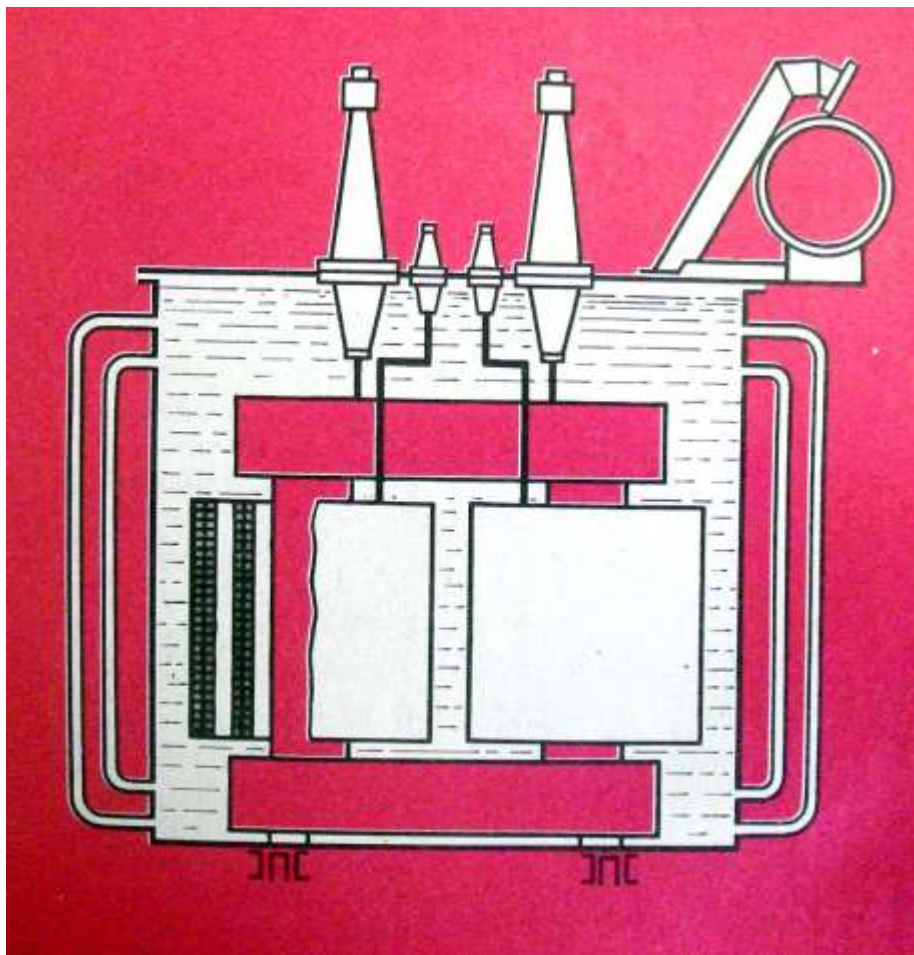


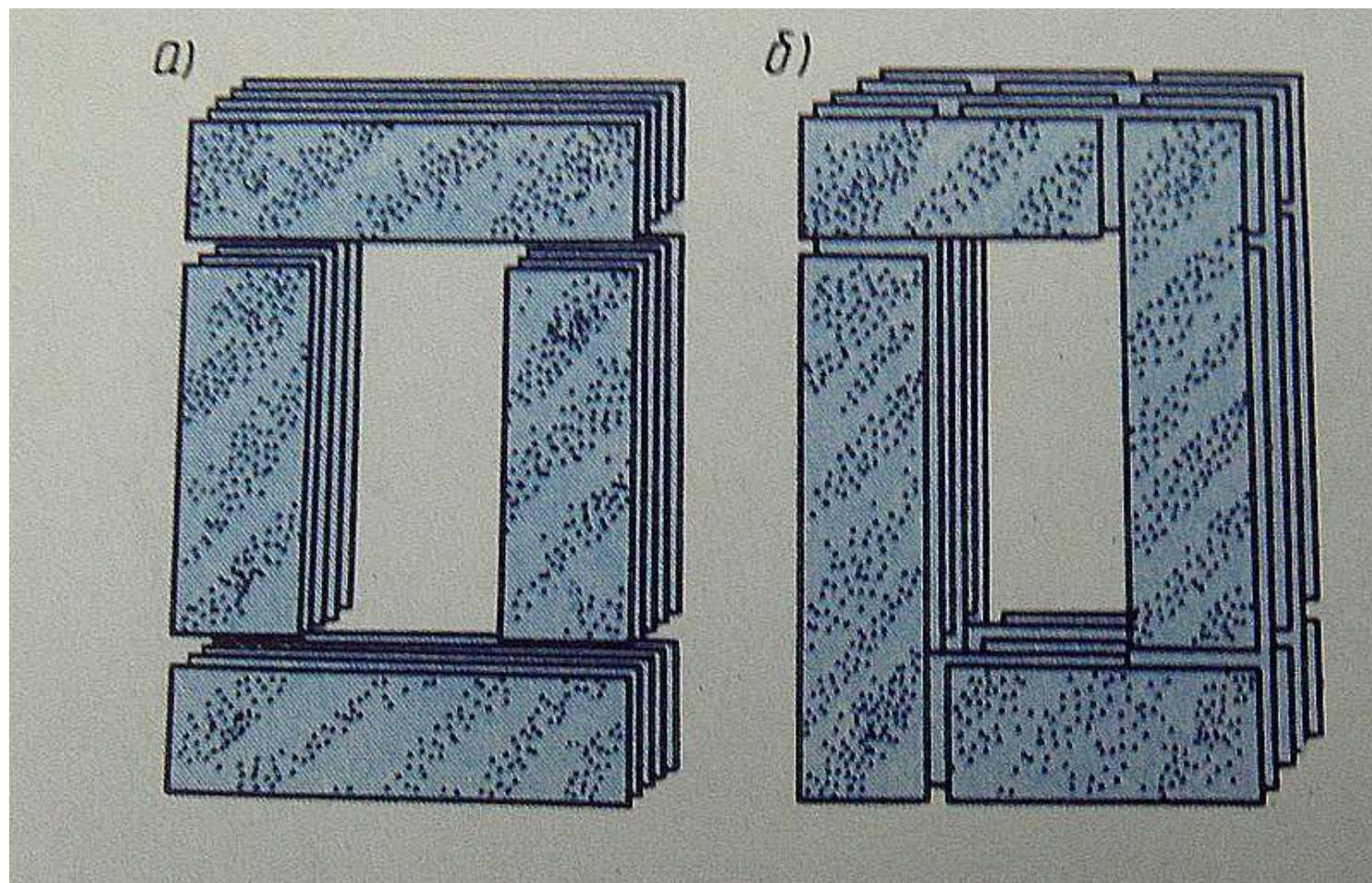
# **Трансформаторы**

**Трансформаторы** – это статические электромагнитные устройства, имеющие 2е или более индуктивно связанные обмотки и предназначены для преобразования энергии одного напряжения в энергию другого напряжения.

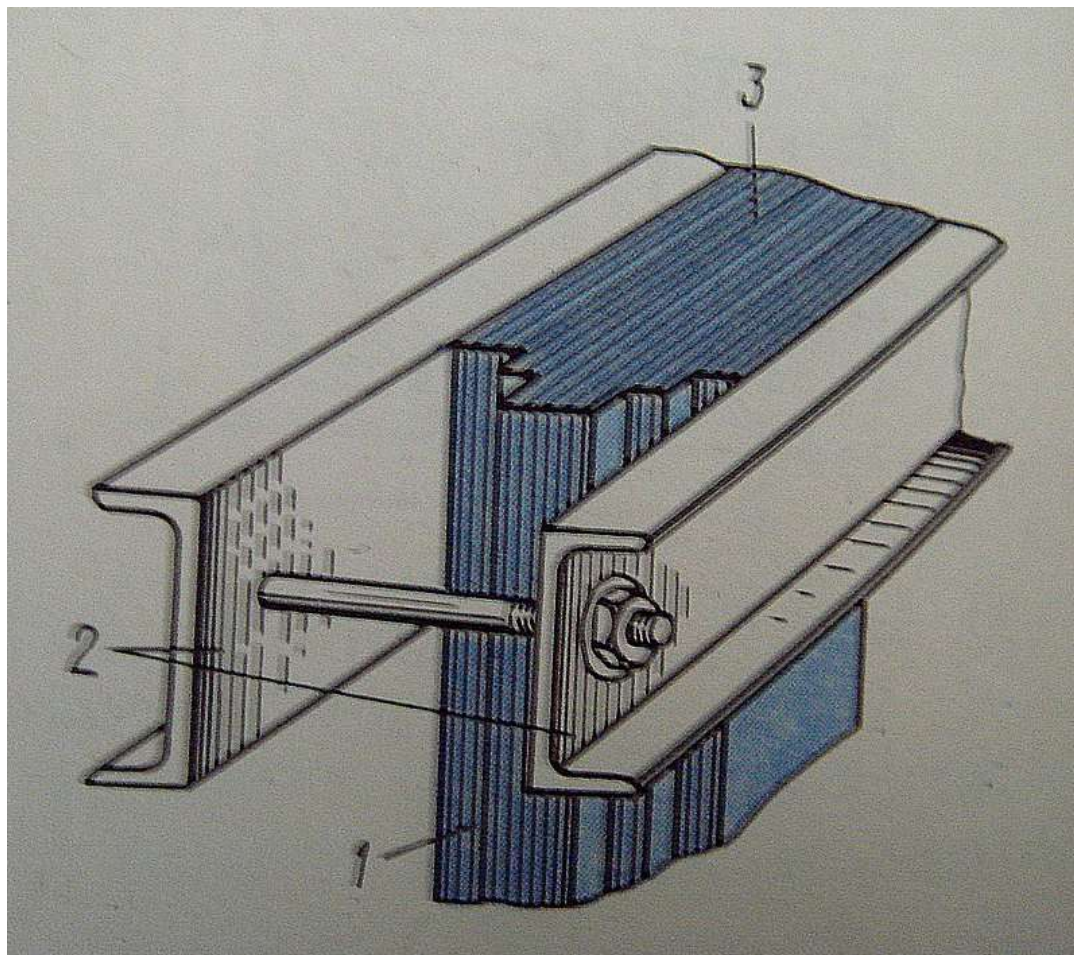
# Однофазный трансформатор



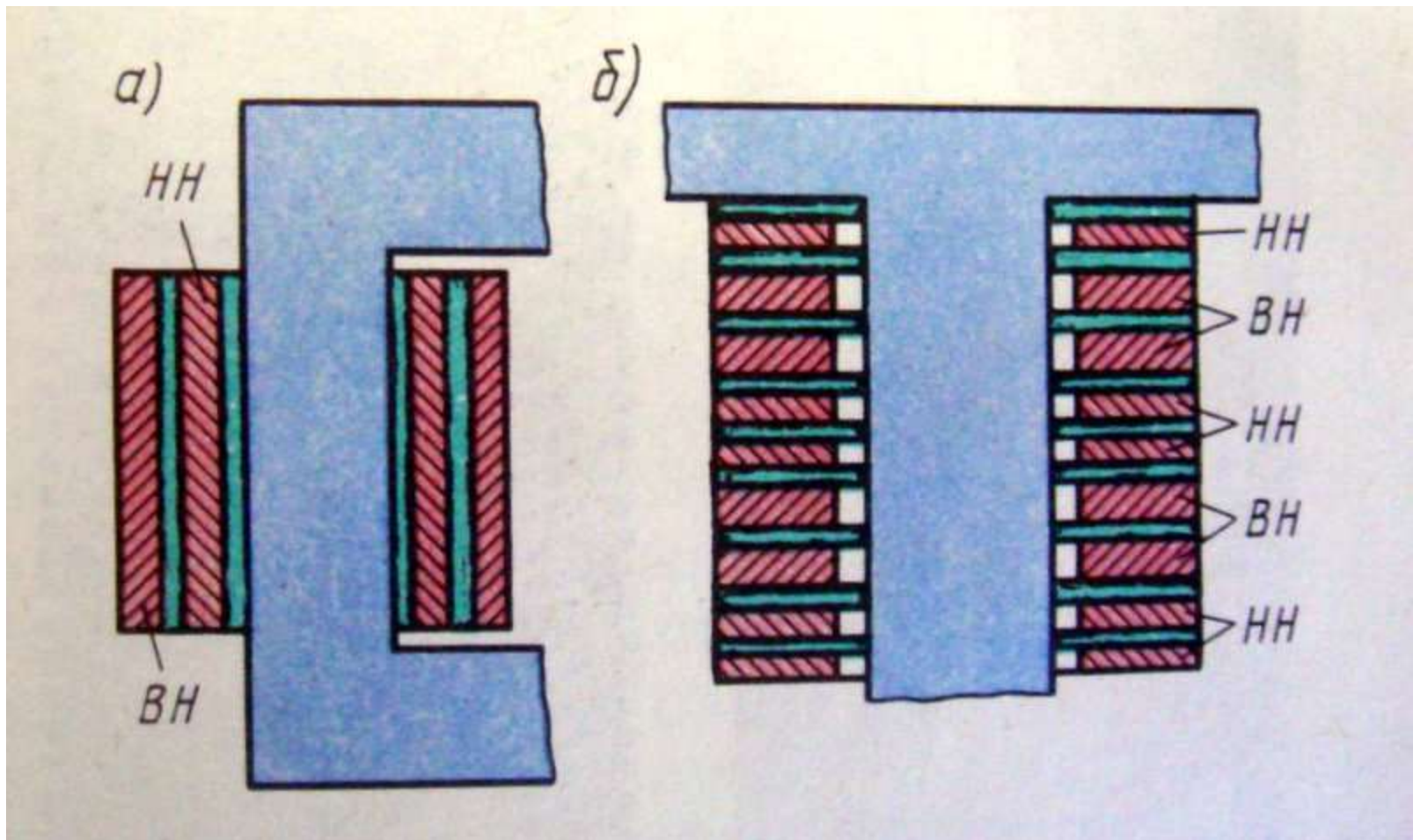
# Магнитопровод



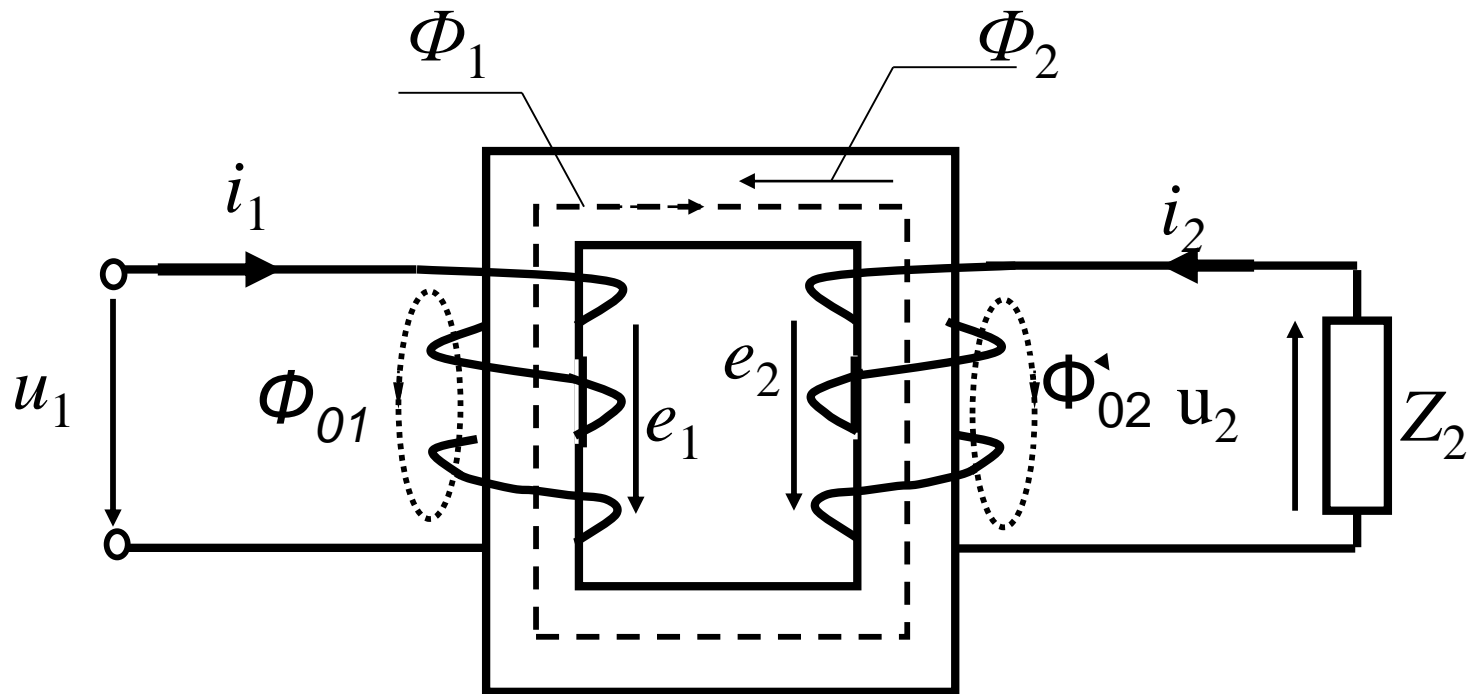
# Крепление магнитопровода



# Обмотки трансформатора



# Принцип действия



# ***Названия***

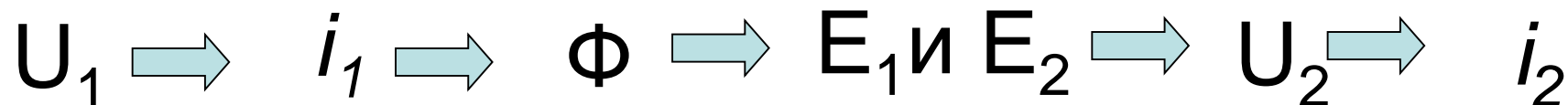
***Первичная*** обмотка – присоединена к источнику питания.

***Вторичная*** обмотка – присоединена к нагрузке.

По уровню напряжения обмотки различают: ***высшая, низшая***

Между обмотками нет гальванической связи. Энергия передается магнитным полем (магнитным потоком)

## Условная схема работы трансформатора



$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt} \qquad e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

$W_1$  и  $W_2$  – число витков в первичной и вторичной обмотках

# Уравнения напряжения тр-ра

Пусть  $\Phi = \Phi_{max} \sin \omega t$

$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega W_1 \Phi_m \cos \omega t$$

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

$$e_1 = \omega W_1 \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

По аналогии:

$$e_2 = \omega W_2 \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

Э.Д.С.  $e_1$  и  $e_2$  отстают по фазе от  $\Phi$  на угол  $\pi/2$

Амплитуда  $E_{1max} = \omega W_1 \Phi_m$

При  $E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}}$  и  $\omega = 2\pi f$

Получим действующее значение Э.Д.С.

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} W_1 f \Phi_m \quad \text{или}$$

$$E_1 = 4.44 W_1 f \Phi_m$$

Это трансформаторное  
э.д.с.

По аналогии

$$E_2 = 4.44 W_2 f \Phi_m$$

Отношение э.д.с. обмотки высшего напряжения к э.д.с. обмотки низшего напряжения называется коэффициентом трансформации

$$n_{12} = E_1 / E_2 = W_1 / W_2$$

Учитывая, что  $P_1 \approx P_2$  или  $U_{1H} I_{1H} \approx U_{2H} I_{2H}$

$$n_{12} \approx U_{1H} / U_{2H} \approx I_{2H} / I_{1H}$$

# Потоки рассеяния в тр-рах

- Токи  $I_1$  и  $I_2$  в обмотках тр-ра дополнительно создают потоки рассеяния  $\Phi_{01}$  и  $\Phi_{02}$ , каждый из которых сцеплен только со своей обмоткой и индуцирует в ней соответствующие э.д.с. рассеяния:
- $e_{01} = -L_{01}(di_1 / dt)$ ,  $e_{02} = -L_{02}(di_2 / dt)$   
 $L_{01}$  и  $L_{02}$  – индуктивности рассеяния обмоток

Потоки рассеяния в основном замыкаются по воздуху, маслу, меди, магнитная проницаемость которых постоянна, соответственно:

$$L_{01} \text{ и } L_{02} = \text{const}$$

Тогда действующие э.д.с. рассеяния:

$$\underline{E}_{01} = -j \underline{I}_1 X_1 \quad \underline{E}_{02} = -j \underline{I}_2 X_2$$

$$X_1 = \omega L_{01} \quad X_2 = \omega L_{02}$$

Таким образом, в каждой обмотке трансформатора индуцируется по  $2e$  э.д.с.: от основного потока  $\Phi$  и от потоков рассеяния  $\Phi_{01}$  и  $\Phi_{02}$

Для первичной цепи тр-ра, включенной на  $U_1$ , с учетом падения напряжения на активном сопротивлении  $R_1$ , можно записать баланс напряжений:

$$\underline{U}_1 + \underline{E}_1 + \underline{E}_{01} = \underline{I}_1 R_1 \quad \text{или}$$

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + jX_1\underline{I}_1 + R_1\underline{I}_1 \quad \text{или}$$

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1(R_1 + jX_1) \quad \text{или}$$

баланс напряжений в первичной обмотке:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1\underline{Z}_1$$

$\underline{Z}_1$  – мала по величине, то  $\underline{U}_1 \approx -\underline{E}_1$

Для вторичной обмотки (без вывода)  
можно записать:

$$\underline{E}_2 + \underline{E}_{02} = \underline{I}_2 R_2 + \underline{I}_2 \underline{Z}_H \quad \underline{U}_2 = \underline{I}_2 \underline{Z}_H$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - j \underline{I}_2 X_2 - \underline{I}_2 R_2$$

Баланс напряжений на вторичной  
обмотке:

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 \underline{Z}_2 = \underline{I}_2 \underline{Z}_H$$

$\underline{Z}_2$  – мало, то  $\underline{U}_2 \approx \underline{E}_2$

# Уравнения магнитодвижущих сил И ТОКОВ

- Рассмотрим тр-р в режиме холостого хода, т.е.  $I_2 = 0$ ,  $I_0$  – ток в первичной обмотке
- Магнитодвижущая сила (м.д.с.  $M = I_0 W_1$ ) наводит основной магнитный поток

$$\Phi_{\max} = \sqrt{2} \frac{I_0 W_1}{R_M}$$

Где  $R_M$  – магнитное сопротивление магнитопровода

Подключение нагрузки к вторичной обмотке ( $Z_H$ ) вызывает ток  $I_2$  и, соответственно, увеличивается ток в первичной обмотке с  $I_0$  до  $I_1$

Тогда в создании основного магнитный поток  $\Phi_{max}$ , который остается неизменным для конкретного тр-ра, участвуют м.д.с.  $I_1W_1$  и  $I_2W_2$ :

$$\Phi_{MAX} = \frac{\sqrt{2}(I_1W_1 + I_2W_2)}{R_M}$$

Этот же поток можно определить из трансформаторной э.д.с.

$$\Phi_{MAX} = \frac{E_1}{4.44 \cdot W_1 f} \quad \text{При } \underline{E}_1 \approx I - \underline{U}_1 I$$

$$\Phi_{MAX} \approx \frac{U_1}{4.44 \cdot W_1 f} = const$$

Т.е.  $\Phi_{max}$  не зависит от нагрузки трансформатора, а определяется его конструкцией.

Тогда из полученных выражений  
можем записать:

$$\sqrt{2} \frac{\underline{I}_0 W_1}{R_M} = \sqrt{2} \frac{\underline{I}_1 W_1 + \underline{I}_2 W_2}{R_M} \quad \text{или}$$

$$\underline{I}_0 W_1 = \underline{I}_1 W_1 + \underline{I}_2 W_2$$

или

$$\underline{I}_1 W_1 = \underline{I}_0 W_1 + (-\underline{I}_2 W_2)$$

Составляющая ( $I_0 W_1$ ) наводит в магнитопроводе тр-ра основной магнитный поток  $\Phi_{\text{MAX}}$ , а составляющая ( $-I_2 W_2$ ) уравнивает м.д.с. вторичной обмотки ( $I_2 W_2$ )

Увеличение тока во вторичной обмотке (увеличение отбора мощности), автоматически увеличивает ток в первичной обмотке и отбор мощности из сети

# Схема замещения однофазного трансформатора

Из уравнения баланса м.д.с.

можно записать

$$I_1 = I_0 - I_2 \frac{W_2}{W_1}$$

или

$$I_1 = I_0 + \left(-I_2 \frac{W_2}{W_1}\right) = I_0 + \left(-I_2 n_{21}\right)$$

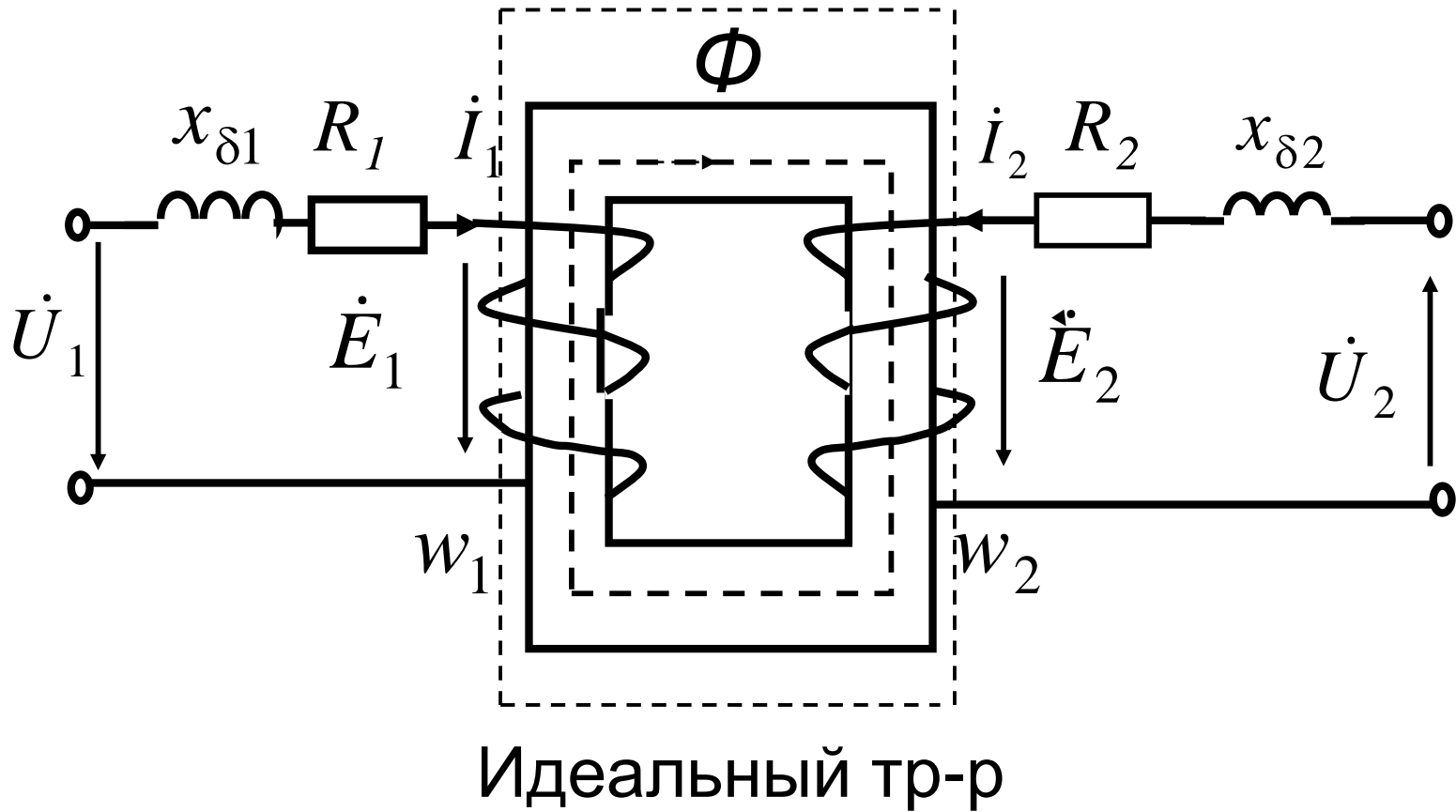
$$I_1 = I_0 + I'_2$$

Где приведенный ток

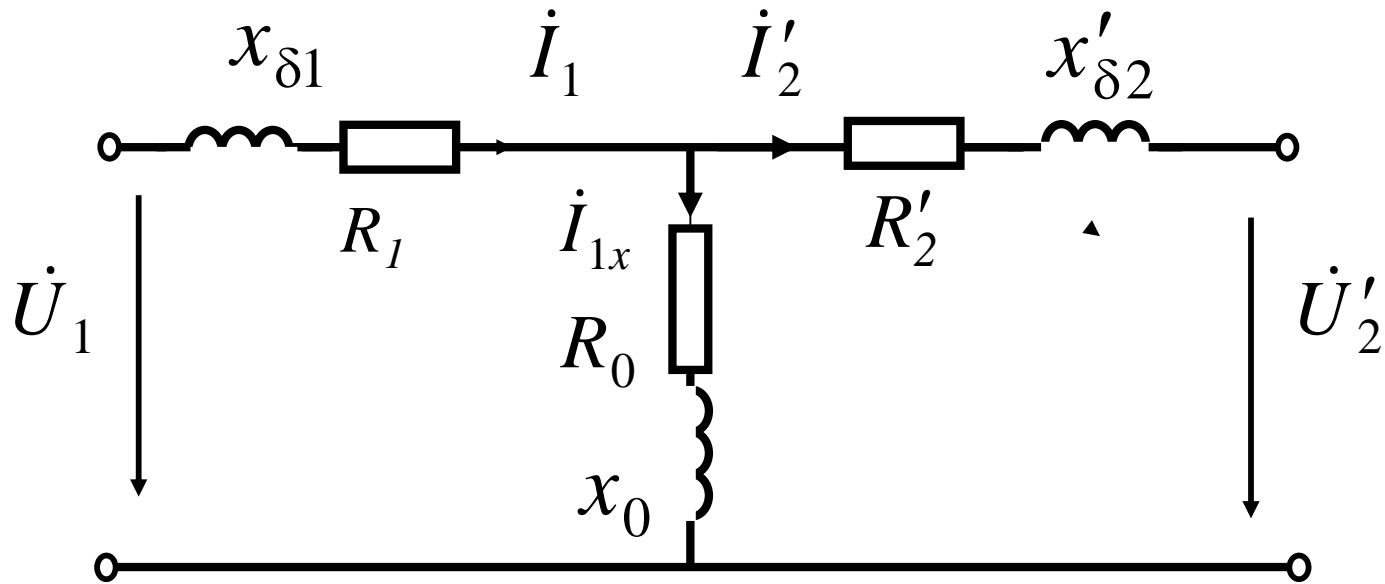
$$I'_2 = -I_2 n_{21}$$

Ток в первичной цепи можно рассматривать как сумму двух токов

# Схема реального однофазного тр-ра



# T-образная схема замещения трансформатора



# Приведенные параметры вторичной обмотки трансформатора (без вывода)

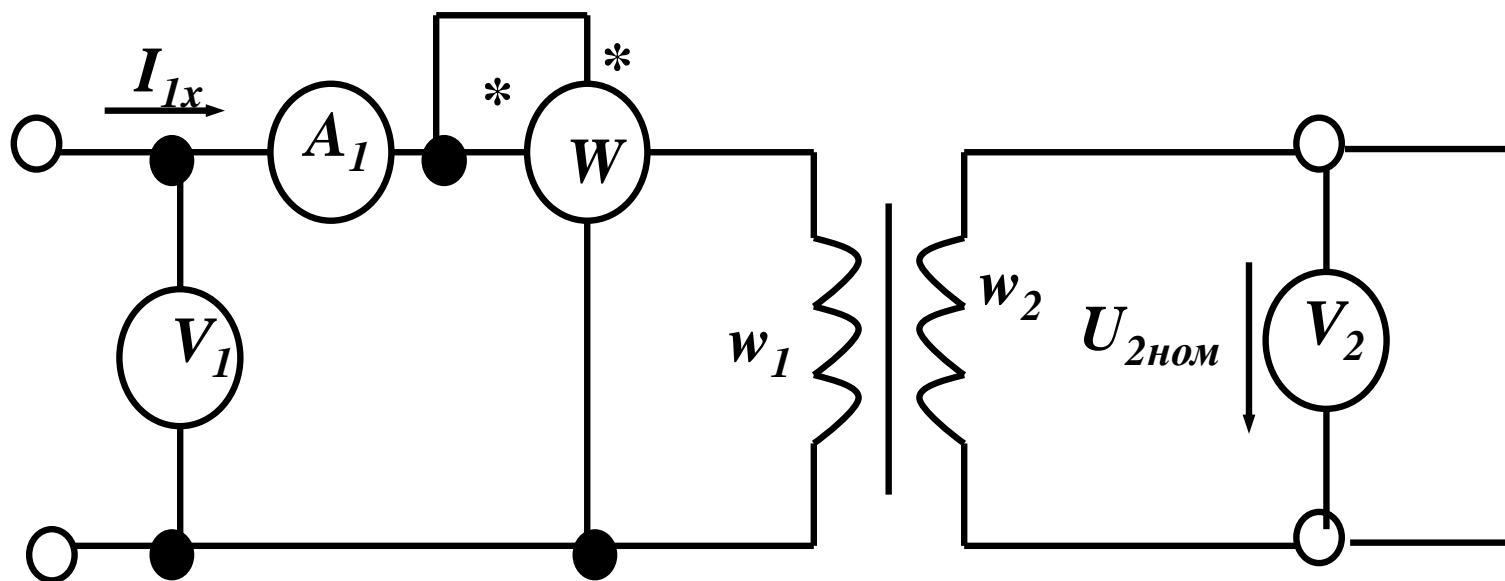
$$I_2' = -I_2 n_{21} \quad X_{\delta 2}' = X_{\delta 2} n_{12}^2$$

$$U_2' = -U_2 n_{12} \quad R_2' = R_2 n_{12}^2$$

где  $n_{21} = W_2 / W_1$      $n_{12} = W_1 / W_2$

# Опытное определение параметров однофазного трансформатора

## Опыт холостого хода



**Из опыта ХХ можно найти**

**1. Параметры ветви намагничивания:**

$$\mathbf{Z}_0 = \frac{U_{1ном}}{I_{1x}} = \frac{U_{1x}}{I_{1x}} = \mathbf{R}_0 + j \cdot \mathbf{x}_0$$

$$\mathbf{R}_0 = \frac{P_x}{I_{1x}^2} \quad \mathbf{x}_0 = \sqrt{\mathbf{Z}_0^2 - \mathbf{R}_0^2}$$

## 2. Потери в стали

$$\Delta P_{\text{магн}} = P_x$$

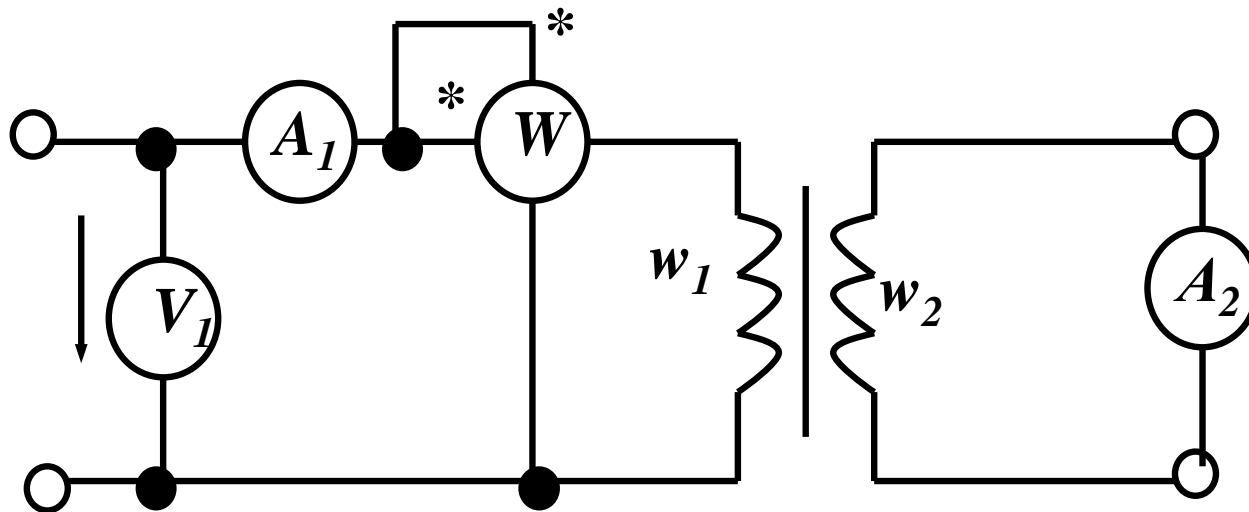
## 3. Коэффициент трансформации

$$n = \frac{U_{1x}}{U_{2x}}$$

## 4. Коэффициент мощности при ХХ

$$\cos \varphi_x = \frac{P_x}{U_{1x} \cdot I_{1x}}$$

# Опыт короткого замыкания



# Из опыта КЗ можно найти

1. Мощность потерь при КЗ и  $I_{\text{НОМ}}$

$$P_K = R_1 \cdot I_{1\text{НОМ}}^2 + R_2 \cdot I_{2\text{НОМ}}^2$$

2. Параметры вторичной ветви

схемы замещения:  $Z_K = U_{1K} / I_{1\text{НОМ}}$

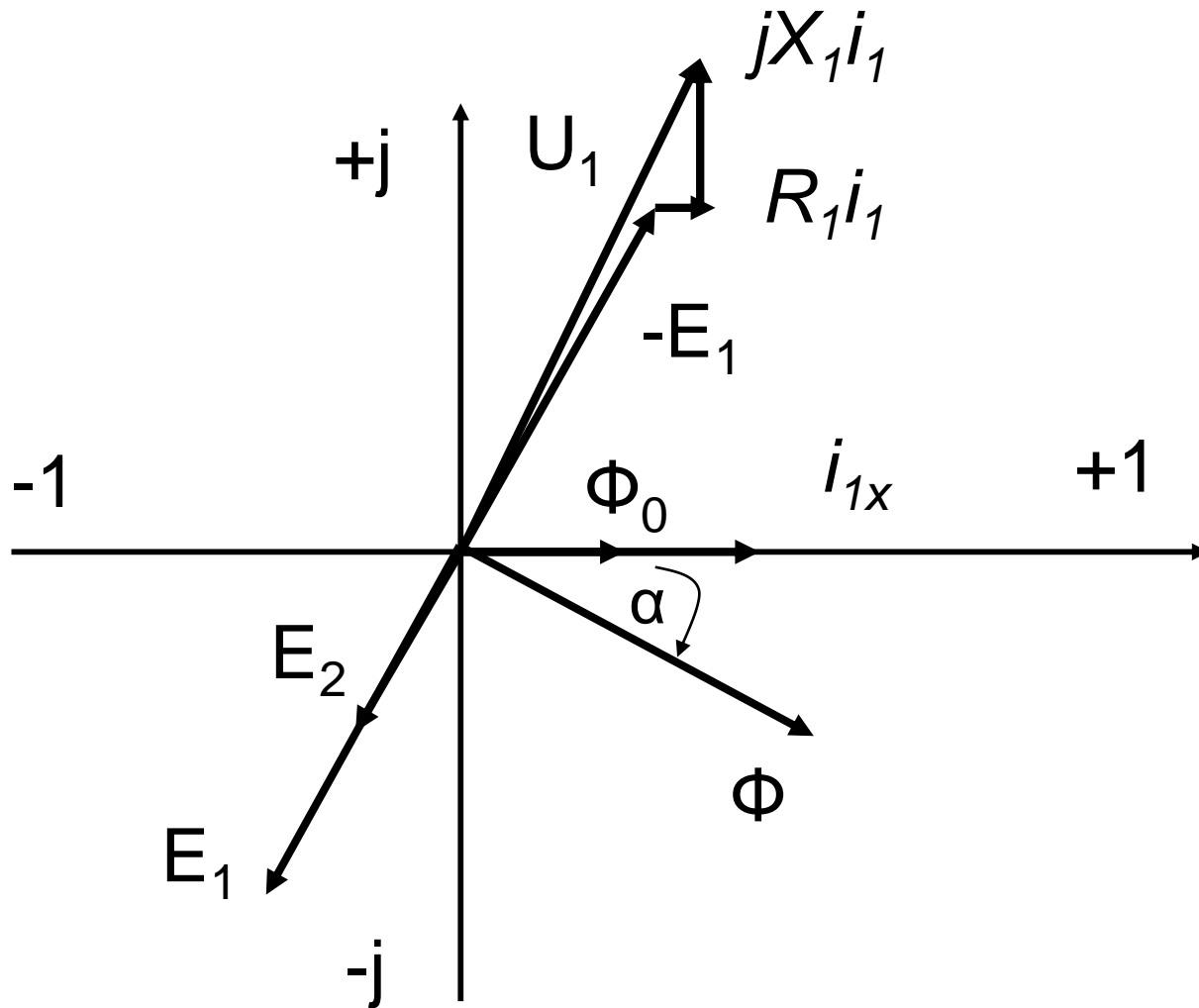
$$R_K = P_K / I_{1\text{НОМ}}^2$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}$$

3. Коэффициент  
мощности при КЗ

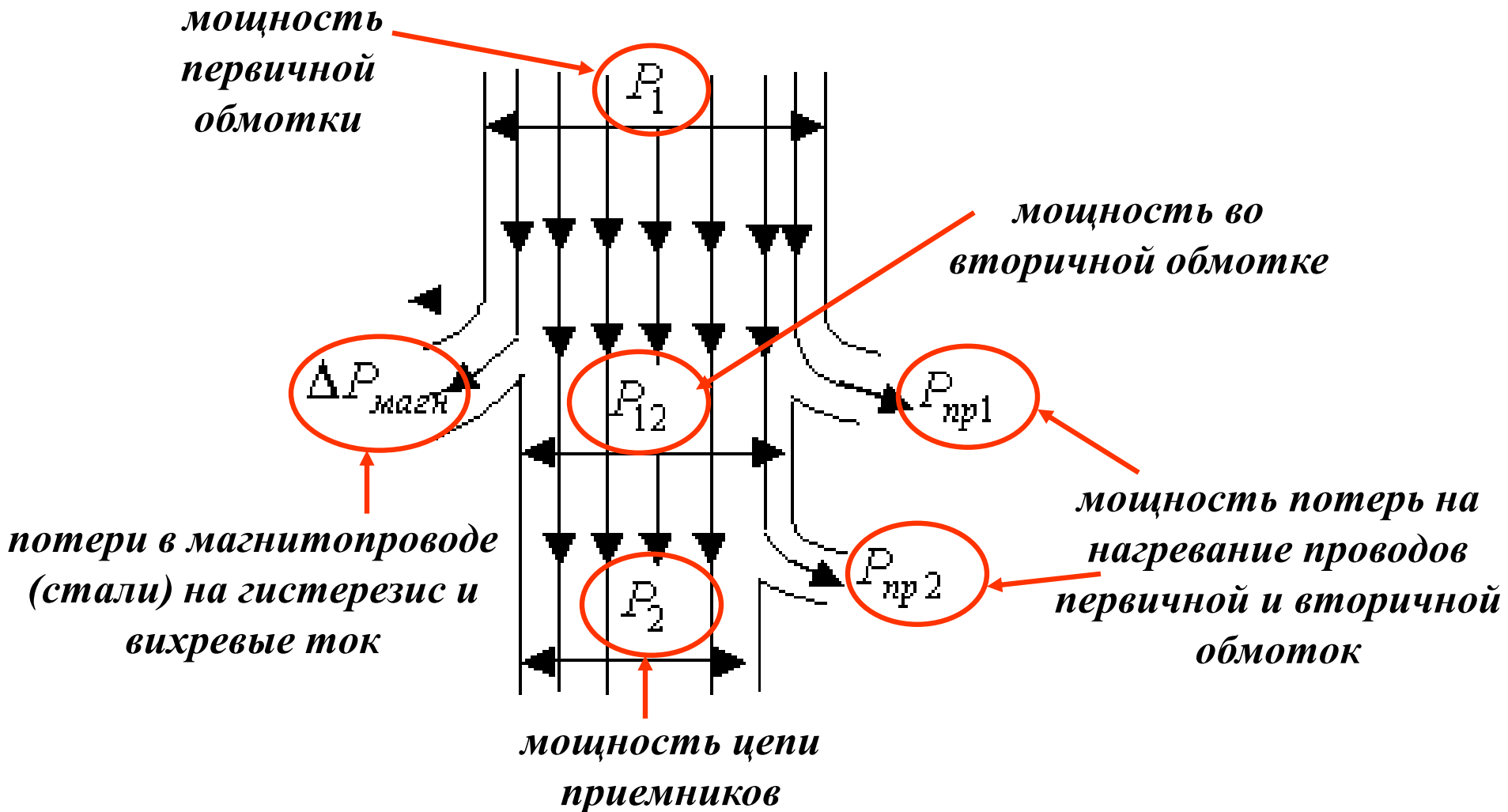
$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{U_{1K} \cdot I_{1\text{НОМ}}}$$

# Векторная диаграмма трансформатора на холостом ходу



# Потери мощности и КПД ТР-РА

## Энергетическая диаграмма трансформатора



Т.к.  $\Phi_m = const$



$$\Delta P_{\text{магн}} = P_x$$

коэффициент  
нагрузки ТР

$$\beta = \frac{I_1}{I_{1\text{ном}}}$$

$$\Delta P_{\text{эл}} = P_{\text{пр1}} + P_{\text{пр2}} = R_K I_1^2 = \beta^2 P_K$$

мощность потерь КЗ

$$P_K = R_K \cdot I_{1\text{ном}}^2$$

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cos \varphi_2 = \beta \cdot S_{\text{ном}} \cos \varphi_2$$

$$S_{\text{ном}} = U_2 I_{2\text{ном}}$$

*КПД определяют по формуле:*

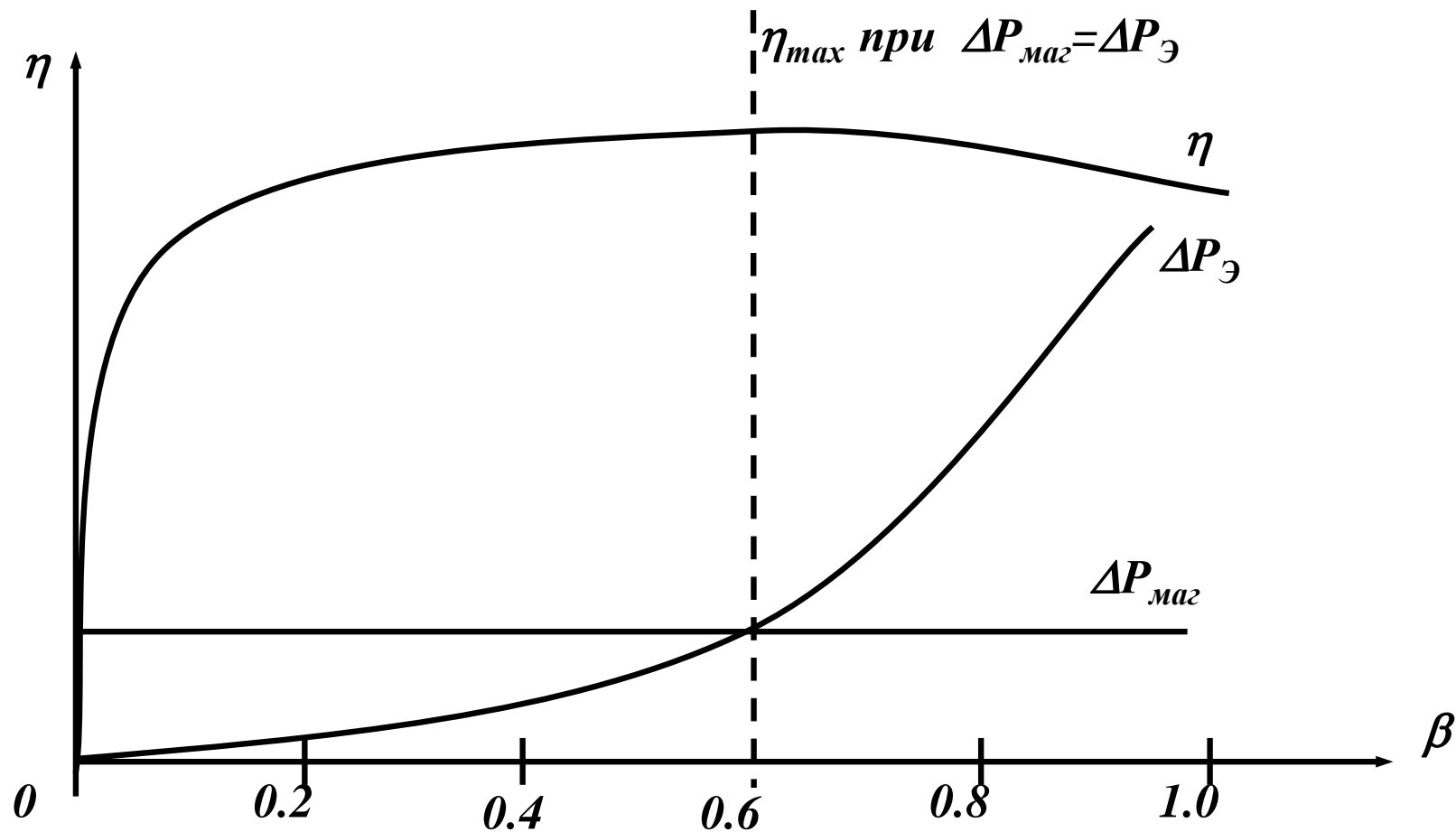
$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{эл} + \Delta P_{магн}} = \frac{\beta \cdot S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_{ном} \cos \varphi_2 + \beta^2 \cdot P_K + P_x}$$

*Оптимальный коэффициент нагрузки :*

$$\beta_{опт} = \sqrt{\frac{P_x}{P_K}} \quad \text{Обычно } P_x / P_K \approx 0.35 - 0.5$$

$$\beta_{опт} \approx 0.6 - 0.7$$

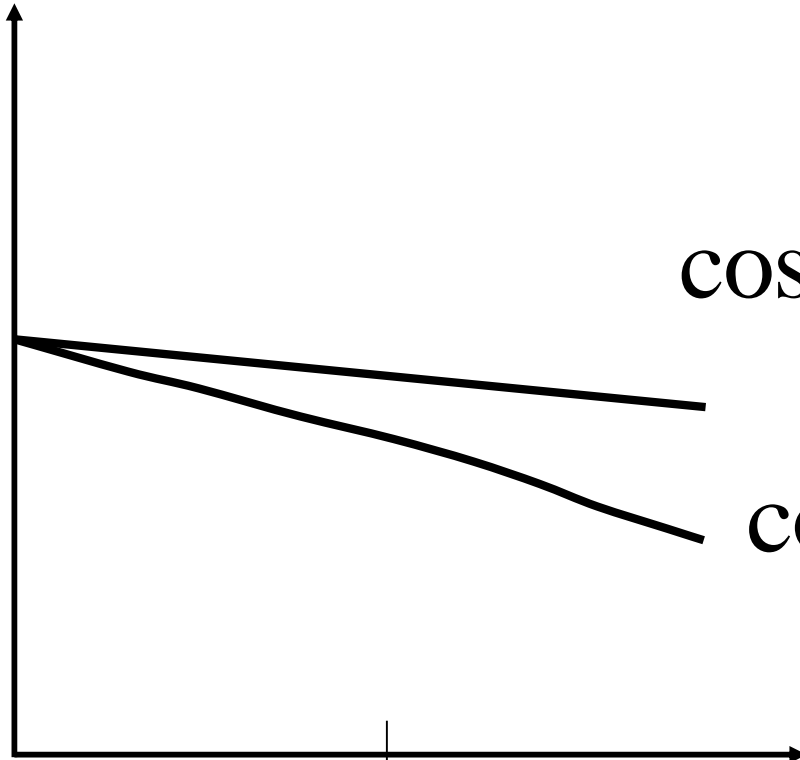
*Зависимость магнитных, электрических потерь и КПД от коэффициента нагрузки ТР*



# Внешняя характеристика тр-ра

- Для трансформатора очень важной является его **внешняя характеристика**, т.е.  $U_2=f(I_2)$  зависимость вторичного напряжения от тока нагрузки при фиксированном напряжении  $U_1$  и постоянном коэффициенте мощности приемника  $\cos\varphi$ .
- Чем больше ток нагрузки  $I_2$ , тем больше падение напряжения на сопротивлении обмоток трансформатора и, значит, тем меньше напряжение  $U_2$ .

$U_2$



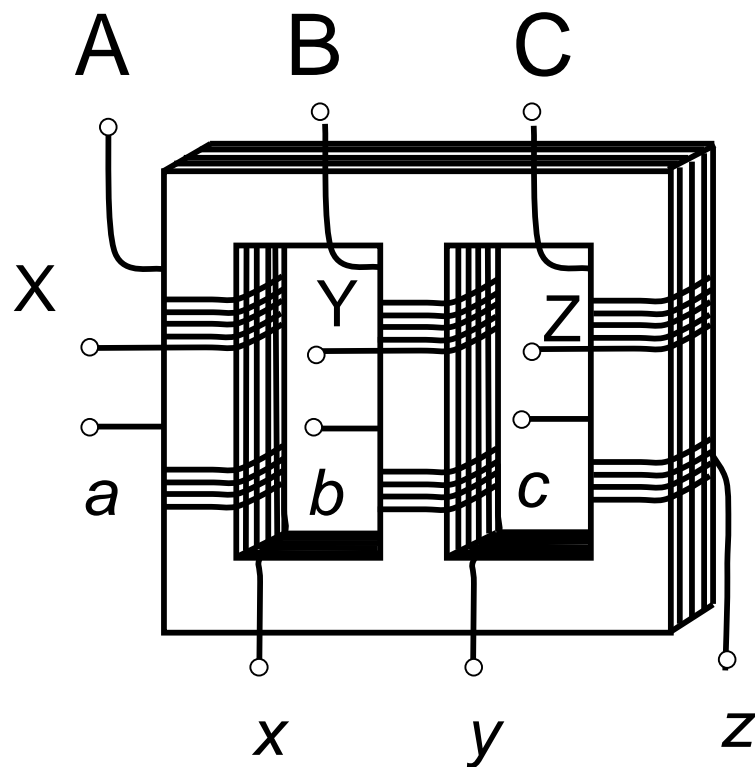
$\cos \varphi_2 = 1$

$\cos \varphi_2 = 0.8$

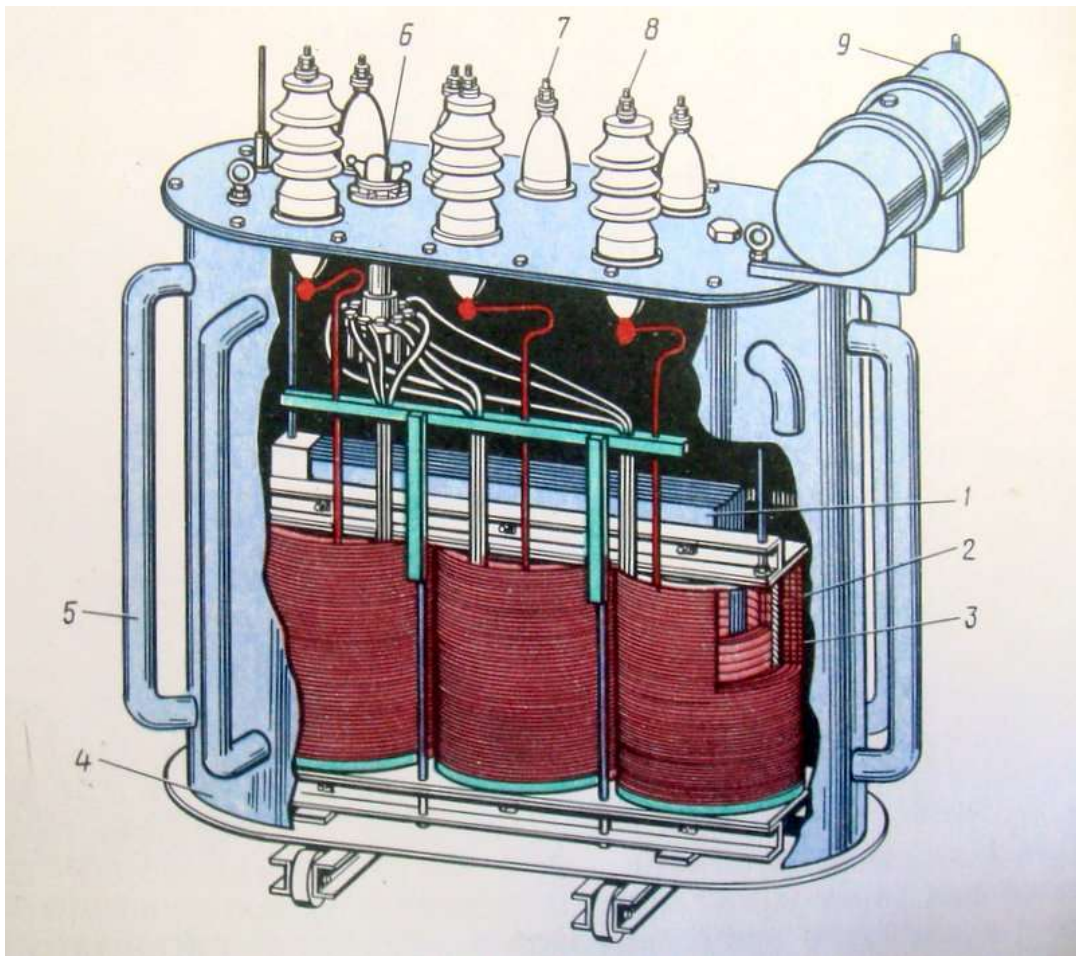
$I_{2ном}$

$I_2$

# Трехфазные трансформаторы

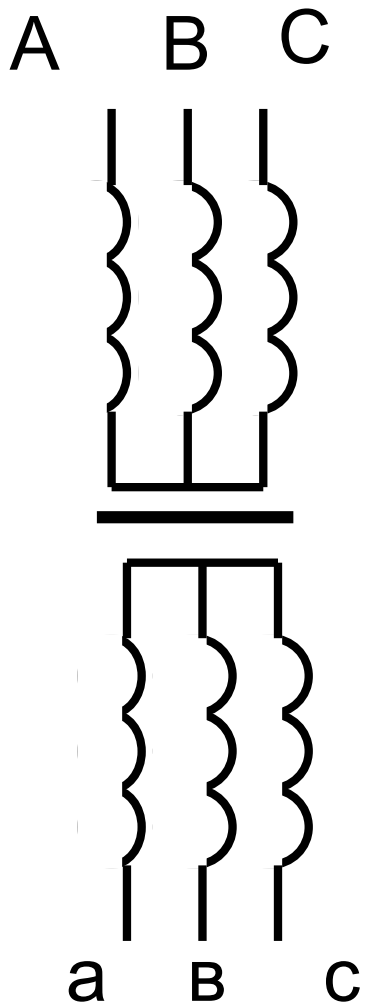


# Трехфазный трансформатор



# Принцип работы трехфазных тр-ров такой же, как и однофазных тр-ров.

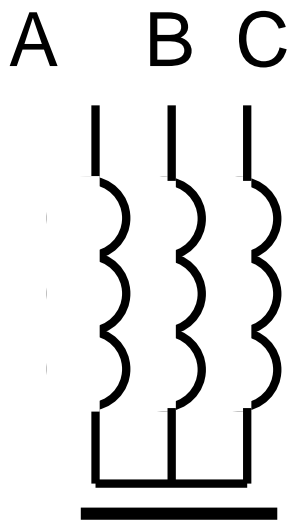
- При изготовлении трехфазных трансформаторов на каждый стержень его сердечника навивают по две обмотки: низкого напряжения, а поверх нее - высокого напряжения. Выводы обмоток принято обозначать в порядке чередования фаз: на стороне высшего напряжения выводы А, В, С – начала обмоток, Х, Y, Z – их концы; на стороне низшего напряжения начала *a*, *b*, *c*, концы – *x*, *y*, *z*.
- Эти выводы можно соединять по различным схемам ( в этом особенность 3х фазных трансформаторах)



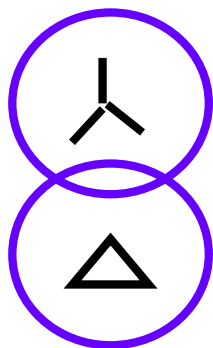
$$U_{Л1} = \sqrt{3}U_{\Phi1}$$

$$n_{\Phi} = n_{Л} = \frac{U_{Л1}}{U_{Л2}} = \frac{U_{\Phi1}}{U_{\Phi2}}$$

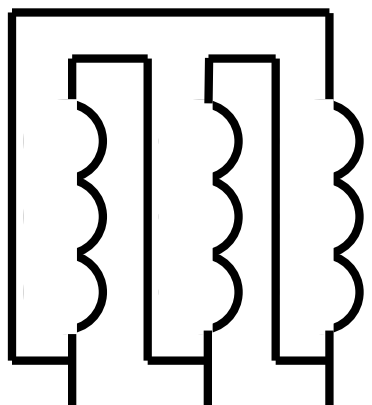
$$U_{Л2} = \sqrt{3}U_{\Phi2}$$



$$U_{\text{Л1}} = \sqrt{3}U_{\Phi 1}$$

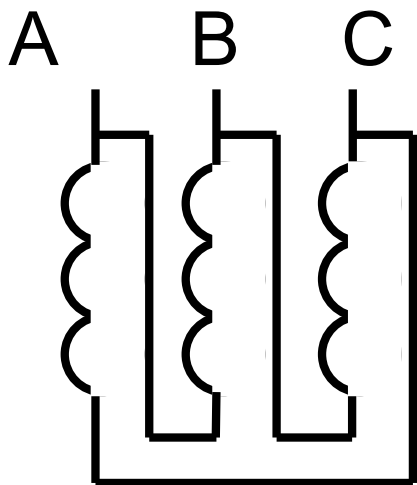


$$n_{\Phi} = \frac{U_{\Phi 1}}{U_{\Phi 2}} = \frac{U_{\text{Л1}}}{\sqrt{3}U_{\text{Л2}}}$$

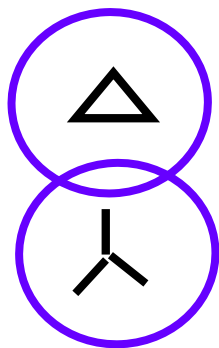


$$U_{\text{Л2}} = U_{\Phi 2}$$

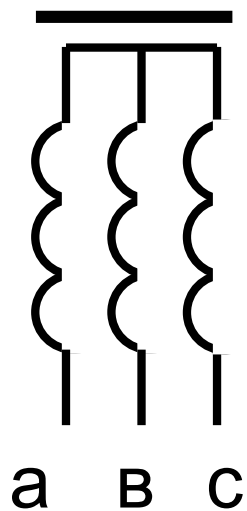
a B C



$$U_{\mathcal{L}1} = U_{\Phi 1}$$



$$n_{\Phi} = \frac{U_{\Phi 1}}{U_{\Phi 2}} = \sqrt{3} \frac{U_{\mathcal{L}1}}{U_{\mathcal{L}2}}$$



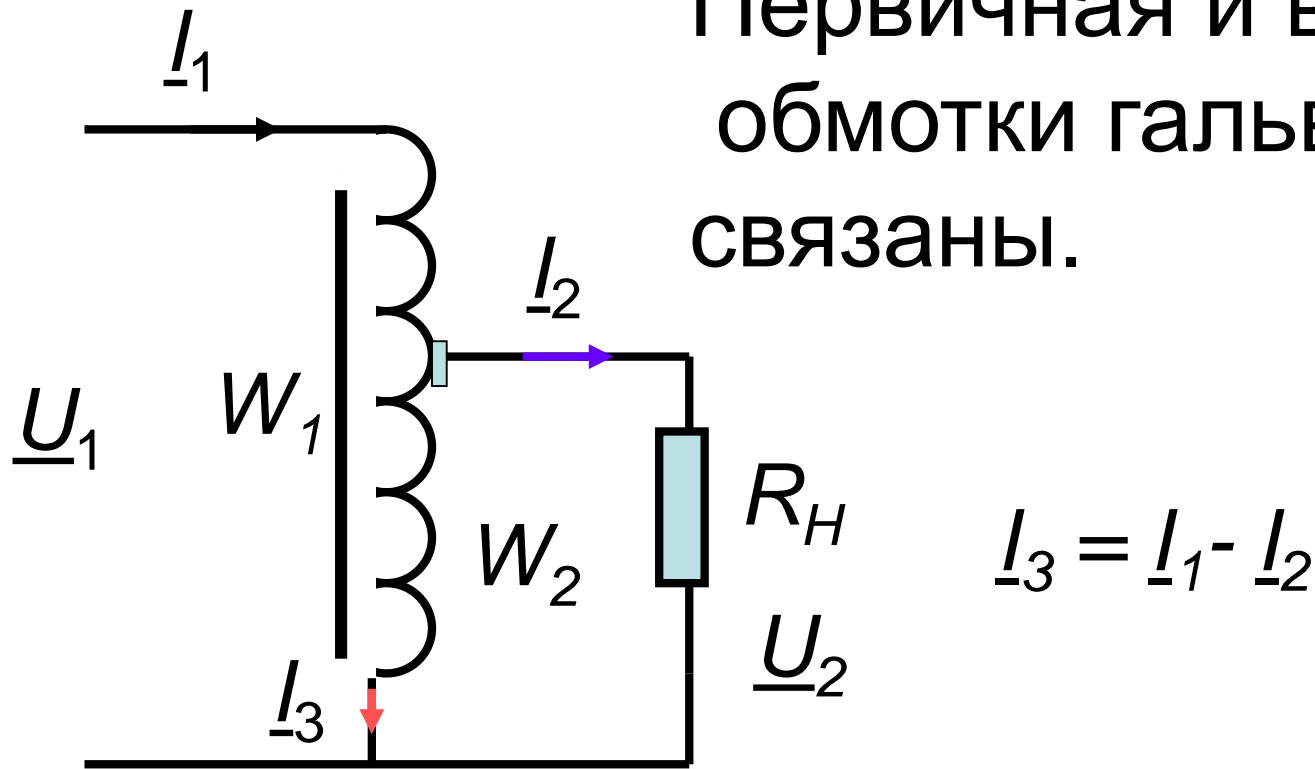
$$U_{\mathcal{L}2} = \sqrt{3} U_{\Phi 2}$$

# Специальные трансформаторы

- К специальным трансформаторам относятся: автотрансформаторы, измерительные трансформаторы, сварочные трансформаторы и т.д.
- Автотрансформаторы предназначены для регулирования напряжения в сетях
- Измерительные трансформаторы служат для включения в сеть измерительных приборов, элементов автоматики и т.д.
- Сварочные трансформаторы используются в технологиях соединения или разъединения металлов и др.

# Автотрансформатор

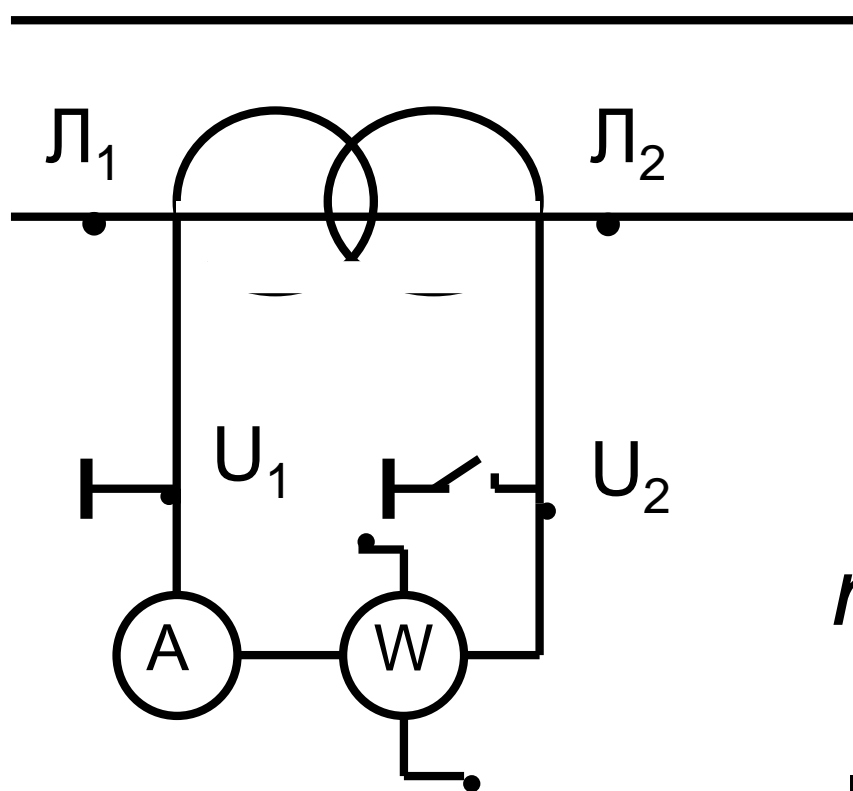
Первичная и вторичная обмотки гальванически связаны.



$$\underline{I}_3 = \underline{I}_1 - \underline{I}_2$$

$$n = W_1 / W_2 \approx \underline{I}_2 / \underline{I}_1 \approx \underline{U}_1 / \underline{U}_2$$

# Трансформатор тока

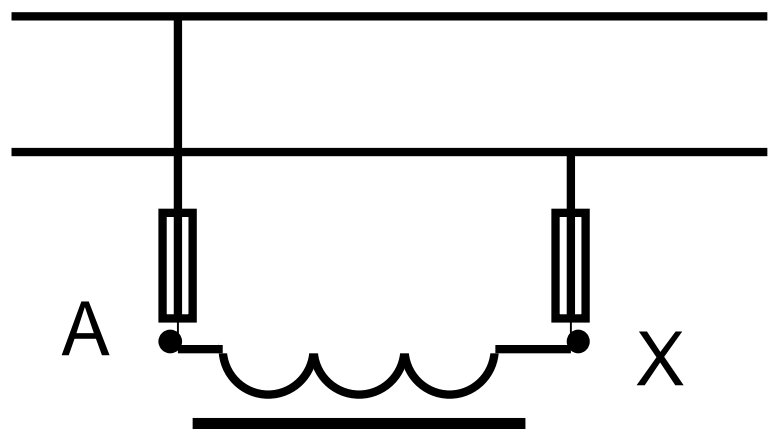


Это повышающий тр-р, работающий в режиме КЗ

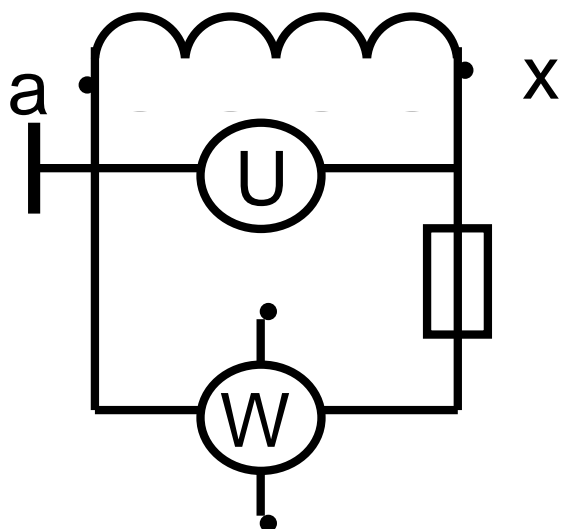
$$n = I_1 / I_2 \longrightarrow I_1 = n I_2$$

$$I_2 \leq 5 \text{ A}$$

# Трансформатор напряжения



Это понижающий тр-р,  
работающий в режиме  
близком к ХХ.



$$U_1/U_2 = n \rightarrow U_1 = nU_2$$

$$U_2 \leq 100 \text{ В}$$

# Сварочный трансформатор

