

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.

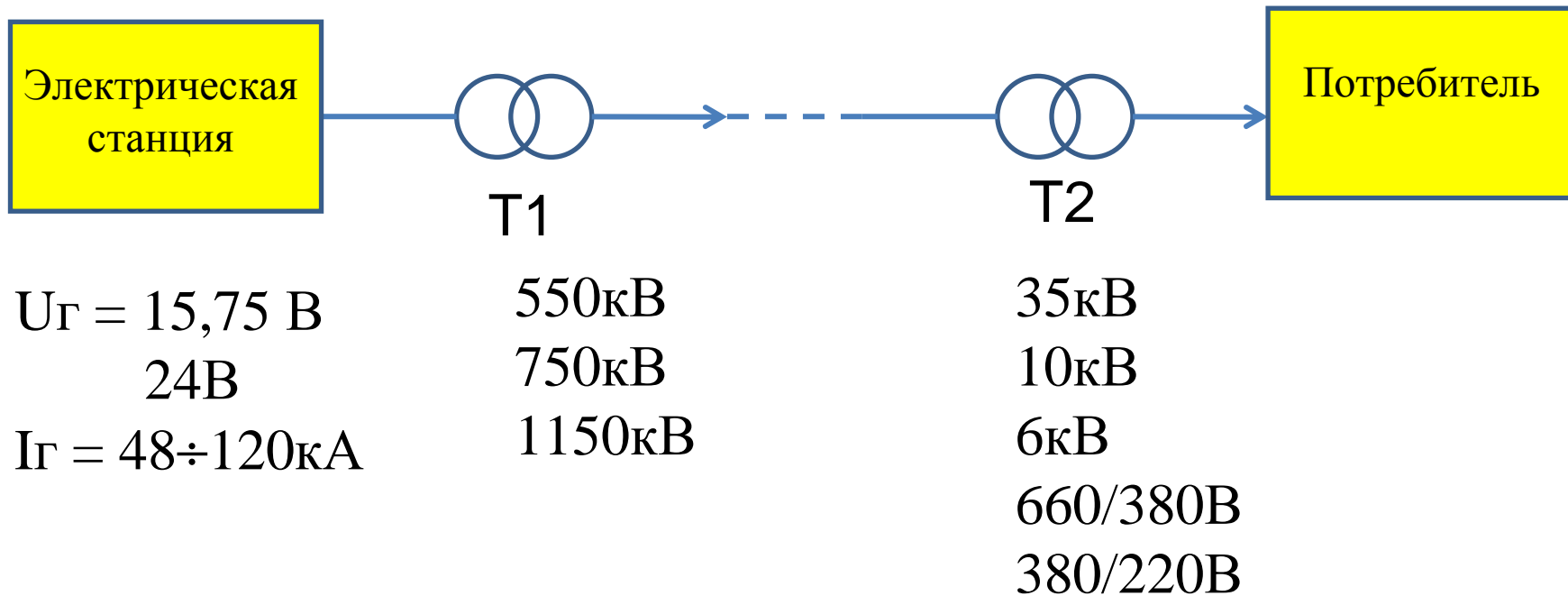


Группы трансформаторов:

1) силовые

- трансформаторы в системах распределения электроэнергии называют *силовыми*. Они имеют номинальную мощность от 10 кВ·А до 10^6 кВ·А.
- силовые трансформаторы применяют в промышленных электрических сетях и их изготавливают однофазными и трехфазными, повышающими и понижающими.
- условное обозначение:





Силовые трансформаторы позволяют экономично передавать и распределять электрическую энергию.

2) трансформаторы специального назначения:

a) измерительные

b) автотрансформаторы

c) сварочные

d) пик трансформаторы

e) печные

f) трансформаторы, применяемые в радиоэлектронике

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 обмотки различают:
высшая, низшая

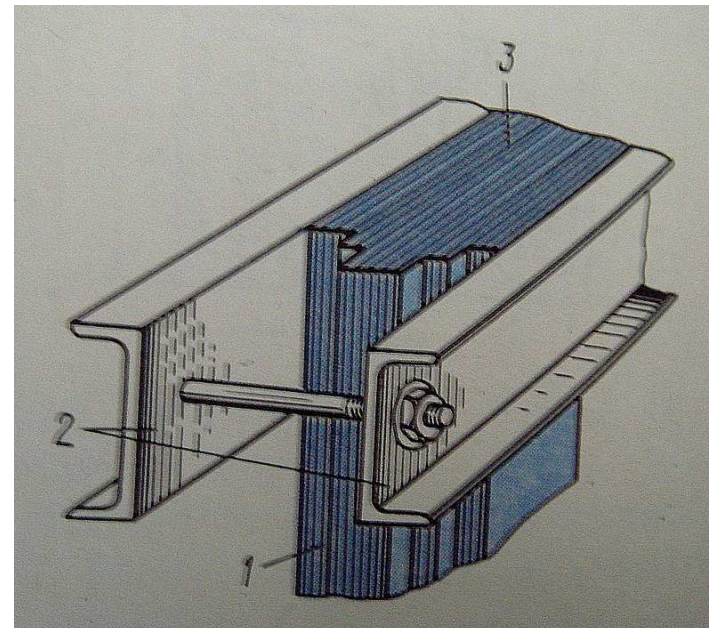
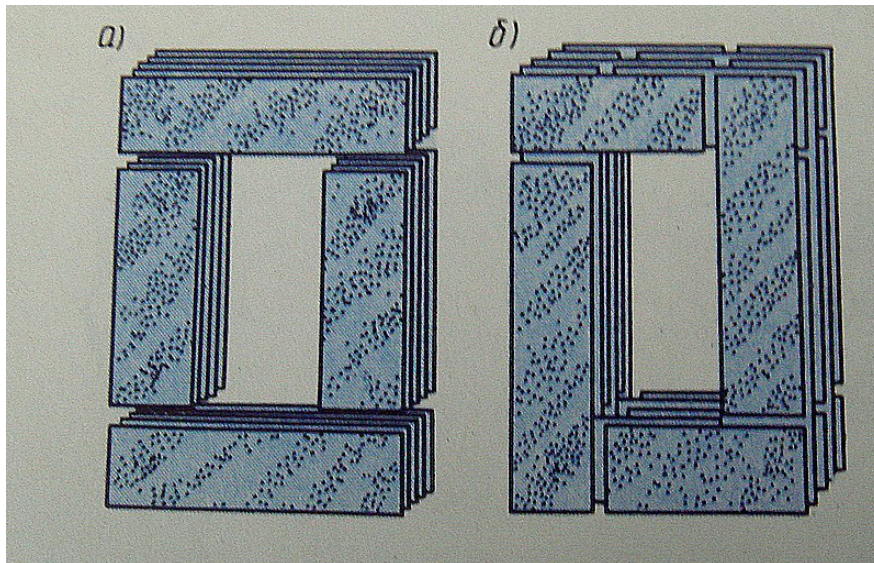
Между обмотками нет гальванической связи.
Энергия передается магнитным полем (магнитным потоком)

Магнитопровод трансформаторов выполняют из листов электротехнической стали

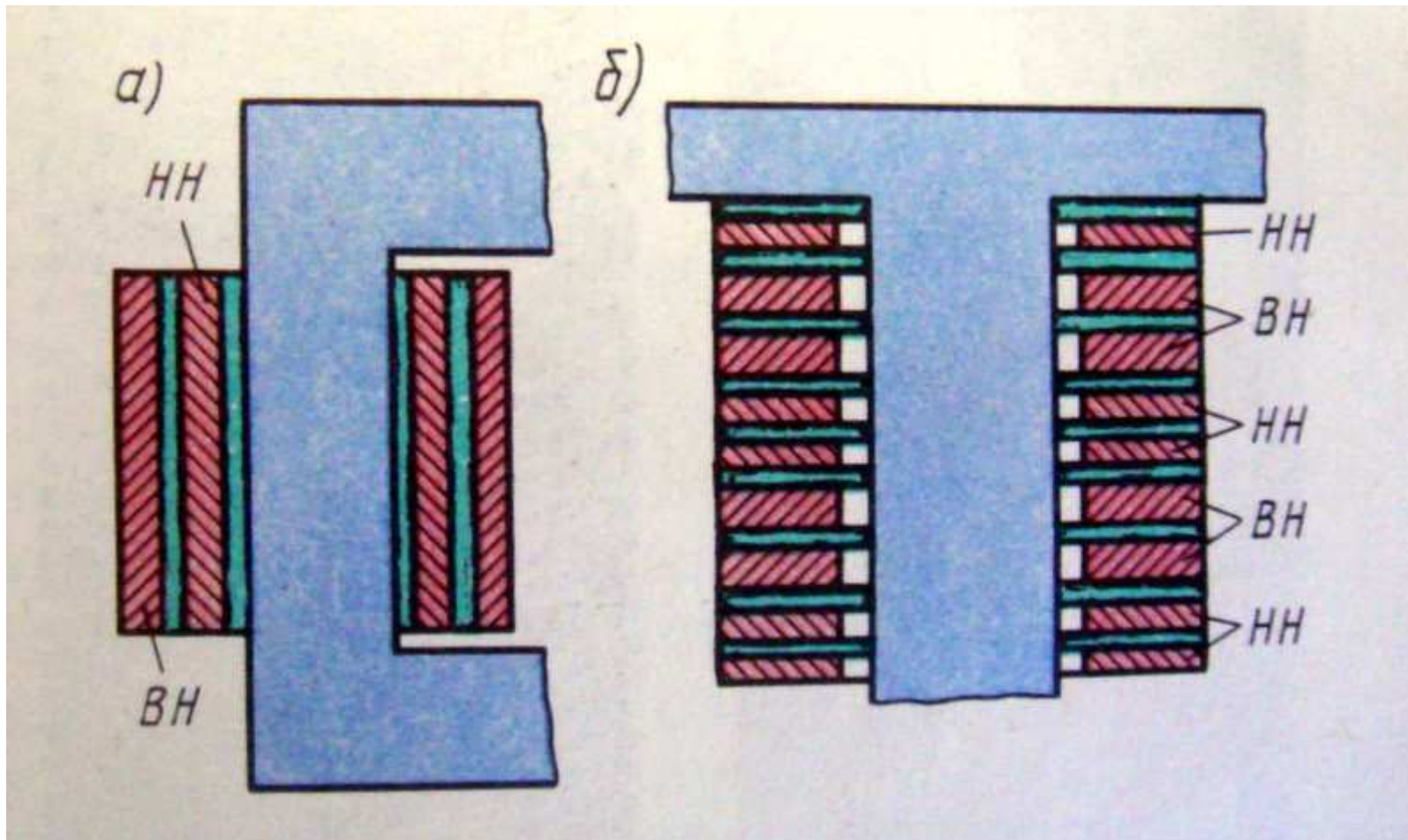
$f = 50\text{Гц}$ $d = 0,3\div 0,5\text{мм}$

$f > 50\text{Гц}$ $d < 0,1\text{мм}$

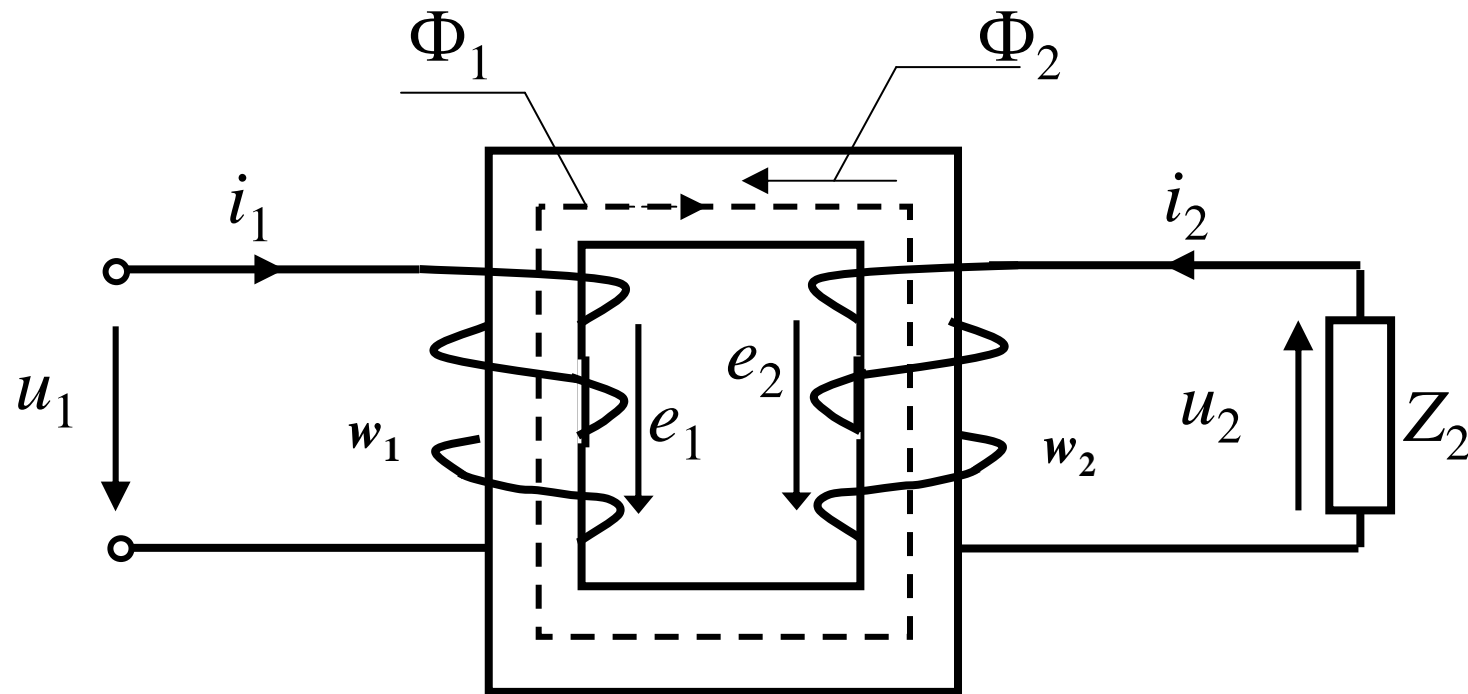
Листы друг от друга изолированы. При частоте $f > 100\text{кГц}$ трансформаторы делают воздушными.



Обмотки трансформатора



Принцип действия однофазного двухобмоточного трансформатора



Условная схема работы трансформатора

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

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

под нагрузкой $\Rightarrow i_2 \Rightarrow i_2 w_2 \Rightarrow$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Уравнения идеализированного трансформатора

Трансформатор, первичная и вторичная обмотка которого не имеют активных сопротивлений и потоков рассеяния, называется **идеализированным**

$$u_1 = -e_1 \qquad u_2 = e_2$$

По закону полного тока
$$H(t) = \frac{i_1 w_1 + i_2 w_2}{l_{\text{ср}}}$$

В режиме холостого хода
$$H(t) = \frac{i_{1\text{хх}} w_1}{l_{\text{ср}}}$$

$$i_{1\text{хх}} w_1 = i_1 w_1 + i_2 w_2$$

$$i_1 = i_{1\text{хх}} - i_2 \frac{w_2}{w_1} = i_{1\text{хх}} + i_2'$$

$i'_2 = -i_2 \frac{w_2}{w_1}$ – приведенный вторичный ток

$$i_1 = i_{1\text{хх}} + i'_2$$

$i_{1\text{хх}}$ - намагничивающий ток, который создает Φ и является постоянной величиной, зависящей от магнитных свойств сердечника. Т.о., в идеальном трансформаторе Φ не зависит от характера и величины нагрузки и определяется уровнем приложенного напряжения.

i'_2 – реакция первичной обмотки на изменение нагрузки во вторичной обмотке (зависит от величины нагрузки).

Схема замещения идеализированного трансформатора

Магнитная связь заменяется электрической. Для этого необходимо объединить обе обмотки, сделав равными их ЭДС.

$$e_1 = e_2$$

Равенство будет выполнено, если новое число витков вторичной обмотки сделать равным числу витков первичной обмотки.

$$\frac{u_1}{u_2} = -\frac{e_1}{e_2} = -\frac{w_1}{w_2}$$

$$u'_2 = u_1 = -u_2 \frac{w_1}{w_2} \text{ - приведенное значение напряжения}$$

Из условия сохранения мощности вторичной обмотки

$$u_2 i_2 = u'_2 i'_2$$

Следовательно

$$i'_2 = i_2 \frac{u_2}{u'_2} = -i_2 \frac{w_2}{w_1}$$

Из условия сохранения мощности потерь

$$R_{H2} i_2^2 = R'_{H2} i'^2_2$$

R_{H2} — активное сопротивление нагрузки вторичной обмотки

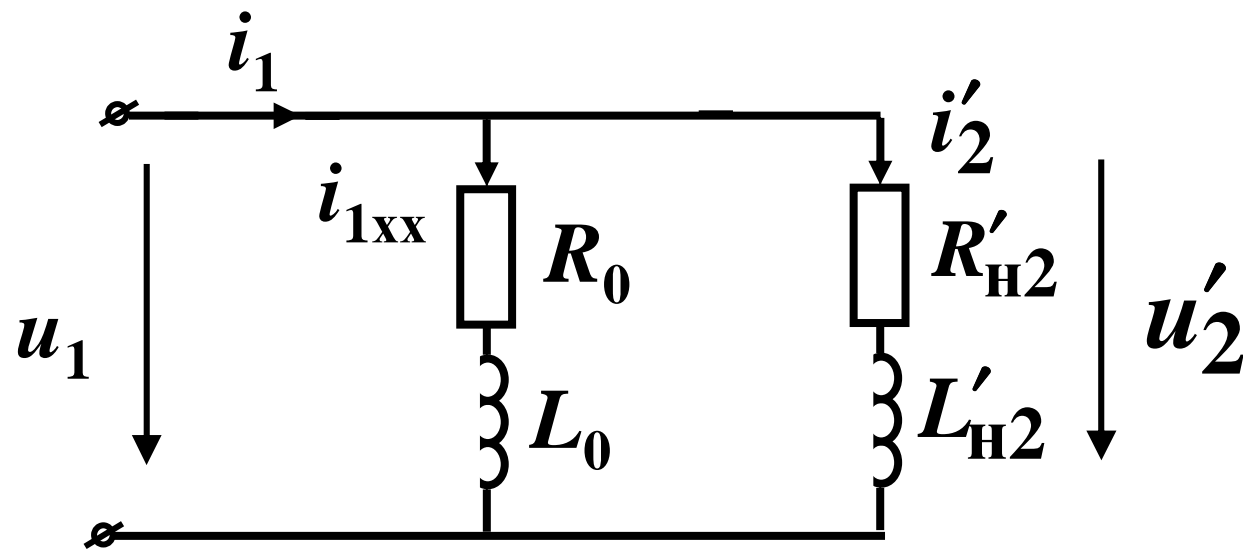
$$R'_{H2} = R_{H2} \cdot \frac{i_2^2}{i'^2_2} = \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 \cdot R_{H2}$$

По аналогии

$$L'_{H2} = L_{H2} \cdot \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2$$

$$C'_{H2} = C_{H2} \cdot \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^2$$

Схема замещения идеализированного трансформатора



R_0, L_0 – параметры ветви намагничивания

R_0 характеризует магнитные потери в сердечнике

L_0 – коэффициент пропорциональности между
ОСНОВНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ И НАМАГНИЧИВАЮЩИМ
ТОКОМ

Реальный трансформатор

Напряжение u_1 уравнивается не только ЭДС e_1 , но и ЭДС потоков рассеяния $e_{\sigma 1}$ и падением напряжения на активном сопротивлении

$$u_1 = -e_1 - e_{\sigma 1} + R_1 i_1$$

$$e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt}$$

$$u_1 = -e_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1$$

Напряжение на вторичной обмотке:

$$u_2 = e_2 - L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} - R_2 i_2$$

Уравнение магнитного состояния:

$$i_{1xx} w_1 = i_1 w_1 + i_2 w_2$$

Уравнения реального трансформатора

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + jx_{\sigma 1}\dot{I}_1 + R_1\dot{I}_1$$

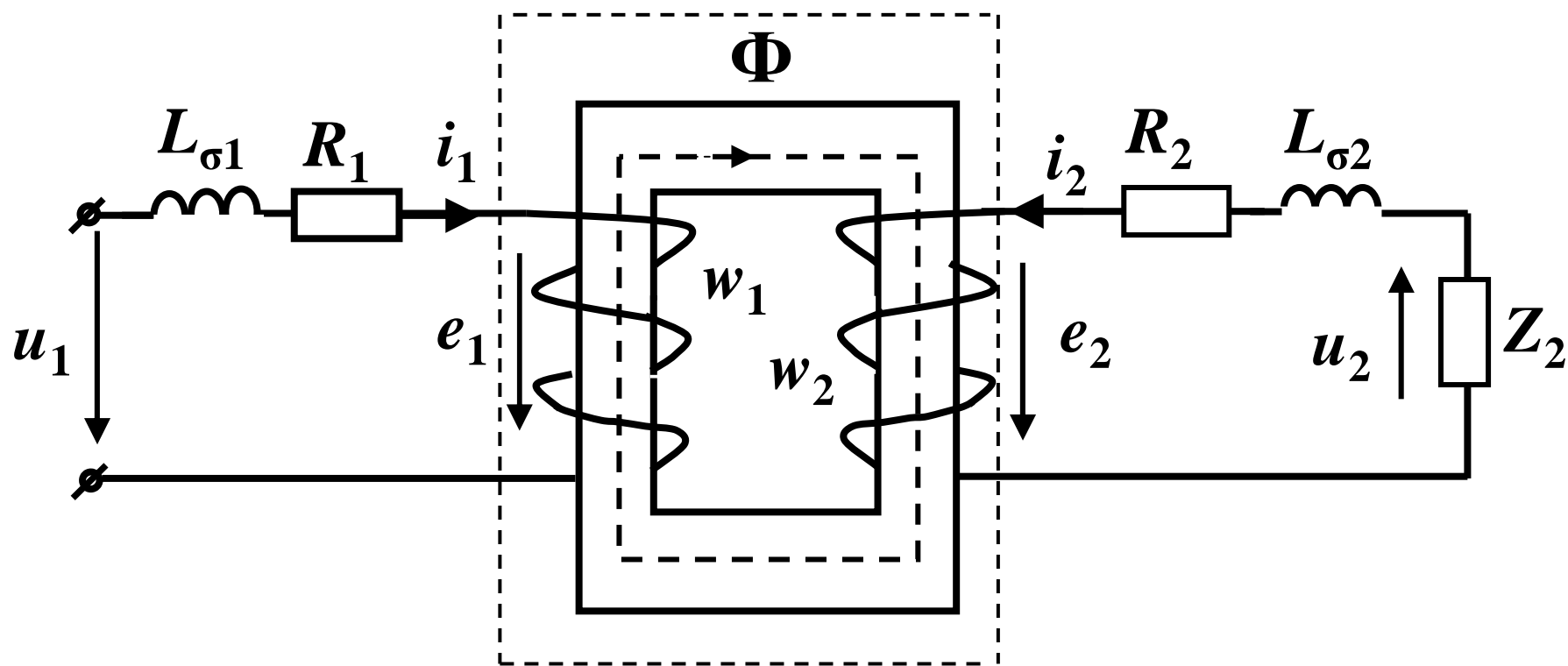
$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - jx_{\sigma 2}\dot{I}_2 - R_2\dot{I}_2$$

$$\dot{I}_1 x_{\sigma 1} w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2$$

$x_{\sigma 1} = \omega L_{\sigma 1}$, – индуктивные сопротивления

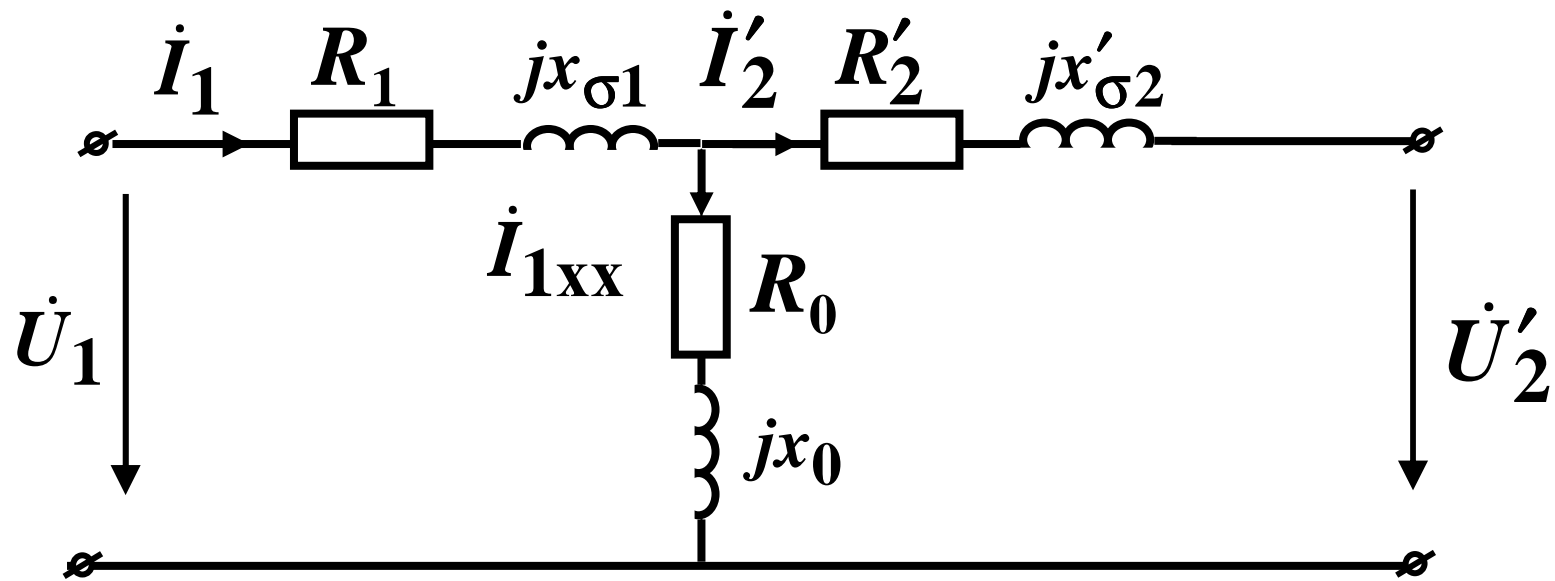
$x_{\sigma 2} = \omega L_{\sigma 2}$ первичной и вторичной обмоток

Схема реального однофазного трансформатора



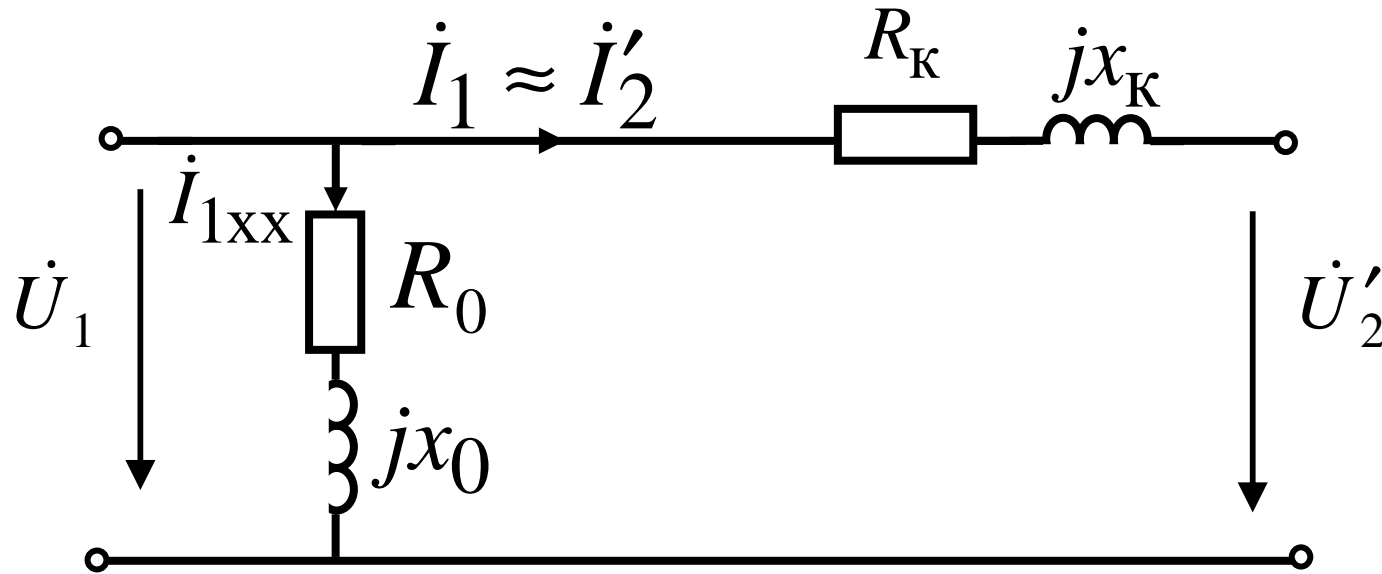
Идеализированный трансформатор

Т-образная схема



Недостаток: невозможно экспериментально определить все параметры

Г-образная схема замещения

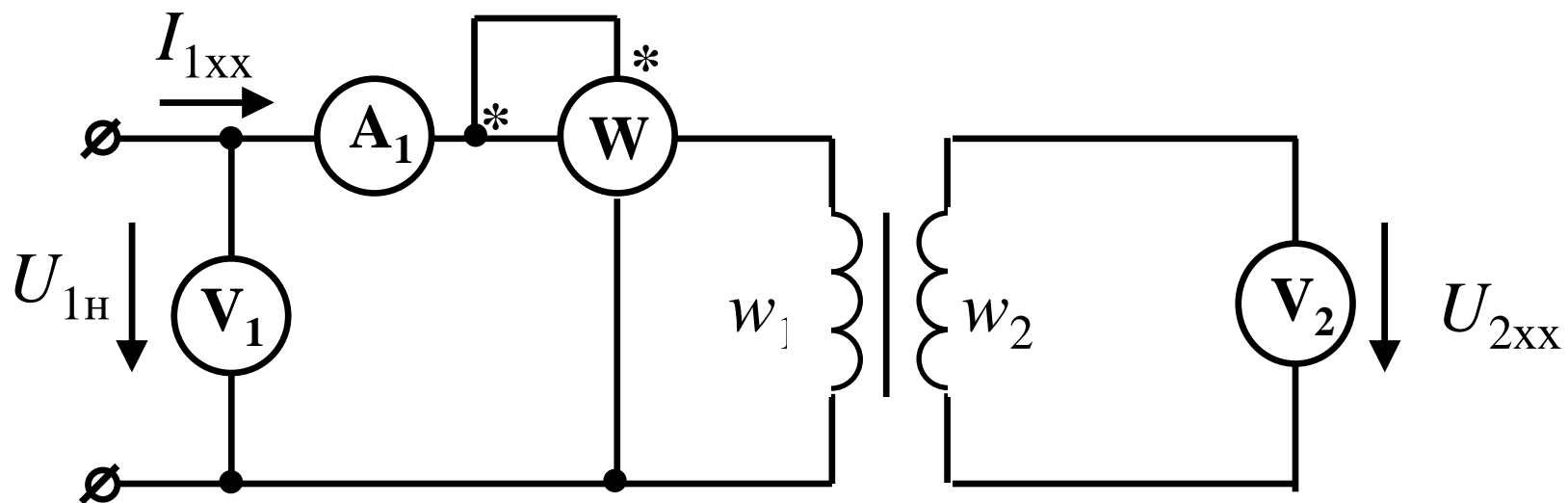


R_0, x_0 - параметры холостого хода

$R_K = R_1 + R'_2$ $x_K = x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2}$ - параметры КЗ

Опытное определение параметров однофазного трансформатора

Опыт холостого хода



Из опыта ХХ можно найти

1. Параметры ветви намагничивания:

$$Z_0 = \frac{U_{1H}}{I_{1XX}} \quad R_0 = \frac{P_{XX}}{I_{1XX}^2} \quad x_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$$

2. Коэффициент мощности:

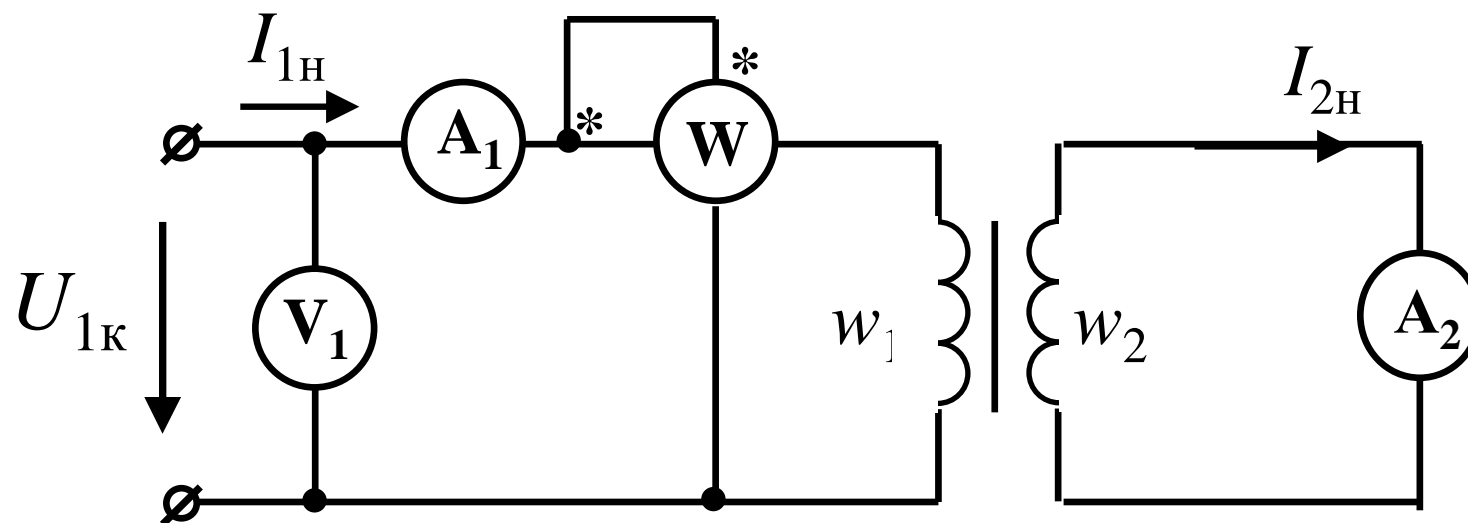
$$\cos \varphi_{XX} = \frac{P_{XX}}{U_{1H} \cdot I_{1XX}}$$

3. Потери в стали $P_{\text{ст}} \approx P_{\text{хх}}$

4. Коэффициент трансформации

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

Опыт короткого замыкания



$$u_{\text{K}} = \frac{U_{1\text{K}}}{U_{1\text{H}}} \cdot 100\% = (5 \div 10)\% U_{1\text{H}}$$

- напряжение КЗ

Из опыта КЗ можно найти

1. Номинальные потери в обмотках (показание ваттметра)

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

2. Параметры вторичной ветви схемы замещения:

$$R_{\text{к}} = \frac{P_{\text{к}}}{I_{1\text{н}}^2} \quad Z_{\text{к}} = \frac{U_{1\text{к}}}{I_{1\text{н}}} \quad x_{\text{к}} = \sqrt{Z_{\text{к}}^2 - R_{\text{к}}^2}$$

3. Коэффициент мощности при КЗ

$$\cos \varphi_{\text{к}} = \frac{P_{\text{к}}}{U_{1\text{к}} I_{1\text{н}}}$$

Параметры Т-образной схемы замещения

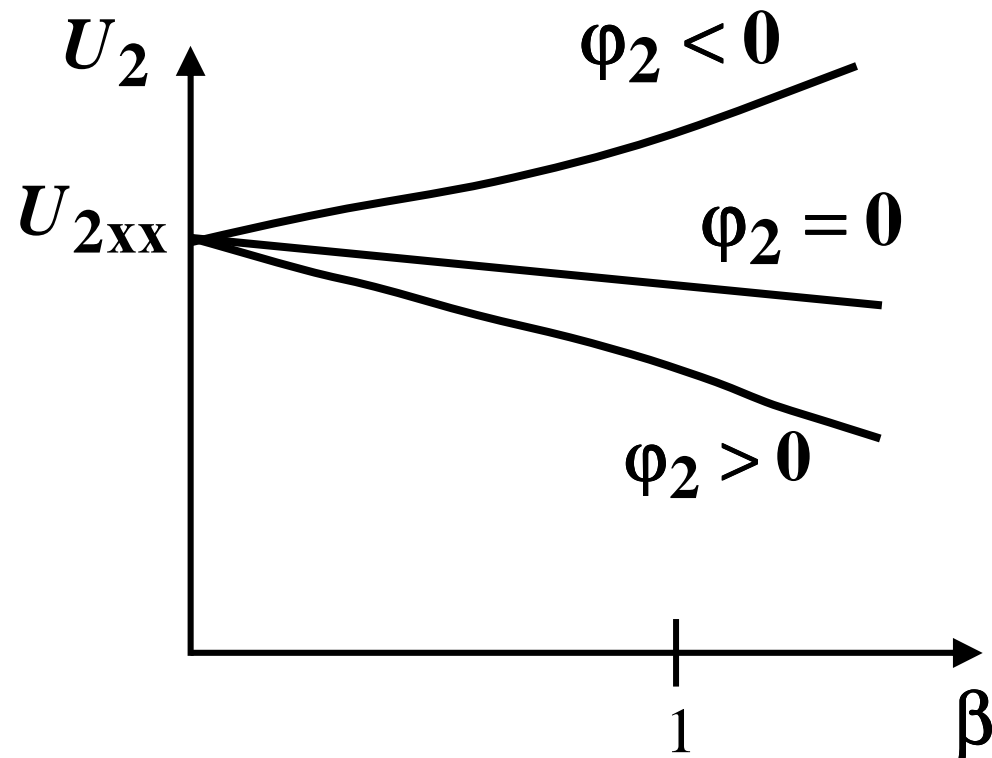
$$x_{\sigma 1} = x'_{\sigma 2} = \frac{1}{2} x_{\kappa}$$

$$R_1 = R'_2 = \frac{1}{2} R_{\kappa}$$

Внешняя характеристика

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

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



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

Коэффициент нагрузки

$$\beta = \frac{I_1}{I_{1н}} \approx \frac{I_2}{I_{2н}}$$

Регулировка напряжения осуществляется изменением коэффициента трансформации с помощью отводов на первичной обмотке, которые позволяют изменять число витков в пределах $\pm 5\%$. Число витков регулируется переключателем.

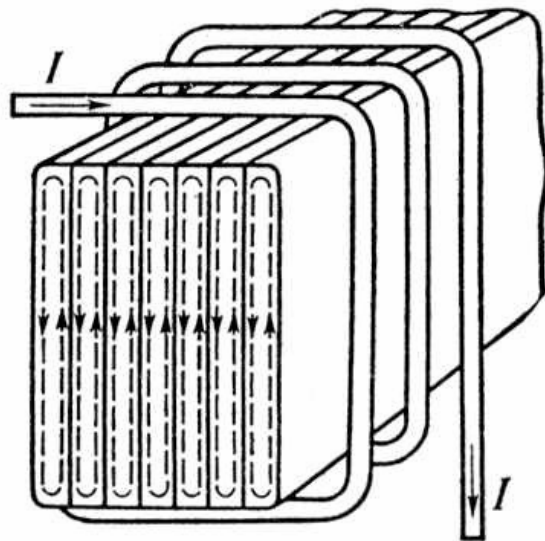
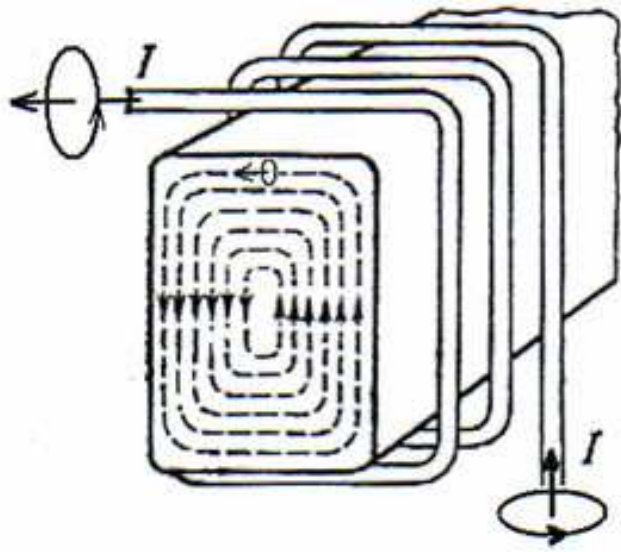
Потери энергии и КПД трансформатора

Потери: магнитные $P_{ст}$ (потери в стали магнитопровода на гистерезис и вихревые токи) и электрические $P_{эл}$ (потери на нагрев обмоток).

$P_{ст}$ определяются величиной и частотой Φ и не зависят от нагрузки: $P_{ст} = \text{const} \approx P_{хх}$

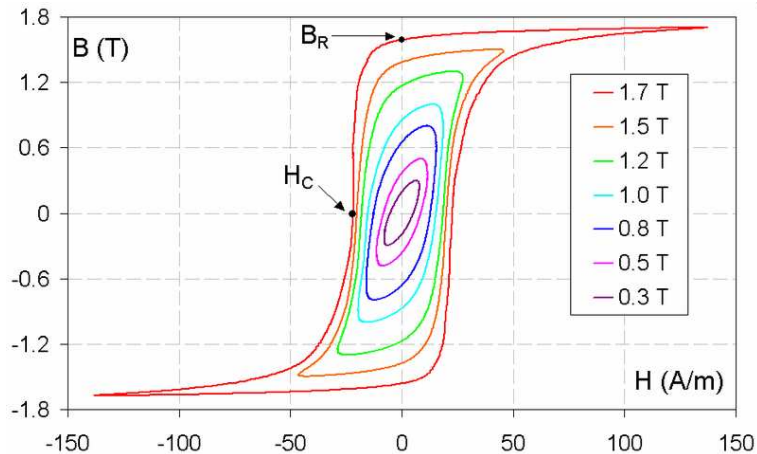
Мощность потерь КЗ

$$P_{к} = R_{к} I_{1}^2 \Rightarrow P_{эл} = R_{к} \frac{I_{1н}^2}{I_{1н}^2} I_{1}^2 = \beta^2 P_{к}$$



Переменный магнитный поток индуцирует ЭДС в сердечнике, т.к. сердечник является проводником. Если сердечник сплошной, то ЭДС создает в нем большие вихревые токи, которые нагревают его и вызывают значительные потери энергии. В шихтованном сердечнике эти потери уменьшаются во много раз.

Мощность потерь на вихревые токи уменьшается пропорционально квадрату числа пластин.



Потери на гистерезис можно сравнить с потерями на трение — под воздействием переменного магнитного поля магнитные домены должны изменять свое направление, преодолевая силы внутреннего сцепления в ферромагнетике. Эти потери за один цикл перемагничивания пропорциональны площади петли гистерезиса материала.

Суммарные потери энергии в стали сердечника пропорциональны квадрату магнитного потока

КПД определяют по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{эл}} + P_{\text{ст}}} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{\text{эл}} + P_{\text{ст}}} =$$
$$\frac{U_2 \frac{I_{2\text{н}}}{I_{2\text{н}}} I_2 \cos \varphi_2}{U_2 \frac{I_{2\text{н}}}{I_{2\text{н}}} I_2 \cos \varphi_2 + \beta^2 P_{\text{к}} + P_{\text{ст}}} \approx \frac{\beta S_{\text{н}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{н}} \cos \varphi_2 + \beta^2 P_{\text{к}} + P_{\text{хх}}}$$

$S_{\text{н}} = U_2 I_{2\text{н}}$ — номинальная полная мощность

Найдем экстремум:

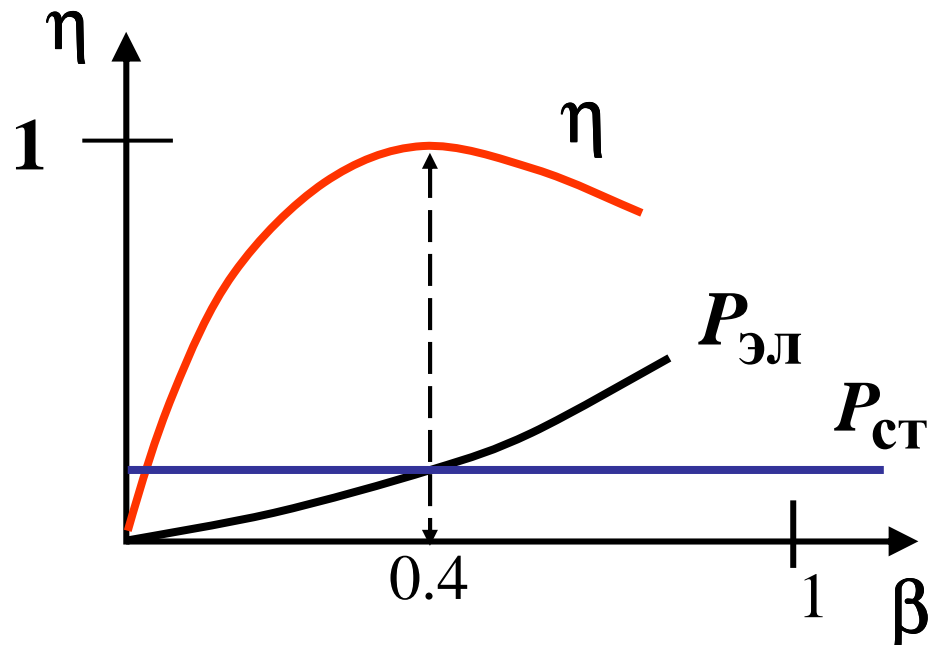
$$\frac{d\eta}{d\beta} = \frac{S_H \cos \varphi_2 (\beta S_H \cos \varphi_2 + \beta^2 P_K + P_{XX}) - \beta S_H \cos \varphi_2 (S_H \cos \varphi_2 + 2\beta P_K)}{(\beta S_H \cos \varphi_2 + \beta^2 P_K + P_{XX})^2} = 0$$

Приравняв числитель к нулю, получим

$$S_H \cos \varphi_2 (P_{XX} - \beta^2 P_K) = 0$$

$$P_{XX} = \beta^2 P_K \quad \beta = \sqrt{\frac{P_{XX}}{P_K}}$$

Максимальный КПД будет при равенстве переменных электрических потерь постоянным магнитным потерям



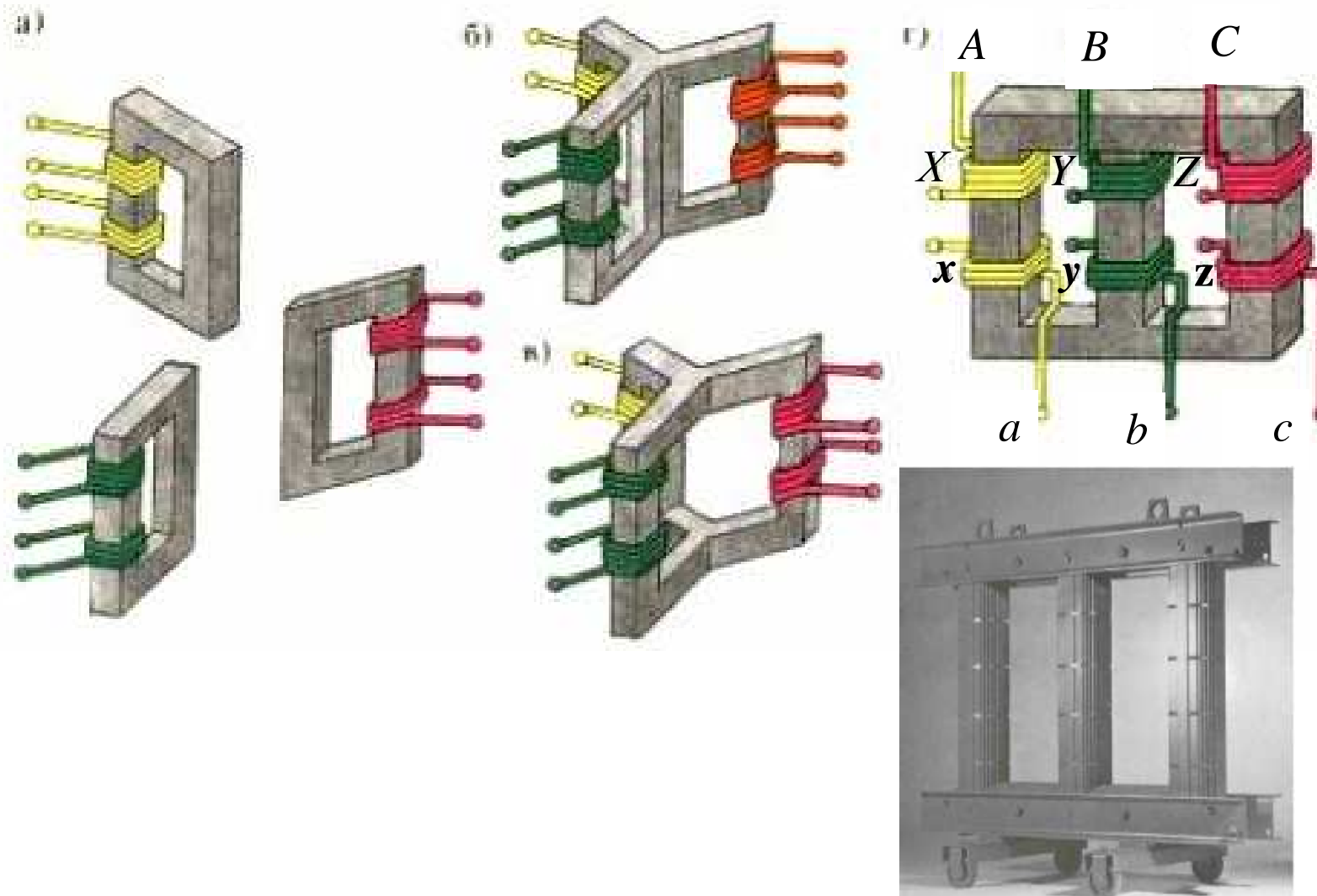
$$\frac{P_{\text{xx}}}{P_{\text{к}}} = 0.25 \div 0.5$$

$$\beta = 0.5 \div 0.7$$

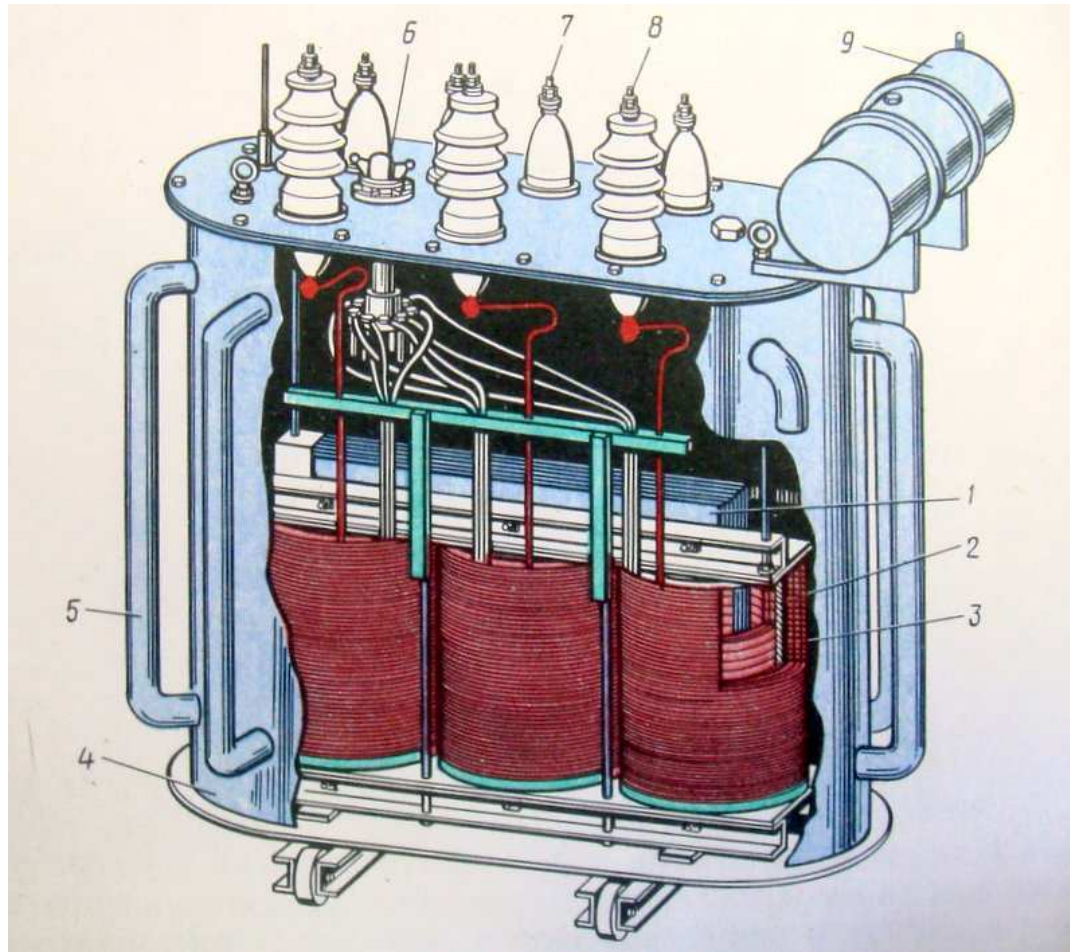
Наибольшее значение КПД трансформатора будет при токе нагрузки 50-70% номинального.

Максимальный КПД силовых трансформаторов доходит до 99.5%.

Трехфазные трансформаторы



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

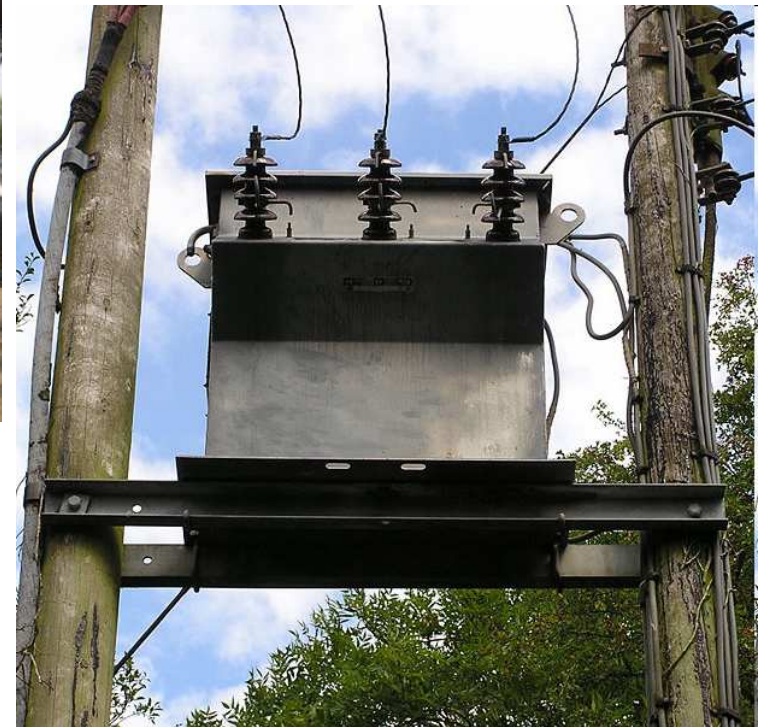
7 – ввод (изолятор) ВН

9 – расширитель

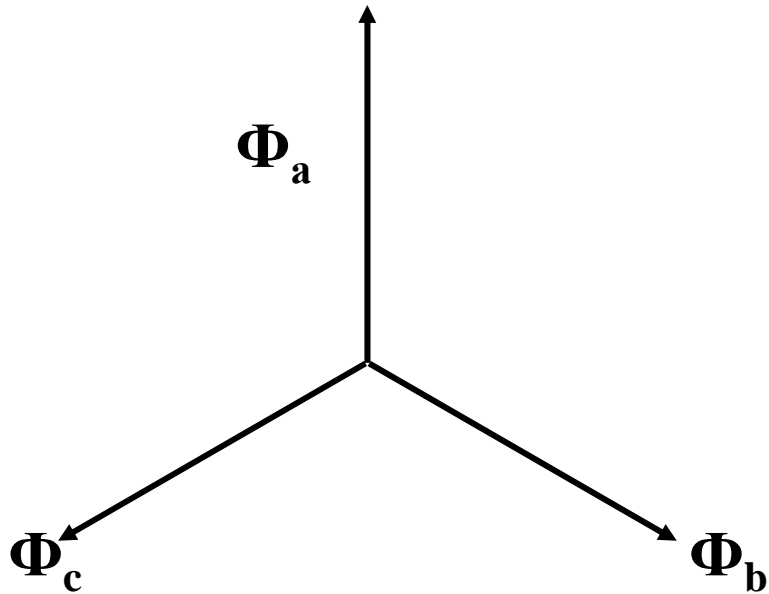
Силовой трансформатор 110 кВ



Понижающий тр-р



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)



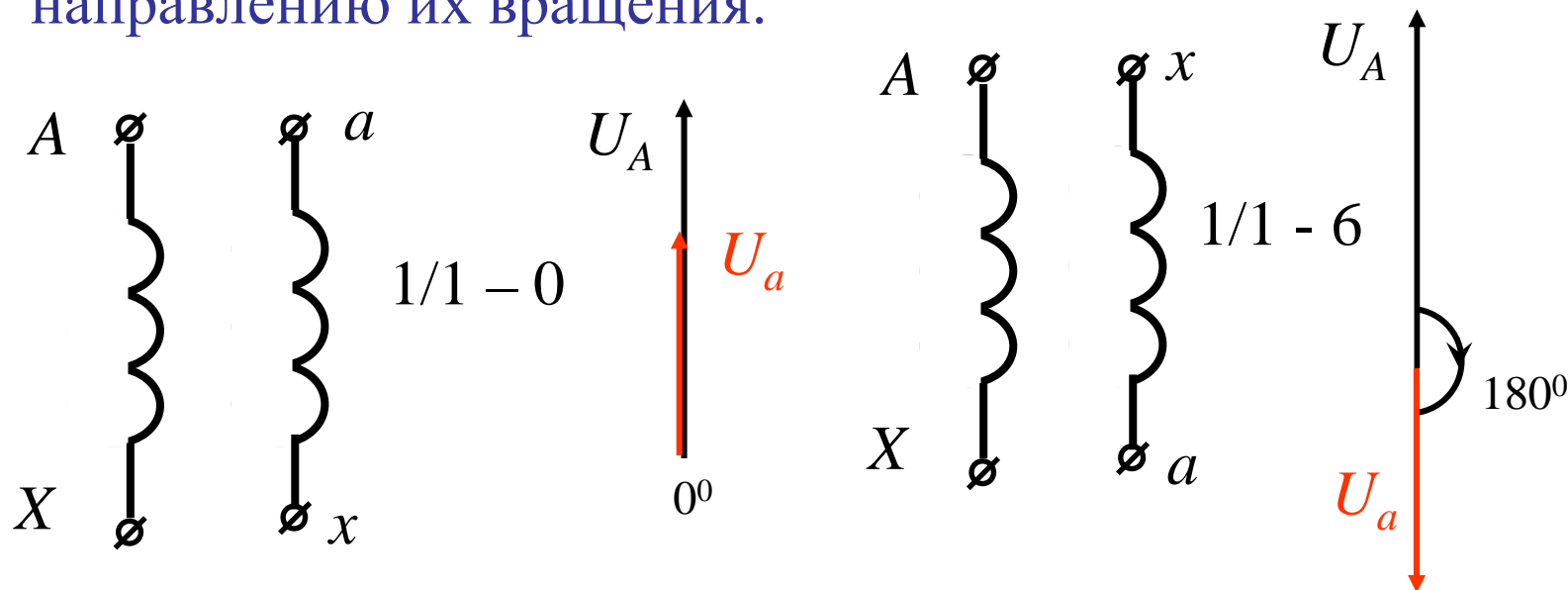
Принцип работы трехфазных тр-ров такой же, как и однофазных тр-ров.

В зависимости от сдвига фаз между линейными первичным и вторичным напряжениями трансформаторы делятся на группы соединений: 1, 2, 3...12

1 – 30^0 ; 2 – 60^0 ; 3 – 90^0 и т.д.

Вектор напряжения обмотки ВН совмещается с минутной стрелкой, а вектор напряжения обмотки НН – с часовой.

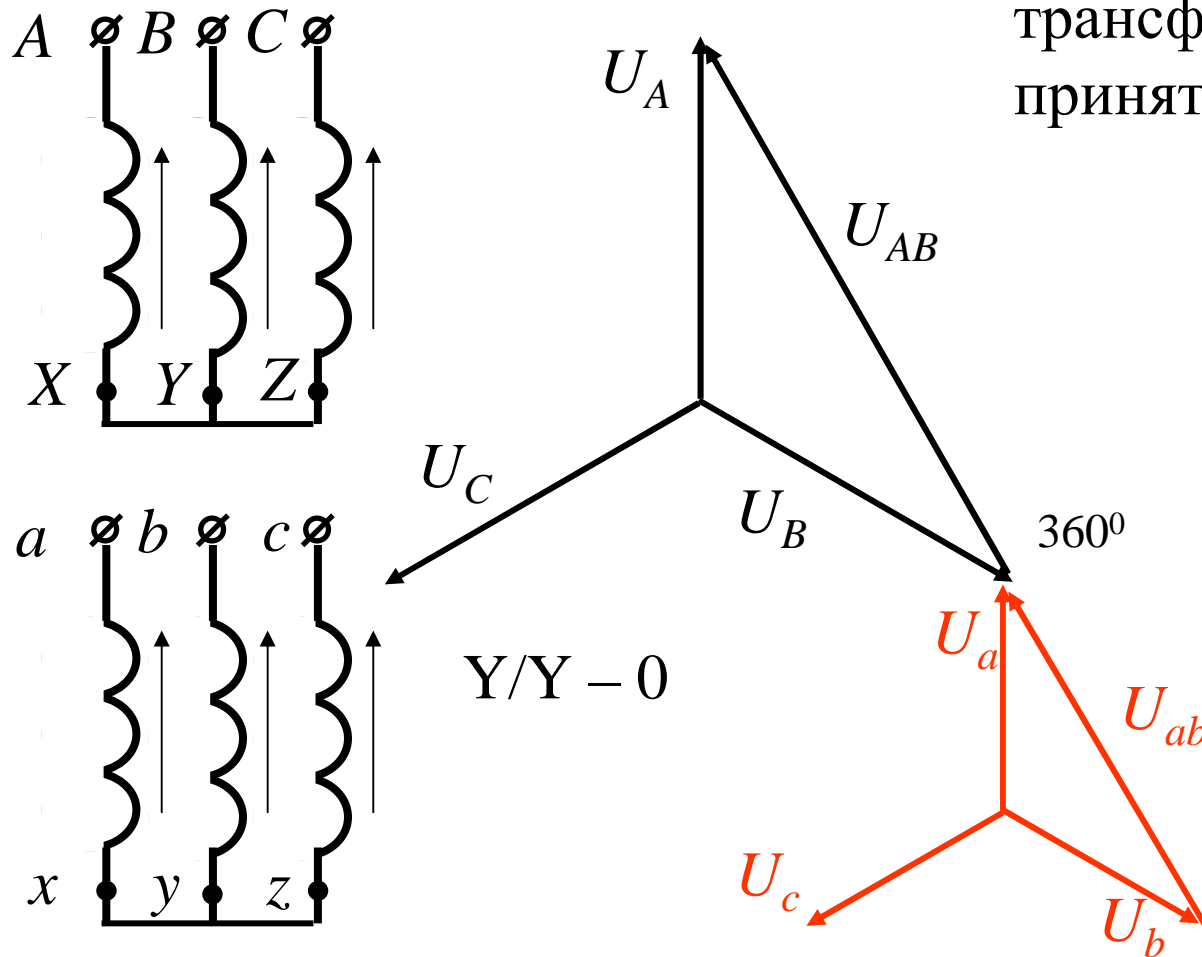
Отсчет угла производится от минутной стрелки к часовой по направлению их вращения.



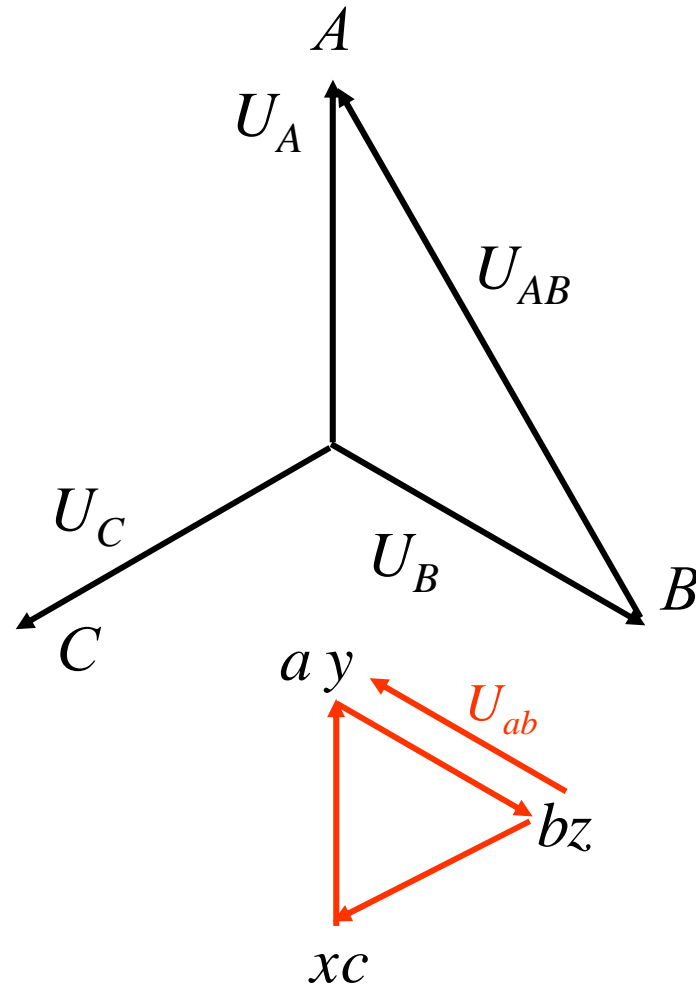
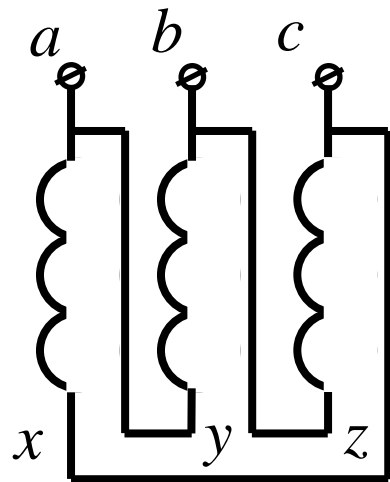
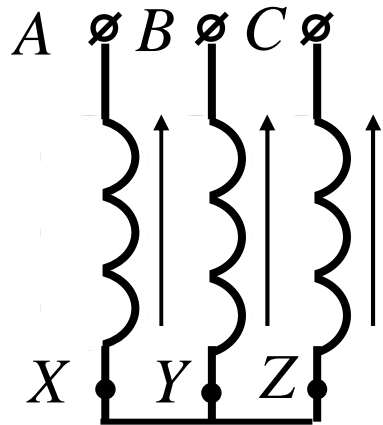
При соединении Y/Y все четные группы соединений: 2, 4, 6...12

При соединении Y/Δ все нечетные группы: 1, 3, 5...11

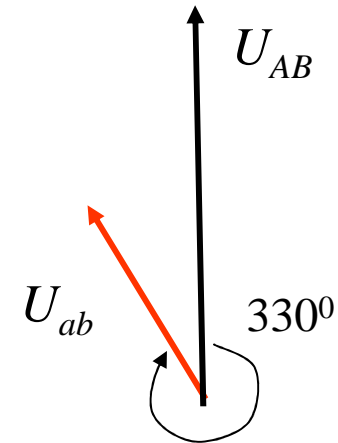
Для трехфазных трансформаторов приняты 11 и 0 группы.



Y/ Δ – 11



Векторы одноименных фазных напряжений первичной и вторичной обмоток совпадают по направлению, т.к. создаются общими магнитными потоками.



Коэффициент трансформации при различных соединениях обмоток

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

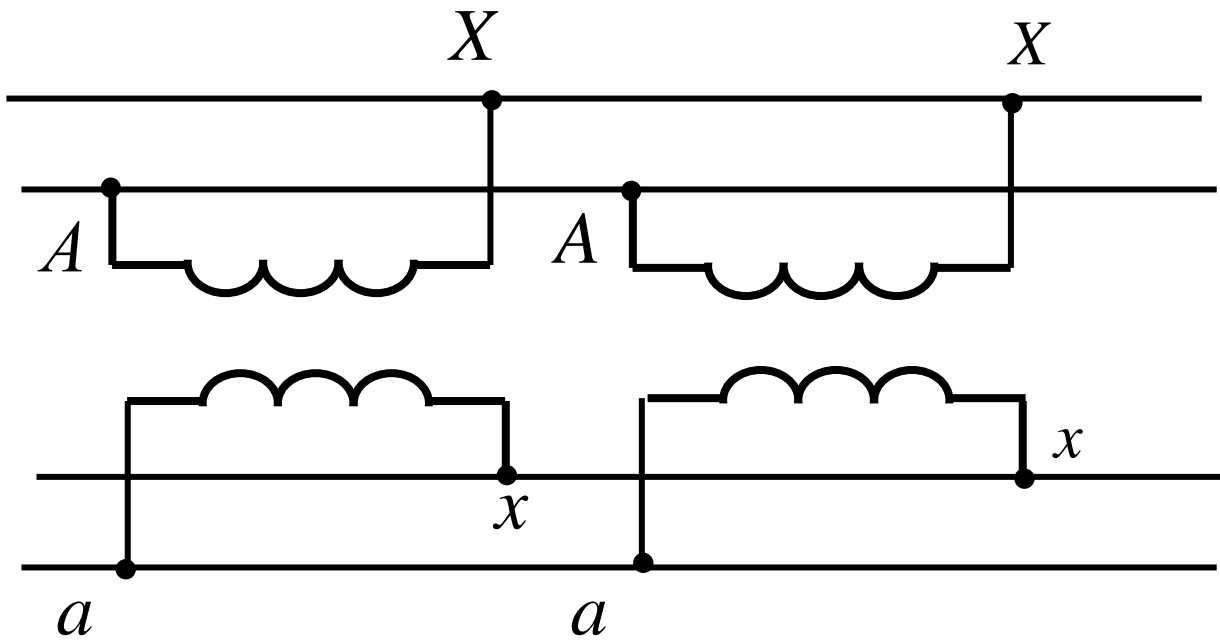
$$\mathbf{Y/\Delta} \quad U_{\text{л1}} = \sqrt{3}U_{\phi1} \quad U_{\text{л2}} = U_{\phi2} \quad k_{\phi} = \frac{U_{\phi1}}{U_{\phi2}} = \frac{U_{\text{л1}}}{\sqrt{3}U_{\text{л2}}}$$

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

Параллельная работа трансформаторов

Условия:

- 1) Равенство номинальных напряжений первичных и вторичных обмоток.
- 2) Трансформаторы должны принадлежать к одной и той же группе соединений.
- 3) Равенство номинальных напряжений короткого замыкания (обеспечивает распределение нагрузки между трансформаторами пропорционально их номинальной полной мощности).

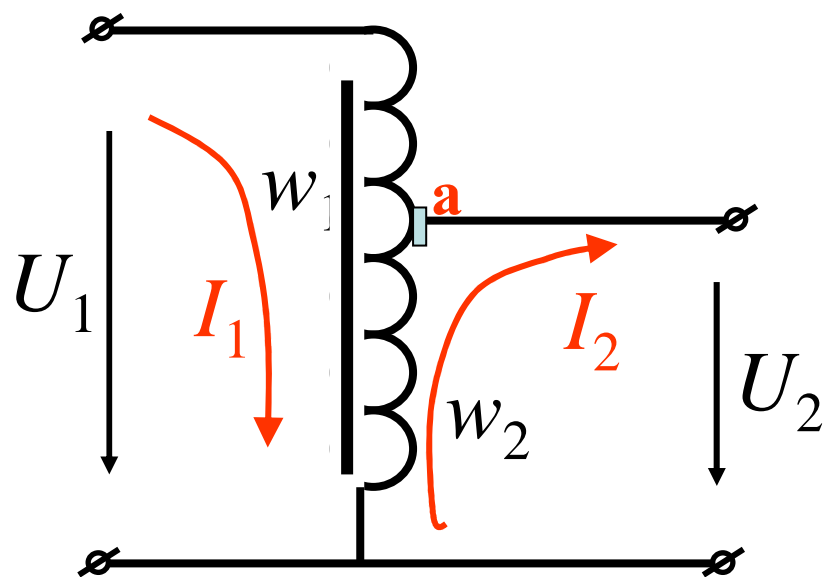


$$\frac{S_{\text{I}}}{S_{\text{IH}}} \div \frac{S_{\text{II}}}{S_{\text{IiH}}} = \frac{1}{u_{\text{KI}} \%} \div \frac{1}{u_{\text{KII}} \%}$$

Автотрансформатор предназначен для регулирования напряжения в сетях

имеет лишь обмотку ВН, а обмоткой НН служит часть обмотки ВН. Используется при соединении эл. цепей, отношение $U_{\text{Н}}$ у которых не превышает 2.

$$k_{12} = w_1 / w_2 \approx I_2 / I_1 \approx U_1 / U_2$$



Т.к. $k_{12} < 2$, то $I_1 \approx I_2$ и их фазы практически одинаковы, поэтому ток в общей части мал $I_2 - I_1$ и общая часть выполняется из более тонкого провода.

Размеры трансформатора зависят от его
расчетной мощности

$$S_T = U_1 I_1 \approx U_2 I_2$$

Автотрансформатор

Расчетная полная мощность общей части

$$S' \approx U_2 (I_2 - I_1) = U_2 I_2 \left(1 - \frac{w_2}{w_1}\right)$$

Расчетная полная мощность остальной части обмотки

$$S'' \approx I_1 (U_1 - U_2) = U_1 I_1 \left(1 - \frac{w_2}{w_1}\right)$$

$$S' \approx S'' \approx S_{\text{ат}} \quad \text{т.к.} \quad U_2 I_2 \approx U_1 I_1$$

Размеры трансформатора зависят от его расчетной мощности

$$\frac{S_{\text{ат}}}{S_{\text{T}}} = 1 - \frac{w_2}{w_1} -$$

Чем меньше различаются числа витков обмоток, тем выгоднее применение автотрансформатора.

Преимущества: меньший расход активных материалов (медь, сталь); более высокий КПД (99%); меньший размер и стоимость.

при $k_{12} < 2$

Недостатки: большие токи КЗ; электрическая связь обмоток ВН и НН требует усиленной изоляции по отношению к земле; возрастает опасность поражения эл. током (при $k_{12} > 2$).



Изменением положения точки **а** можно плавно регулировать U_2 в ЛАТРах, у которых одним из выводов вторичной цепи служит подвижный контакт (щетка из графита).

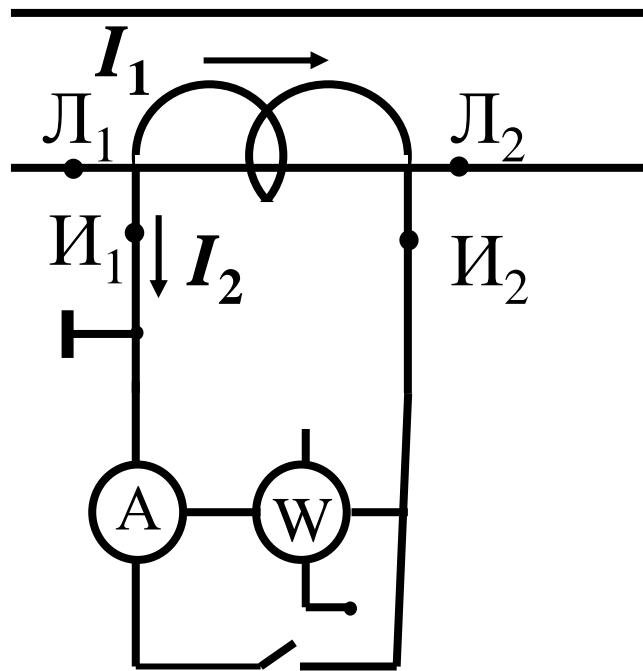


В электромеханических стабилизаторах напряжения регулировка производится за счет перемещения графитовой щетки вдоль катушки регулируемого автотрансформатора.



Трансформатор тока

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



$$I_1 \gg I_2$$

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

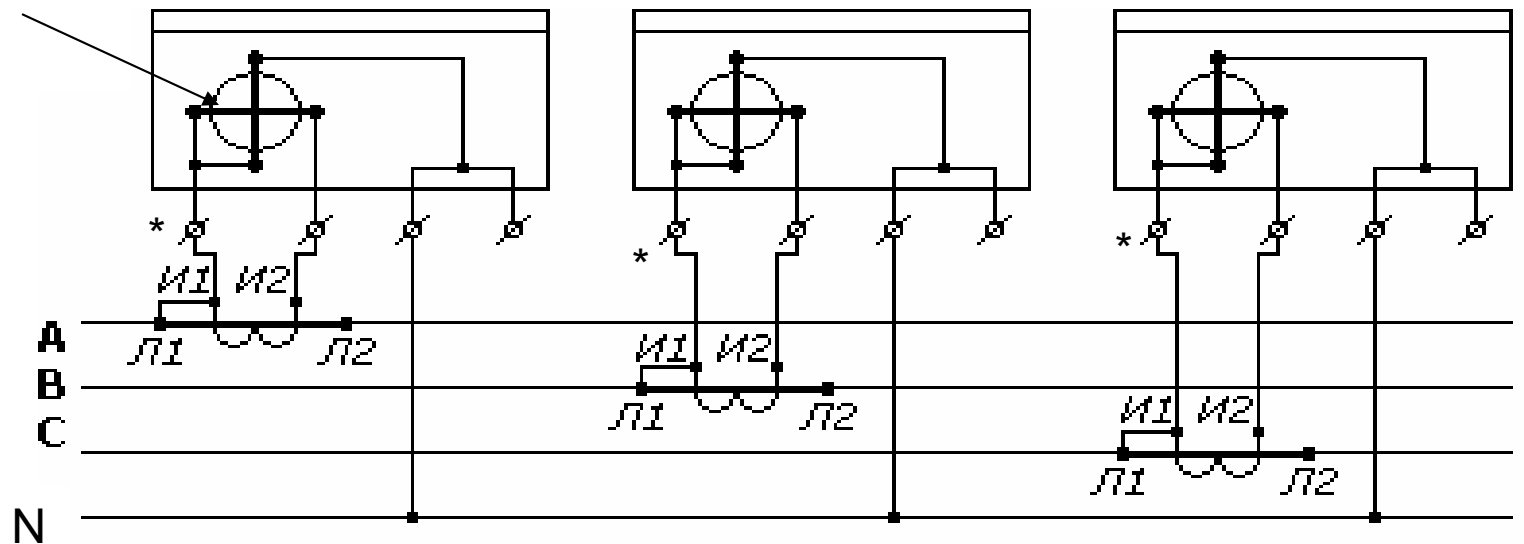
Первичная обмотка включается последовательно с контролируемым объектом, а вторичная замыкается через амперметр. Она имеет такое количество витков, чтобы при $I_{1н}$ в ней индуктировался ток 5 А. Коэффициенты трансформации: 10/5, 15/5, 20/5 А. Трансформаторы применяются в зависимости от величины рабочего тока потребителя.

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.



Схема включения счетчиков электроэнергии с трансформаторами тока

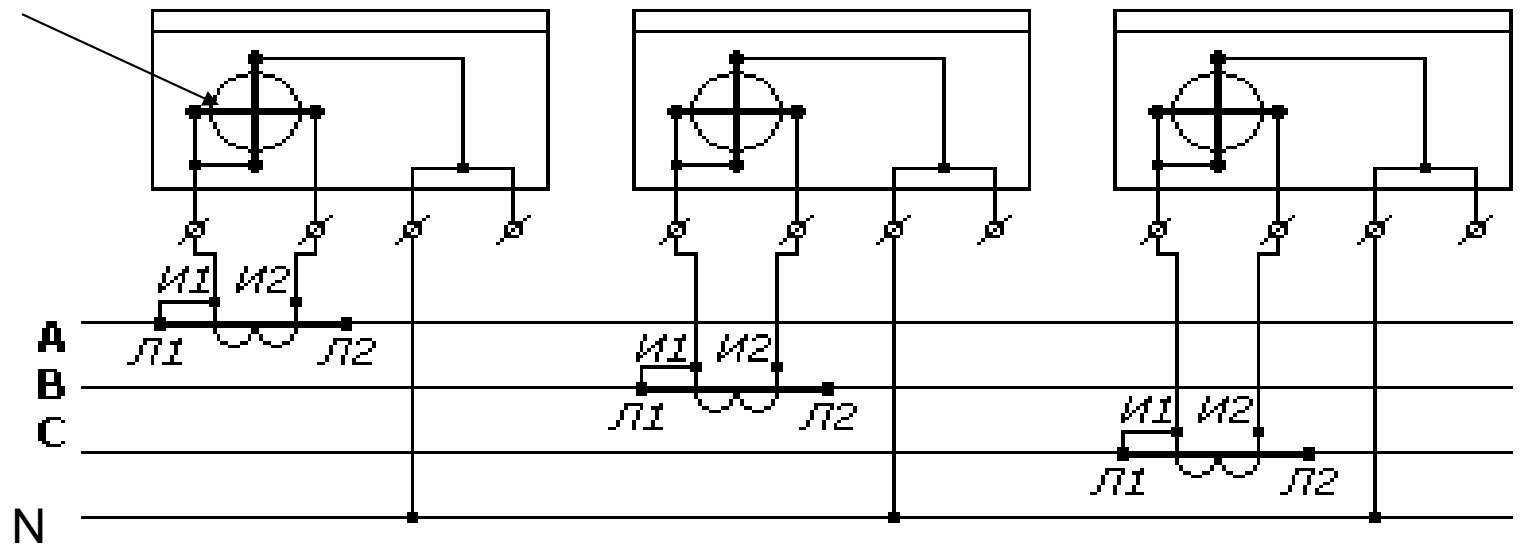
счетчик



Первичная обмотка трансформатора Л1 - Л2 включена в линейный провод с большим током, а токовая обмотка счетчика подключена ко вторичной обмотке трансформатора тока (выводы И1 - И2). Обмотка напряжения включена на U_{ϕ} (между выводами Л1 и И1 сделана перемычка, а третий зажим счетчика соединен с нулевым проводом). Для определения расхода электроэнергии необходимо расход, показанный счетчиком, умножить на коэффициент трансформации измерительного трансформатора.

Схема включения счетчиков электроэнергии с трансформаторами тока

счетчик



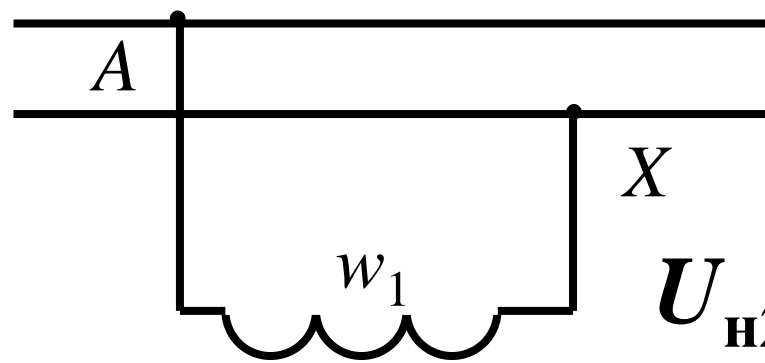
Если поменять местами выводы **И1 - И2** на одной из фаз, счетчик будет недоучитывать более 1/3 электроэнергии (либо сделать перемычку между выводами **И1 - И2**, либо оборвать токовую обмотку).

Для снятия информации о значениях переменного тока в проводнике, проводник помещается внутрь трансформатора тока. При этом проводник - первичная обмотка трансформатора тока, а вторичной обмоткой будет являться трансформатор тока, напряжение с которого снимается пропорционально протекающему по проводнику току.



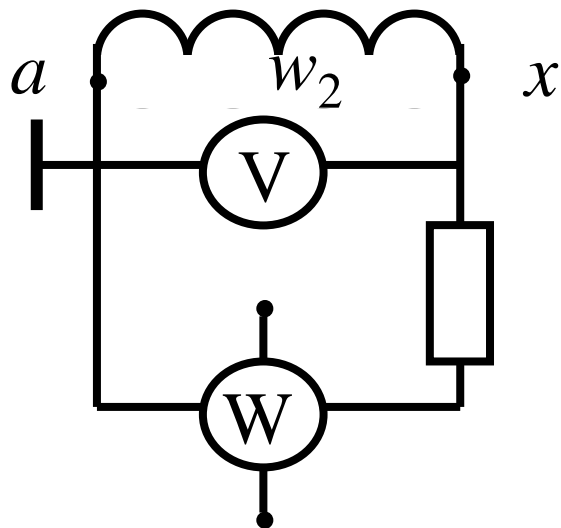
Трансформатор напряжения

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



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

$$U_{н2} = 100 \text{ В}$$

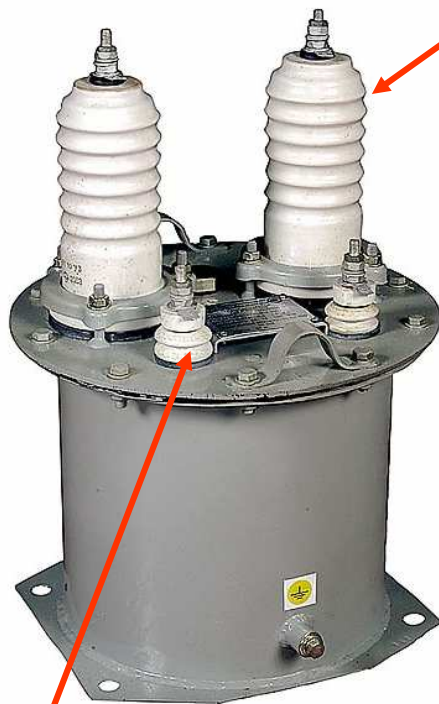


Заземление – на случай повреждения изоляции, а также для замыкания на землю цепи емкостного тока, который снижает точность измерения.

трехфазный

первичная обмотка

однофазный



вторичная обмотка



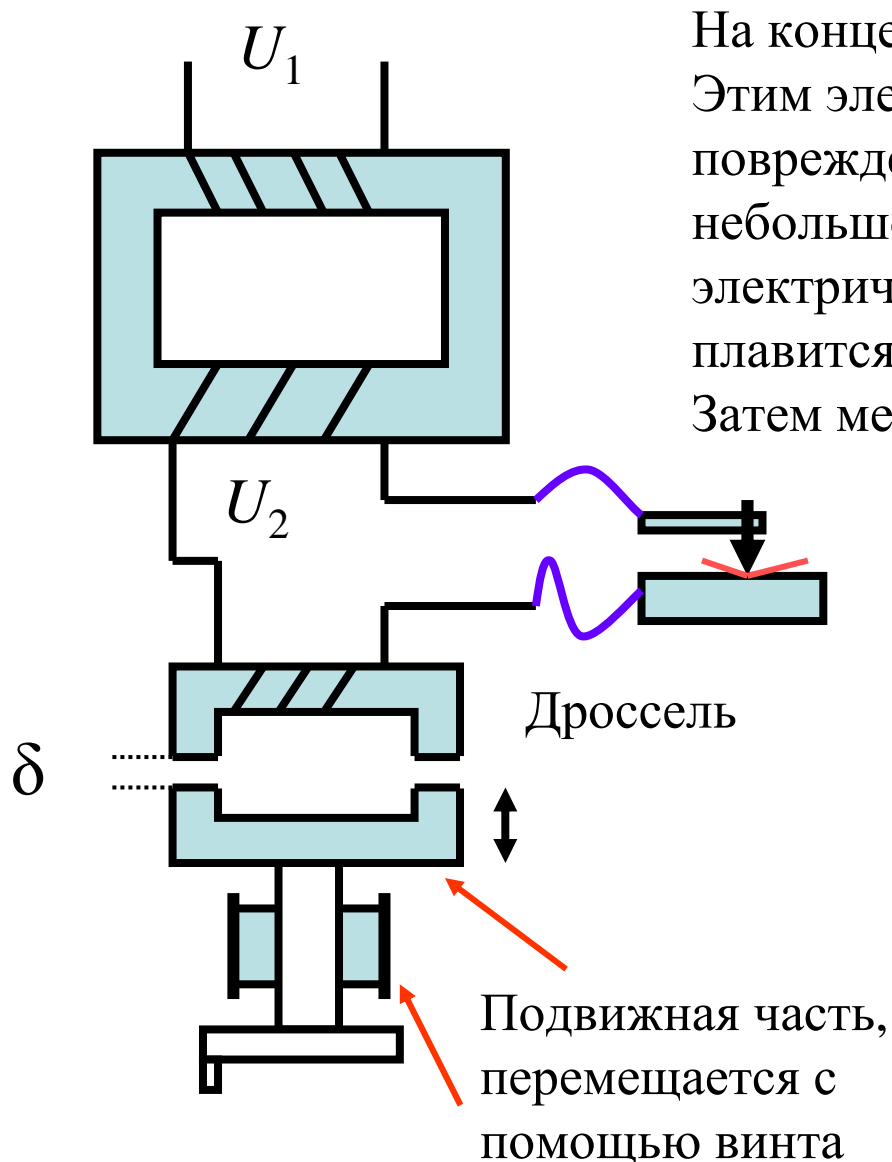
вторичная обмотка
(начало, конец, нейтраль)

Сварочный трансформатор

- однофазный понижающий трансформатор с $U_{2\text{xx}} = 60-75\text{В}$ (понижает напряжение до необходимого при сварке). Энергия Φ , преобразуется в электрическую во вторичной обмотке и подается на сварочную дугу. Работает в режиме КЗ ($I_2 > 200\text{ А}$). Для повышения стабильности горения дуги и ограничения тока КЗ в цепь вторичной обмотки включают дополнительную реактивную катушку.



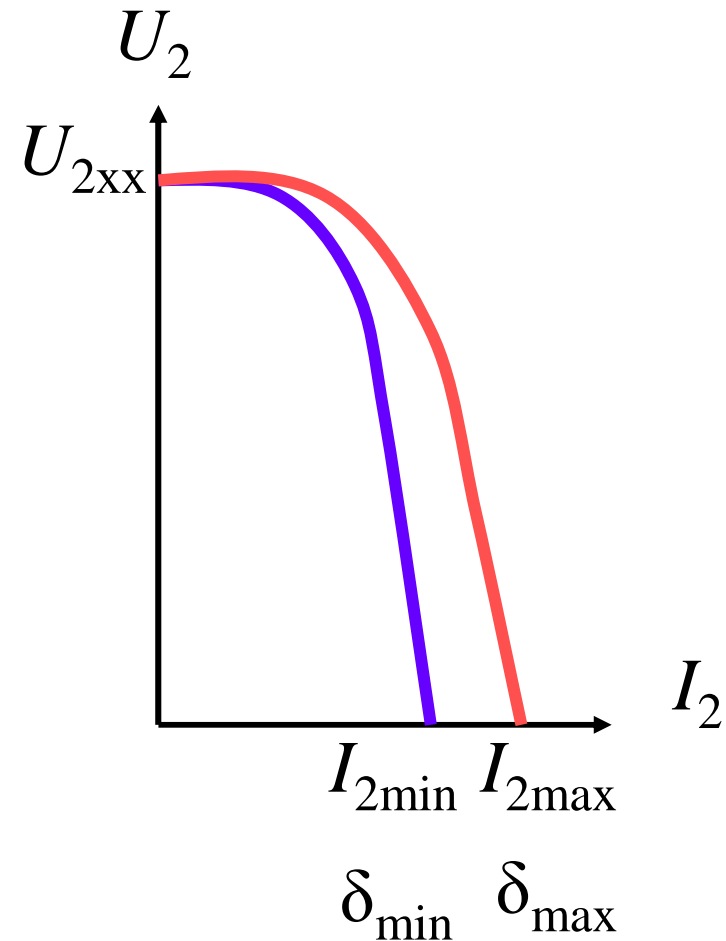
Достаточно быстро перегревается, поэтому указывается время включения, ПВ в % (10 мин – работа; 20 – отдых)



На конце вторичной обмотки – электрод. Этим электродом прикасаются к поврежденному месту, затем отводят на небольшое расстояние и возникает электрическая дуга. Электрод (металл) плавится и капает на поврежденное место. Затем металл застывает.

Обмотку дросселя включают последовательно со вторичной обмоткой. Величину сварочного тока регулируют путем изменения воздушного зазора δ между подвижной и неподвижной частями.

При увеличении δR_M магнитопровода \uparrow , $\Phi \downarrow$, индуктивное сопротивление катушки \downarrow и сварочный ток \uparrow . Для получения большей величины тока воздушный зазор нужно увеличить (рукоятку на дросселе вращать по часовой стрелке), а для получения меньшей величины тока — зазор уменьшить (рукоятку вращать против часовой стрелки). Регулирование сварочного тока рассмотренным способом позволяет настраивать режим сварки плавно и с достаточной точностью.



Современные сварочные трансформаторы размером с большую книгу (за счет повышения частоты).



$$E = 4,44f\omega\Phi_m$$

При увеличении частоты, уменьшается число витков, следовательно, уменьшаются габариты.

Трехфазный трансформатор $S_H=50$ кВА работает в течение времени $T=800$ ч/год с полной нагрузкой. Магнитные потери – $0.7\% S_H$; электрические потери – $2.65\% S_H$. Определить КПД при номинальной нагрузке, а также среднегодовой КПД.

$$P_{\text{ст}} = \frac{0.7\% \cdot 50000}{100\%} = 0.35 \text{ кВт}$$

$$P_{\text{эл}} = \frac{2.65\% \cdot 50000}{100\%} = 1.325 \text{ кВт}$$

$$P_{\text{ст}} + P_{\text{эл}} = 1.675 \text{ кВт}$$

Полезная мощность, отдаваемая трансформатором потребителю при номинальной нагрузке ($\beta=1$)

$$P_{2H} = S_H \cos \varphi_2 = 50 \cdot 1 = 50 \text{ кВт}$$

$$\eta_H = \frac{P_{2H}}{P_{2H} + P_{ст} + P_{эл}} = \frac{50}{50 + 1.675} = 0.967$$

Энергия, отдаваемая за год

$$W_2 = P_{2H} \cdot T = 50 \cdot 800 = 40000 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Энергия, потребляемая при ХХ (на магнитные потери)

$$T_{ХХ} = 365 \cdot 24 = 8760 \text{ ч}$$

$$W_{ХХ} = P_{ст} \cdot T_{ХХ} = 0.35 \cdot 8760 = 3066 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Энергия, теряемая в проводах при номинальной нагрузке

$$W_{\text{к}} = P_{\text{эл}} \cdot T = 1.325 \cdot 800 = 1060 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Энергия, потребляемая в год

$$W_{\text{г}} = W_2 + W_{\text{хх}} + W_{\text{к}} = 40000 + 3066 + 1060 = 44126 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

$$\eta_{\text{г}} = \frac{W_2}{W_{\text{г}}} = \frac{40000}{44126} \cdot 100\% = 90.5\%$$

Три трехфазных трансформатора с одинаковыми группами соединения включены параллельно на общую нагрузку $S_H=5000$ кВА, при этом $S_1=1000$ кВА, $u_{к1}=6.5\%$; $S_2=1800$ кВА, $u_{к2}=6.65\%$; $S_3=2200$ кВА, $u_{к3}=6.3\%$. Определить нагрузку каждого трансформатора.

Суммарная номинальная мощность трансформаторов

$$\sum \frac{S}{u_k} = \frac{1000}{6.5} + \frac{1800}{6.65} + \frac{2200}{6.3} = 774 \text{ кВА}$$

Нагрузка каждого трансформатора

$$S_{T1} = \frac{S_H \cdot S_1}{u_{к1} \cdot \sum \frac{S}{u_k}} = \frac{5000 \cdot 1000}{6.5 \cdot 774} = 994 \text{ кВА}$$

$$S_{T2} = \frac{5000 \cdot 1800}{6.65 \cdot 774} = 1749 \text{ кВА} \quad S_{T3} = \frac{5000 \cdot 2200}{6.3 \cdot 774} = 2256 \text{ кВА}$$

Третий трансформатор перегружен на

$$\frac{2256}{2200} \cdot 100\% - 100\% = 2.5\%$$

Для устранения этой перегрузки следует снизить внешнюю нагрузку трансформаторов на 2.5%

$$S_{\text{н}} = 5000 - \frac{2.5 \cdot 5000}{100} = 5000 - 125 = 4875 \text{ кВА}$$