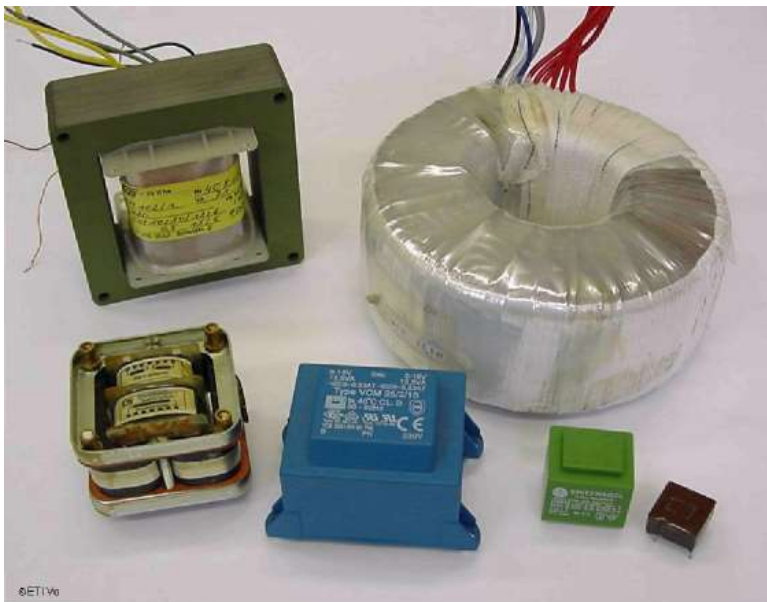


ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ и АППАРАТЫ

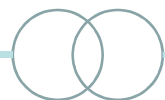
Трансформаторы

Трансформатор – это статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения при неизменной частоте.





Электрическая
станция



T1



T2

Потребитель

$U_{\Gamma} = 24 \text{ кВ}$

$I_{\Gamma} \approx 2,2 \text{ кА}$

$P_{\text{НОМ}} = 75 \text{ МВт}$

550кВ

750кВ

1150кВ

35кВ

10кВ

6кВ

660/380В

380/220В



Силовые трансформаторы позволяют экономично передавать и распределять электрическую энергию.

Трансформатор состоит из замкнутого сердечника (магнитопровода), на котором расположены обмотки первичного и вторичного возбуждения.

Первичная обмотка – присоединена к источнику питания.

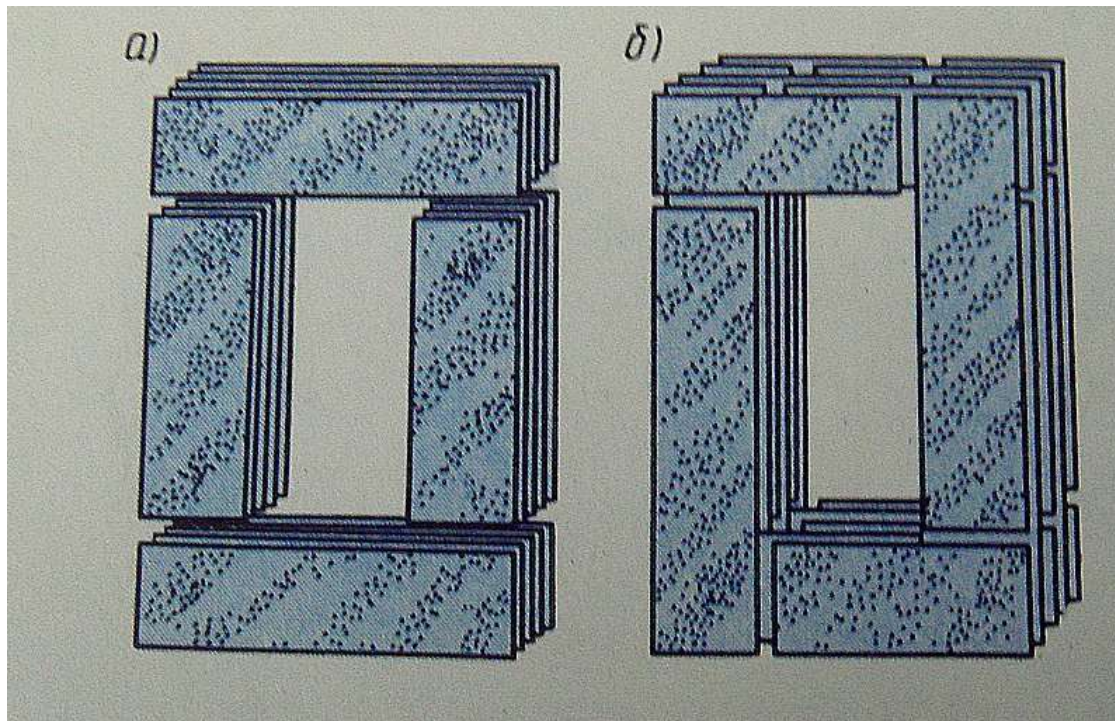
Вторичная обмотка – присоединена к нагрузке.

По уровню напряжения: *высшая, низшая*.

Между обмотками нет электрической связи.

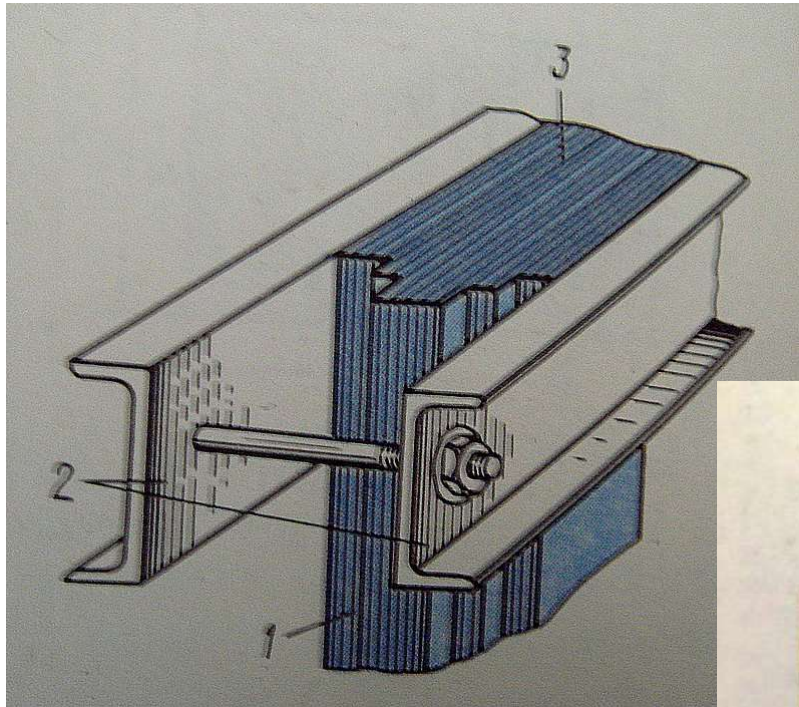
Энергия передается магнитным полем (магнитным потоком).

Магнитопровод

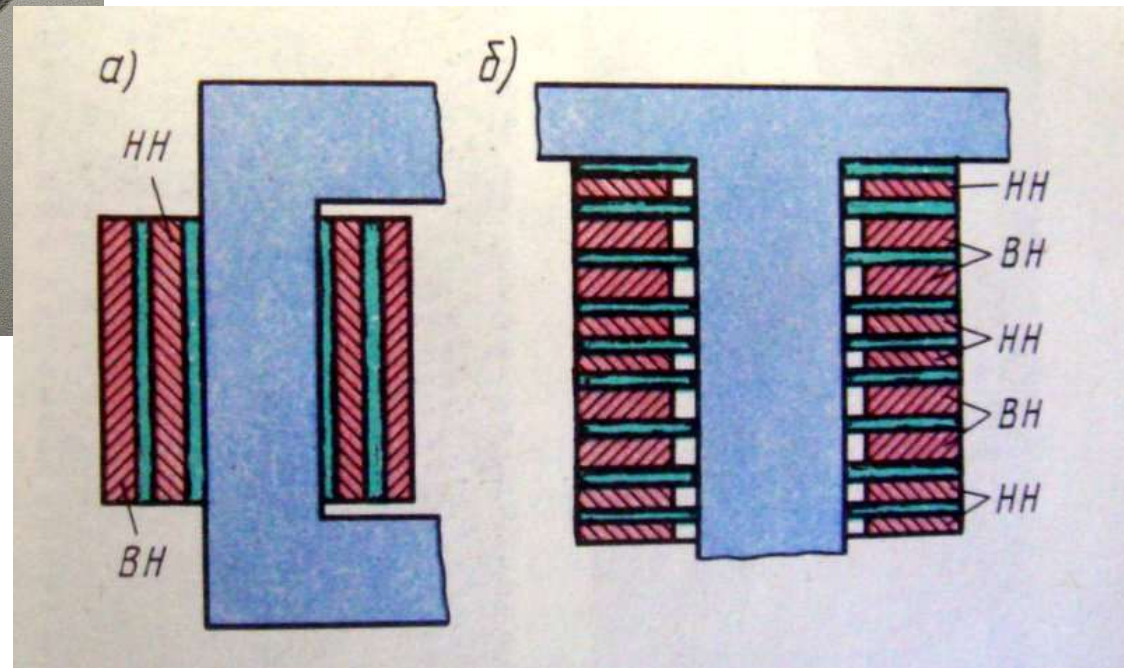


Для уменьшения потерь магнитопровод собирается из тонких листов электротехнической стали (0,35; 0,5 мм), которые изолируют друг от друга лаком.

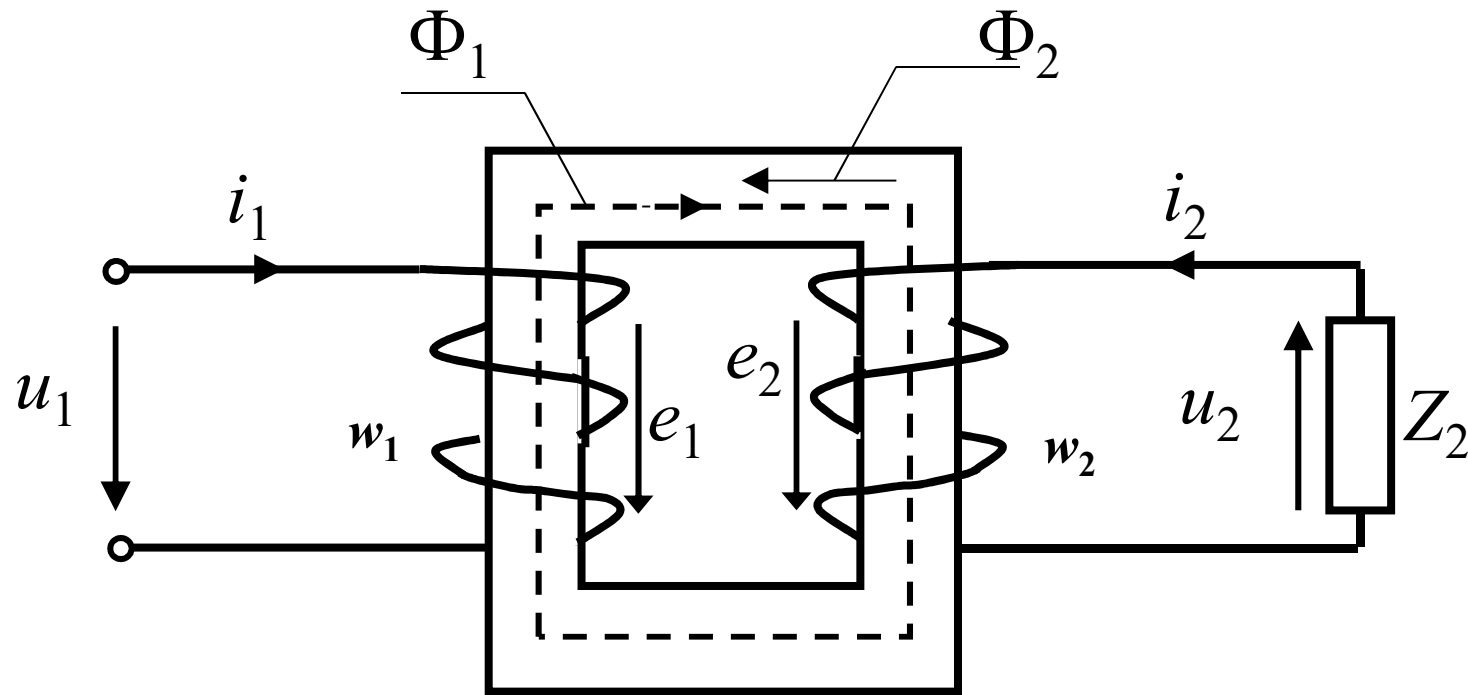
Крепление магнитопровода



Обмотки трансформатора



Принцип действия однофазного двухобмоточного трансформатора



Условная схема работы трансформатора

$$u_1 \longrightarrow i_1 \longrightarrow i_1 w_1 \longrightarrow \Phi_1 \longrightarrow e_1 \text{ и } e_2$$

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_1}{dt} \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_1}{dt} \longrightarrow u_2$$

под нагрузкой $\longrightarrow i_2 \longrightarrow i_2 w_2 \longrightarrow$

$$\Phi_2 \text{ (направлен встречно)} \longrightarrow \vec{\Phi} = \vec{\Phi}_1 + \vec{\Phi}_2 \longrightarrow$$

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Пусть $\Phi(t) = \Phi_m \sin(\omega t)$

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} = -\Phi_m w_1 \omega \cos(\omega t) = \Phi_m w_1 \omega \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$e_2 = \Phi_m w_2 \omega \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$E_1 = 4.44 w_1 f \Phi_m \quad E_2 = 4.44 w_2 f \Phi_m$$

$$k_{12} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} - \text{коэффициент трансформации}$$

В понижающем трансформаторе $U_1 > U_2$ в k_{12} раз, а $I_1 < I_2$ также в k_{12} раз. В повышающем трансформаторе соотношения обратные

Учитывая, что $S_1 \approx S_2$ или $U_{1H}I_{1H} \approx U_{2H}I_{2H}$

$$\frac{U_{1H}}{U_{2H}} \approx \frac{I_{2H}}{I_{1H}} \approx \frac{w_1}{w_2} = k_{12}$$

При работе трансформатора часть энергии теряется на покрытие магнитных потерь $P_{ст}$ (потери в стали магнитопровода на гистерезис и вихревые токи) и электрических потерь $P_{эл}$ (потери на нагрев обмоток).

$P_{ст}$ определяются величиной и частотой Φ ($P_{ст} \equiv B^2$) и не зависят от нагрузки: $P_{ст} = \text{const} \approx f^{1,3}$

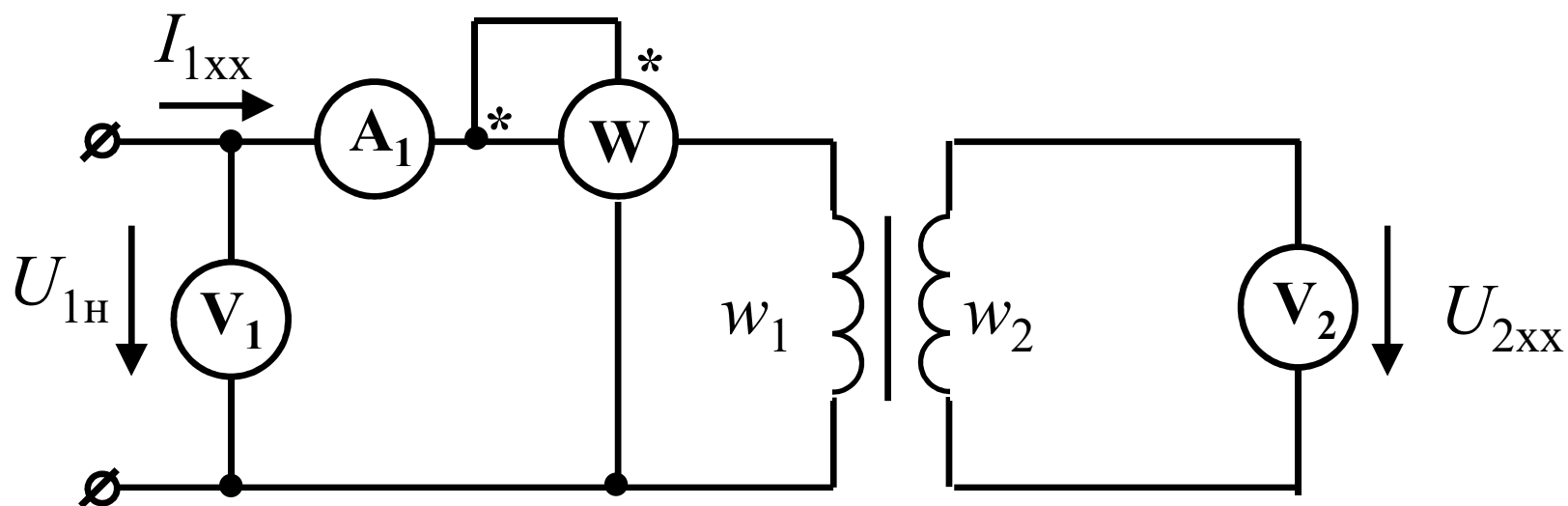
Мощность электрических потерь определяется суммой электрических потерь в первичной и вторичной обмотках:

$$P_{эл} = mI_1^2 R_1 + mI_2^2 R_2$$

R_1, R_2 – активные сопротивления обмоток

m – число фаз

В режиме **холостого хода** цепь вторичной обмотки разомкнута, а к первичной подведено номинальное напряжение. При этом в первичной обмотке протекает небольшой ток холостого хода, создающий магнитный поток в трансформаторе.



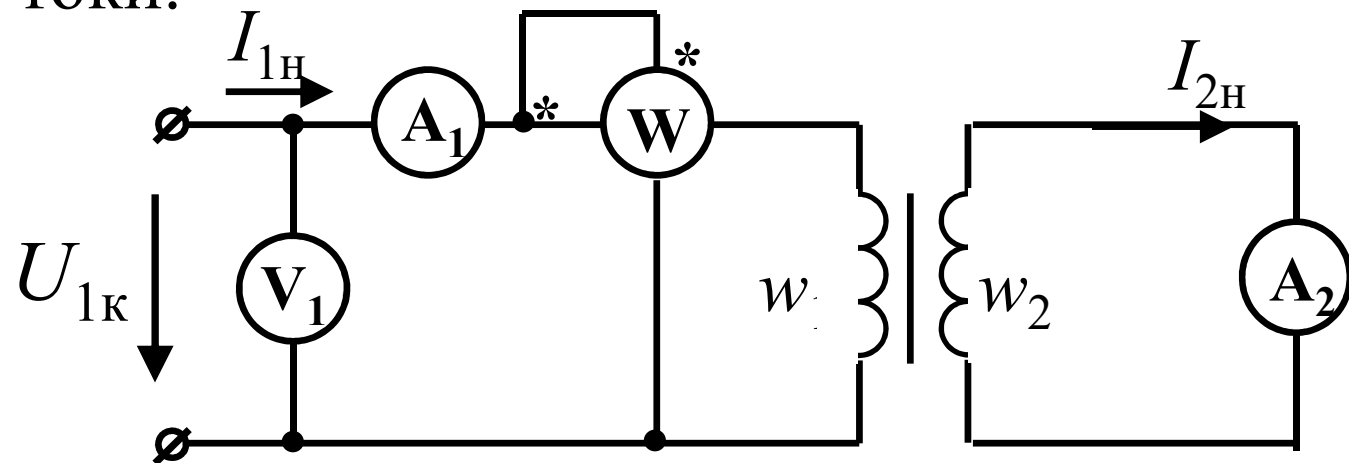
В режиме ХХ с помощью электроизмерительных приборов (вольтметр и ваттметр) можно определить коэффициент трансформации и мощность потерь в магнитопроводе.

Потери в стали $P_{ст} \approx P_{ХХ}$

Коэффициент трансформации

$$k_{12} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_{1н}}{U_{2ХХ}}$$

В режиме **короткого замыкания** вторичная обмотка замкнута накоротко. КЗ – аварийный режим, при котором в тр-ре выделяется большое количество тепла, и создаются большие механические усилия, способные его разрушить. Опыт КЗ проводится при таком первичном напряжении $u_{\text{к}}$, чтобы в обмотках текли номинальные токи.



$$u_{\text{к}} = \frac{U_{1\text{к}}}{U_{1\text{н}}} \cdot 100\% = (5 \div 10)\% U_{1\text{н}} - \text{напряжение КЗ}$$

Из опыта КЗ можно найти номинальные электрические потери в обмотках (показание ваттметра):

$$P_{\text{к}} = R_1 I_{1\text{н}}^2 + R_2 I_{2\text{н}}^2$$

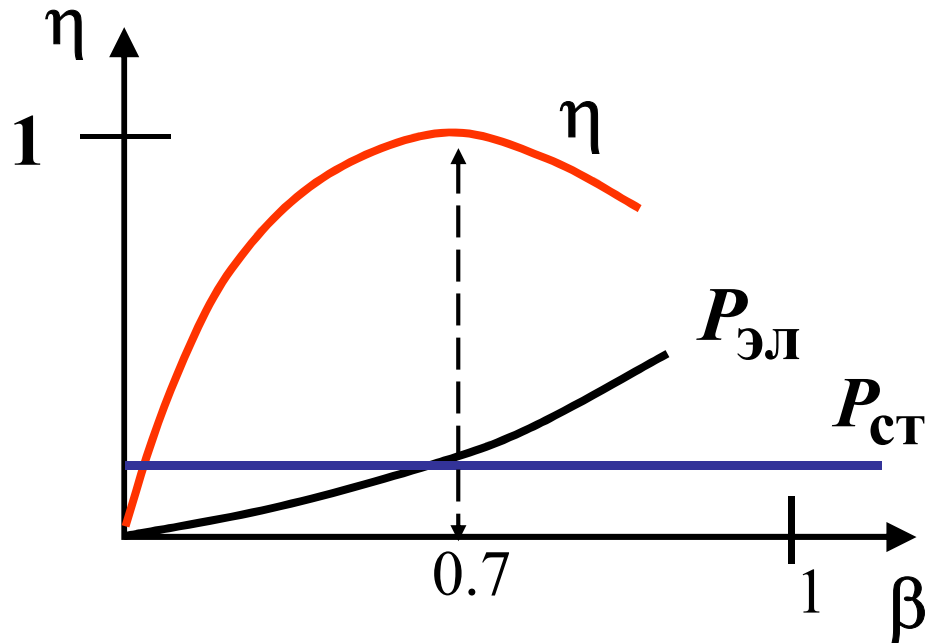
КПД определяют по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{эл}} + P_{\text{ст}}} \approx \frac{\beta S_{\text{н}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{н}} \cos \varphi_2 + \beta^2 P_{\text{к}} + P_{\text{хх}}}$$

$S_{\text{н}}$ – номинальная полная мощность

$$\beta = \frac{I_1}{I_{1\text{н}}} \approx \frac{I_2}{I_{2\text{н}}} - \text{коэффициент нагрузки}$$

Максимальный КПД будет при равенстве переменных электрических потерь постоянным магнитным потерям.



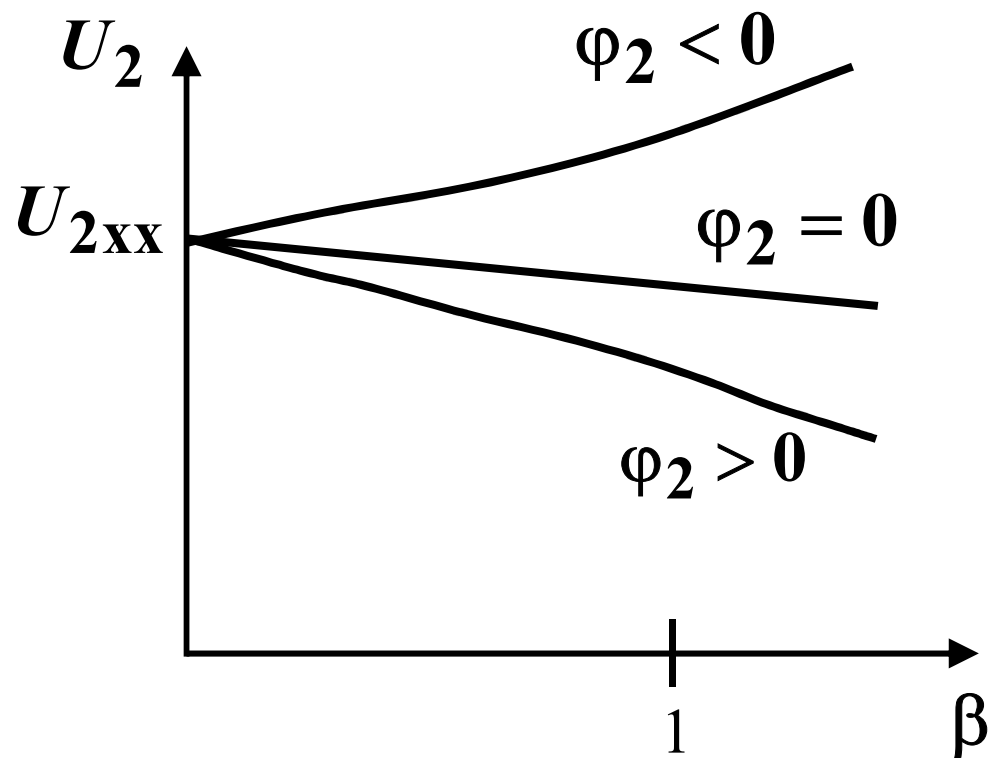
Наибольшее значение КПД трансформатора будет при токе нагрузки 50-70% номинального.

Максимальный КПД силовых трансформаторов доходит до 99.5%.

Внешняя характеристика

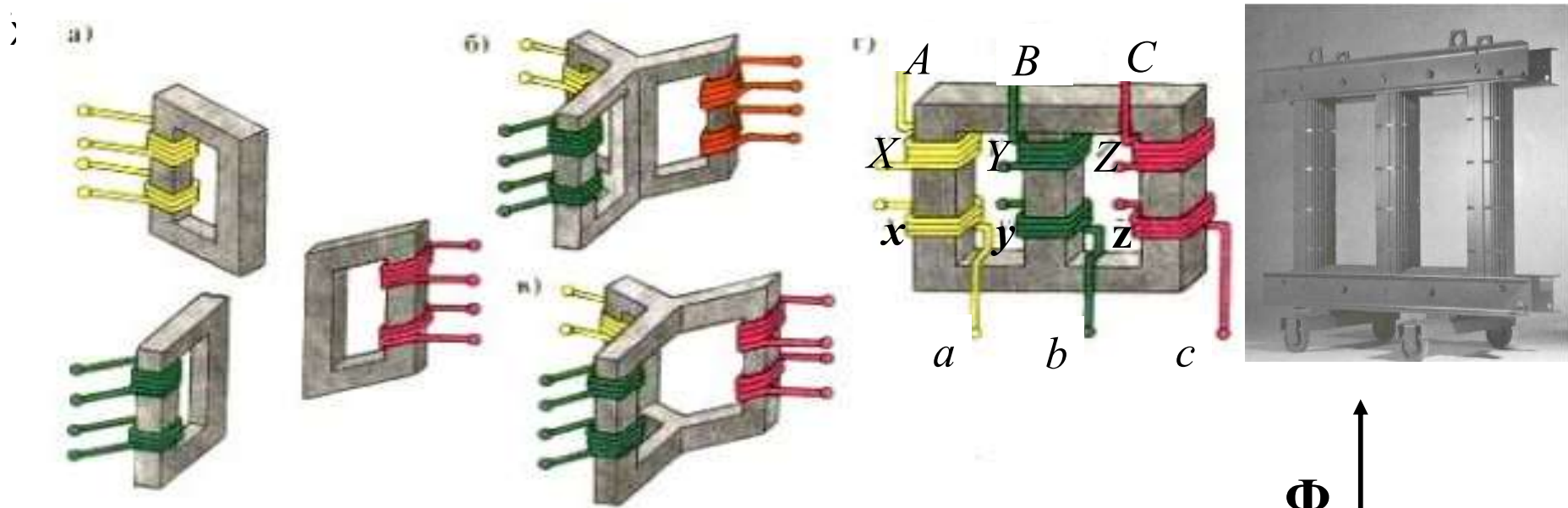
$$U_1 = U_{1н} \quad \varphi_2 = const$$

U_2 изменяется с ростом I_2 из-за падения напряжения в обмотках.

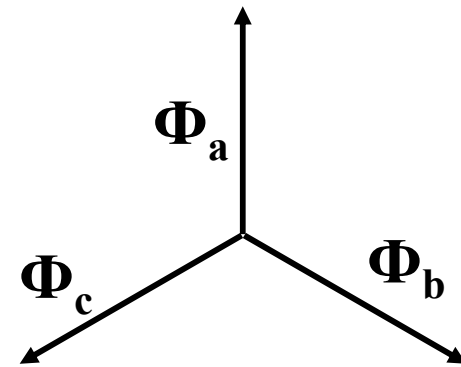


$$\Delta U_{2\%} = \frac{U_{2хх} - U_2}{U_{2хх}} \cdot 100\%$$

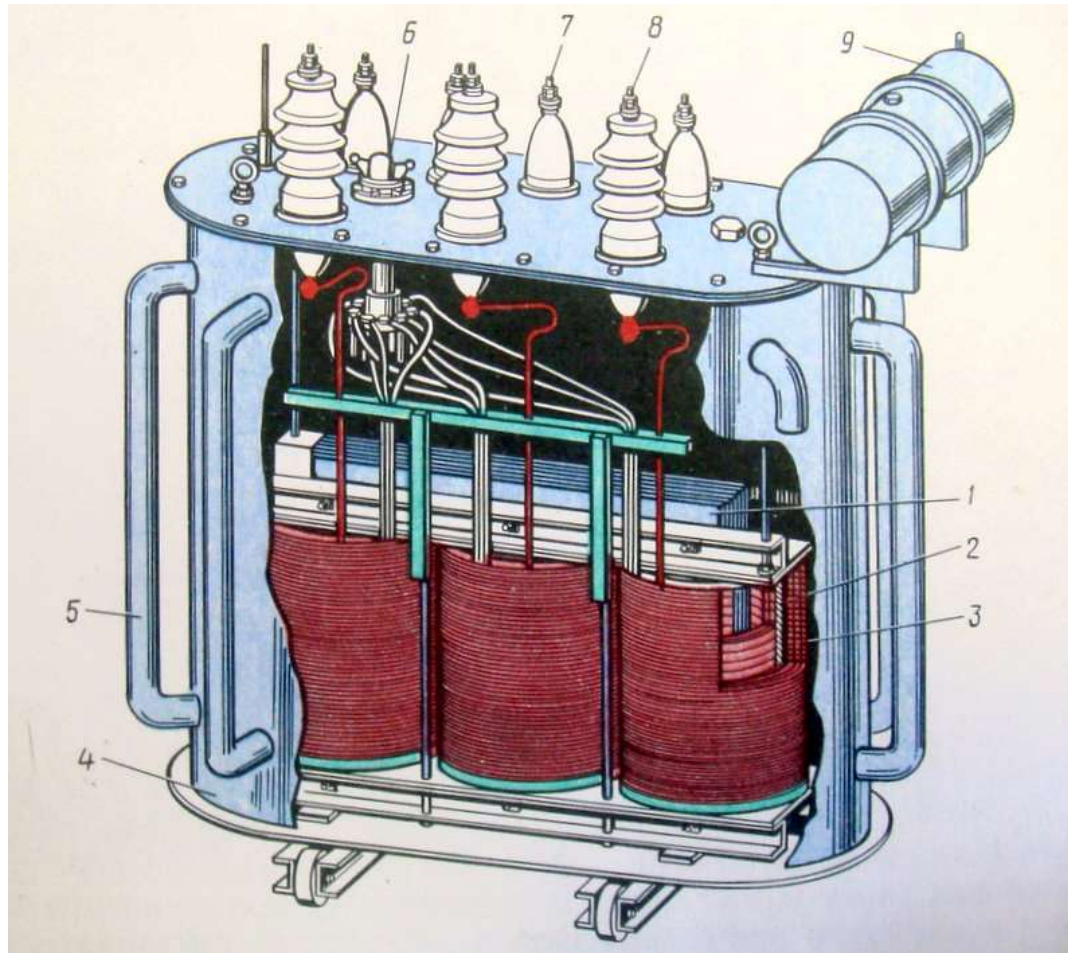
Трехфазные трансформаторы



Для получения симметричной системы магнитных потоков средний стержень имеет другое сечение. При симметричной системе все расчеты ведутся на одну фазу (теория как у однофазного трансформатора)



Трехфазный трансформатор



1 – магнитопровод

2,3 – обмотки ВН И НН

4,5 – трубчатый бак (для лучшего отвода тепла)

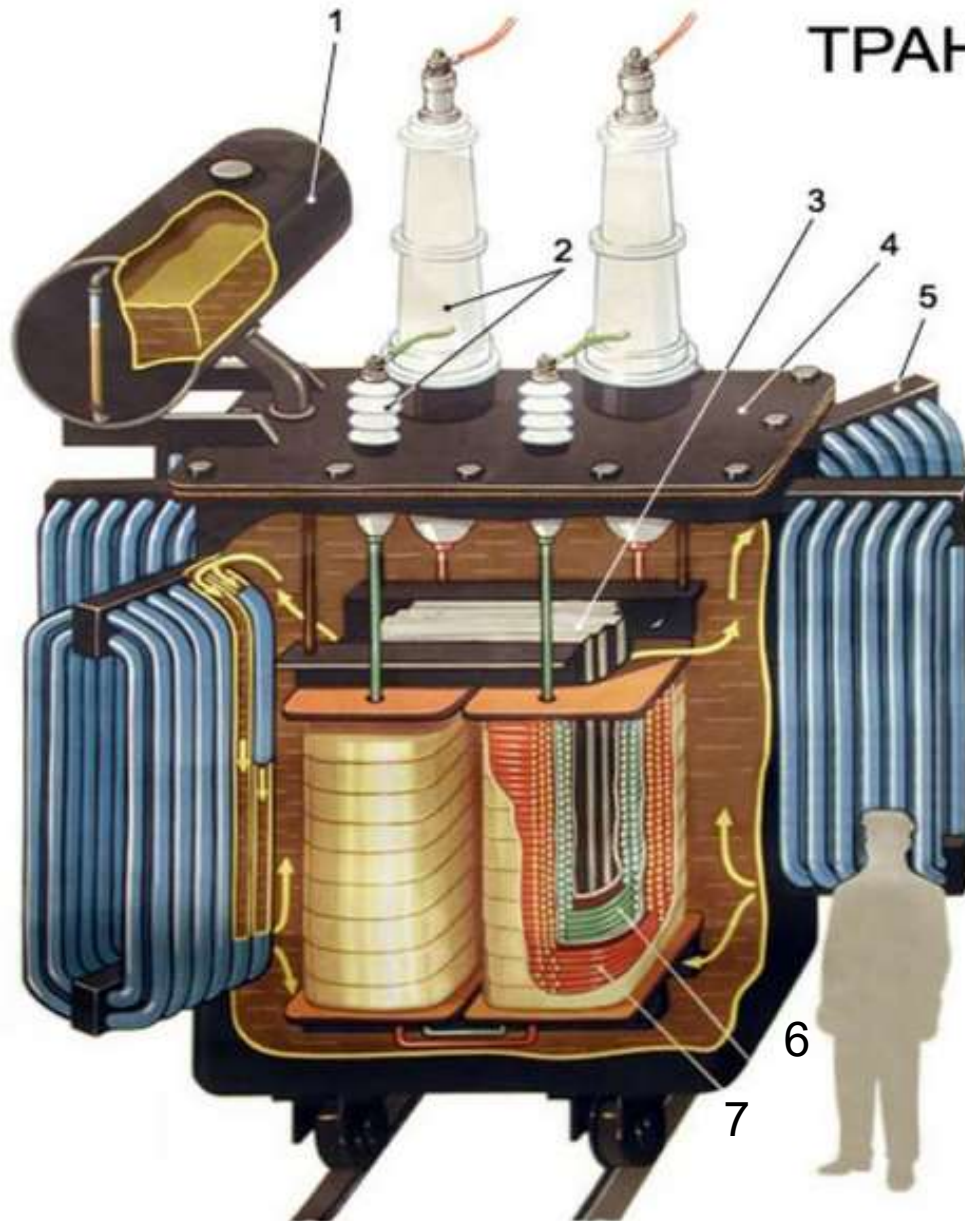
6 – кран для заливки масла

7 – ввод (изолятор) НН

8 – ввод (изолятор) ВН

9 – расширитель

ТРАНСФОРМАТОР

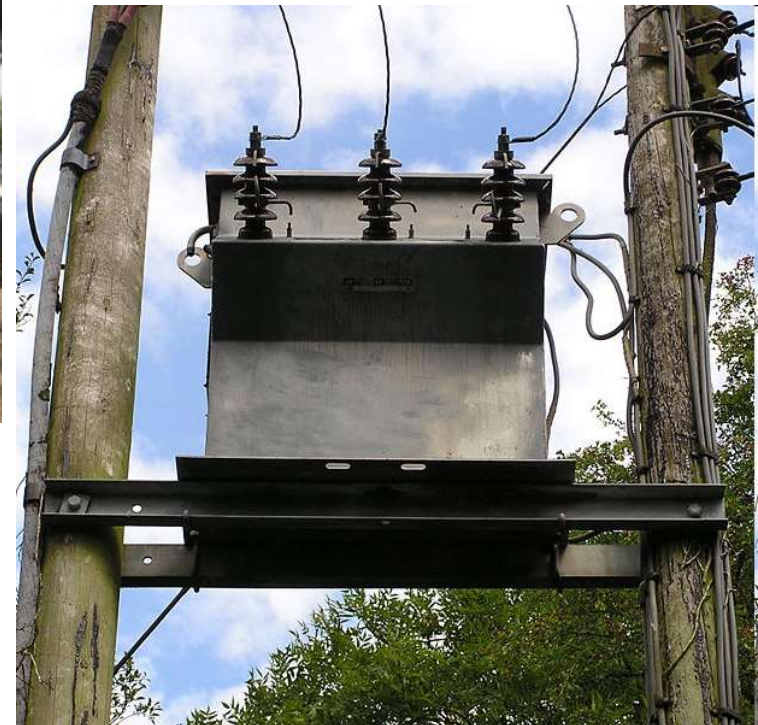


1. Расширительный бак
2. Изолятор
3. Сердечник трансформатора
4. Крышка бака трансформатора
5. Радиаторы
6. Обмотка низкого напряжения
7. Обмотка высокого напряжения

Силовой трансформатор 110 кВ



Понижающий тр-р





Коэффициент трансформации при различных соединениях обмоток

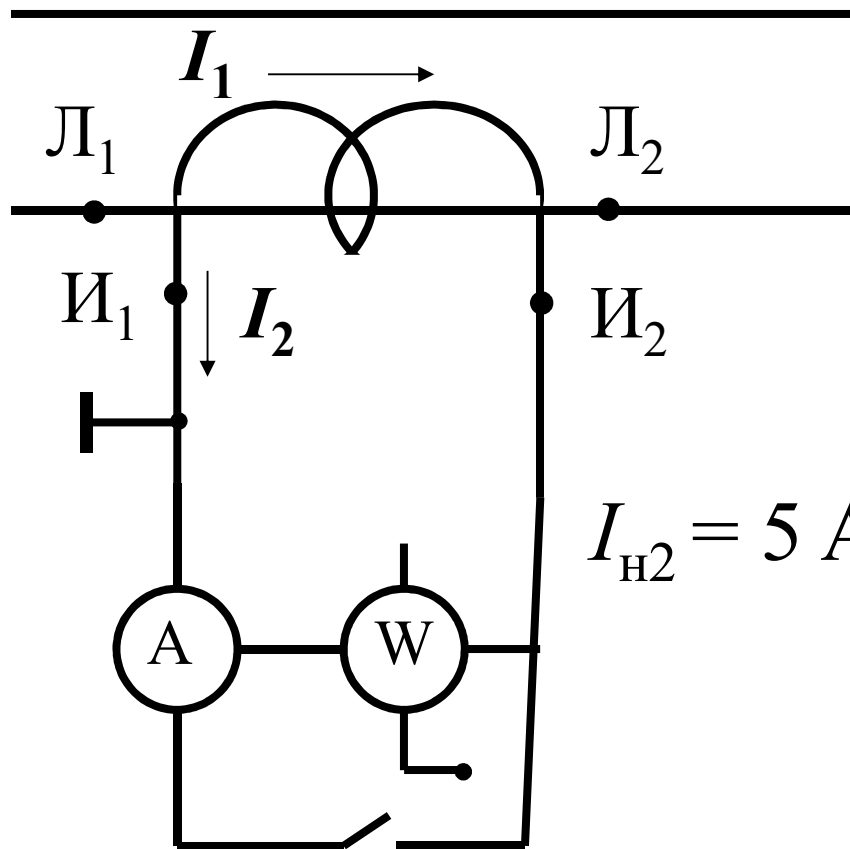
$$\mathbf{Y/Y} \quad U_{л1} = \sqrt{3}U_{\phi1} \quad U_{л2} = \sqrt{3}U_{\phi2} \quad k_{\phi} = \frac{U_{л1}}{U_{л2}} = \frac{U_{\phi1}}{U_{\phi2}}$$

$$\mathbf{Y/\Delta} \quad U_{л1} = \sqrt{3}U_{\phi1} \quad U_{л2} = U_{\phi2} \quad k_{\phi} = \frac{U_{\phi1}}{U_{\phi2}} = \frac{U_{л1}}{\sqrt{3}U_{л2}}$$

$$\mathbf{\Delta/Y} \quad U_{л1} = U_{\phi1} \quad U_{л2} = \sqrt{3}U_{\phi2} \quad k_{\phi} = \frac{U_{\phi1}}{U_{\phi2}} = \sqrt{3} \frac{U_{л1}}{U_{л2}}$$

Трансформатор тока

- это повышающий трансформатор, работающий в режиме КЗ ($w_2 > w_1$)



Первичная обмотка
включается
последовательно с
контролируемым объектом,
а вторичная замыкается
через амперметр.

$$I_{н2} = 5 \text{ A}$$

$$I_1 \gg I_2$$

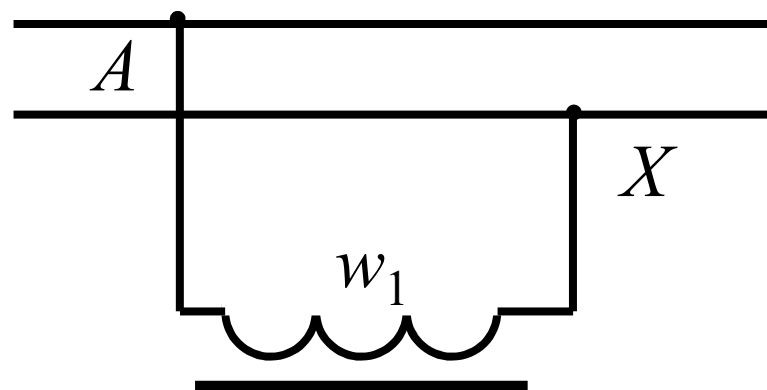
$$I_1 = (w_2/w_1)I_2$$

Нельзя размыкать вторичную обмотку тр-ра, т.к. весь первичный ток становится намагничивающим, Φ резко возрастает и во вторичной обмотке возникает ЭДС до 1.5 кВ. Это опасно для жизни, кроме того, резко возрастают магнитные потери, магнитопровод нагревается и расширяется. Это опасно для изоляции и может привести к КЗ на землю со стороны ВН.

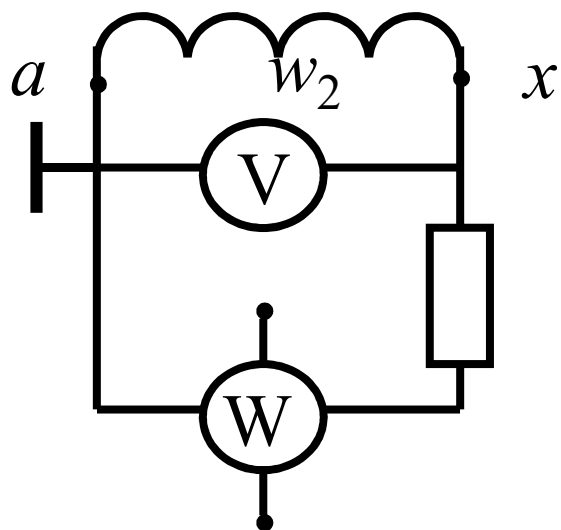


Трансформатор напряжения

- это понижающий трансформатор, работающий в режиме, близком к ХХ ($w_1 > w_2$).



$$U_1 = (w_1/w_2) U_2$$



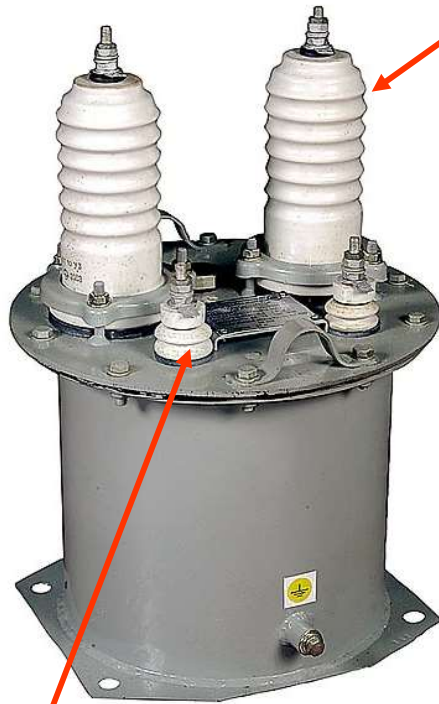
$$U_{H2} = 100 \text{ В}$$



трехфазный

первичная обмотка

однофазный



вторичная обмотка



вторичная обмотка
(начало, конец, нейтраль)