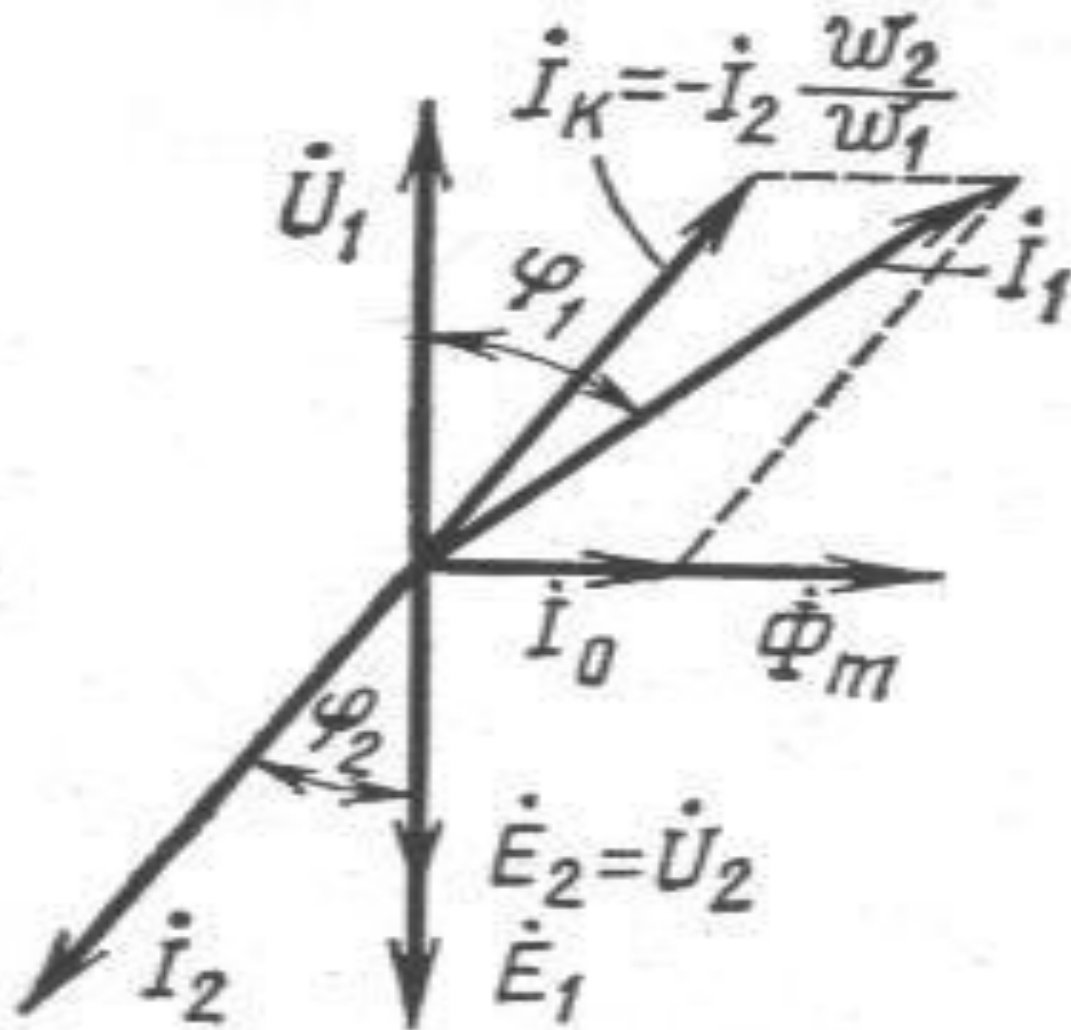
$$\sqrt{2} \dot{I}_1 w_1 + \sqrt{2} \dot{I}_2 w_2 = \sqrt{2} \dot{I}_0 w_1 \quad | \quad \sqrt{2} w_1$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left[ -\dot{I}_2 \left( \frac{w_2}{w_1} \right) \right] \quad \dot{I}_K = -\dot{I}_2 \left( \frac{w_2}{w_1} \right)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_K$$



$$I_K E_1 \cos \varphi_2 = I_2 \left( \frac{w_2}{w_1} \right) E_2 \left( \frac{w_1}{w_2} \right) \cos \varphi_2 = I_2 E_2 \cos \varphi_2$$



$$\Phi = \Phi_M \sin \omega t$$

$$\Phi_M = \frac{E_1}{4,44 f w_1}$$

# Намагничивающий ток и ток холостого хода

Магнитная характеристика трансформатора, как и других машин переменного тока, дает связь между амплитудными или мгновенными значениями потока и МДС.

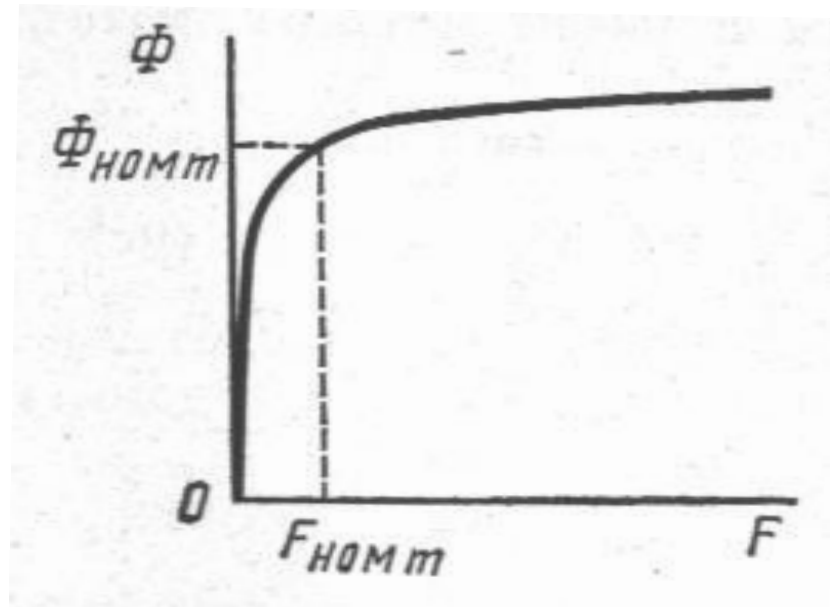
$$F = F_{\text{СТ}} + F_{\text{Я}} + F_{\text{З}}$$

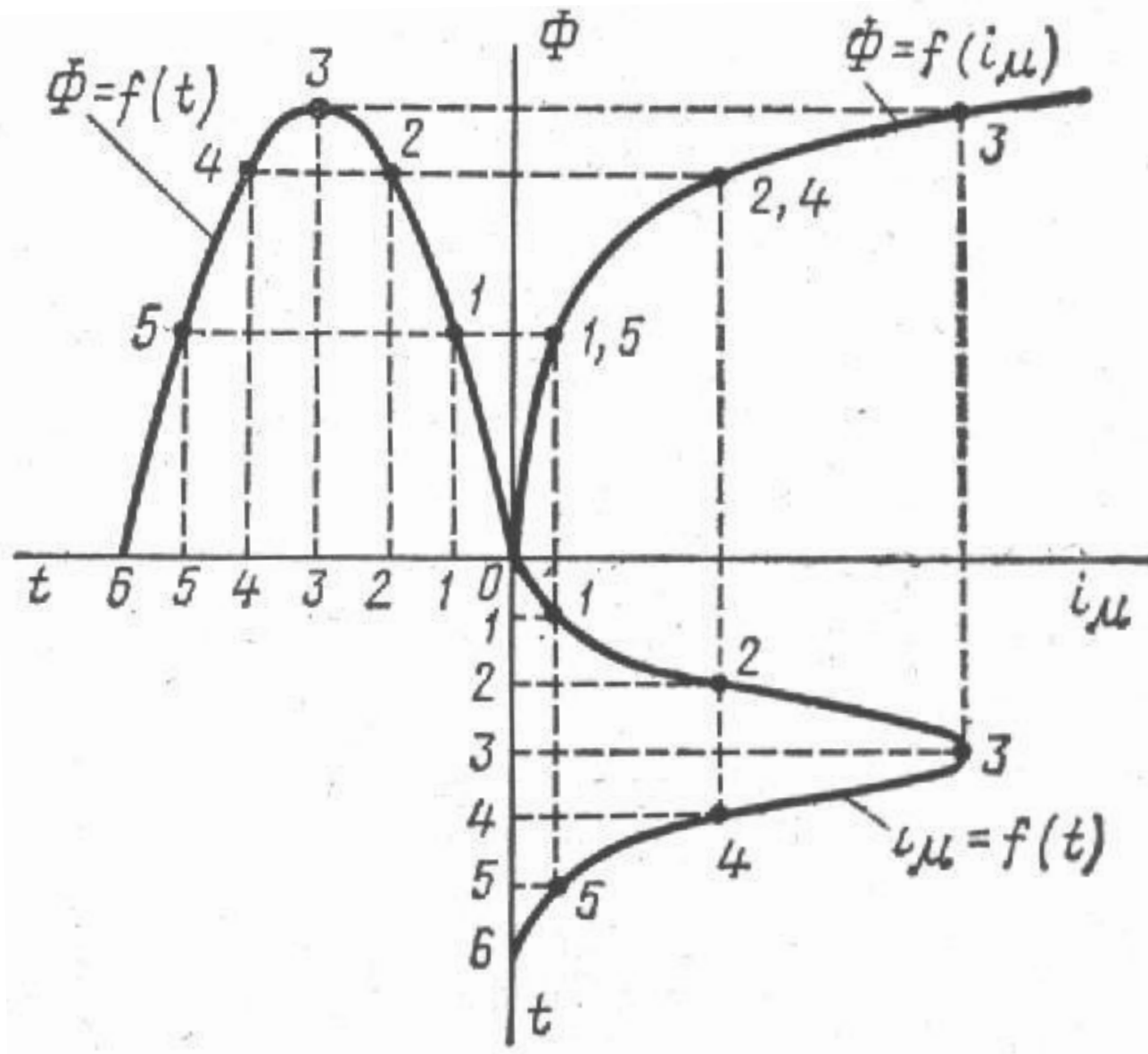
$$\Phi = f(F)$$

$$F_{\text{СТ}} = H_{\text{СТ}} I_{\text{СТ}}$$

$$F_{\text{Я}} = H_{\text{Я}} I_{\text{Я}}$$

$$F_{\text{З}} = H_{\text{З}} I_{\text{З}}$$





$$i_\mu = \frac{F}{w_1}$$

$$I_{\mu} = \sqrt{I_{\mu 1}^2 + I_{\mu 3}^2 + I_{\mu 5}^2 + I_{\mu 7}^2 + \dots}$$

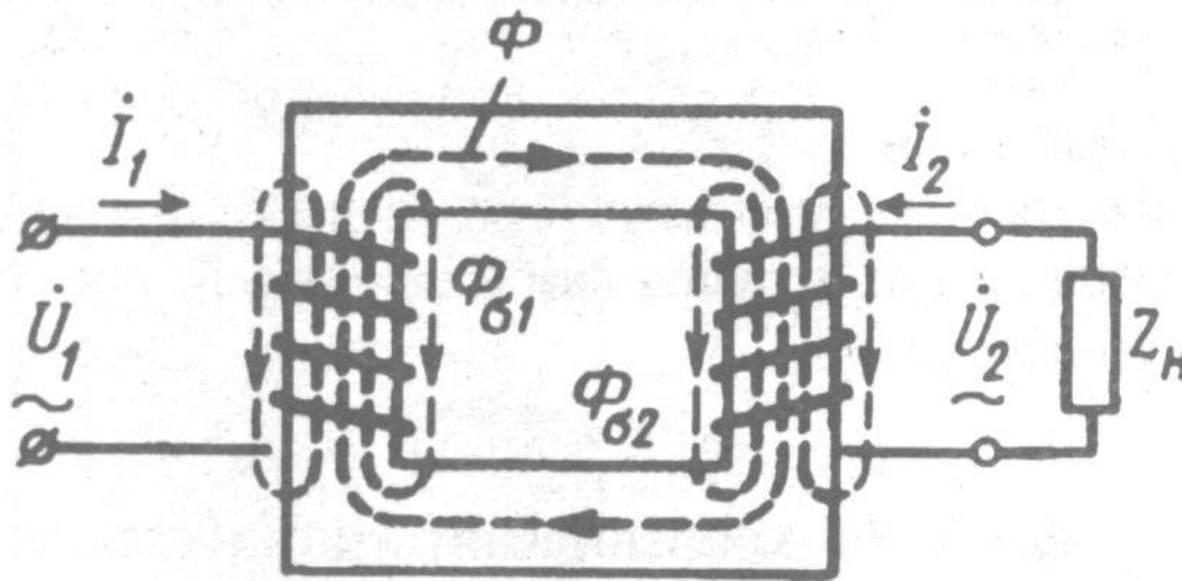
$$I_{\mu} = I_{\mu 1} \sqrt{1 + \alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 + \dots} = k_D I_{\mu 1}$$

$$I_{\mu} = I_{OP} \quad I_{\mu} \approx I_{\mu 1} \quad I_{oa} = \frac{\Delta P_M}{U_1}$$

$$\dot{I}_o = \dot{I}_{\mu} + \dot{I}_{ao}$$

$$I_o = \sqrt{I_{\mu}^2 + I_{ao}^2}$$

# Комплексные уравнения и векторные диаграммы трансформатора



$$E_{\sigma 1} = 4.44 f w_1 \Phi_{\sigma 1 m}; E_{\sigma 2} = 4.44 f w_2 \Phi_{\sigma 2 m}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 + \dot{E}_1 &= \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_1 \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 r_2 - j \dot{I}_2 x_2 \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2) \end{aligned} \right\}$$

$$E_{\sigma 1} = I_1 x_1; E_{\sigma 2} = I_2 x_2$$

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j \dot{I}_1 x_1; \dot{E}_{\sigma 2} = -j \dot{I}_2 x_2$$

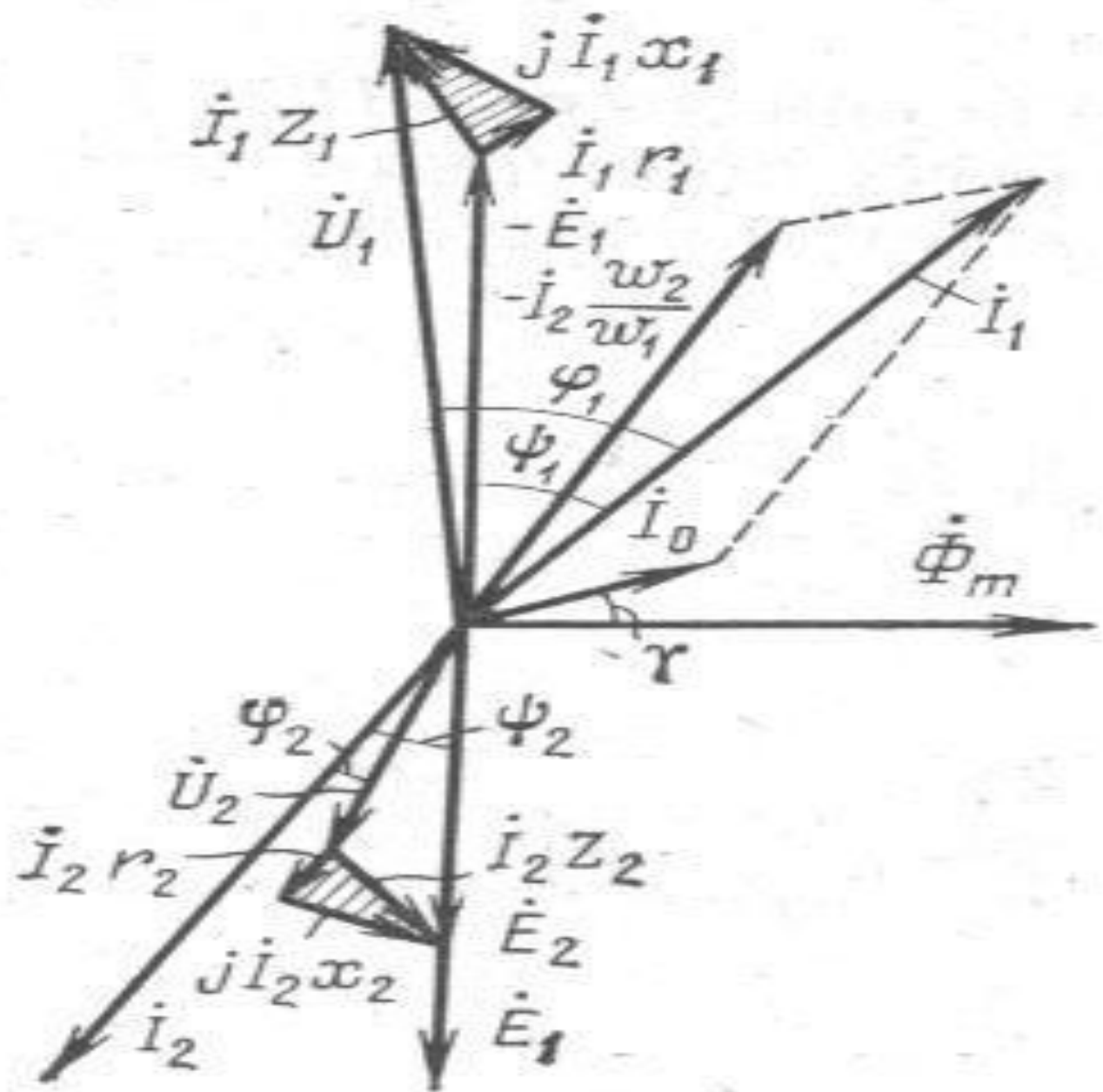
$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 = \dot{I}_1 R_1 + j \dot{I}_1 x_1 = \dot{I}_1 Z_{-1} \quad (1)$$

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 R_2 + j \dot{I}_2 x_2 + \dot{I}_2 Z_{-H} = \dot{I}_2 Z_2 + \dot{I}_2 Z_H \quad (2)$$

$$\dot{I}_1 + \left( -I_2 \frac{w_2}{w_1} \right) = \dot{I}_0 \quad (3)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_{-H}$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - j \dot{I}_2 x_2$$



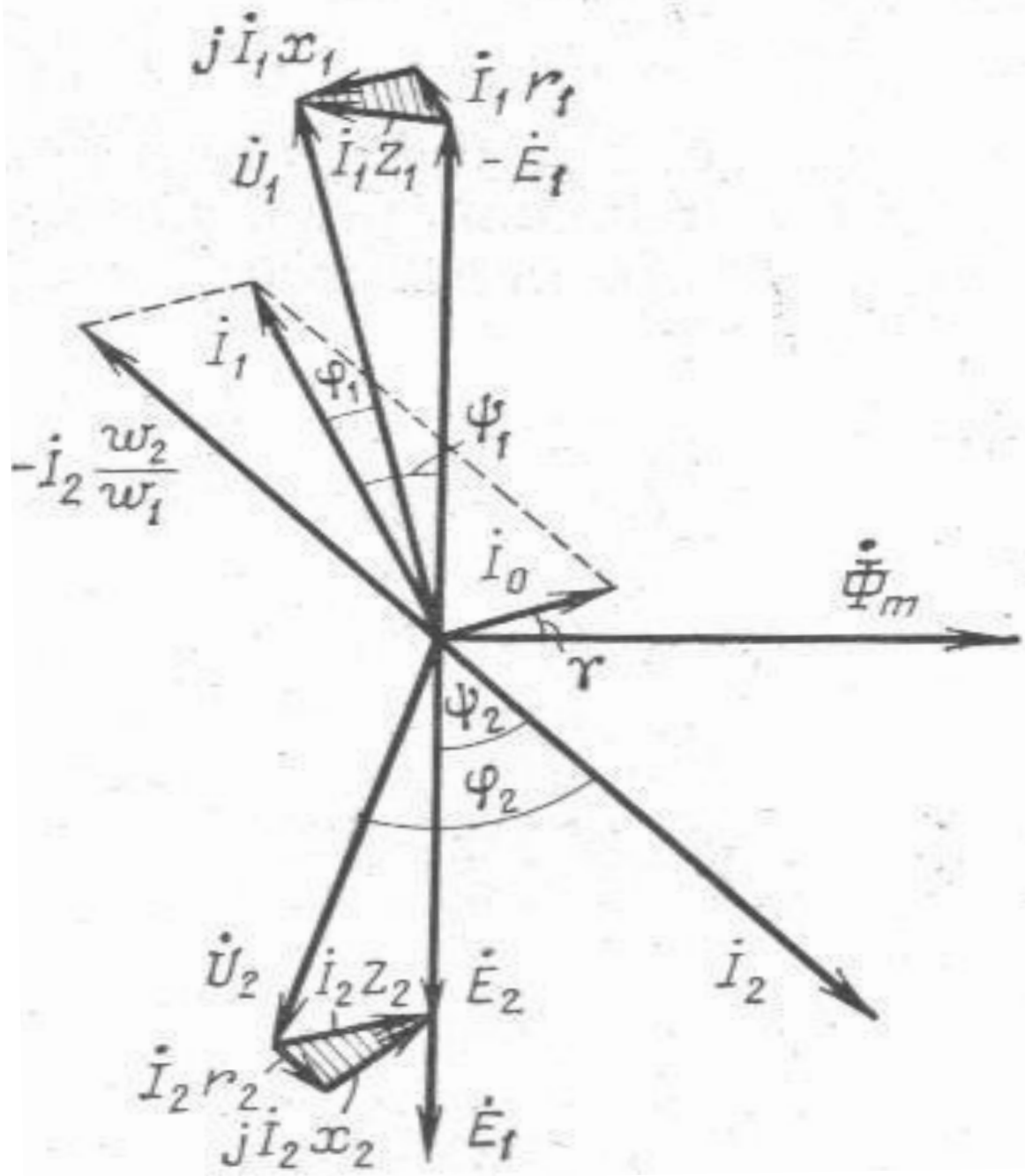


$$\dot{I}_{2p} \omega_2 = \dot{I}_2 \omega_2 \sin \varphi_2, \text{ где } \dot{I}_2 = I_2 \sin \psi_2$$

$$\dot{\Phi}_m = \frac{E_1}{4,44 f \omega_1}$$

$$\gamma = 5 \cdot 10^0$$

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{x_2 + x_H}{r_2 + r_H}$$



# Составление схемы замещения

$$\begin{aligned} E_1 &= \\ kE_2 & \\ E_1 &= I_0 Z_m = I_0 (R_m + jx_m) \end{aligned}$$

$$E_1 \approx U_1 \quad I_0 = \frac{E_1}{R_m + x_m} = \frac{E_1}{Z_m}$$

$$I_0 E_1 \cos \varphi_0 = I_0 R_m^2$$

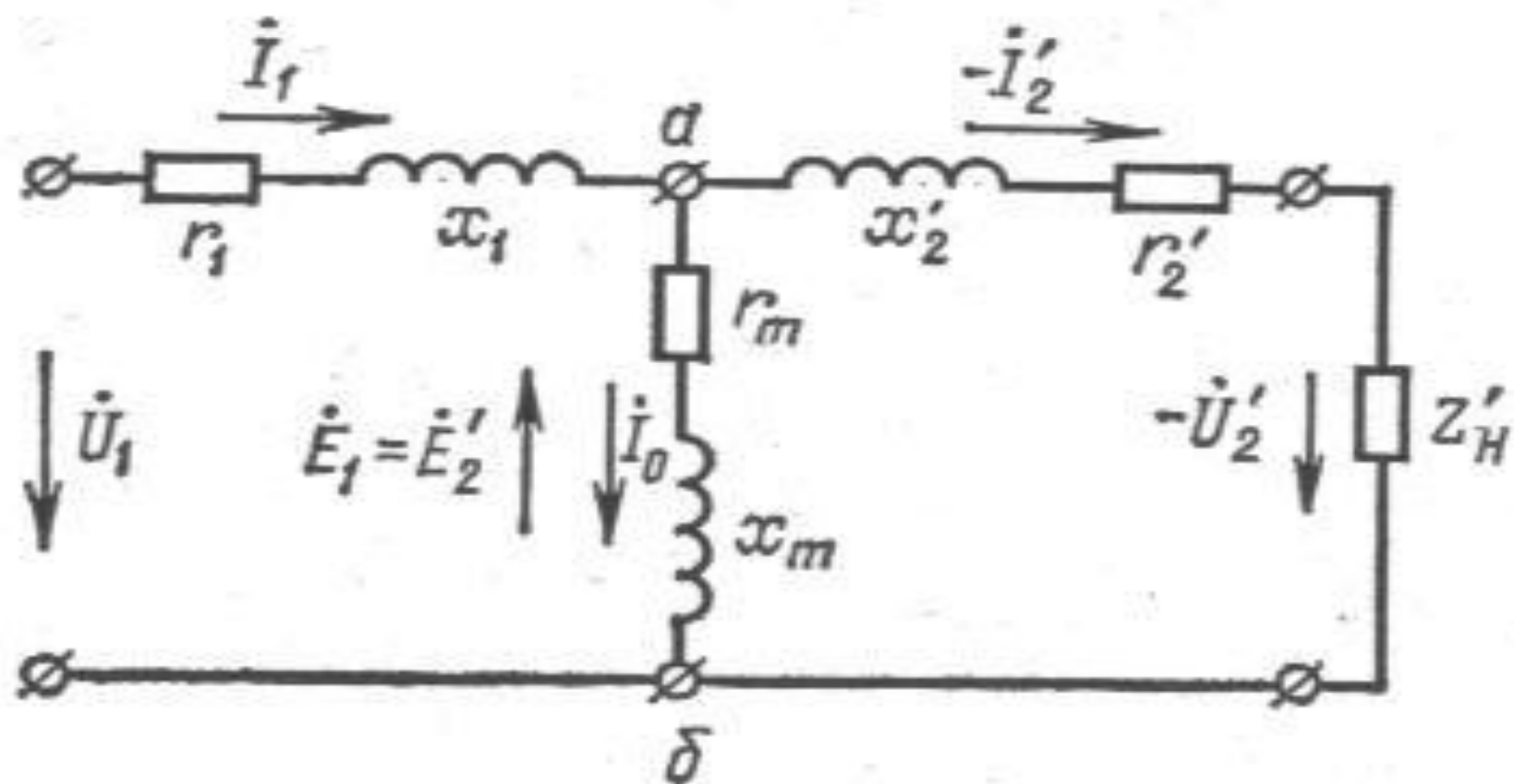
$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + [Z_m(k^2 Z_H + k^2 Z_2)] / [Z_m + (k^2 Z_H + k^2 Z_2)]} = \frac{\dot{U}_1}{Z_{\text{экв}}}$$

$$Z_{\text{экв}} = Z_1 + \frac{Z_m(Z'_H + Z'_2)}{Z_m + Z'_H + Z'_2}$$

$$Z_1 = R_1 + jx_1, Z_m = R_m + jx_m, Z'_H = k^2 Z_H$$

$$Z'_2 = k^2 Z_2 = k^2 (R_2 + jx_2)$$

$$R'_2 = R_2 k^2, x'_2 = x_2 k^2$$



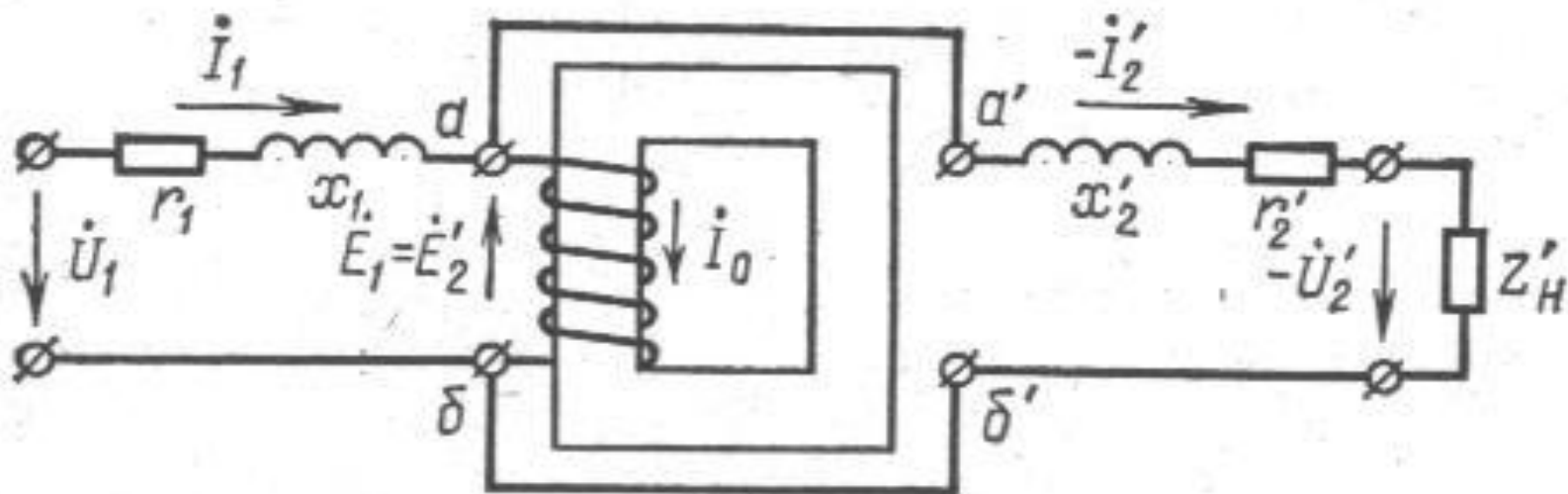
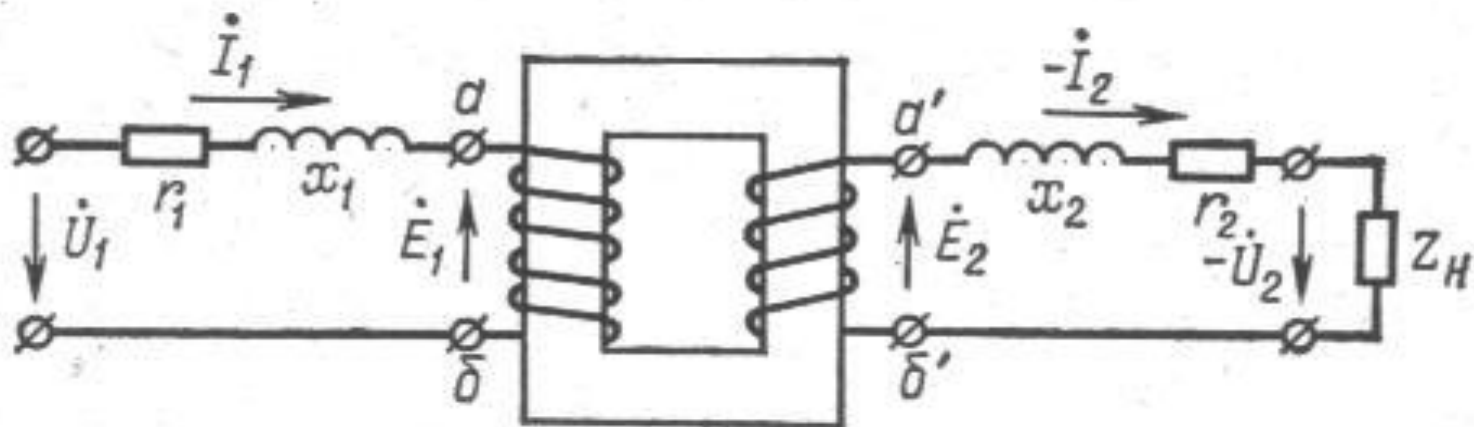
$$E_2' = kE_2 = E_1, I_2' = \frac{I_2}{k}$$

$$I_2' E_2' = \frac{I_2}{k} kE_2 = I_2 E_2$$

$$I_2'^2 R_2' = \left(\frac{I_2}{k}\right)^2 R_2 k^2 = I_2^2 R_2$$

$$\frac{I_2' R_2'}{E_2'} = \frac{\left(\frac{I_2}{k}\right) k^2 R_2}{kE_2} = \frac{I_2 R_2}{E_2}$$

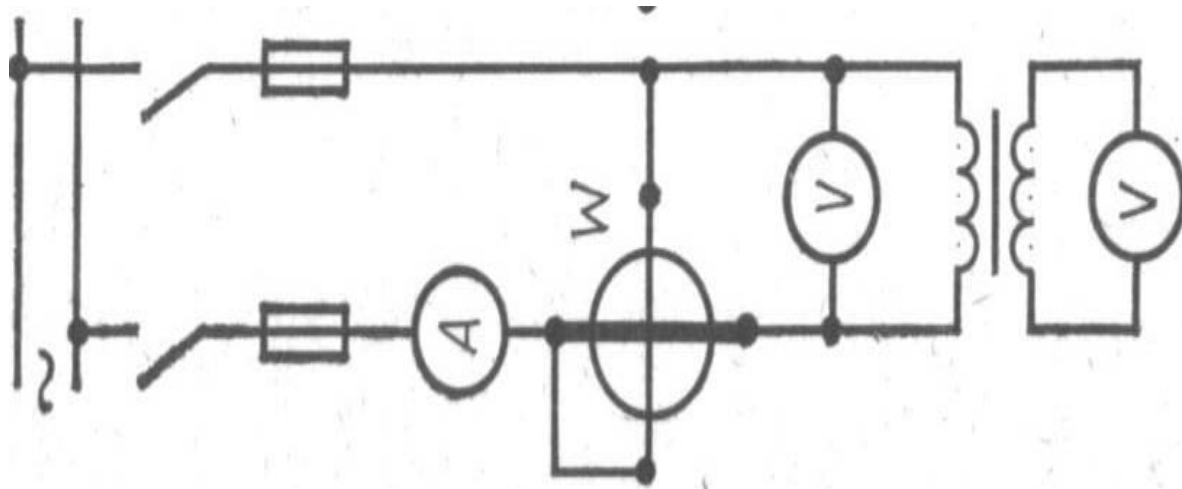
$$\frac{I_2' x_2'}{E_2'} = \frac{\left(\frac{I_2}{k}\right) k^2 x_2}{kE_2} = \frac{I_2 x_2}{E_2}$$



# Определение параметров схемы замещения по опытам холостого хода и короткого замыкания

## Опыт холостого хода

хода



$$\left. \begin{aligned} Z_1 + Z_m &= \frac{U_0}{I_0}; R_1 + R_m = \frac{P_0}{I_0^2} \\ x_1 + x_m &= \sqrt{(Z_1 + Z_m)^2 - (R_1 + R_m)^2} \end{aligned} \right\}$$

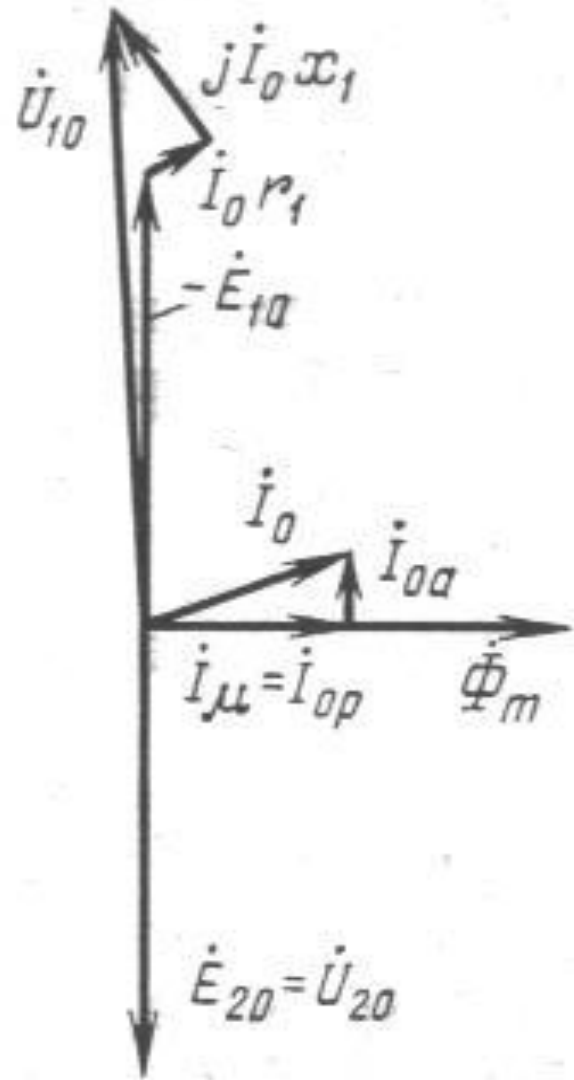


$$P_0 = I_0^2 (R_1 + R_m) \approx I_0^2 R_m \Rightarrow R_m = \frac{P_0}{I_0^2}$$

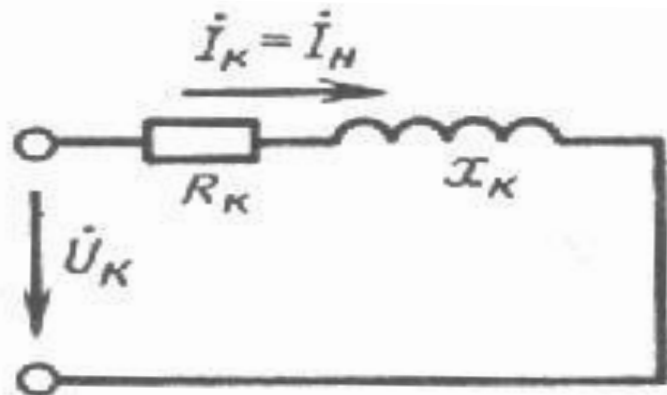
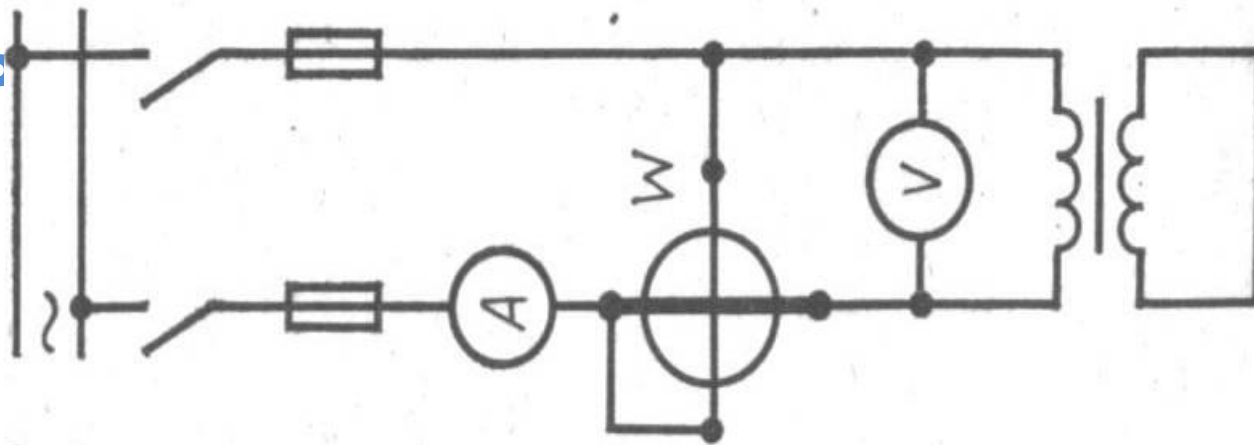
$$Z_m = \frac{U_0}{I_0} \quad x_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}$$

$$k = \frac{U_0}{U_{20}}$$

$$\dot{U}_0 = -\dot{E}_{10} + I_0 \dot{R}_1 + j I_0 \dot{x}_1$$



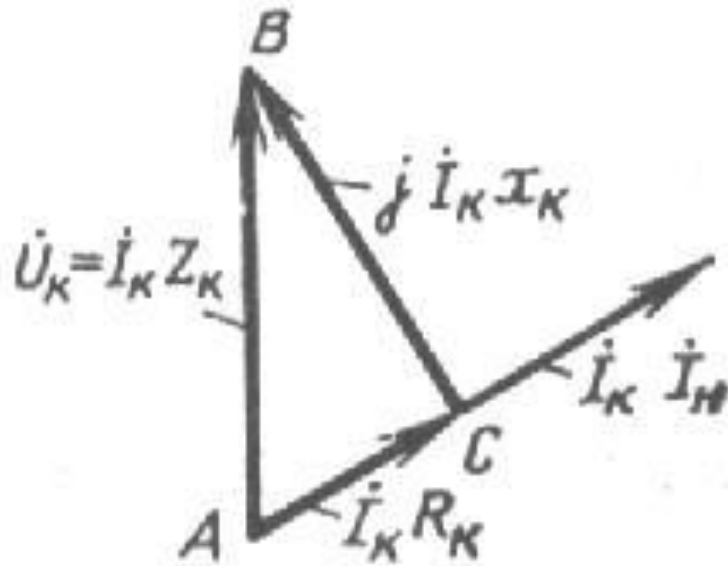
# Опыт короткого замыкания



$$Z_k = Z_1 + Z_2' = \frac{U_k}{I_{HOM}};$$

$$R_k = R_1 + R_2' = \frac{P_k}{I_{HOM}^2};$$

$$x_k = x_1 + x_2' = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2};$$



$$U_k = \left( \frac{I_{HOM} Z_k}{U_{HOM}} \right) \cdot 100\%$$

$$U_{ka} \% = \left( \frac{I_{HOM} R_k}{U_{HOM}} \right) \cdot 100\%$$

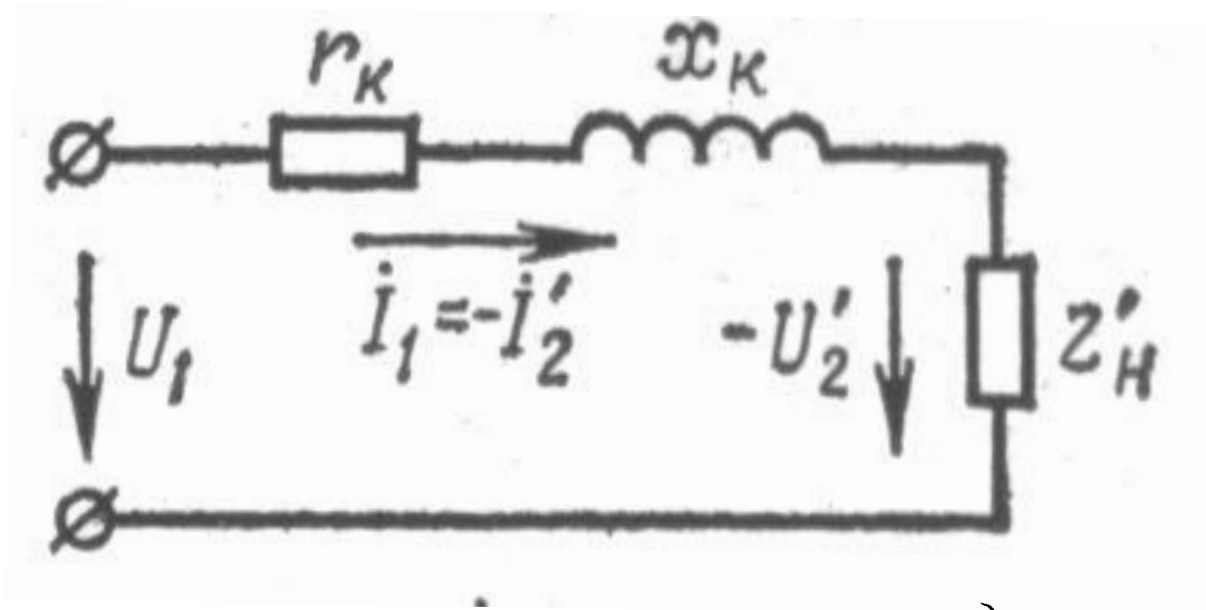
$$U_{kp} \% = \left( \frac{I_{HOM} x_k}{U_{HOM}} \right) \cdot 100\%$$

$$U_{ka} = U_k \cos \varphi_k$$

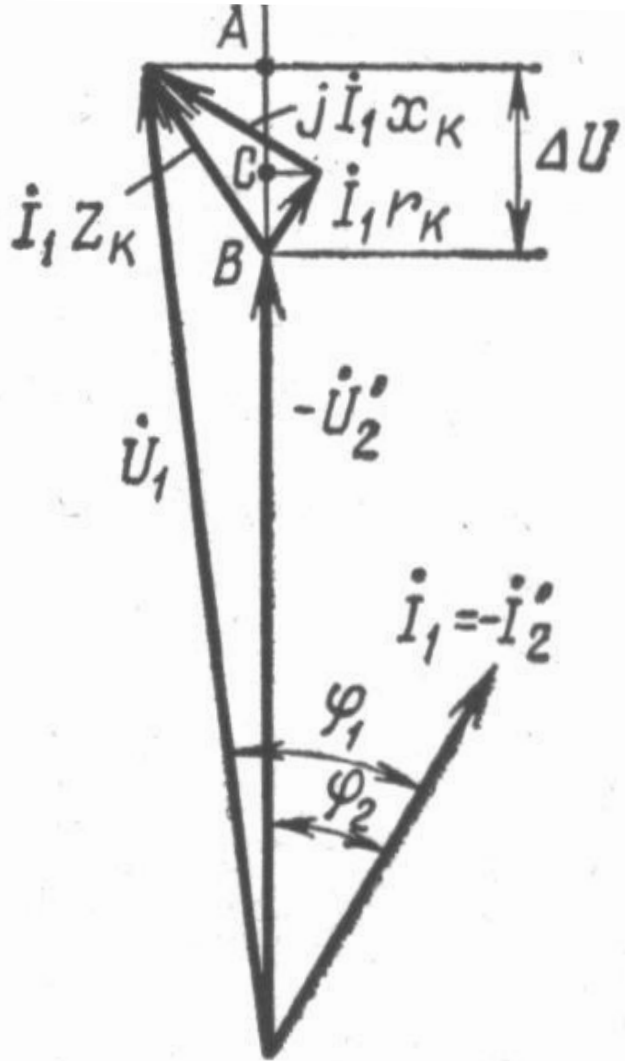
$$U_{kp} = U_k \sin \varphi_k$$

$$U_k = \sqrt{U_{ka}^2 + U_{kp}^2}$$

# Упрощенная схема замещения трансформатора



$$\left. \begin{aligned} Z_k &= Z_1 + Z'_2 = \frac{U_k}{I_{HOM}}; \\ R_k &= R_1 + R'_2 = \frac{P_k}{I_{HOM}^2}; \\ x_k &= x_1 + x'_2 = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}; \end{aligned} \right\}$$



$$\dot{I}_1 Z_k = \dot{I}_1 R_k + j \dot{I}_1 x_k$$

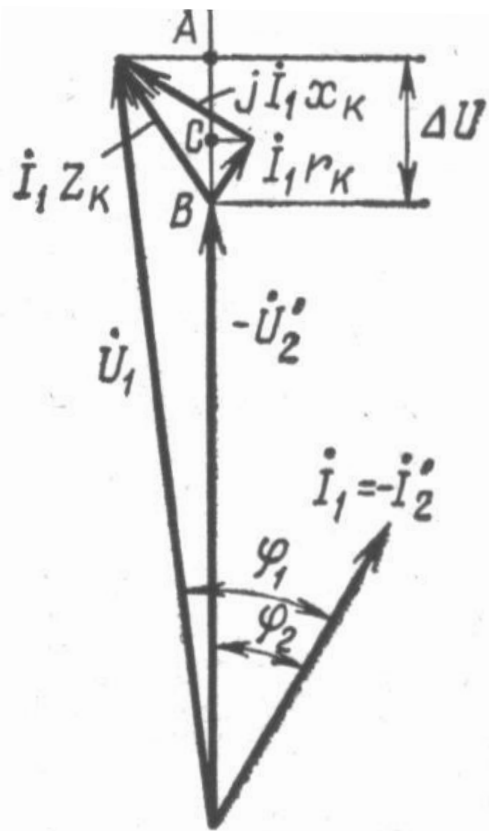
$$I_1 Z_k = \frac{\beta U_k \% U_{HOM}}{100}$$

$$I_1 R_k = \frac{\beta U_{ka} \% U_{HOM}}{100}$$

$$I_1 x_k = \frac{\beta U_{kp} \% U_{HOM}}{100}$$

$$\beta = \frac{I_2}{I_1} \approx \frac{I_1}{I_{1HOM}}$$

$$\Delta U \% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} 100 \% = \frac{U_{1H} - U'_2}{U'_{1H}} 100 \%$$



$$\Delta U = U_1 - U_2' = \overline{OA} - \overline{OB} = \overline{BA}$$

$$\Delta U = \overline{BC} + \overline{CA} = I_1 R_k \cos \varphi_2 + I_1 x_k \sin \varphi_2$$

$$\Delta U \% = \left[ \frac{(I_1 R_k \cos \varphi_2 + I_1 x_k \sin \varphi_2)}{U_{HOM}} \right] 100 \Rightarrow$$

$$\Delta U_{HOM} \% = \left[ \frac{(I_{HOM} R_k \cos \varphi_2 + I_{HOM} x_k \sin \varphi_2)}{U_{HOM}} \right] 100$$

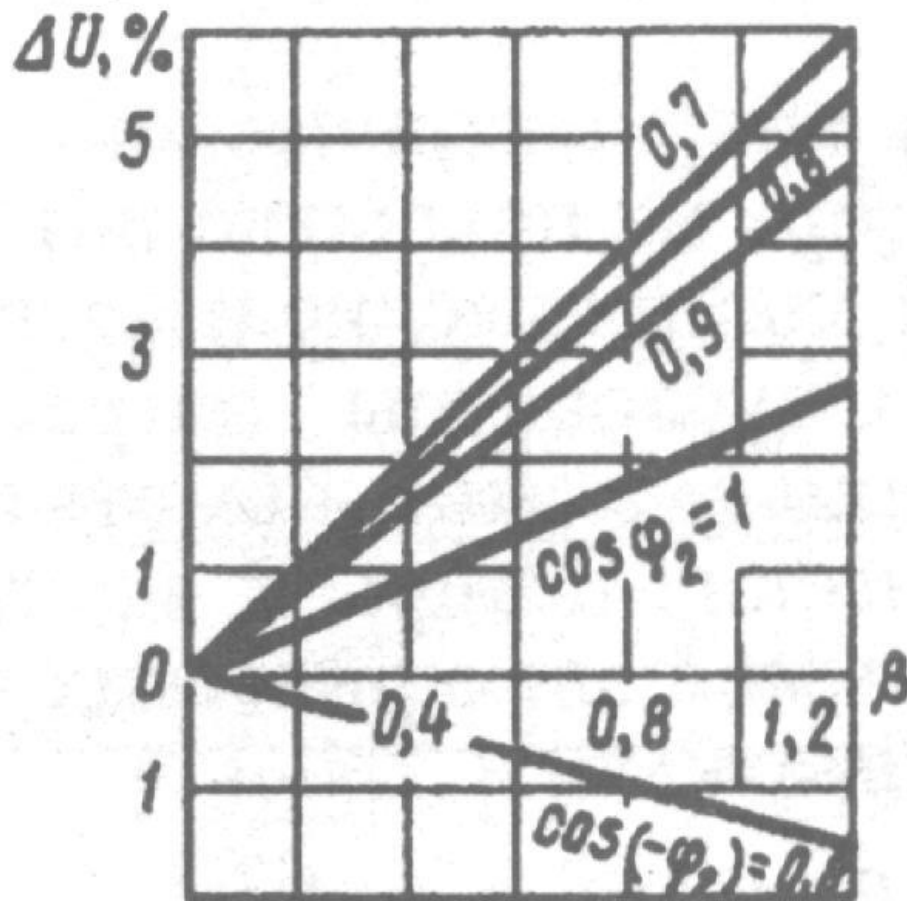
$$\Delta U_{HOM} \% = U_{k.a} \cos \varphi_2 + U_{k.p} \sin \varphi_2$$

$$\Delta U \% = \beta \Delta U_{HOM} = \beta (U_{k.a} \cos \varphi_2 + U_{k.p} \sin \varphi_2)$$

$$\Delta U \% = \beta (U_{k.a} \cos \varphi_2 + U_{k.p} \sin \varphi_2) + \frac{\beta^2 (U_{k.p} \cos \varphi_2 - U_{k.a} \sin \varphi_2)^2}{200}$$

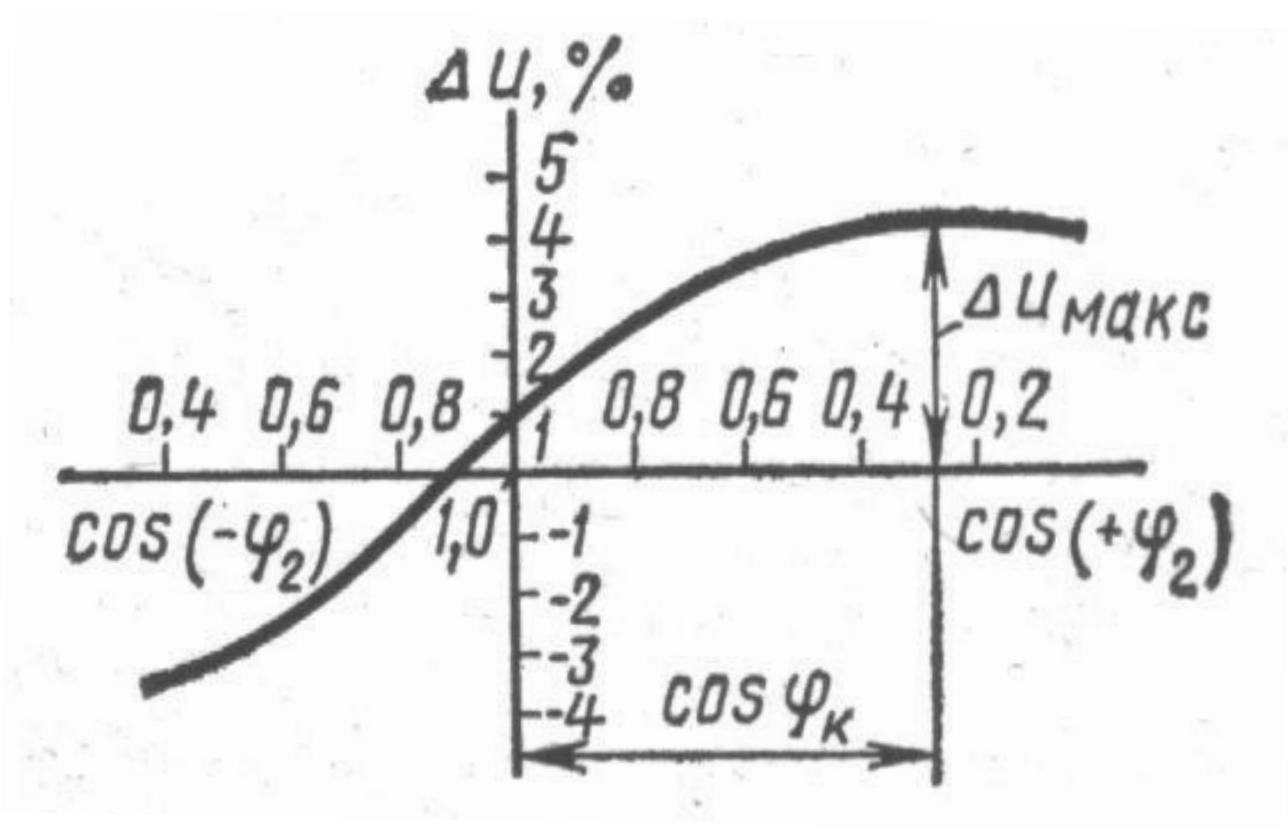
# Внешние характеристики

$U_2 = f(I_2)$  или  $U_2 = f(\beta)$  при  $U_1 = U_{НОМ} = const$  и  $f = f_{НОМ} = const$  и  $\cos\varphi_2 = const$



$\Delta U = f(\beta)$  при  $\cos \varphi_2 = const$

$$\Delta U = f(\cos \varphi_2) n p u \beta = \text{const}$$



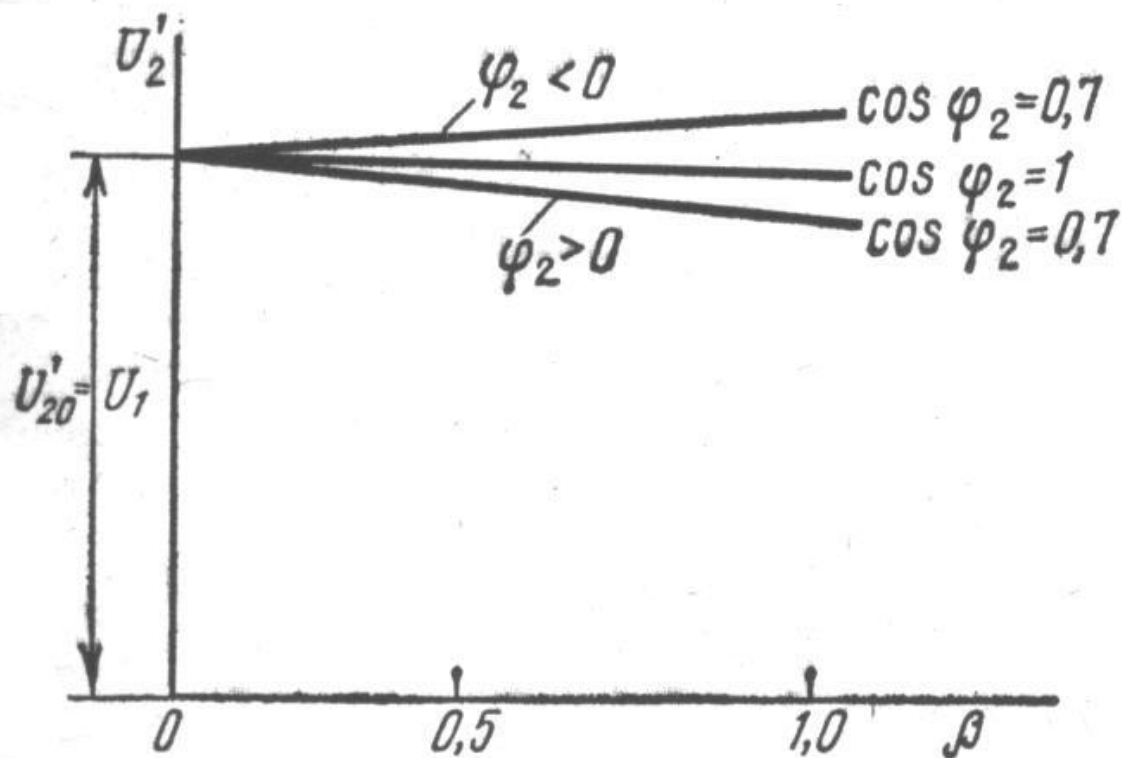


$$U_2 = f(\beta)$$

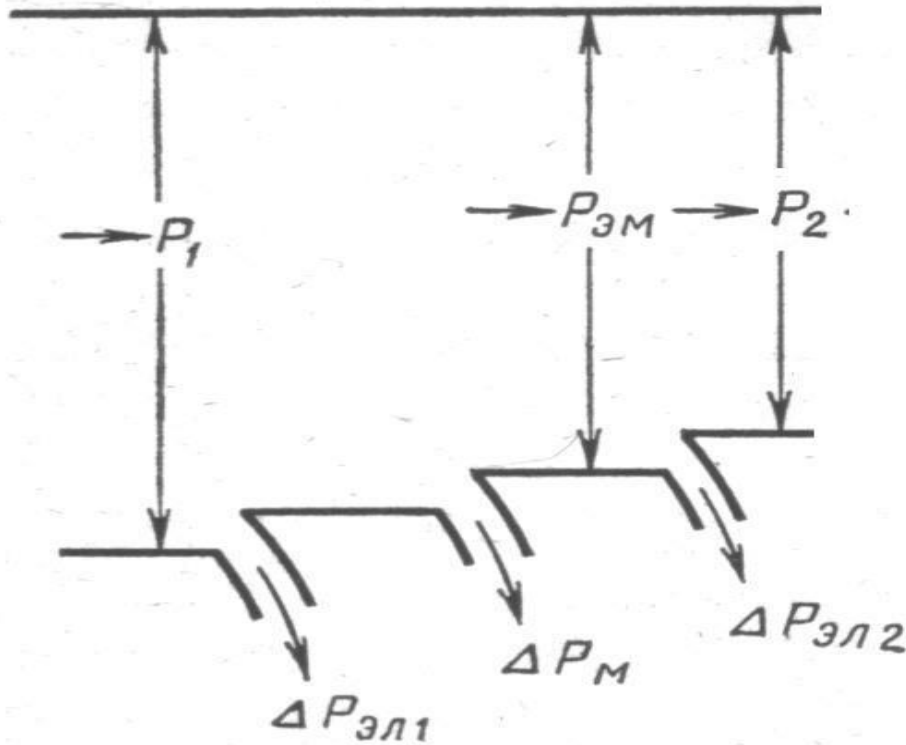
$$U_{ka} = U_k \cos \varphi_k;$$

$$U_{kp} = U_k \sin \varphi_k$$

$$\Delta U = \beta U_k (\cos \varphi_k \cos \varphi_2 + \sin \varphi_k \sin \varphi_2) = \beta U_k \cos(\varphi_k - \varphi_2)$$



# Энергетическая



$$\Delta P_2 = P_1 - \Delta P_{эл1} - \Delta P_{эл2} -$$

$$P_{эм} = P_1 - \Delta P_{эл1} -$$

$$\Delta P_{м}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1}$$

$$\eta = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{ЭЛ1}} + \Delta P_{\text{ЭЛ2}} + \Delta P_M} = 1 - \frac{\Delta P_{\text{ЭЛ1}} + \Delta P_{\text{ЭЛ2}} + \Delta P_M}{P_2 + \Delta P_{\text{ЭЛ1}} + \Delta P_{\text{ЭЛ2}} + \Delta P_M}$$

$$I_2' = I_1 \Rightarrow \Delta P_{\text{ЭЛ}} = \Delta P_{\text{ЭЛ1}} + \Delta P_{\text{ЭЛ2}} = I_1^2 R_1 + I_2'^2 R_2 \approx I_2'^2 (R_1 + R_2') \approx I_2'^2 R_k$$

$$\Delta P_{\text{ЭЛ}} \approx \beta^2 I_{2\text{НОМ}}'^2 R_k \approx \beta^2 \Delta P_{\text{ЭЛ.НОМ}}$$

$$\Delta P_{\text{ЭЛ.НОМ}} \approx I_{2\text{НОМ}}'^2 R_k \approx I_{1\text{НОМ}}'^2 R_k$$

$$\Delta P_{\text{ЭЛ}} = \beta^2 P_K$$

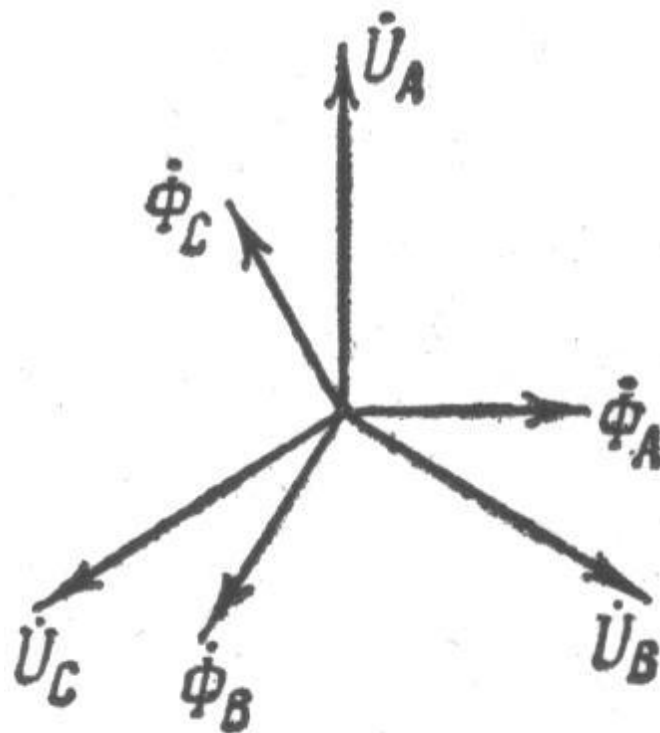
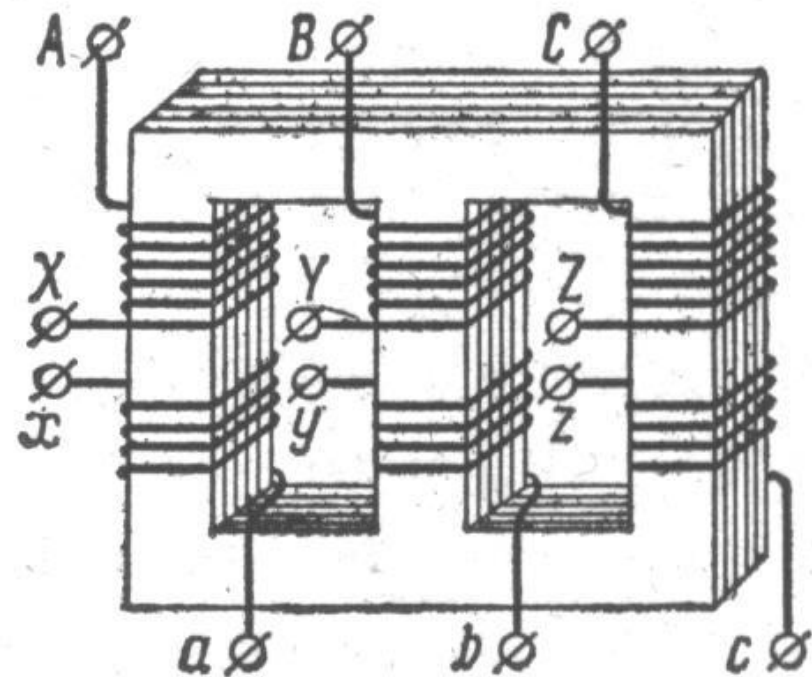
$$\Delta P = P_0 + \beta^2 P_K$$

$$P_2 = I_2 U_2 \text{Cos} \varphi_2 \approx \beta S_{\text{НОМ}} \text{Cos} \varphi_2$$

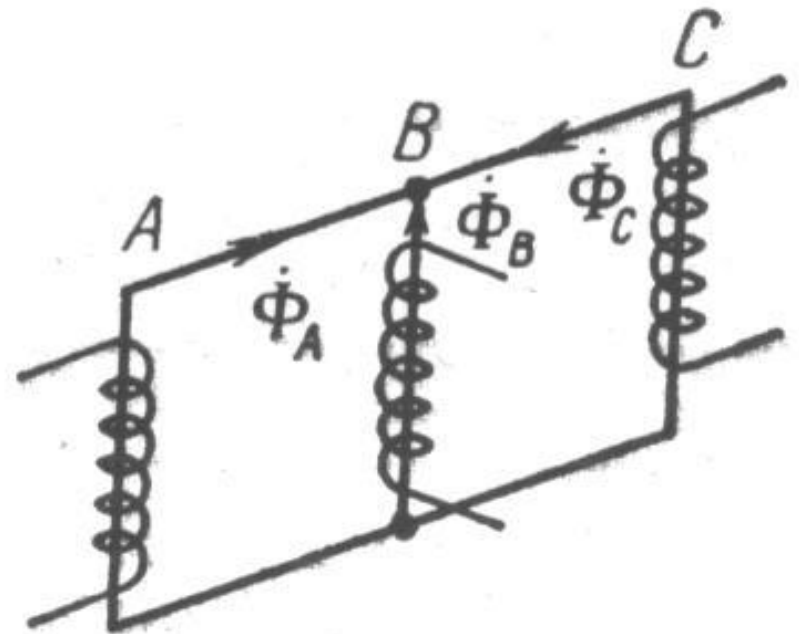
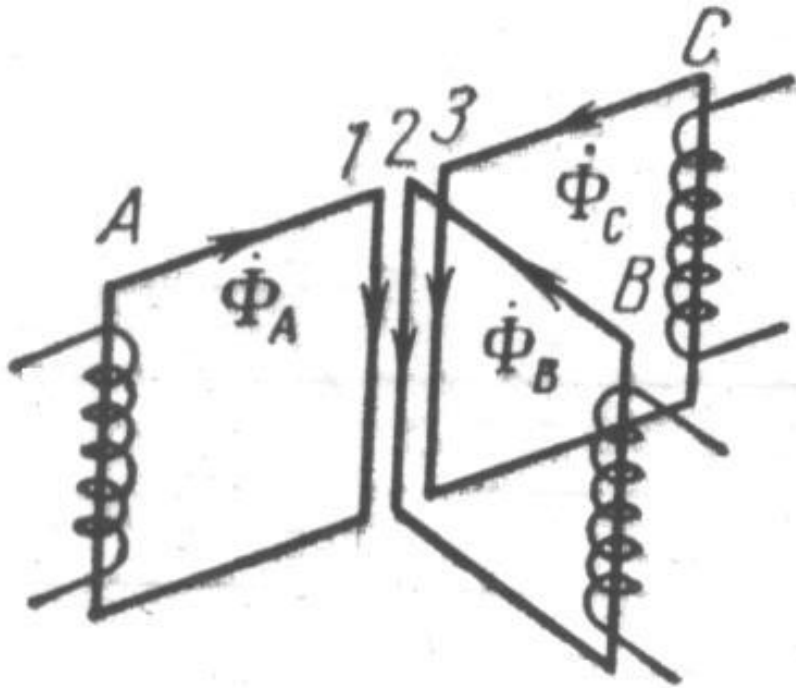
$$\eta = 1 - \frac{\beta^2 P_K + P_0}{\beta S_{\text{НОМ}} \text{Cos} \varphi_2 + \beta^2 P_K + P_0}$$

$$P_{0\text{НОМ}} = \beta'^2 P_{K.\text{НОМ}} \quad \beta' = \sqrt{\frac{P_{0\text{НОМ}}}{P_{K\text{НОМ}}}} \quad \eta = \frac{W_2}{W_1}$$

# Трехфазные трансформаторы



# Трехстержневой 3-фазный трансформатор



$$\dot{\Phi}_{PE3} = \dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C$$

# Схемы соединений

**A, B, C; X, Y,  
Z**

$$K_{\Phi} = \frac{W_{BH}}{W_{HH}} = \frac{U_{0\Phi BH}}{U_{0\Phi HH}}$$

$$K_L = \frac{U_{0L BH}}{U_{0L HH}}$$

**a, b, c, x, y,  
z**

**Y/Y, Δ / Δ**

**Y/  
Δ**

**Δ/Y**

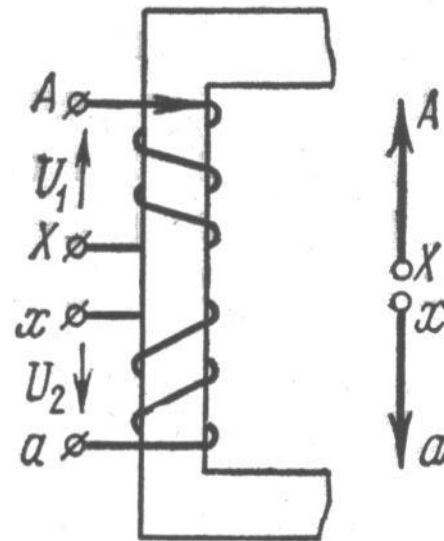
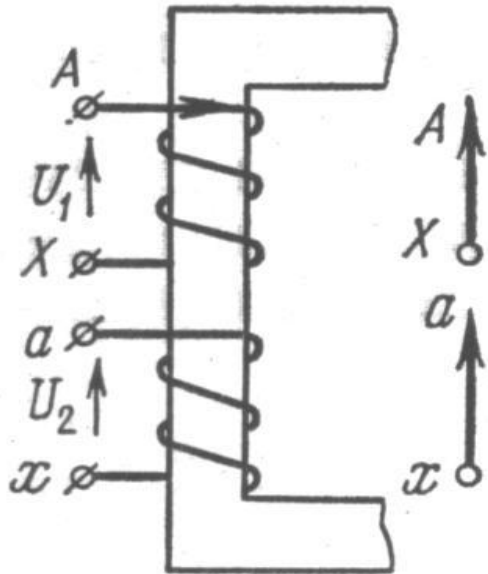
**O**

$K_L = K_{\Phi}$

$$K_L = \sqrt{3} K_{\Phi}$$

$$K_L = \frac{K_{\Phi}}{\sqrt{3}}$$

# Группы соединений обмоток трансформаторов

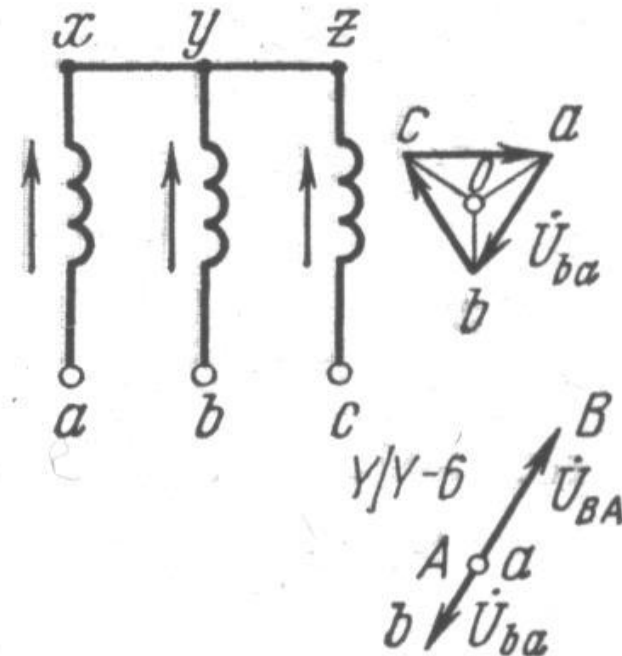
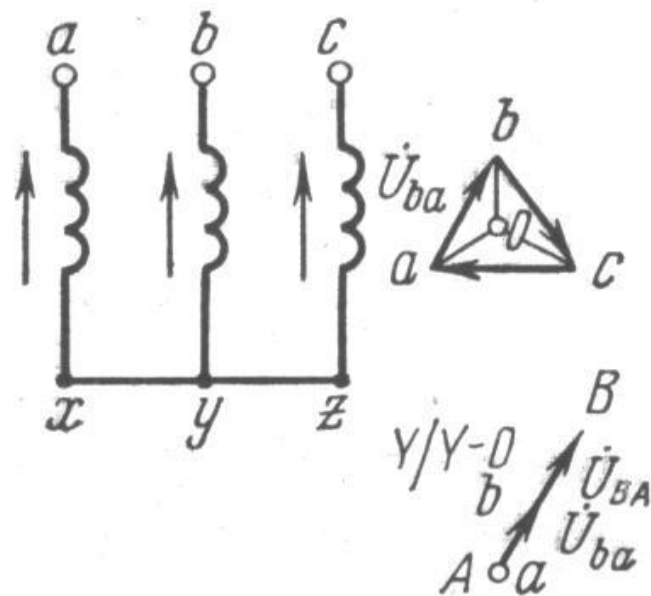
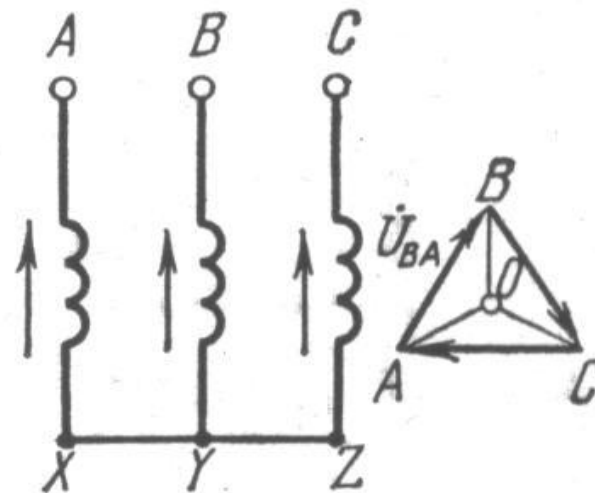
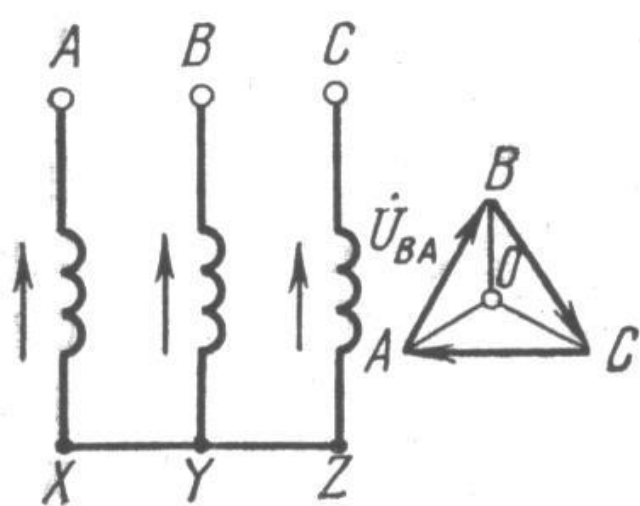


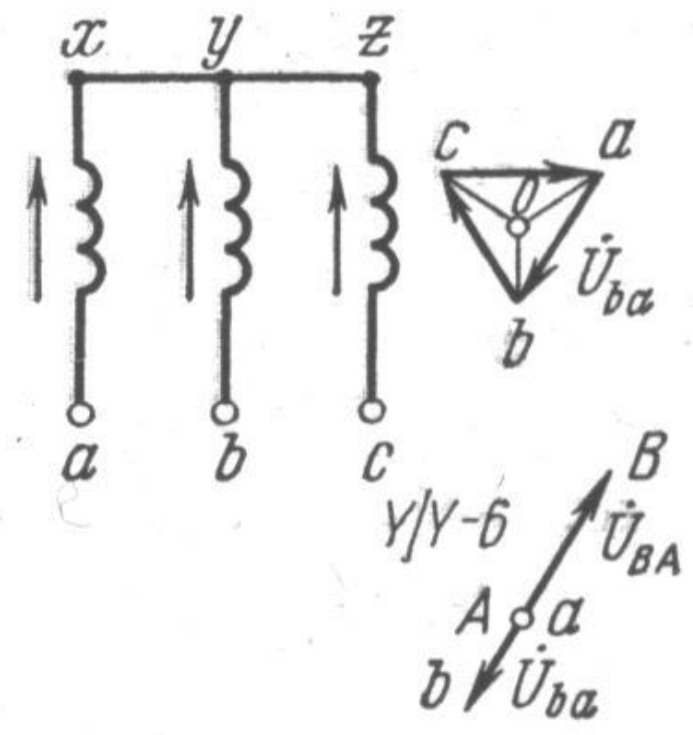
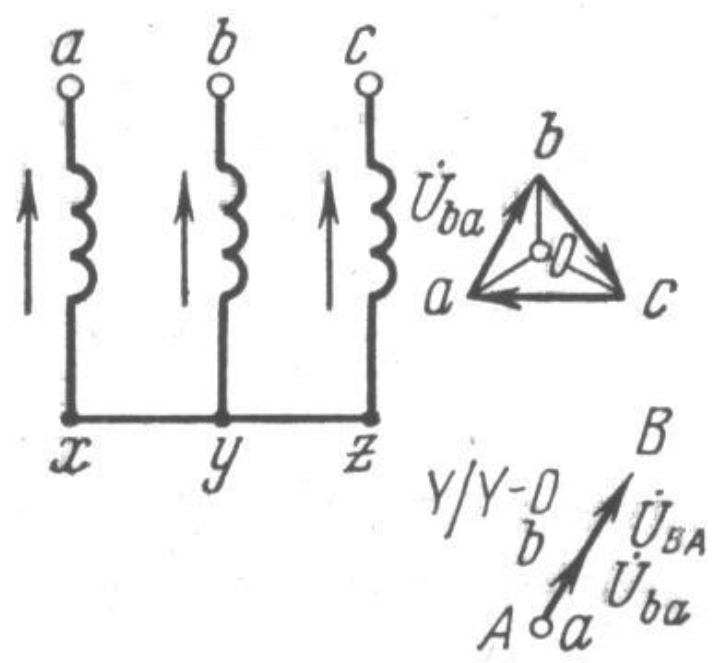
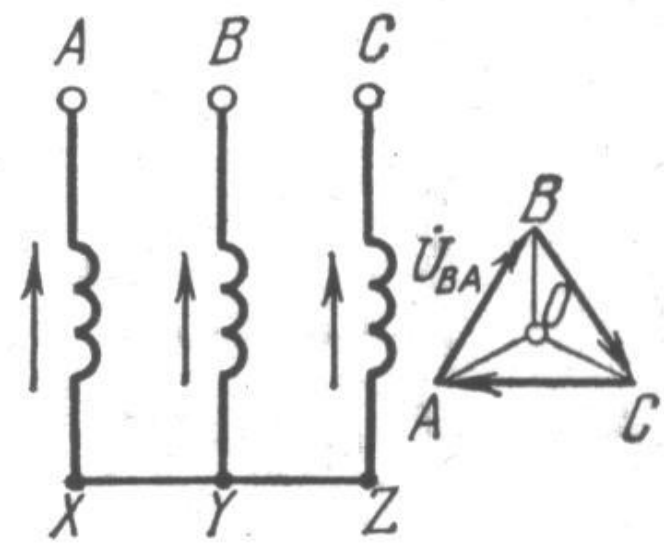
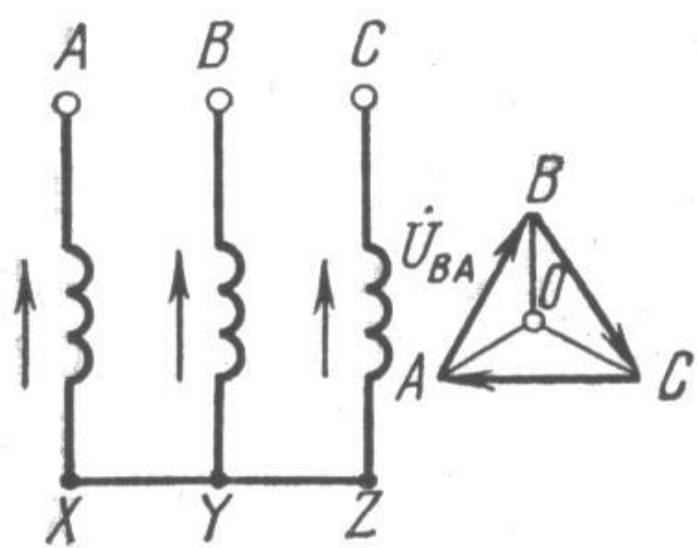
**Номер группы определяют величиной угла, на который вектор линейного напряжения обмотки НН отстает от вектора линейного напряжения обмотки ВН.**

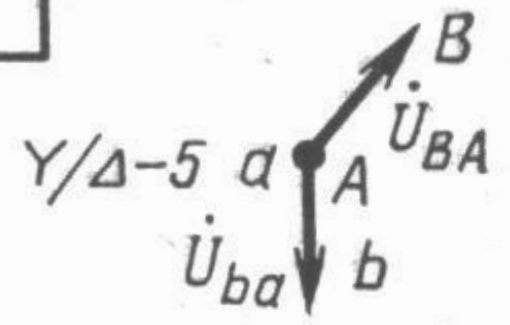
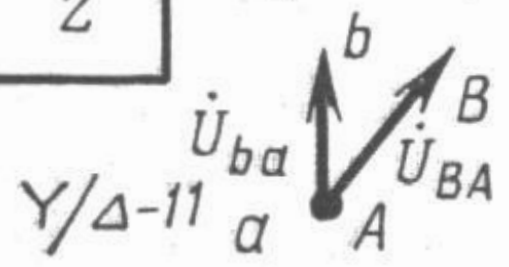
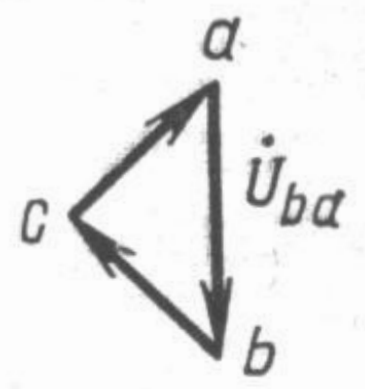
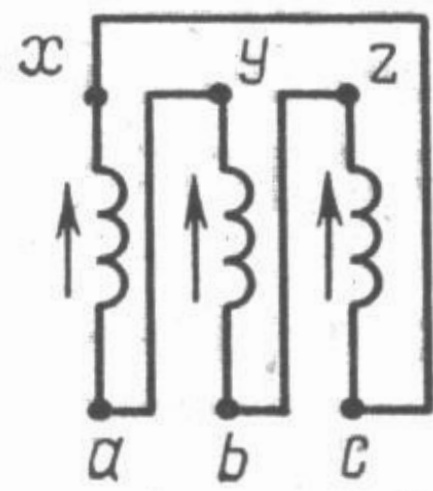
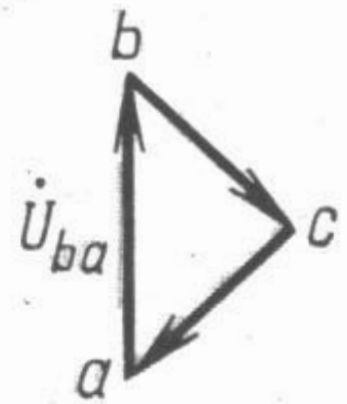
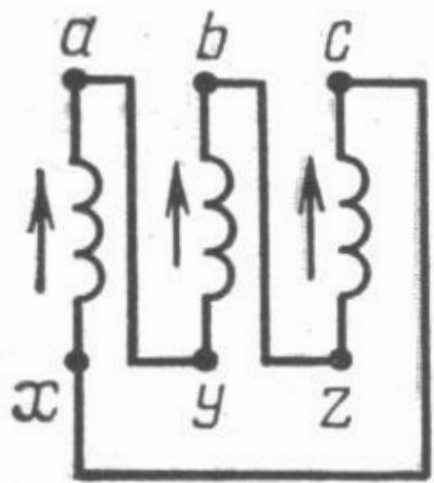
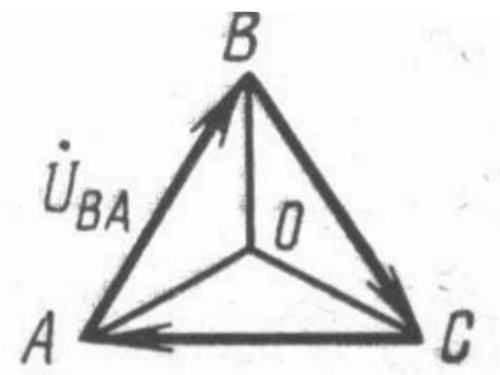
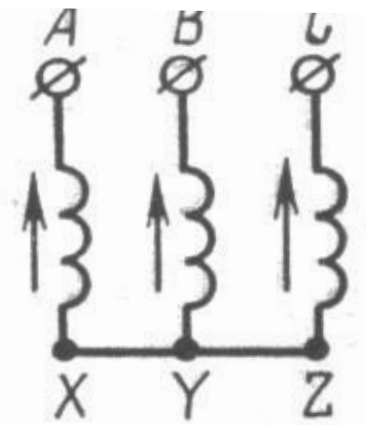
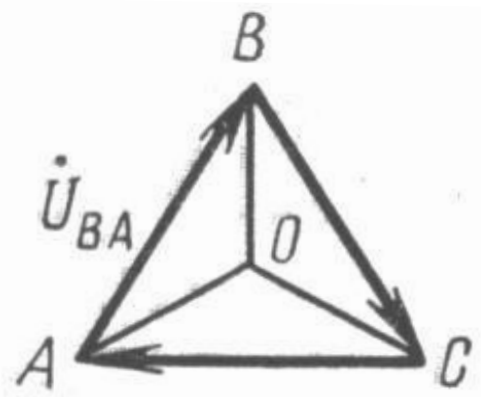
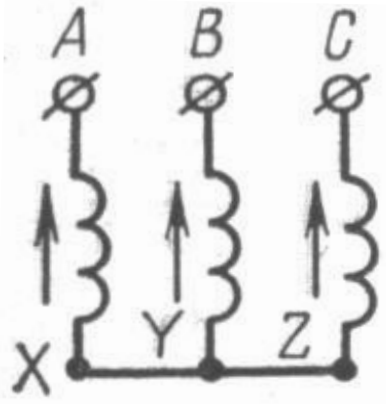
**Для определения номера группы этот угол следует разделить на  $30^{\circ}$ .**

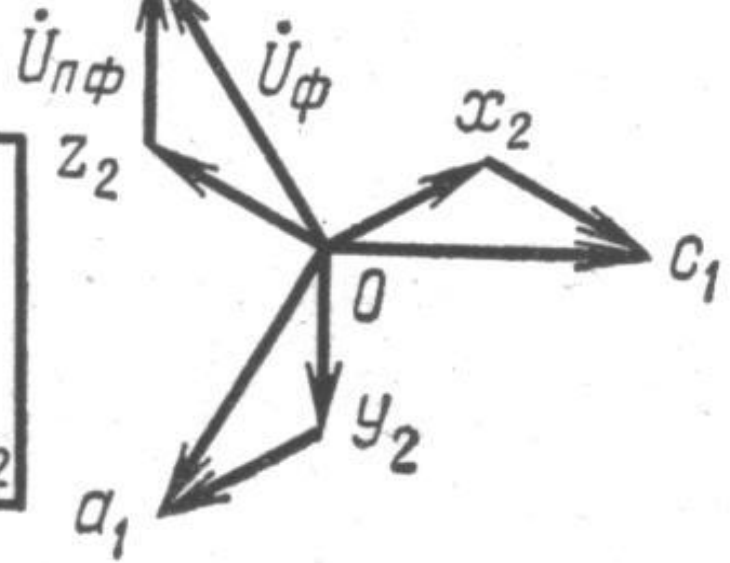
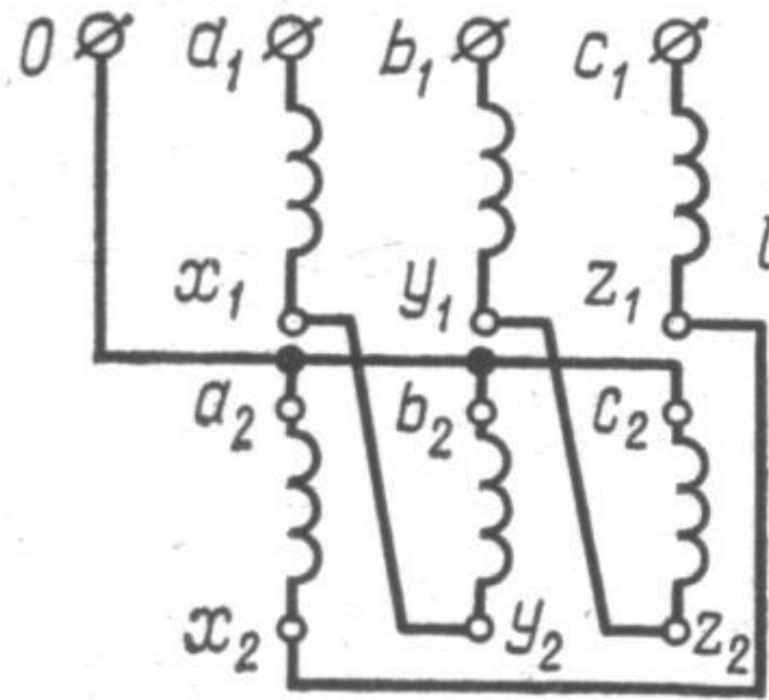
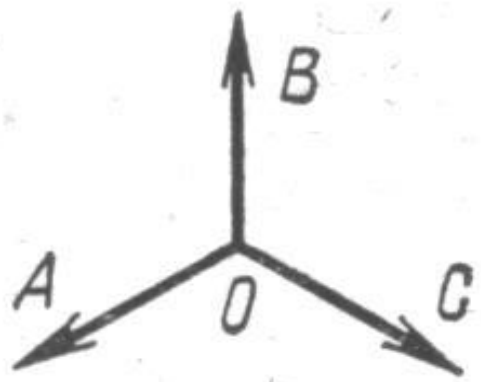
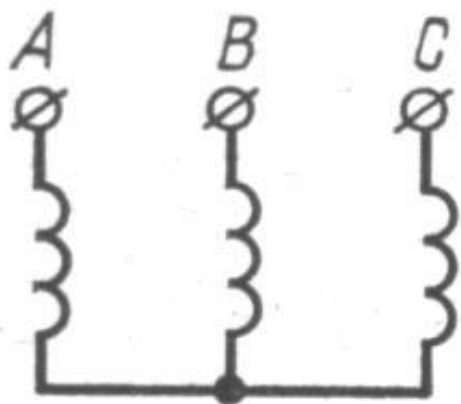


# Трехфазные трансформаторы

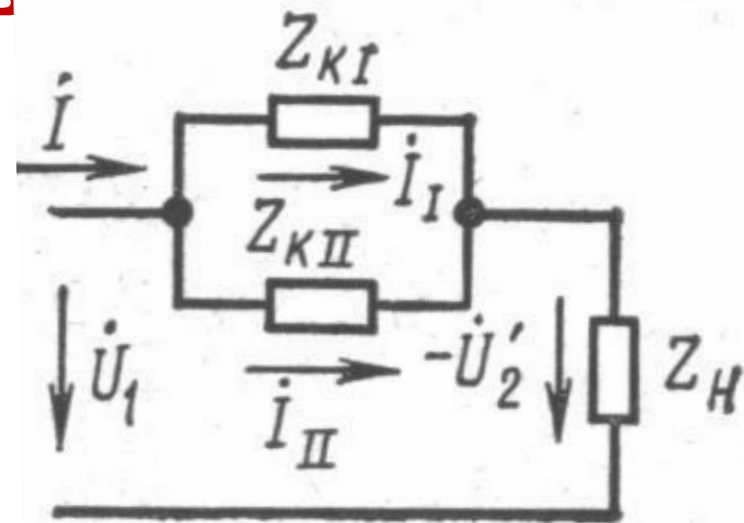
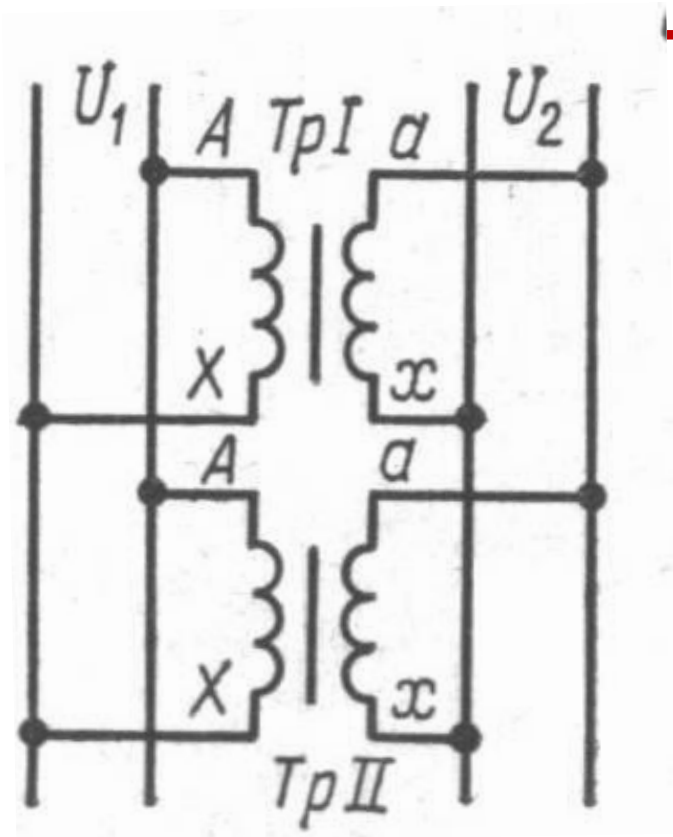








# Параллельная работа торов

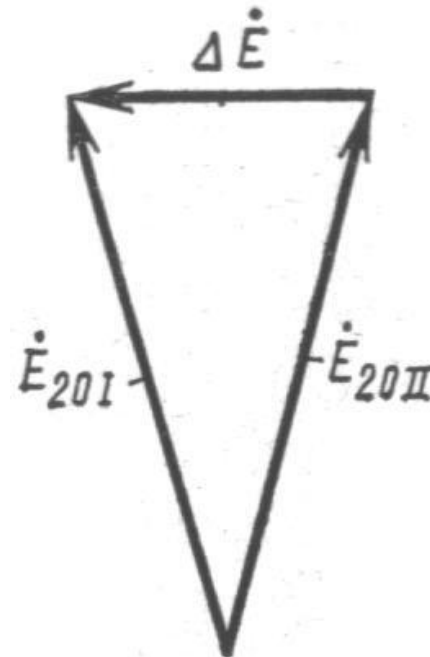


$$\dot{I}_{\text{УР}} = \frac{\dot{E}_{20I} - \dot{E}_{20II}}{Z_{KI} + Z_{KII}}$$

# 1. Равенство вторичных ЭДС

2. Совпадение по фазе ЭДС

$$\dot{E}_{20I} \quad \dot{E}_{20II}$$



### 3. Распределение нагрузок в соответствии с номинальной мощностью

$$\dot{I}_I Z_{-KI} = \dot{I}_{II} Z_{-KII} = \dot{I}_{III} Z_{-KIII} = \dots = \dot{I}_n Z_{-Kn}$$

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{Z_{KII}}{Z_{KI}} \quad I_I : I_{II} = \frac{1}{Z_{KI}} : \frac{1}{Z_{KII}}$$

$$I_I : I_{II} = \frac{I_{HOMI}}{I_{HOMI} Z_{KI}} : \frac{I_{HOMII}}{I_{HOMII} Z_{KII}} \quad U_2 \cos \varphi_2 \quad \frac{U_{HOM}^2}{100}$$

$$P_1 : P_2 = \frac{S_{HOMI}}{U_{KI}} : \frac{S_{HOMII}}{U_{KII}}$$

$$\frac{P_1}{S_{HOMI}} : \frac{P_2}{S_{HOMII}} = \frac{1}{U_{KI}} : \frac{1}{U_{KII}}$$

# Автотрансформа

тор

$$E = 4.44 f \Phi_m$$

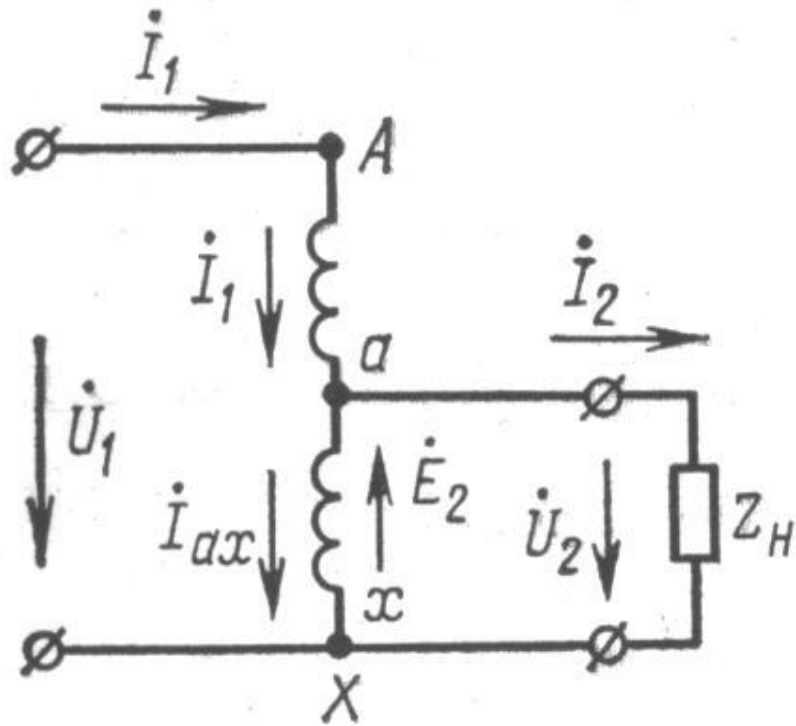
$$U_2 = 4.44 f w_{ax} \Phi_m = U_1 \frac{w_{ax}}{w_{AX}} = \frac{U_1}{K}$$

$$S_H = U_{1H} I_{1H} = U_{2H} I_{2H}$$

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k$$

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 = 0$$

$$I_{ax} w_2 = I_1 \left(1 - \frac{w_1}{w_2}\right) w_2 = -I_1 (w_1 - w_2)$$



$$I_{ax} = I_2 + I_1$$

$$I_{ax} = I_1 \left(1 - \frac{w_1}{w_2}\right)$$



$$S_{\text{пр}} = E_1 I_1 = E_2 I_2$$

$$S_{\text{расч}} = E_2 I_a$$

$$S_{\text{пр}} = E_2 I_2 = E_2 (I_1 + I_{ax}) = E_2 I_{ax} + E_2 I_1 = S_{\text{ЭМ}} + S_{\text{ЭЛ}}$$

$$S_{\text{ЭМ}} = E_2 I_{ax} = S_{\text{расч}}$$

$$S_{\text{ЭЛ}} = E_2 I_1$$

$$I_1 = I_2' = \frac{I_2}{K} \quad I_{ax} = I_2 \left(1 - \frac{1}{K}\right)$$

$$S_{\text{расч}} = E_2 I_{ax} = E_2 I_2 \left(1 - \frac{1}{K}\right)$$

$$K_{\text{выг}} = \frac{S_{\text{расч}}}{S_{\text{ПРОХОДНАЯ}}} = \left(1 - \frac{1}{K}\right)$$

$$K_{\text{ВЫГ}} = \frac{S_{\text{РАСЧ}}}{S_{\text{ПРОХОДНАЯ}}} = \left(1 - \frac{1}{K}\right)$$

$$\frac{\text{отношение эл.потерь АТР}}{2 - x \text{ обм. тр} - m} \approx \frac{\Delta P_{\text{ЭЛ АТР}}}{\Delta P_{\text{ЭЛ ТР}}} \approx 1 - \frac{1}{K}$$

$$R_{K.ATP} = R_{K.TP} \left(1 - \frac{1}{K}\right);$$

$$X_{K.ATP} = X_{K.TP} \left(1 - \frac{1}{K}\right)$$

# Многообмоточные трансформаторы

$$K_{12} = w_{BH} / w_{CH}$$

$$K_{13} = w_{BH} / w_{HH}$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j \dot{I}_1 x_1$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - j \dot{I}_2 x_2$$

$$\dot{U}_3 = \dot{E}_3 - \dot{I}_3 R_3 - j \dot{I}_3 x_3$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left( -\dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} \right) + \left( -\dot{I}_3 \frac{w_3}{w_1} \right)$$



# Регулирование напряжения в трансформаторах