

## Пән: Заманауи электр энергетикасы

№ 8-дәріс

**Тақырыбы: Электр станциялары мен қосалқы станциялардың  
заманауи трансформаторлық жабдықтары**

**Лектор: Сарсенбаев Е.А.**

«Энергетика» кафедрасының қауымдастырылған профессоры

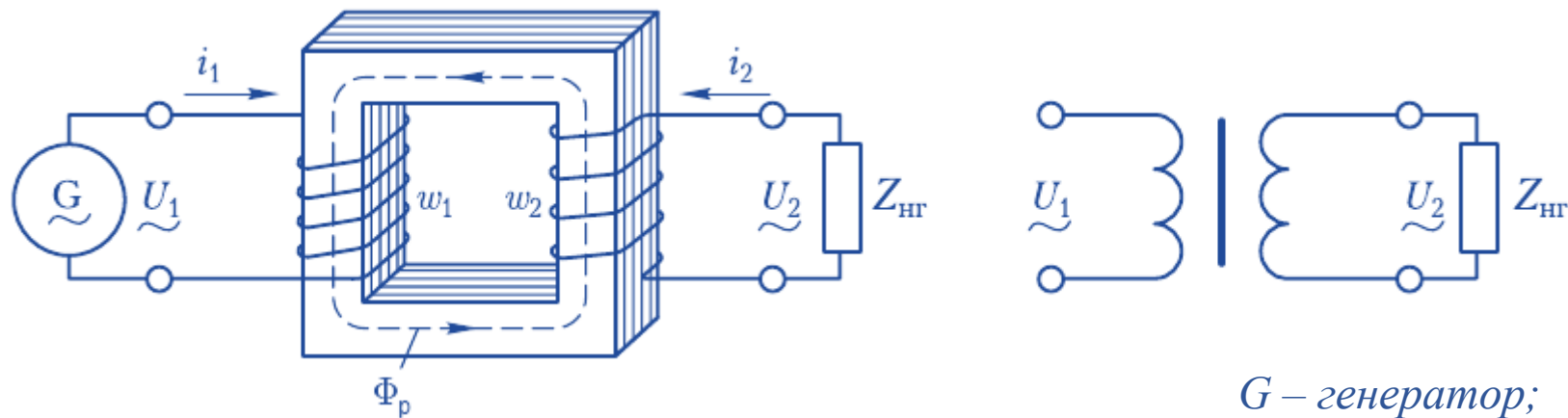
E-mail: [y.sarsenbayev@satbayev.university](mailto:y.sarsenbayev@satbayev.university)

# ДӘРІС ЖОСПАРЫ

1. Трансформатордың жұмыс істеу принципі;
2. Трансформаторлардың классификациясы;
3. Трансформаторлардың құрылысы;
4. Идеалды трансформаторда электрлік қатынастар;
5. Трансформатордың алмастыру схемалары;
6. Үш фазалы трансформаторлар және орамаларының жалғану схемалары;
7. Трансформаторлардың сипаттамалары;
8. Трансформаторлардың параллель жұмысы;
9. Бақылау сұрақтары.



## 1. Принцип действия трансформаторов



В первичной обмотке — ЭДС самоиндукции

$$e_1 = -w_1 (d\Phi / dt),$$

Во вторичной обмотке — ЭДС взаимной индукции

$$e_2 = -w_2 (d\Phi / dt),$$

$G$  — генератор;

$U_1$  — напряжение первичной обмотки;

$U_2$  — напряжение вторичной обмотки

$I_1$  — ток первичной обмотки;

$I_2$  — ток вторичной обмотки;

$w_1$  — число витков первичной обмотки;

$w_2$  — число витков вторичной обмотки;

$\Phi_p$  — результирующий магнитный поток в сердечнике;

$Z_{нг}$  — сопротивление нагрузки.

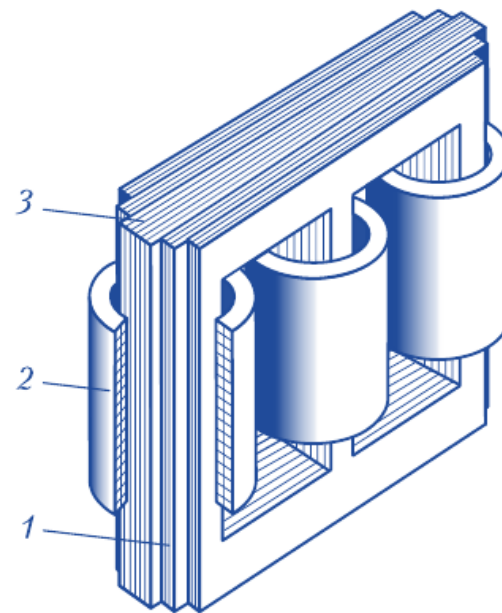
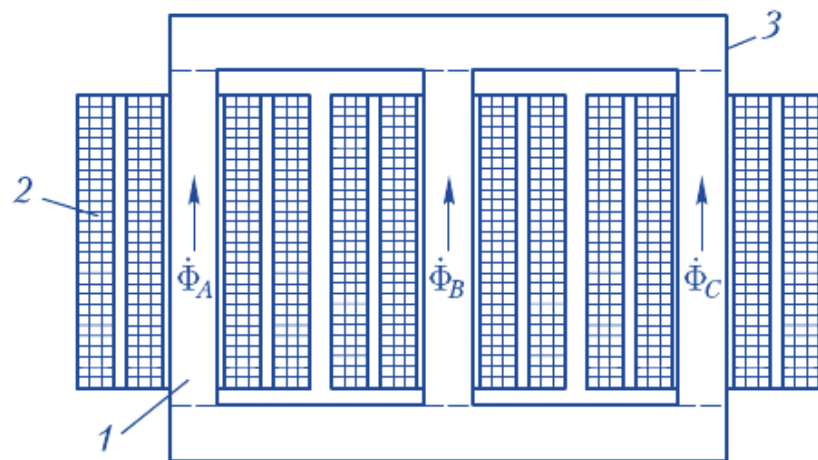
## 2. Классификация трансформаторов



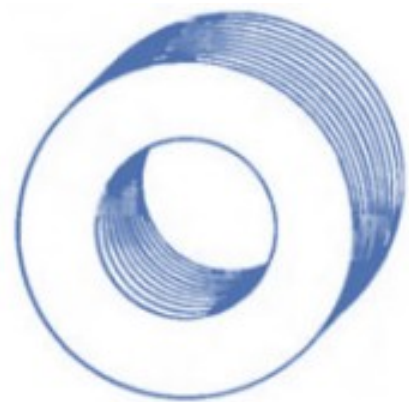


### 3. Устройство трансформаторов

#### Магнитопровод

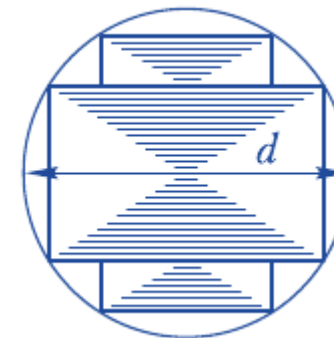


Магнитопровод трехфазного трансформатора стержневого типа с обмотками

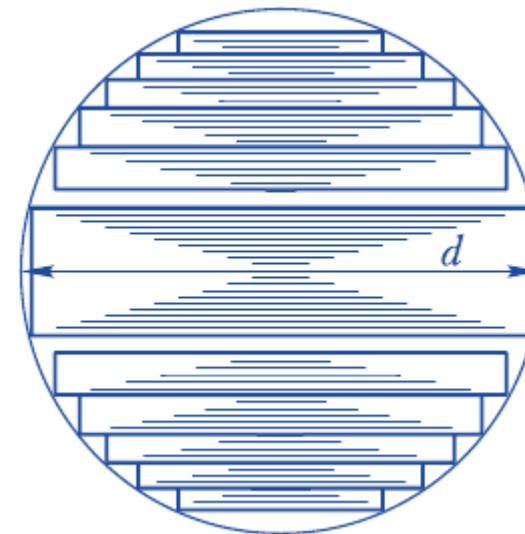


Тороидальный магнитопровод

#### Форма сечения стержней трансформаторов



Малой и средней мощности;

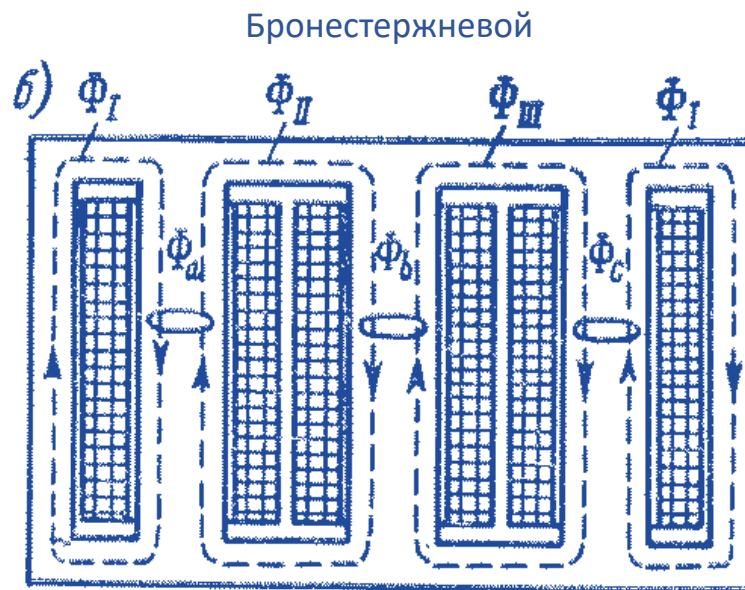
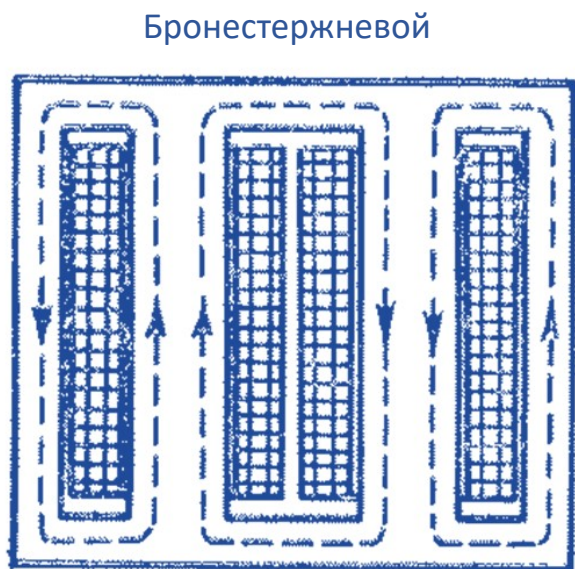
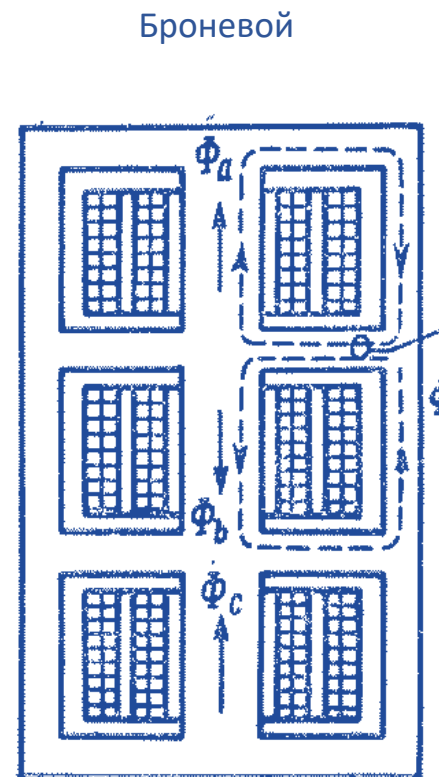
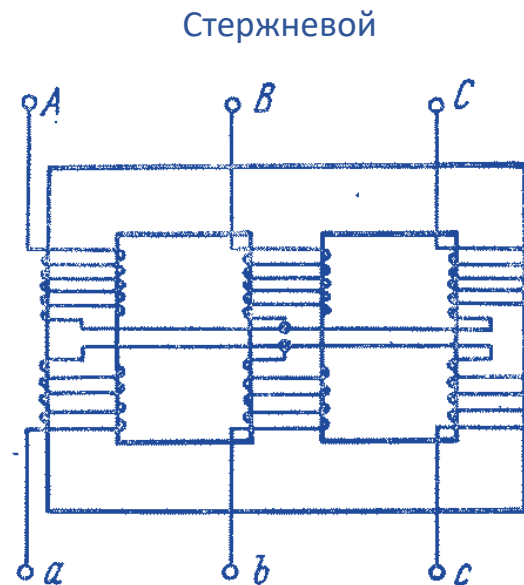
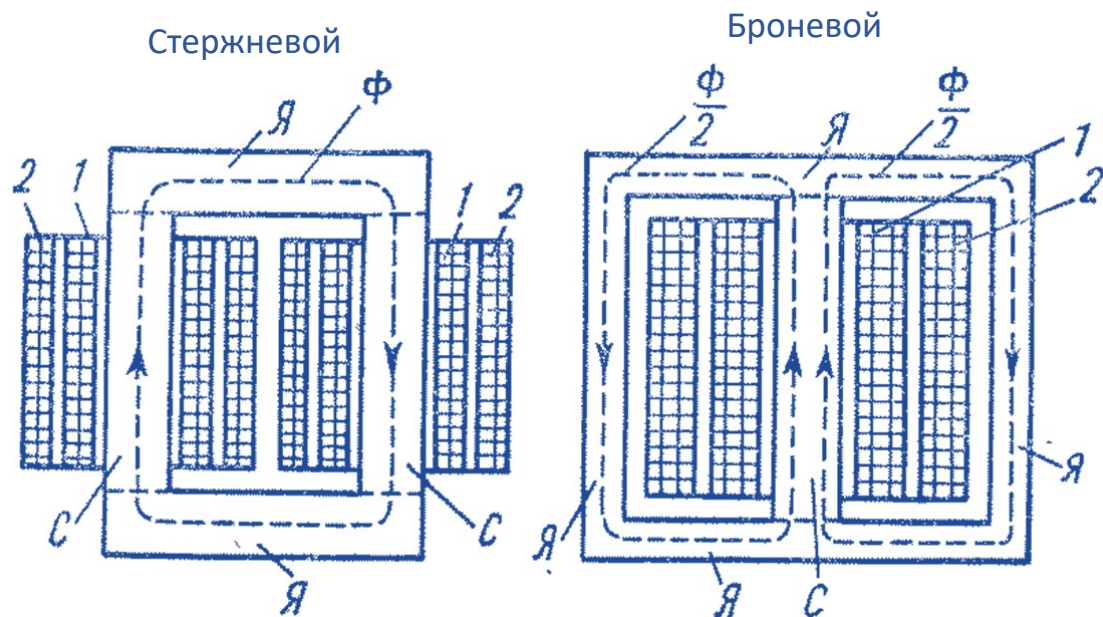


Большой мощности



### 3. Устройство трансформаторов

#### Магнитопровод

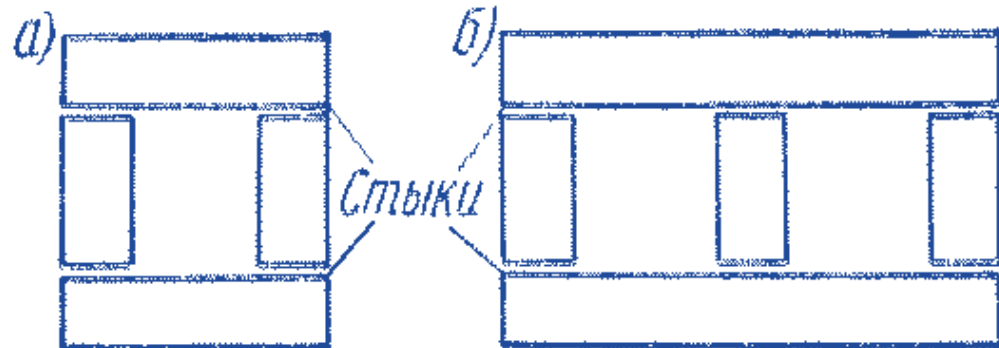


#### Магнитопровод

##### Стыковой

Однофазный

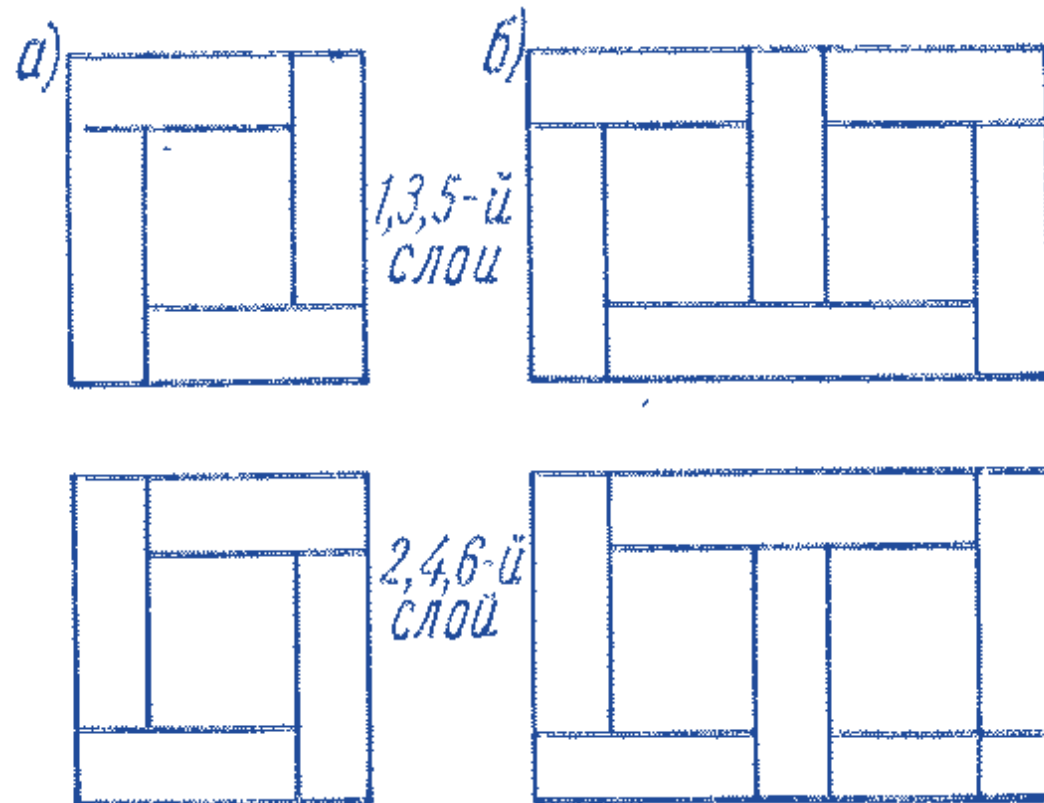
Трёхфазный



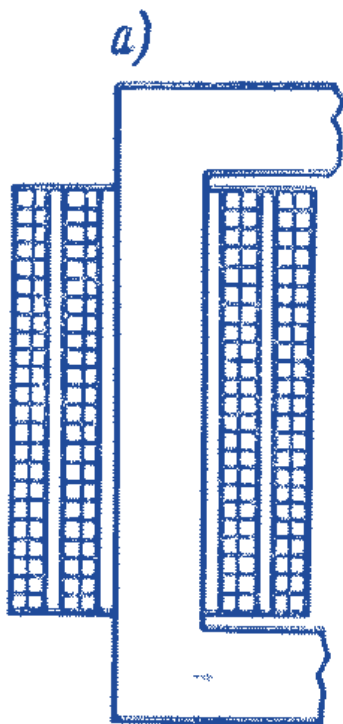
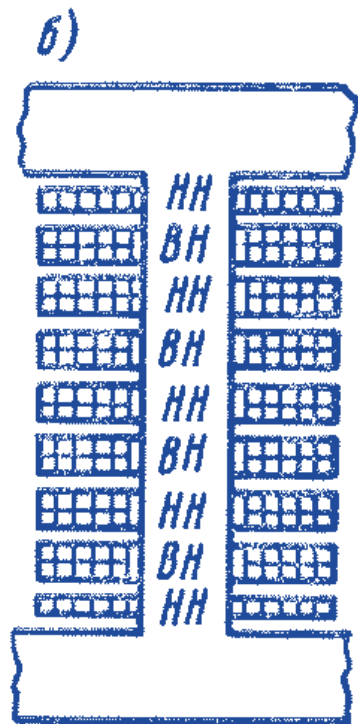
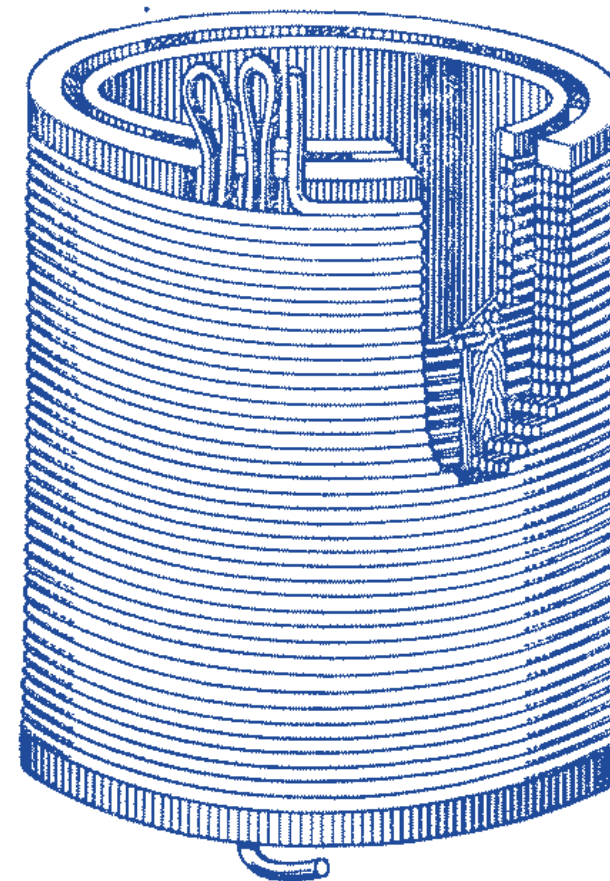
##### Шихтованный

Однофазный

Трёхфазный

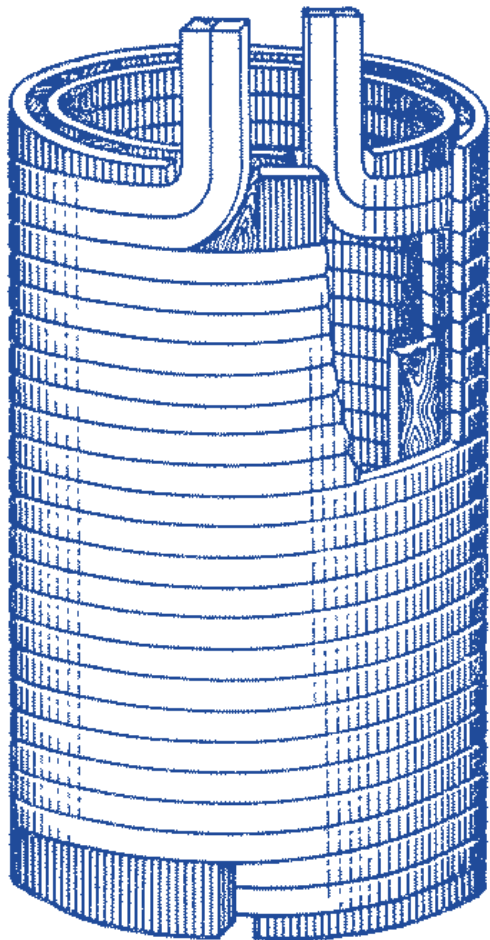


## Обмотки

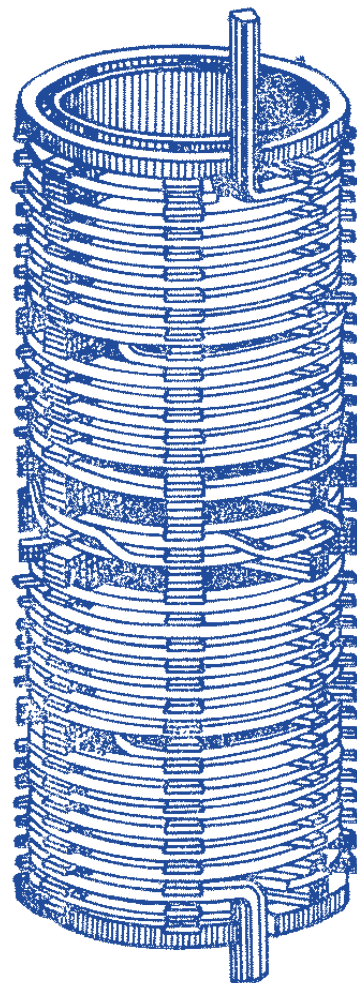
Концентрические  
обмоткиЧередующиеся  
(дисковая) обмоткиМногослойная цилиндрическая  
обмотка



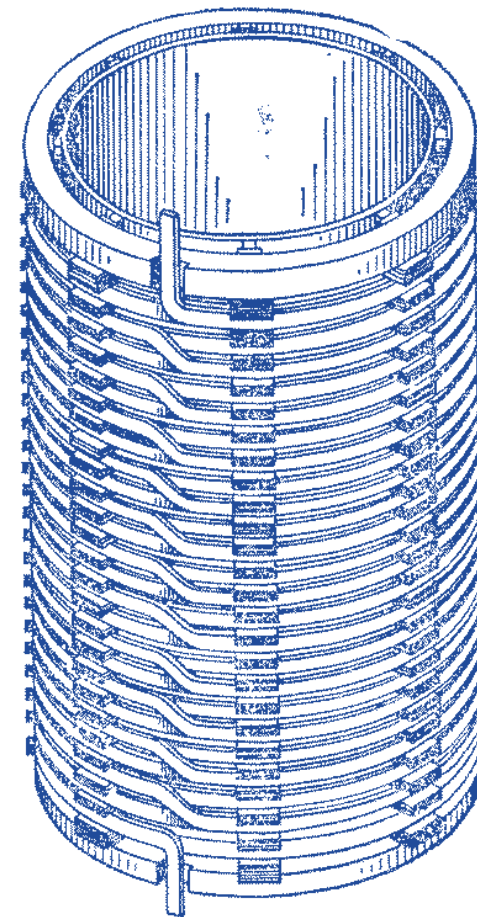
#### Обмотки



Двухслойная цилиндрическая  
обмотка



Винтовая обмотка



Непрерывная спиральная катушечная  
обмотка

## 4. Электрические соотношения в идеальном трансформаторе

### Уравнения напряжений трансформатора

ЭДС первичной и вторичной обмоток трансформатора при синусоидальных переменных потоках

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= -\frac{d\Psi_1}{dt} = -w_1 \frac{d}{dt} (\Phi_p \sin \omega t) = -\omega w_1 \Phi_p \cos \omega t; \\ e_2 &= -\frac{d\Psi_2}{dt} = -w_2 \frac{d}{dt} (\Phi_p \sin \omega t) = -\omega w_2 \Phi_p \cos \omega t, \end{aligned} \right\}$$

$$\cos \omega t = -\sin(\omega t - \pi/2)$$

$$e_1 = \omega w_1 \Phi_{\max} \sin(\omega t - \pi/2).$$

$$e_2 = \omega w_2 \Phi_{\max} \sin(\omega t - \pi/2).$$

Действующие значения этих ЭДС

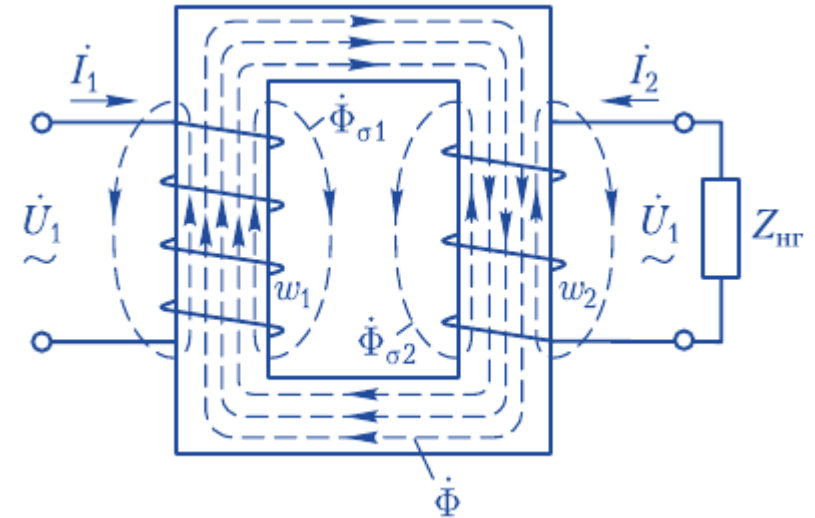
$$E_1 = \frac{\omega w_1 \Phi_p}{\sqrt{2}} = \pi \sqrt{2} f w_1 \Phi_p = 4,44 f w_1 \Phi_p;$$

$$E_2 = \frac{\omega w_2 \Phi_p}{\sqrt{2}} = \pi \sqrt{2} f w_2 \Phi_p = 4,44 f w_2 \Phi_p.$$

$$U_1 \approx E_1; \quad U_2 \approx E_2.$$

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

$$U_1/U_2 = E_1/E_2 = w_1/w_2 = k_T \quad I_2/I_1 = k$$



$$e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1}(di_1 / dt);$$

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} = \dot{I}_2 r_2 + \dot{I}_2 Z_{\text{нг}},$$

$$e_{\sigma 2} = -L_{\sigma 2}(di_2 / dt),$$

$$\dot{I}_2 Z_{\text{нг}} = \dot{U}_2.$$

$L_{\sigma 1}$  и  $L_{\sigma 2}$  — индуктивности рассеяния.

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

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 r_2 = \dot{I}_2 Z_{\text{нг}}.$$

$$\dot{E}_{\sigma 2} = -j\dot{I}_2 x_2,$$

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1.$$



#### 4. Электрические соотношения в идеальном трансформаторе

##### Уравнения напряжений трансформатора

Дифференциальные уравнения напряжений однофазного двухобмоточного трансформатора

$$u_1 = r_1 i_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt};$$

$$u_2 = -r_2 i_2 - L_{22} \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt}.$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= r_1 \dot{I}_1 + jx_{11} \dot{I}_1 + jx_{12} \dot{I}_2; \\ -\dot{U}_2 &= r_2 \dot{I}_2 + jx_{22} \dot{I}_2 + jx_{12} \dot{I}_1, \end{aligned}$$

где

$$x_{11} = \omega L_{11}; \quad x_{22} = \omega L_{22}; \quad x_{12} = \omega M$$

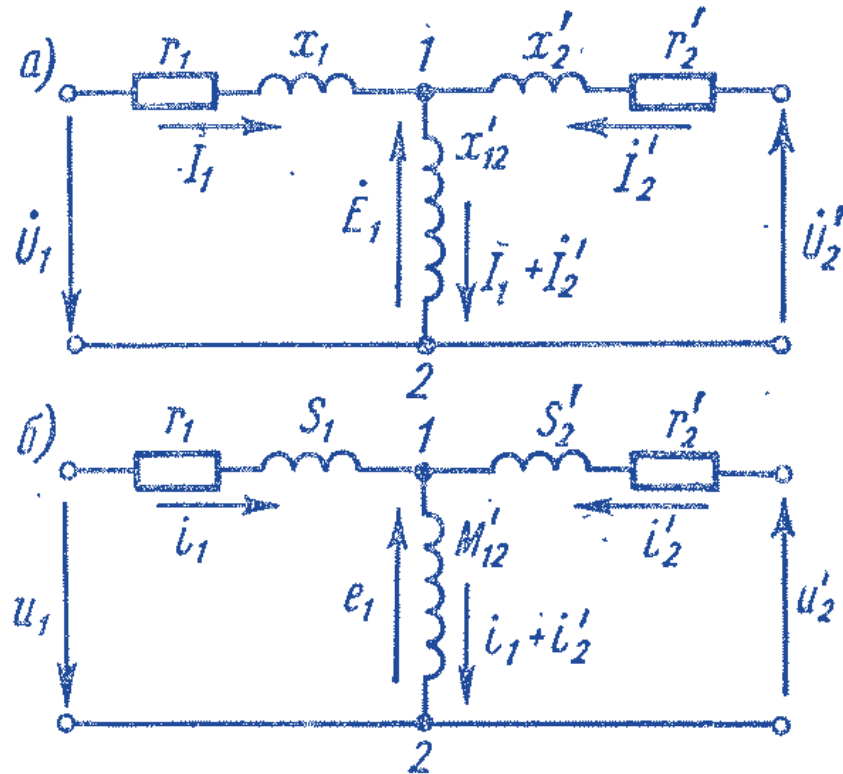
$$\dot{U}_2 = -\frac{jx_{12}}{r_1 + jx_{11}} \dot{U}_1 - (r_2 + jx_{22}) \left[ 1 - \frac{(jx_{12})^2}{(r_1 + jx_{11})(r_2 + jx_{22})} \right] \dot{I}_2.$$

$$\text{при } \dot{I}_2 = 0: \quad \dot{U}_{20} = -\frac{jx_{12}}{r_1 + jx_{11}} \dot{U}_1$$

$$\text{при } \dot{U}_2 = 0 \quad \dot{I}_{2K} = \frac{\dot{U}_{20}}{(r_2 + jx_{22}) \left[ 1 - \frac{(jx_{12})^2}{(r_1 + jx_{11})(r_2 + jx_{22})} \right]}.$$

## 5. Схемы замещения трансформатора

Схемы замещения трансформатора без учета магнитных потерь



Уравнения напряжения приведенного напряжения

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= r_1 \dot{I}_1 + jx_1 \dot{I}_1 + jx'_{12} (\dot{I}_1 + \dot{I}'_2); \\ -\dot{U}'_2 &= r'_2 \dot{I}'_2 + jx'_2 \dot{I}'_2 + jx'_{12} (\dot{I}_1 + \dot{I}'_2).\end{aligned}$$

$$x'_{12} \approx x_{c1} = \omega \omega_1^2 / R_{\mu c}.$$

Индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток

$$S_1 = L_{11} - kM = x_1 / \omega$$

$$S_1 = L_{B1} - kM_B.$$

$$S'_2 = k^2 S_2 = k^2 \frac{x_2}{\omega}$$

$$S_2 = L_{B2} - M_B / k;$$

$$S'_2 = k^2 S_2 = k^2 L_{B2} - kM_B.$$

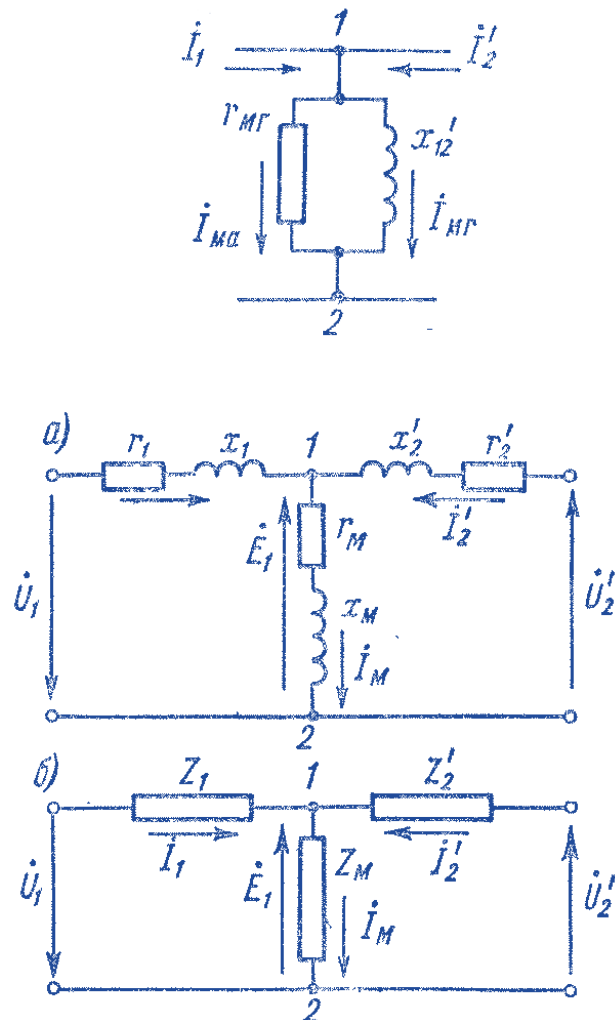
$$M'_{12} = kM = x'_{12} / \omega$$

$$x_1 = \omega S_1; \quad x_2 = \omega S_2; \quad x'_2 = \omega S'_2$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{12} &= jx'_{12} (\dot{I}_1 + \dot{I}'_2) \approx jx_{c1} (\dot{I}_1 + \dot{I}'_2) = j\omega \omega_1 \frac{\omega_1 (\dot{I}_1 + \dot{I}'_2)}{R_{\mu c}} = \\ &= j\omega \omega_1 \frac{\dot{F}_{\text{рез}}}{R_{\mu c}} = j\omega \omega_1 \frac{\dot{\Phi}_c}{V/2} = j\pi \sqrt{2} f \omega_1 \dot{\Phi}_c = -\dot{E}_1.\end{aligned}$$

## 5. Схемы замещения трансформатора

Схема замещения трансформатора с учетом магнитных потерь



$$p_{MG} \sim B_c^2 \sim \Phi_c^2 \sim E_1^2.$$

$$p_{MG} = m_1 U_{12}^2 / r_{MG} = m_1 E_1^2 / r_{MG}.$$

$$r_{MG} = m_1 E_1^2 / p_{MG}$$

$$\dot{I}_M = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2$$

$$Z_M = \frac{r_{MG} j x'_{12}}{r_{MG} + j x'_{12}} = \frac{r_{MG} x'_{12}{}^2}{r_{MG}^2 + x'_{12}{}^2} + j \frac{r_{MG}^2 x'_{12}}{r_{MG}^2 + x'_{12}{}^2} = r_M + j x_M.$$

$$r_{MG} \gg x'_{12},$$

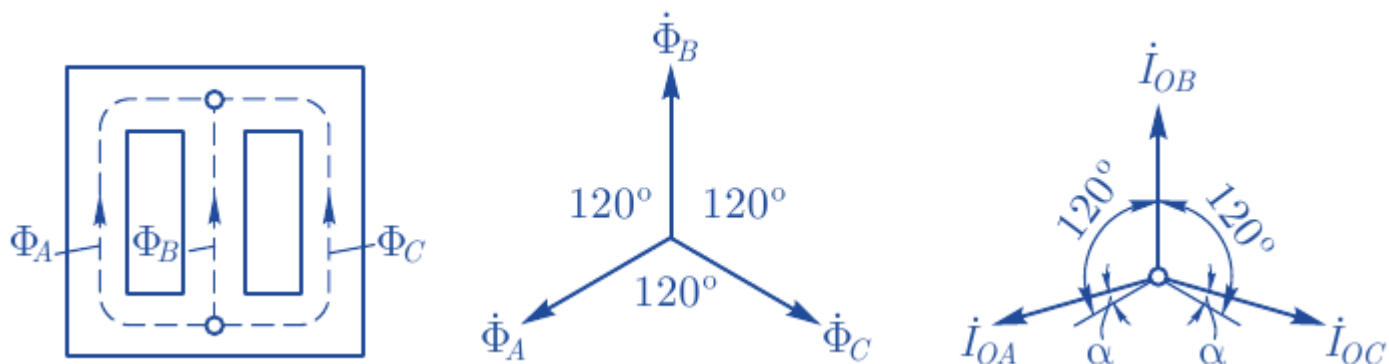
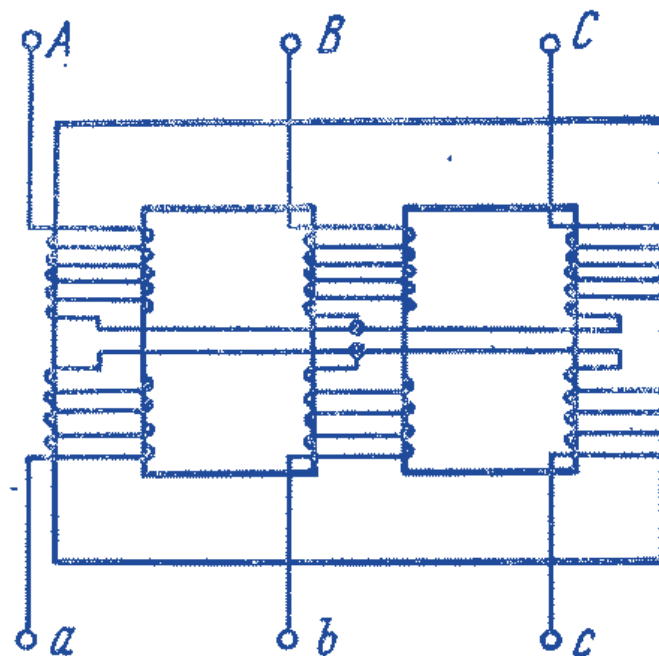
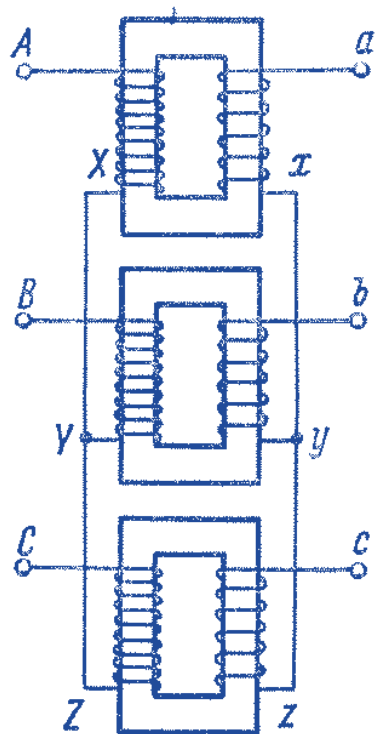
$$r_M \approx x'_{12}{}^2 / r_{MG}; \quad x_M \approx x'_{12} \approx x_{c1}.$$

$$Z_1 = r_1 + j x_1; \quad Z'_2 = r'_2 + j x'_2;$$

$$Z_M = r_M + j x_M,$$

$$z_{M*} = 25 \div 200; \quad z_{1*} \approx z'_{2*} = 0,025 \div 0,10.$$

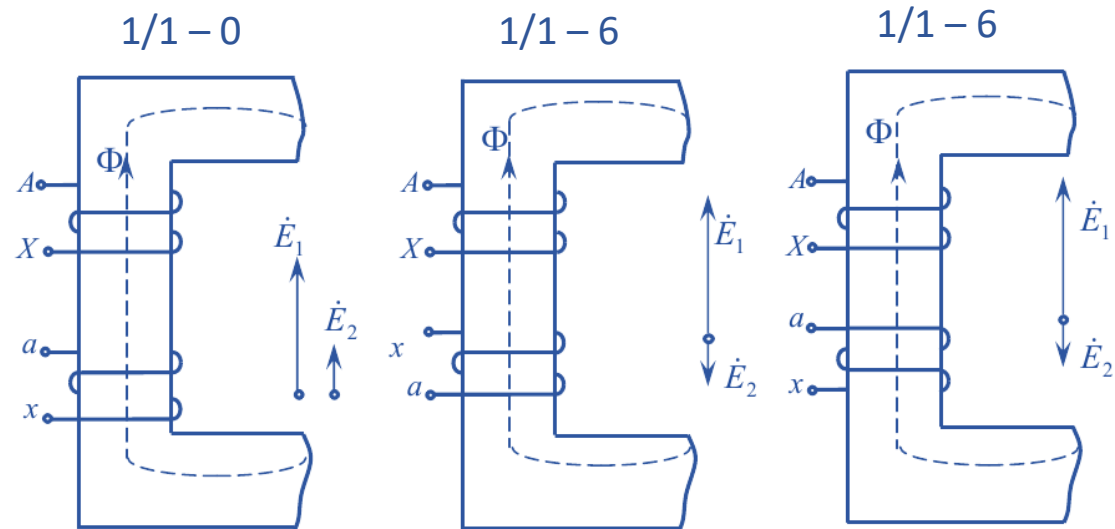
## 6. Трехфазные трансформаторы и схемы соединения обмоток



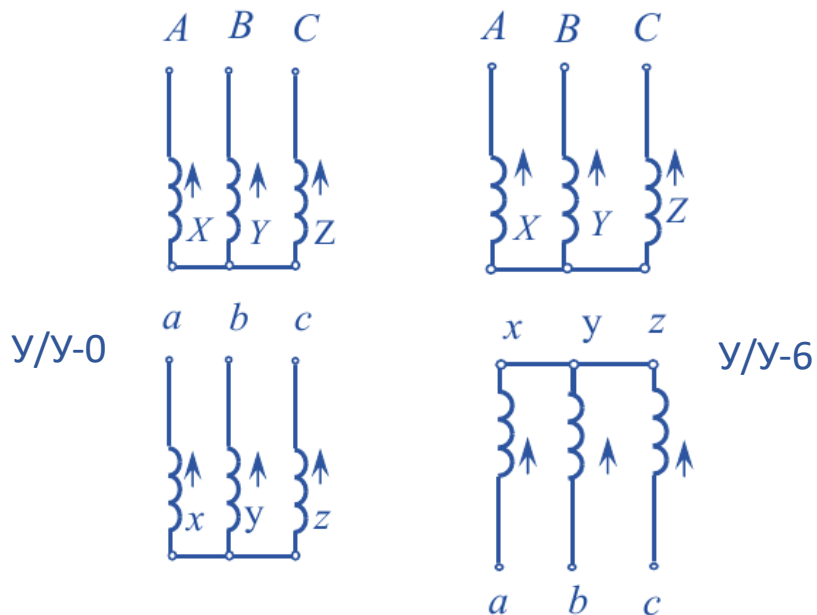
Трехстержневой магнитопровод и векторные диаграммы

## 6. Трехфазные трансформаторы и схемы соединения обмоток

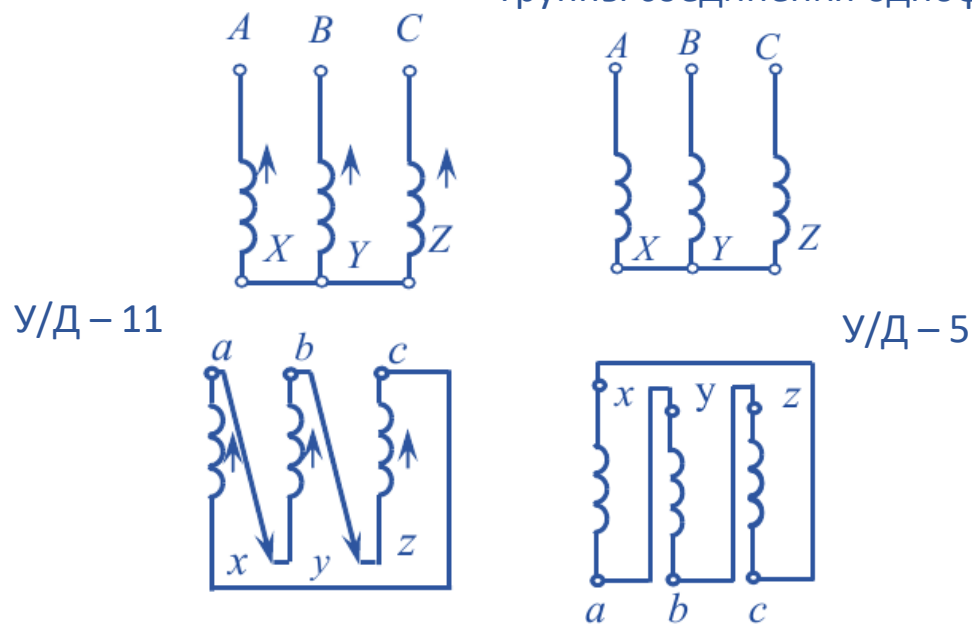
| Название обмоток             | Однофазные трансформаторы | Трехфазные трансформаторы |
|------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Обмотки высшего напряжения:  |                           |                           |
| начала                       | $A$                       | $A, B, C$                 |
| концы                        | $X$                       | $X, Y, Z$                 |
| Обмотки низшего напряжения:  |                           |                           |
| начала                       | $a$                       | $a, b, c$                 |
| концы                        | $x$                       | $x, y, z$                 |
| Обмотки среднего напряжения: |                           |                           |
| начала                       | $A_m$                     | $A_m, B_m, C_m$           |
| концы                        | $X_m$                     | $X_m, Y_m, Z_m$           |



Группы соединения однофазных трансформаторов



Четные группы соединений обмоток  
трехфазного трансформатора

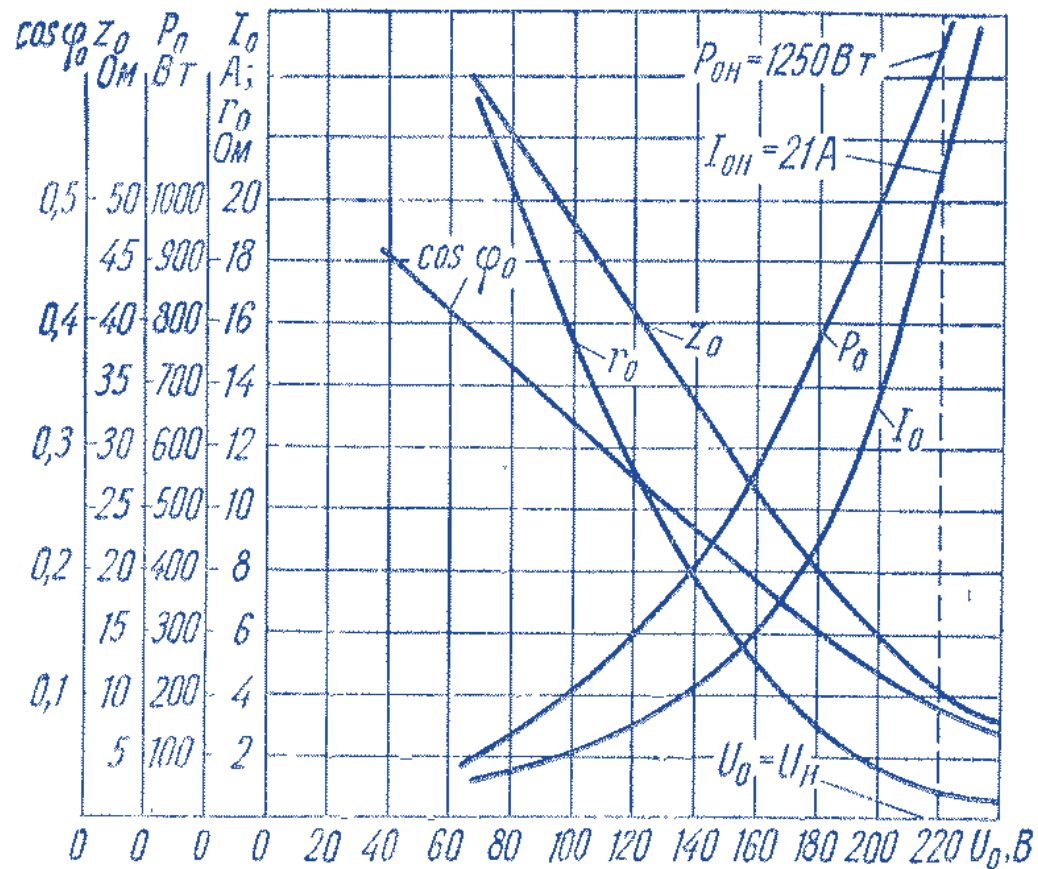


Нечетные группы соединений обмоток  
трехфазного трансформатора

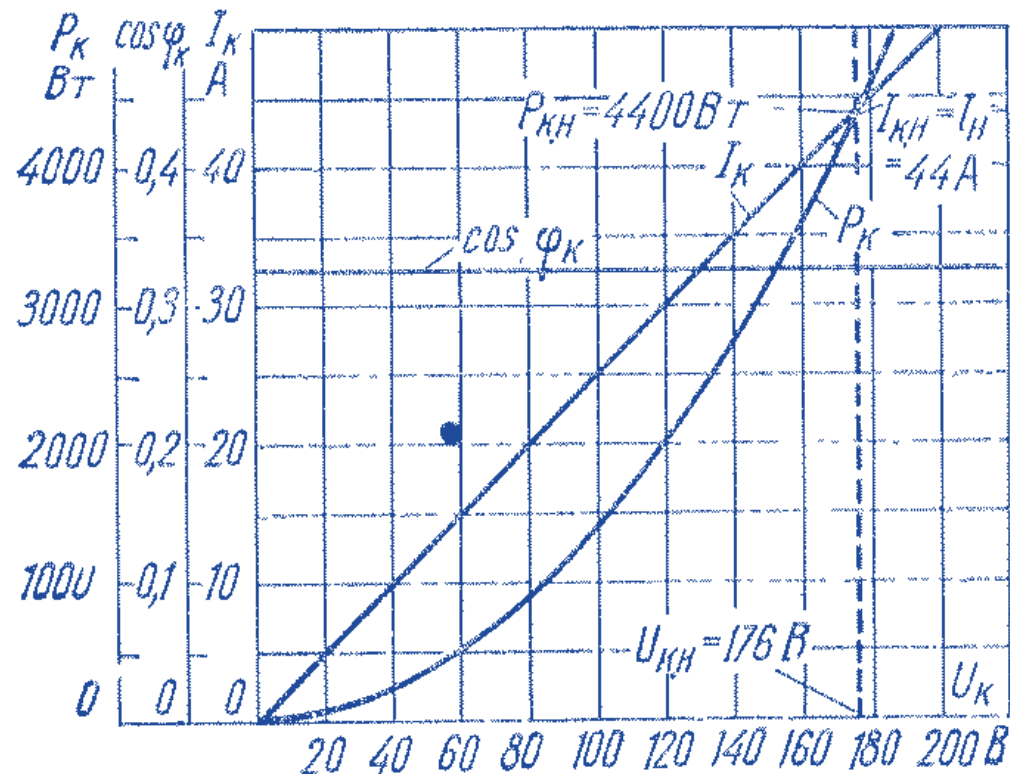


## 7. Характеристики трансформаторов

Характеристики х.х. трансформатора с соединением обмоток Y/Y<sub>0</sub>, 240 кВА, 3150/380 В



Характеристики к.з. трансформатора с соединением обмоток Y/Y<sub>0</sub>, 240 кВА, 3150/380 В

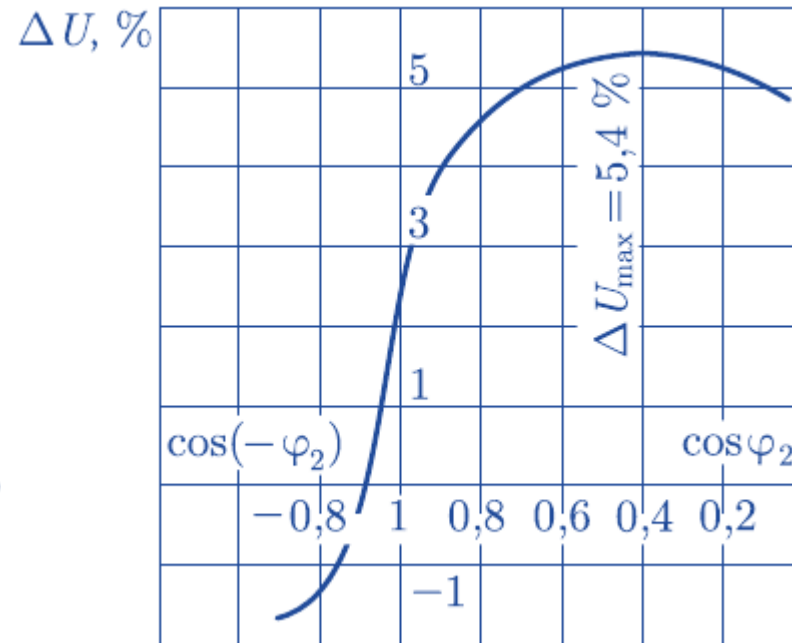
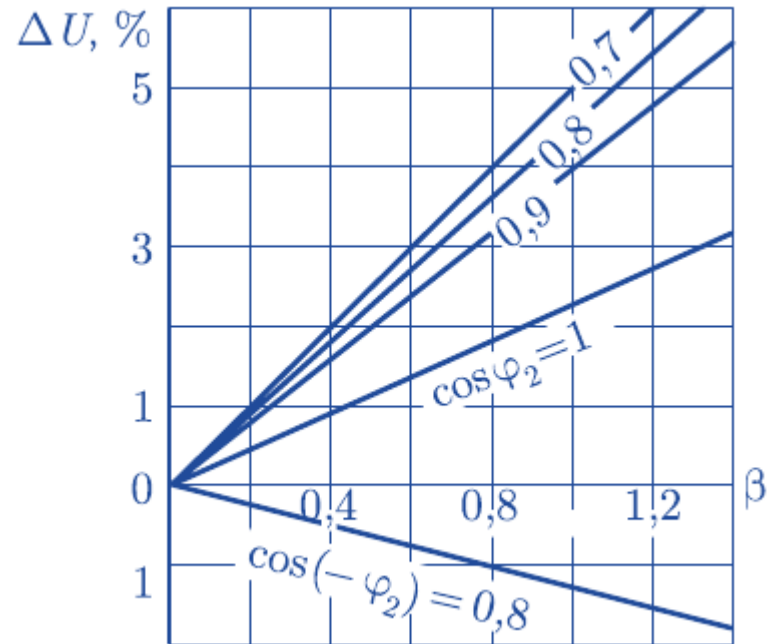




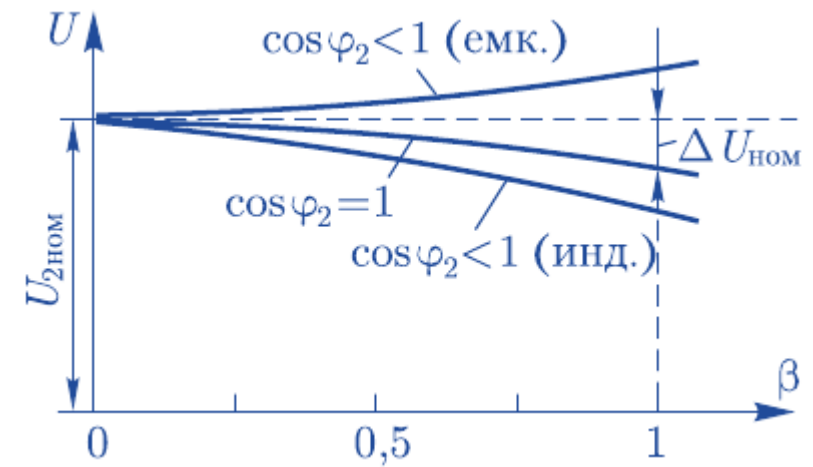
## 7. Характеристики трансформаторов

### Изменение вторичного напряжения трансформатора

Зависимость  $\Delta U$  от нагрузки (а) и коэффициента мощности нагрузки (б)  
трехфазного трансформатора (100 кВ·А; 6,3/0,22 кВ;  $u_k = 5,4\%$ ;  $\cos \varphi_k = 0,4$ )



### Внешние характеристики трансформатора



$$\Delta U = \beta(u_{k,a} \cos \varphi_2 + u_{k,p} \sin \varphi_2).$$

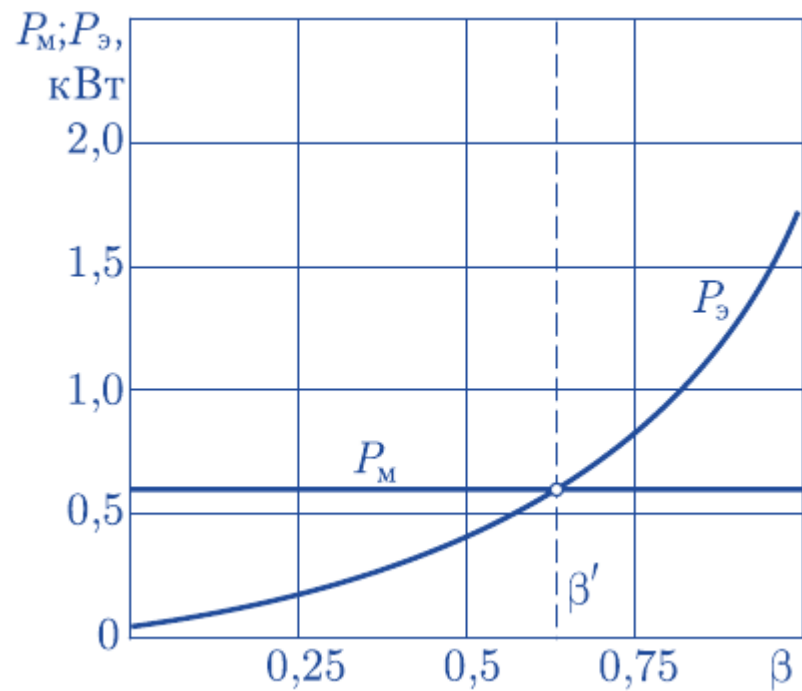
$$\beta = I_2 / I_{2\text{НОМ}} - \text{коэффициент нагрузки}$$



## 7. Характеристики трансформаторов

### Потери и КПД трансформатора

Зависимость потерь трансформатора от его нагрузки



$$P_3 = \beta^2 P_{\text{к.ном}}$$

Энергетическая  
диаграмма  
трансформатора

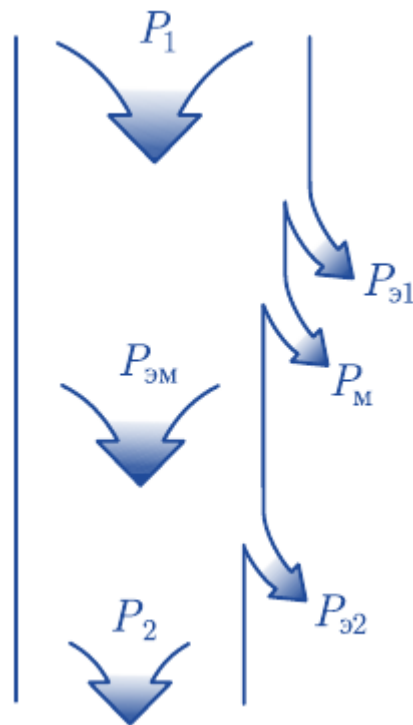
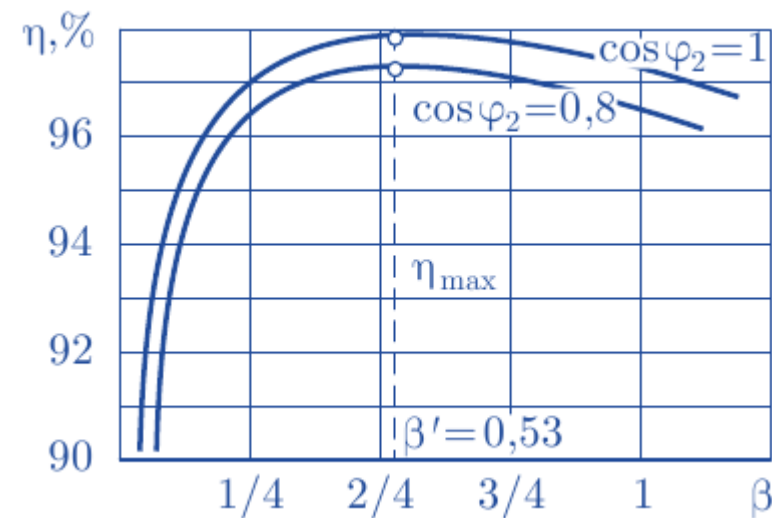


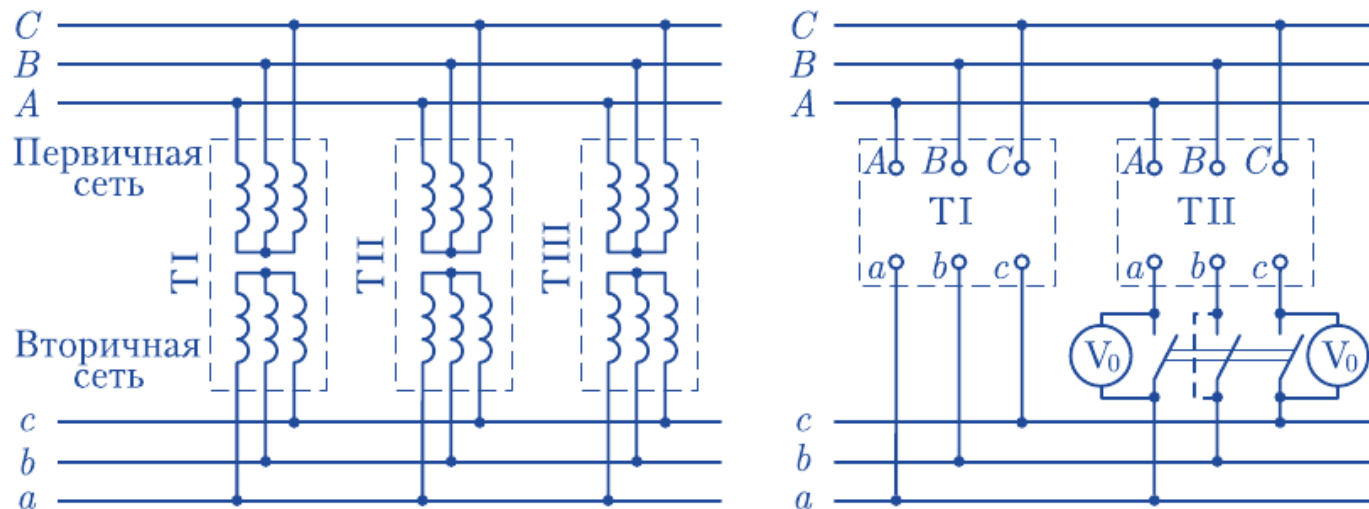
График зависимости КПД трансформатора от нагрузки



$$\eta = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_{0\text{ном}} + \beta^2 P_{\text{к.ном}}}.$$

## 8. Параллельная работа трансформаторов

### Включение трансформаторов на параллельную работу



Допускается параллельная работа двухобмоточных трансформаторов при следующих условиях:

1. При одинаковом первичном напряжении вторичные напряжения должны быть равны;
2. Трансформаторы должны принадлежать к одной группе соединения;
3. Трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения короткого замыкания;
4. Отношение номинальных мощностей трансформаторов, включенных параллельно, было не более чем 3:1.

## 9. Бақылау сұрақтары

Келесі сұрақтарға жауап беріңіз:

1. Трансформатордың негізгі элементтерінің мақсатын түсіндіріңіз.
2. Трансформатор қандай физикалық құбылысқа негізделген?
3. Түрлендіру коэффициенті дегеніміз не?
4. Трансформаторларды қосу схемаларының нұсқаларын атаңыз.
5. «Трансформатор орамасының қосылу тобы» ұғымын түсіндіріңіз.
6. Автотрансформаторлардың артықшылықтары мен кемшіліктері қандай?
7. Трансформатордың конструкциясын сипаттаңыз.
8. Трансформатордағы толқындық құбылыстардың табиғатын түсіндіріңіз.
9. Трансформатордағы қуат жоғалтуының қандай түрлері бар?
10. Трансформатордың ПӘК дегеніміз не?
11. Трансформаторды суытудың негізгі әдістерін атаңыз.
12. Ток және кернеу трансформаторларының мақсаты мен құрылымы қандай?