

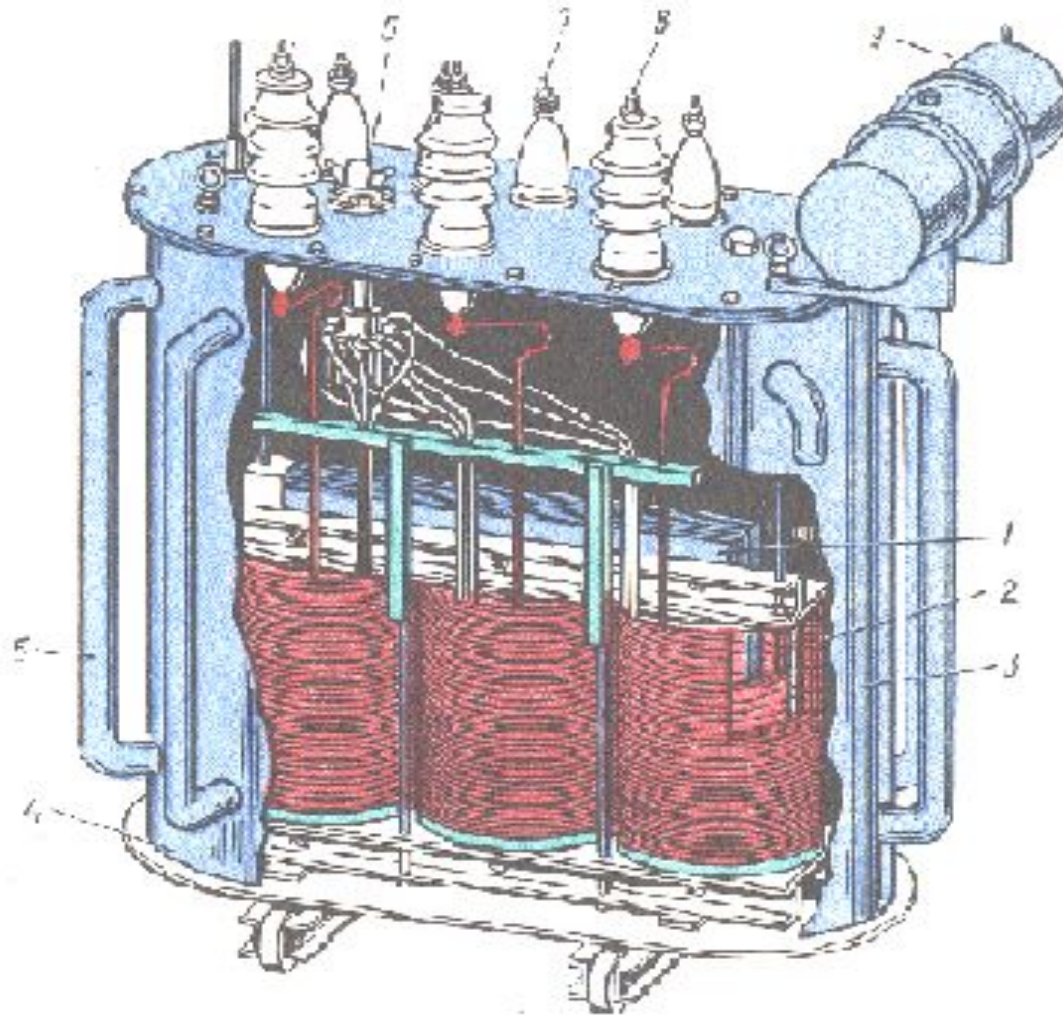
# ТРАНСФОРМАТОРЫ

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

# Основные типы трансформаторов

1. Силовые
2. Трансформаторы для статических преобразователей
3. Автотрансформаторы
4. Испытательные
5. Силовые специальные
6. Измерительные
7. Радиотрансформаторы
8. Специальные

# Силовой трансформатор

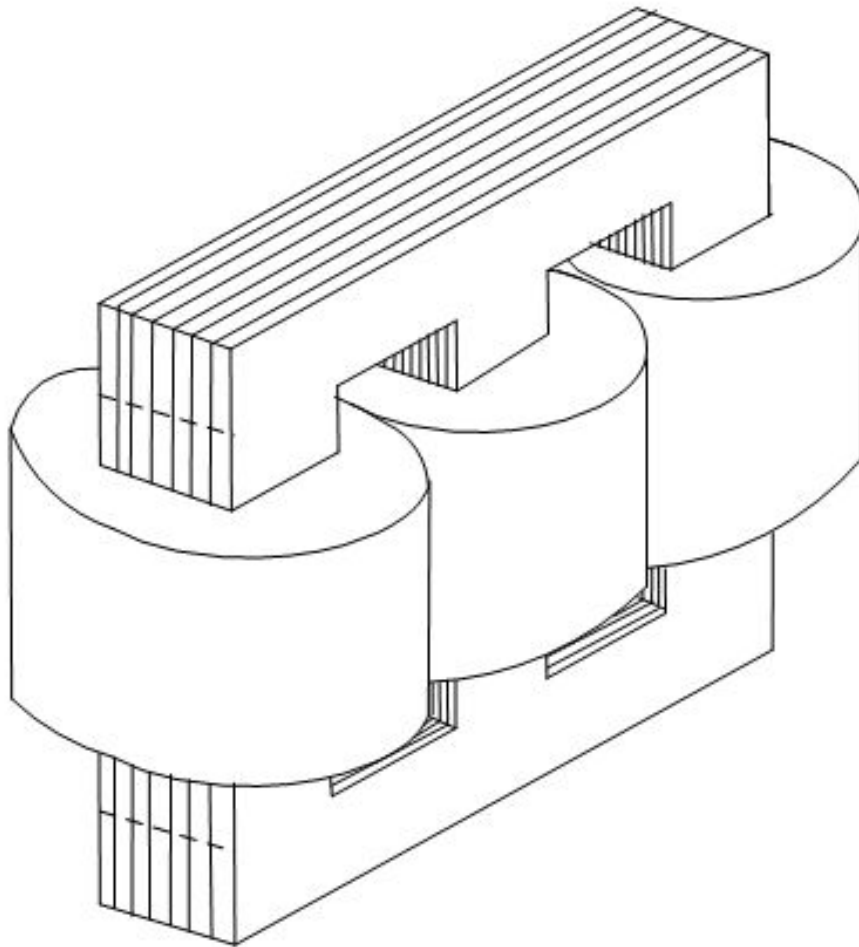


- **Конструктивная схема силовых тр-ров**

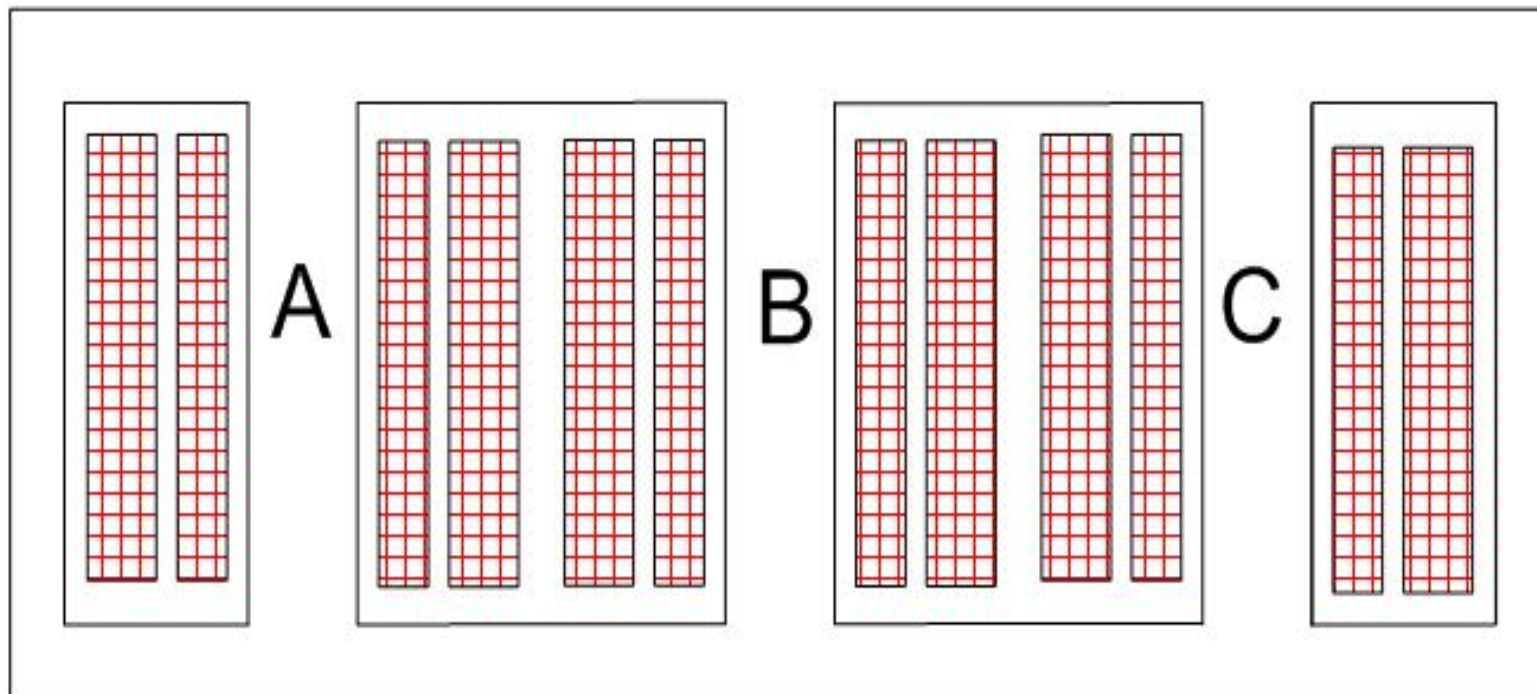
- 1) Замкнутая магнитная система – магнитопровод
- 2) Электрическая система – две или более обмоток
- 3) Охлаждающая система – воздушная, масляная, водяная, комбинированная
- 4) Механическая система – обеспечивает механическую прочность конструкции тр-ра.

- **Магнитопровод** служит для усиления магнитной связи между обмотками, образует магнитную цепь по которой замыкается магнитный поток.
- Магнитопровод собирается из листов электротехнической стали.
- Силовые тр-ры выполняются с магнито-
- проводом трех типов: стержневого, броневого, бронестержневого.

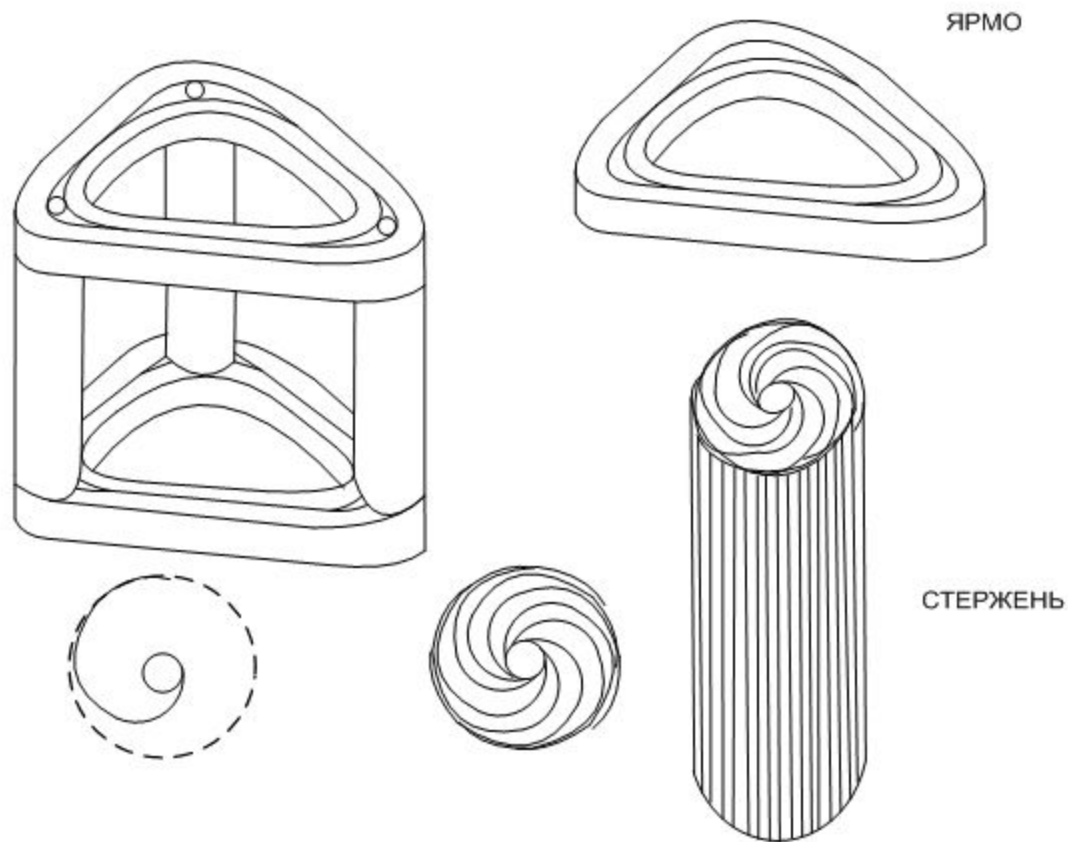
- Стержневой трехфазный



- Бронестержневой трансформатор



- С пространственным магнитопроводом





# Обмотки трансформаторов

- Являются важнейшим элементом трансформатора.
1. Составляют половины стоимости тр-ра.
  2. Практически всегда определяют срок эксплуатации тр-ра.

Обозначают: обмотку высокого напряжения (ВН), низкого напряжения –(НН)

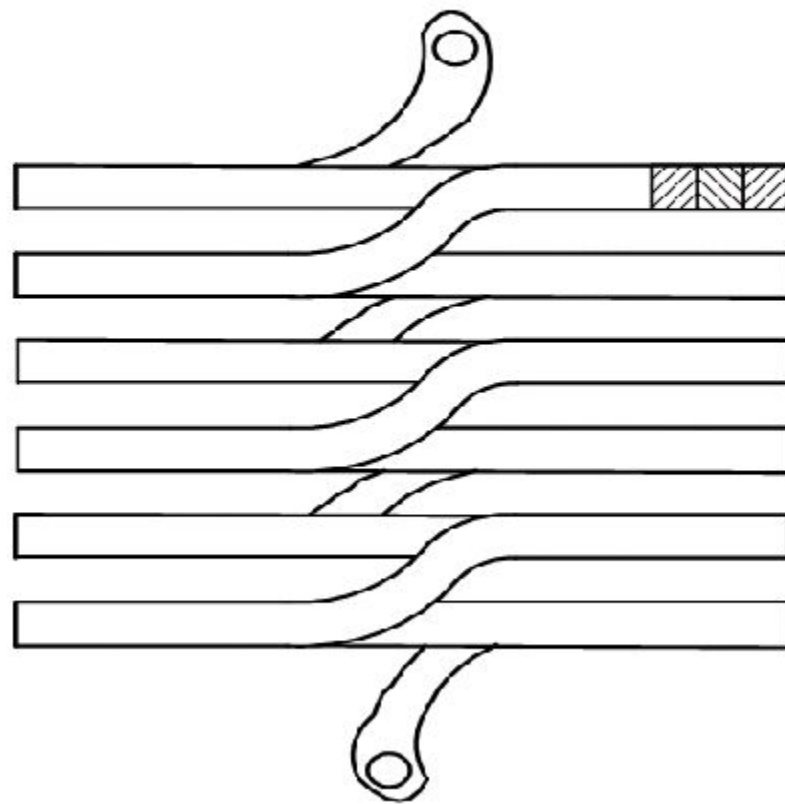
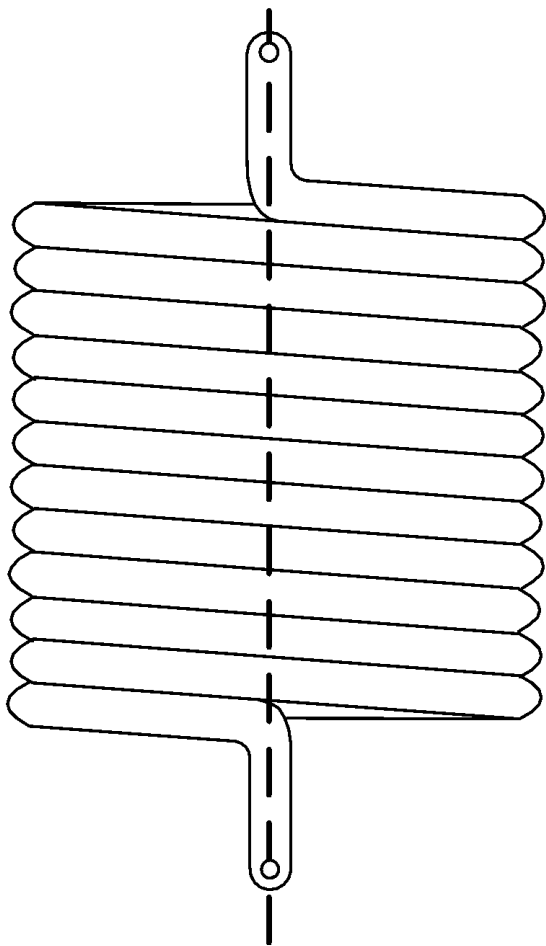
По расположению на стержне обмотки подразделяют на

# Концентрические и чередующиеся

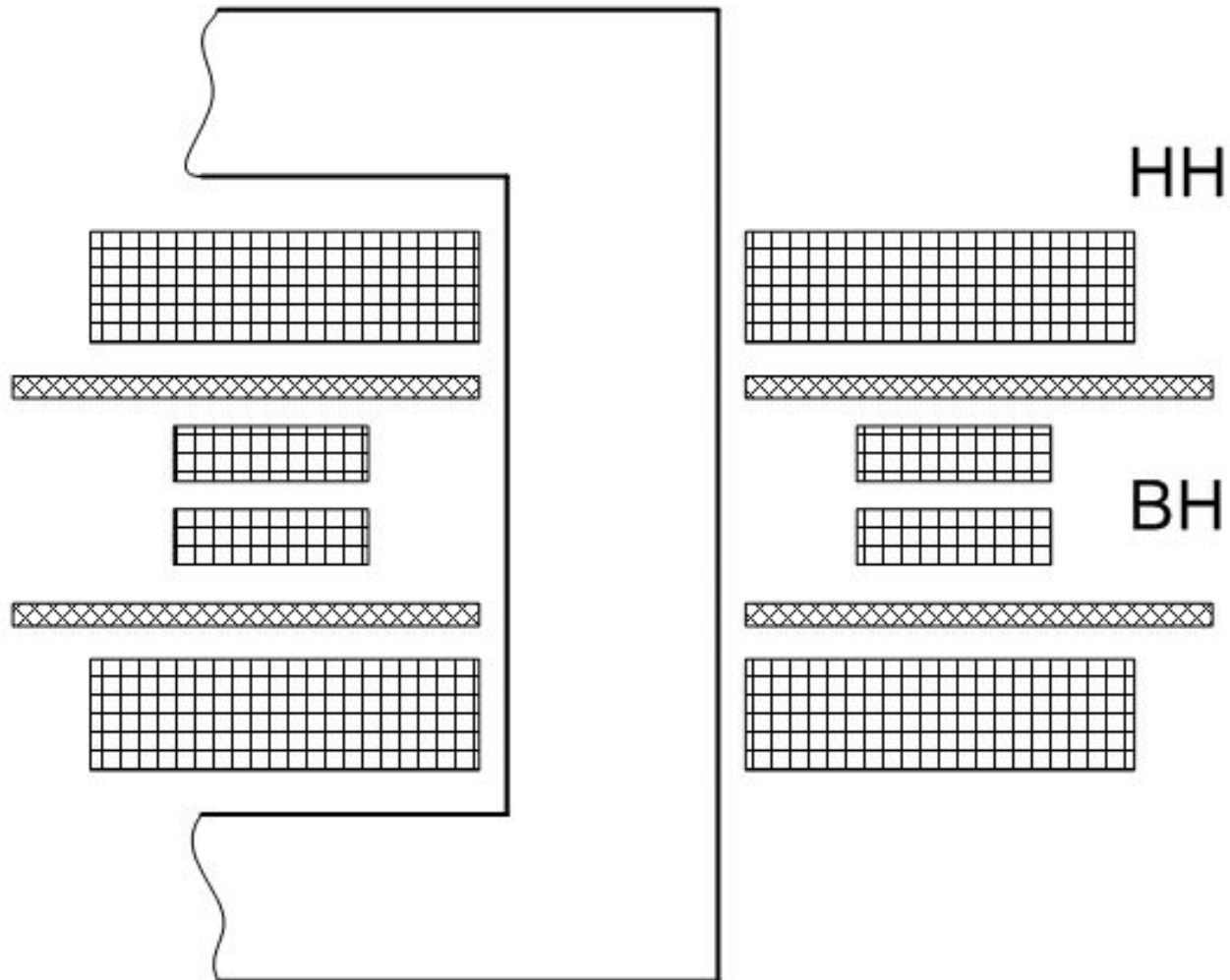
- Концентрические обмотки выполняют в виде полых цилиндров, размещенных на стержнях концентрически: ближе к стержню обмотка НН, а с наружи – обмотку ВН.
- Чередующиеся (дисковые) выполняются в виде отдельных дисков (секций) обмоток НН и ВН располагаются на стержне в чередующем порядке.

- Цилиндрическая обмотка

НЕПРЕРЫВНАЯ

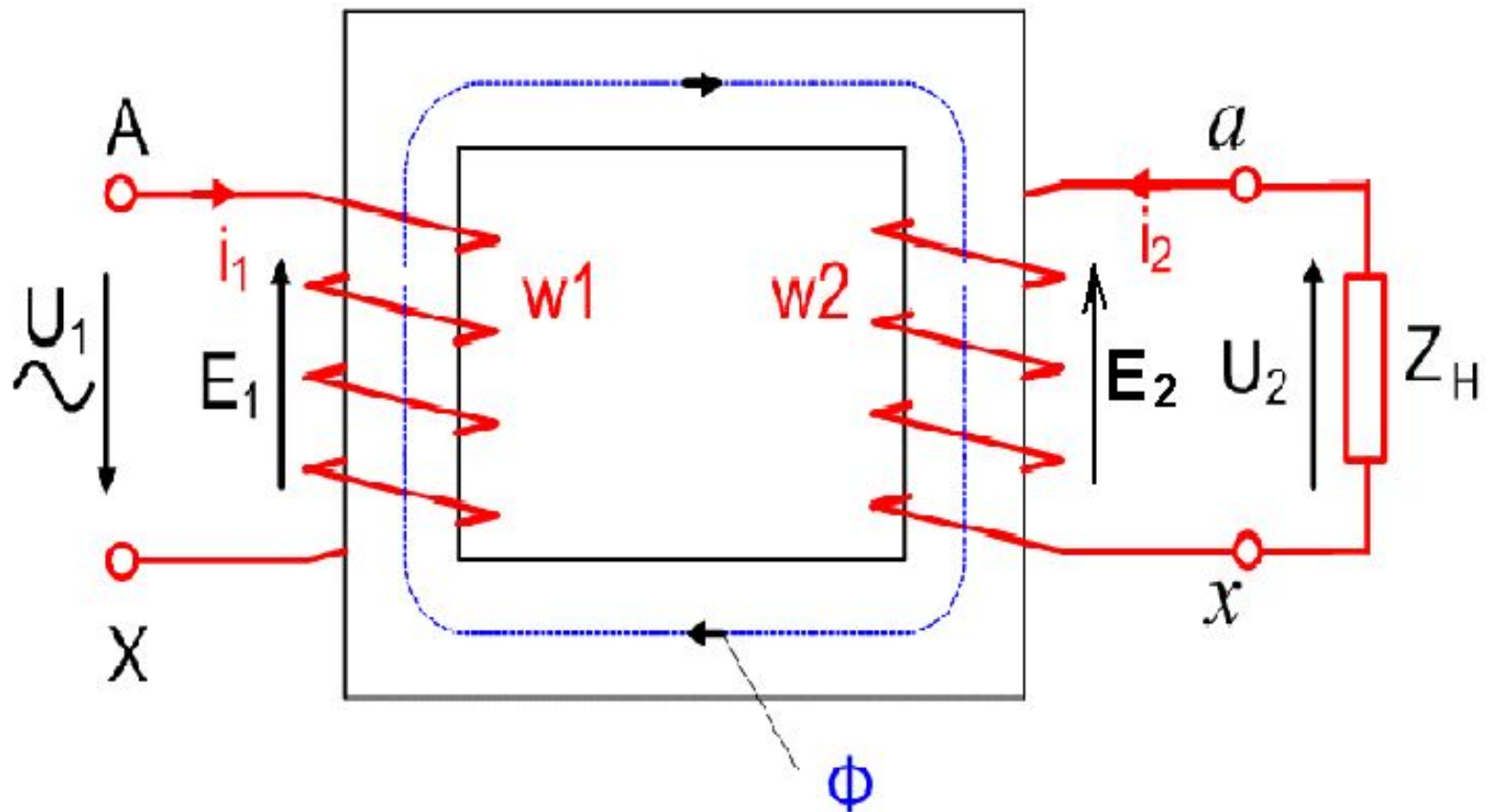


- Чередующиеся



# Принцип действия трансформатора

схема



# Уравнения напряжений обмоток

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= i_1 \cdot r_1 + w_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = i_1 \cdot r_1 - e_1, \\ -u_2 &= i_2 \cdot r_2 + w_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = i_2 \cdot r_2 - e_2. \end{aligned} \right\} (1)$$

# Идеализированный трансформатор – это трансформатор без потерь

- СВОЙСТВА:

$$\left. \begin{aligned} r_1 = r_2 = 0, \quad S_1 = S_2, \\ S_1 = m \cdot U_{1\phi} \cdot I_{1\phi}, \quad S_2 = m \cdot U_{2\phi} \cdot I_{2\phi}, \\ u_1 = e_1, \quad u_2 = e_2. \end{aligned} \right\} (2)$$

- Уравнения ЭДС обмоток

$$\Phi = \Phi_m \cdot \cos(\omega t),$$

$$e_1 = -w_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = \omega \cdot w_1 \cdot \Phi_m \cdot \sin(\omega t) =$$

$$= E_{m1} \cdot \sin(\omega t),$$

$$e_2 = -w_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = \omega \cdot w_2 \cdot \Phi_m \cdot \sin(\omega t) =$$

$$= E_{m2} \cdot \sin(\omega t),$$

(3)



- Из (3) очевидно, что ЭДС обмоток  $e_1$  и  $e_2$  отстают от магнитного потока  $\Phi$

на угол  $\pi / 2$ . Действующие значения ЭДС и напряжений обмоток:

$$\omega = 2\pi \cdot f_1, \quad 2\pi / \sqrt{2} = 4,44,$$

$$E_1 = \frac{E_{m1}}{\sqrt{2}} = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot \Phi_m \approx U_1, \quad \left. \vphantom{E_1} \right\} (4)$$

$$E_2 = \frac{E_{m2}}{\sqrt{2}} = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot \Phi_m \approx U_2.$$

## Коэффициент трансформации

- Принимаем обмотку с ЭДС  $E_1$  за обмотку ВН
- Отношение ЭДС обмоток ВН и НН называют
- **коэффициентом трансформации**

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2} > 1. \quad (5)$$

# Намагничивающий ток

Ток, необходимый для создания магнитного поля в трансформаторе, называется намагничивающим. Обозначается  $I_{\mu}$  .

Из закона Ома для магнитной цепи

$$\Phi_m = \Lambda_m \cdot F_{0m} = \Lambda_m \cdot I_{\mu} \cdot w_1$$

$$I_{\mu} = \frac{E_{m1}}{\omega \cdot \Lambda_m \cdot w_1^2} = \frac{E_{m1}}{\omega \cdot L_m} = \frac{E_{m1}}{X_m}$$

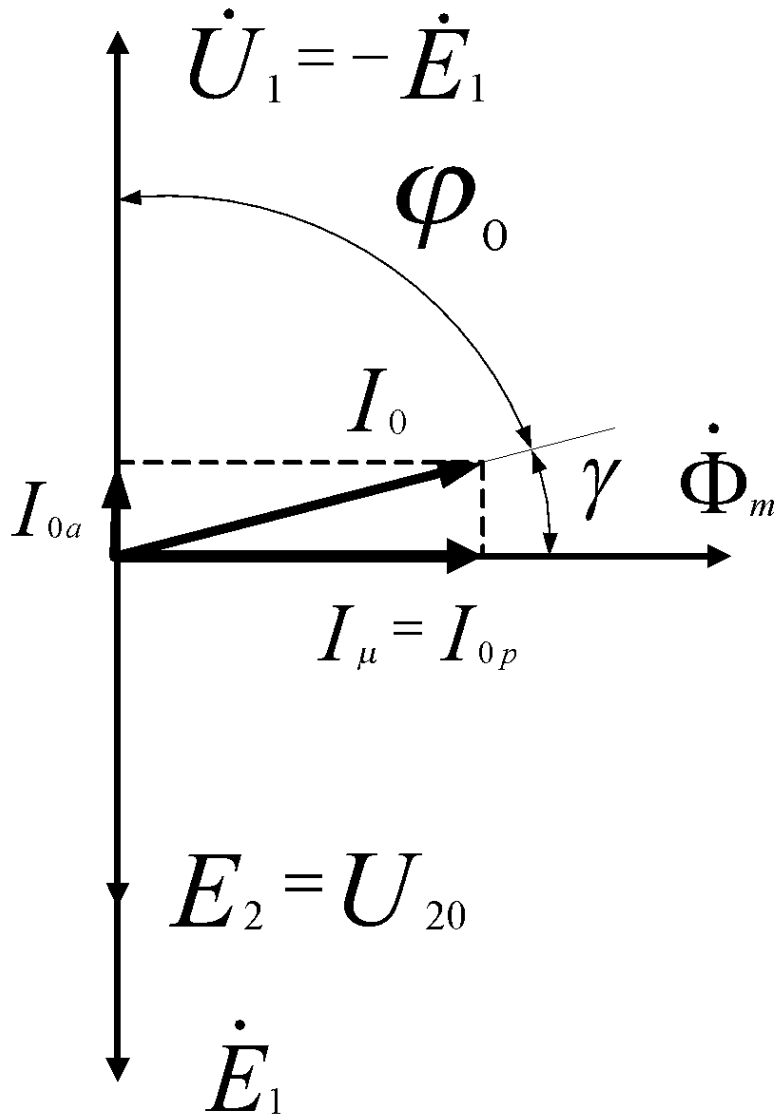
- Токи, магнитные потоки, напряжения обмоток трансформатора изменяются по синусоидальному характеру. Потому, для токов, магнитных потоков, напряжений трансформатора целесообразно использовать комплексную форму записи.

# Ток холостого хода трансформатора

- Ток холостого хода содержит активную и реактивную составляющие. Реактивной составляющей является ток намагничивания

$$\left. \begin{aligned} I_0 &= I_{0a} + jI_{0p}, \\ I_{0p} &= I_{\mu}. \end{aligned} \right\} (6)$$

- Векторная диаграмма XX

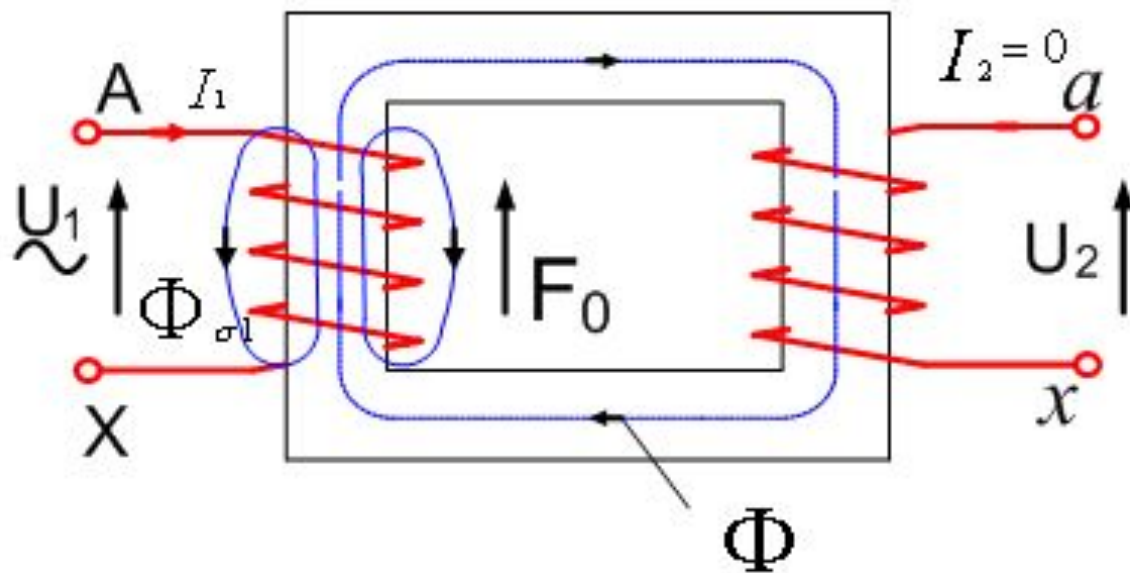


$$i_{0\%} = \frac{I_0}{I_{1H}} \cdot 100$$

$$i_{0\%} = 1 - 10$$

# Схема, XX

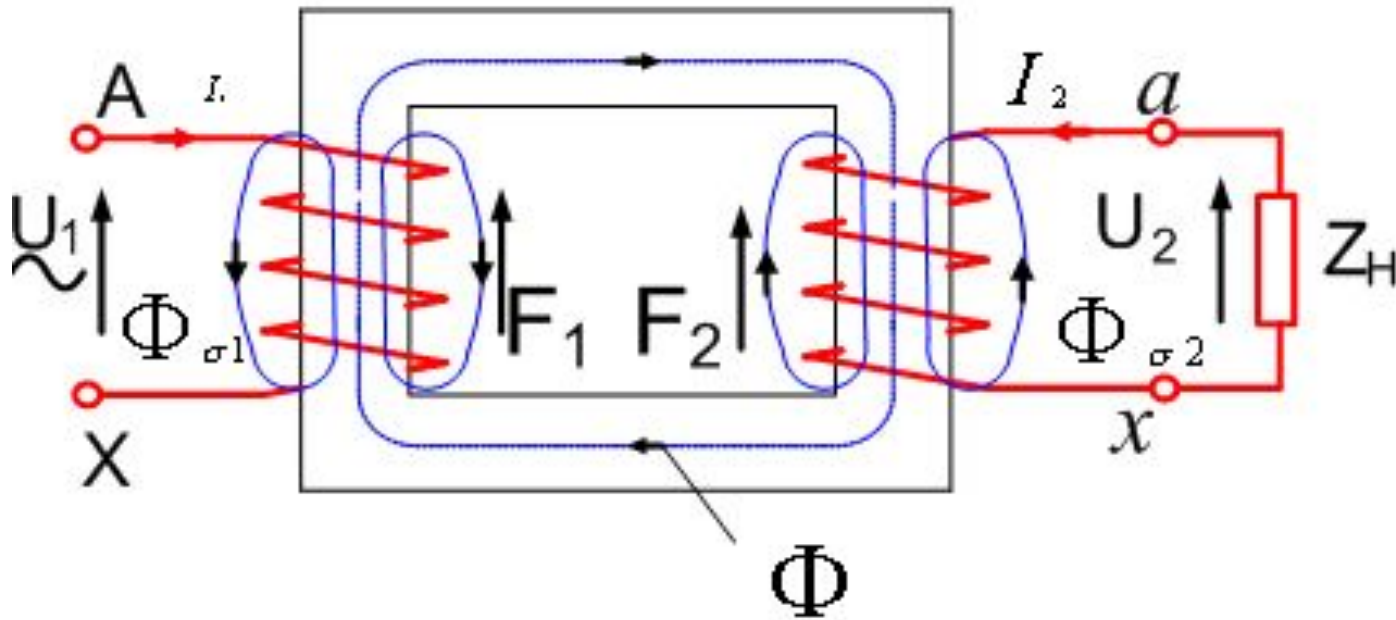
- МДС  $F_0$



$$L_0 = L_0 \cdot w_1$$

# Нагрузка

- МДС





# Уравнения МДС и токов

- При нагрузке трансформатора

$$\left. \begin{aligned} I_0 &= I_1 + I_2, \\ I_0 \cdot w_1 &= I_1 \cdot w_1 + I_2 \cdot w_2, \\ I_0 &= I_1 + I_2 \cdot \frac{w_2}{w_1} = I_1 + I_2', \\ I_2 &= I_2 \cdot \frac{w_2}{w_1} \quad - \end{aligned} \right\} (7)$$

- Если коэффициент трансформации
- $K = \frac{w_1}{w_2}$  (5), то ток вторичной
- обмотки, приведенный к первичной обмотке,

$$I_2' = \frac{I_2}{K}.$$

# Приведенный трансформатор

- Это трансформатор у которого
- параметры (активные и индуктивные сопротивления), токи и напряжения вторичной обмотки пересчитываются на число витков первичной обмотки.
- При этом все мощности и фазовые углы сдвигов во вторичной обмотке приведенного трансформатора должны быть такими, как в реальном трансформаторе.

- В результате приведения вторичной
- обмотки к первичной получим:
- для напряжения и тока

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}'_2 &= K \cdot \dot{E}_2 = \dot{E}_1 \approx \dot{U}_1, \\ \dot{I}'_2 &= \dot{I}_2 / K \approx \dot{I}_1, \end{aligned} \right\} (8)$$

- для активного сопротивления
- из равенства активных потерь в реальной и приведенной вторичной обмотки

$$\left. \begin{aligned}
 I_2^2 \cdot r_2 &= I_2'^2 \cdot r_2', \\
 r_2' &= \left( \frac{I_2}{I_2'} \right)^2 \cdot r_2 = K^2 \cdot r_2
 \end{aligned} \right\} (9)$$

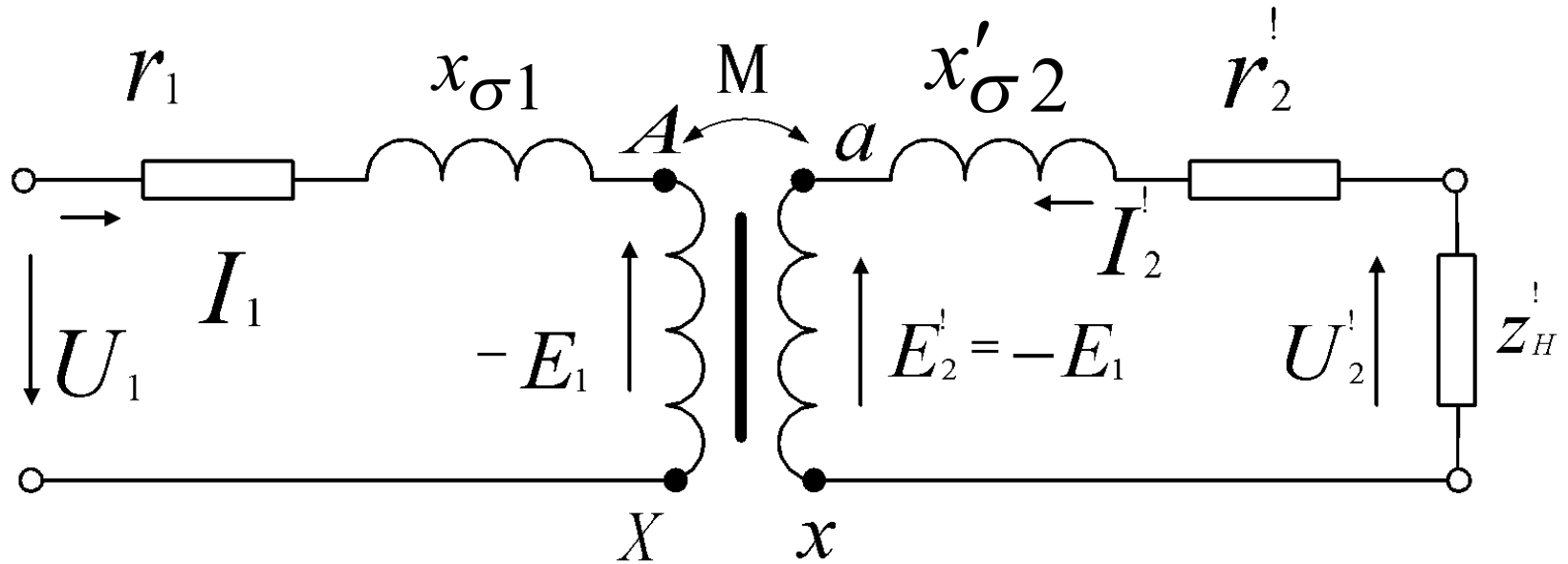
- для реактивного сопротивления рассеяния: Из равенства реактивных мощностей в реальной и приведенной вторичной обмотки

$$\left. \begin{aligned} I_2^2 \cdot x_{\sigma 2} &= I_2'^2 \cdot x_{\sigma 2}', \\ x_{\sigma 2}' &= \left( \frac{I_2}{I_2'} \right)^2 \cdot x_{\sigma 2} = K^2 \cdot x_{\sigma 2}. \end{aligned} \right\} (10)$$

- Уравнения приведенного трансформатора

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= I_1 \cdot r_1 + jI_1 \cdot x_{\sigma 1} - E_1, \\ U_2' &= -I_2' \cdot r_2' - jI_2' \cdot x_{\sigma 2}' + E_2', \\ I_1 &= I_0 + (-I_2'). \end{aligned} \right\} (11)$$

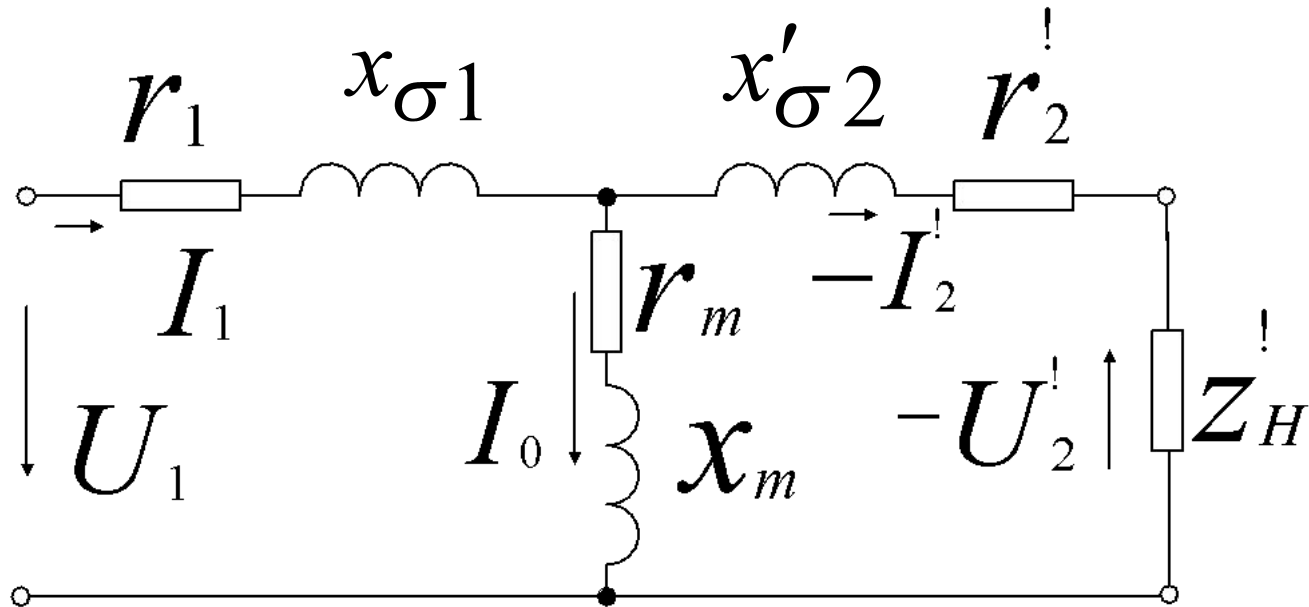
- Схема



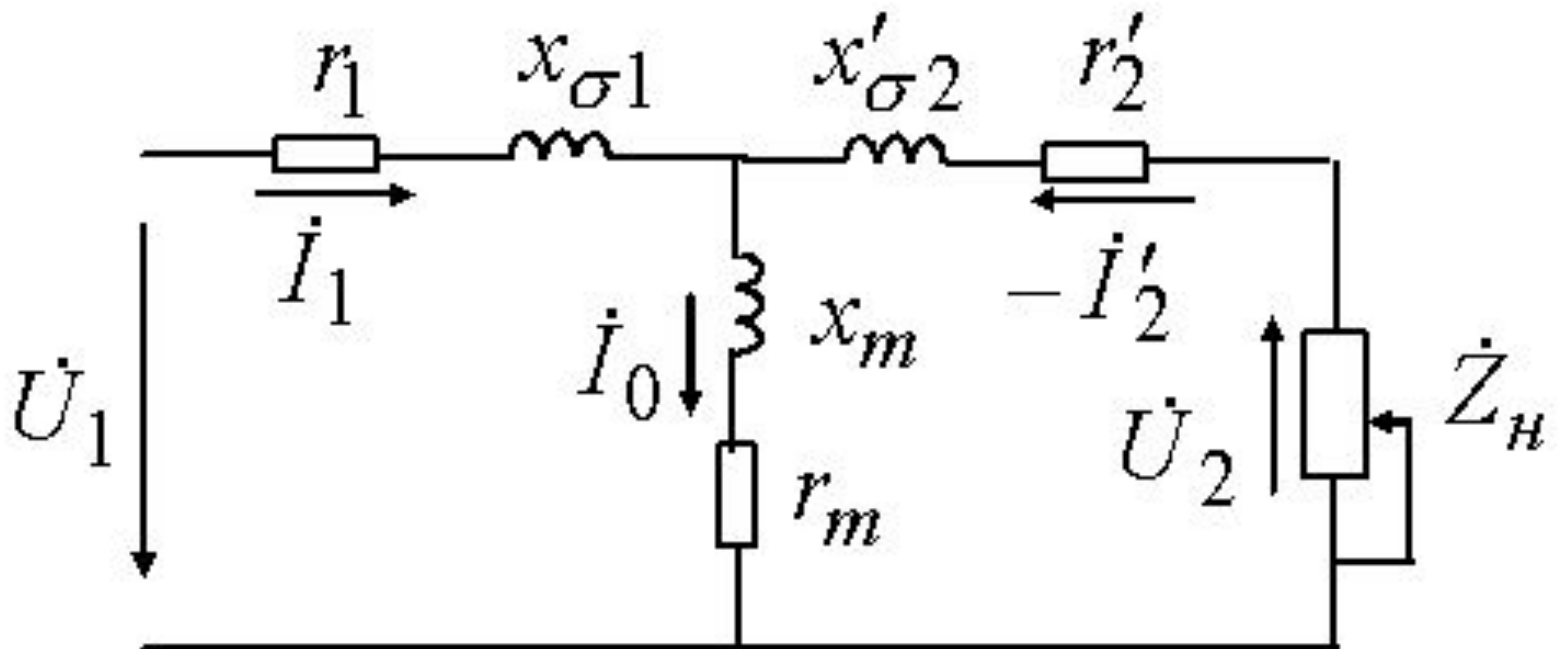
- точки  $A$  и  $a$ , а также  $X$  и  $x$  имеют одинаковые потенциалы, что позволяет их соединить и получить
- Т-образную схему замещения



# T-образная схема замещения



- Т-образная схема замещения



- Параметры схемы замещения

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= r_1 + jx_{\sigma 1} = \sqrt{r_1^2 + x_{\sigma 1}^2}, \\ Z_2 &= r_2' + jx_{\sigma 2}' = \sqrt{r_2'^2 + x_{\sigma 2}'^2}, \\ Z_m &= r_m + jx_m = \sqrt{r_m^2 + x_m^2}, \\ Z_m &= \frac{U_1 - I_1 \cdot Z_1}{I_0}. \end{aligned} \right\} (12)$$

# Параметры нагрузки

- Активно-индуктивная

$$\begin{aligned} Z_H &= r_H + j\omega L_H = \\ &= r_H + jx_H, \end{aligned}$$

- Активно-емкостная

$$\underline{Z}_H = r_H - j \frac{1}{\omega C_H} =$$

$$= r_H - jx_H$$

# Определение параметров схемы

- Параметры схемы замещения определяются из опытов холостого хода и короткого замыкания трансформатора.

# Опыт холостого хода

- В режиме хх:  $(Z_H = \infty, I_2 = 0)$

- Уравнения трансформатора

- $$\left. \begin{aligned} U_1 &= -E_1 + I_1 \cdot r_1 + jI_1 \cdot x_{\sigma 1}, \\ U_2' &= -E_2' = -E_1, \\ I_1 &= I_0. \end{aligned} \right\} (13)$$

**Полезная мощность при х.х.  
равна нулю. Мощность на входе  
трансформатора в режиме ХХ  
расходуется на магнитные  
потери в магнитопроводе и  
электрические потери в меди  
одной лишь первичной обмотки (**

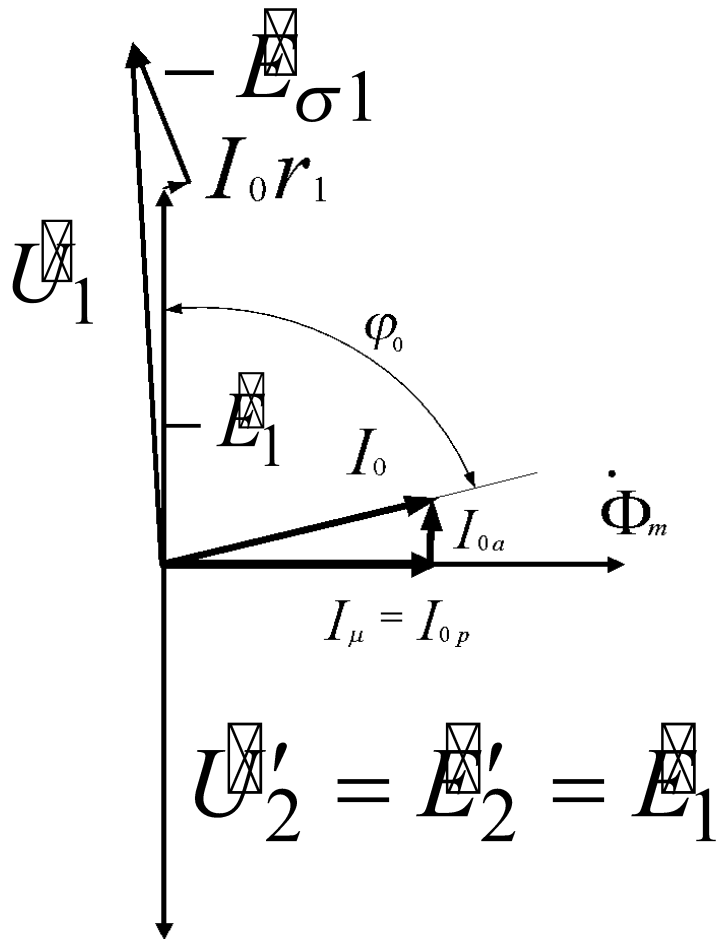
$$I_0^2 \cdot r_1 = P_{эл0}$$



Однако ввиду небольшой величины тока  $X_X$ , который составляет 2÷10% от номинального тока, электрическими потерями можно пренебречь и считать, что вся мощность  $X_X$  представляет собой мощность магнитных потерь в стали магнитопровода. Поэтому **магнитные потери** в трансформаторе принято называть **потерями холостого хода**.

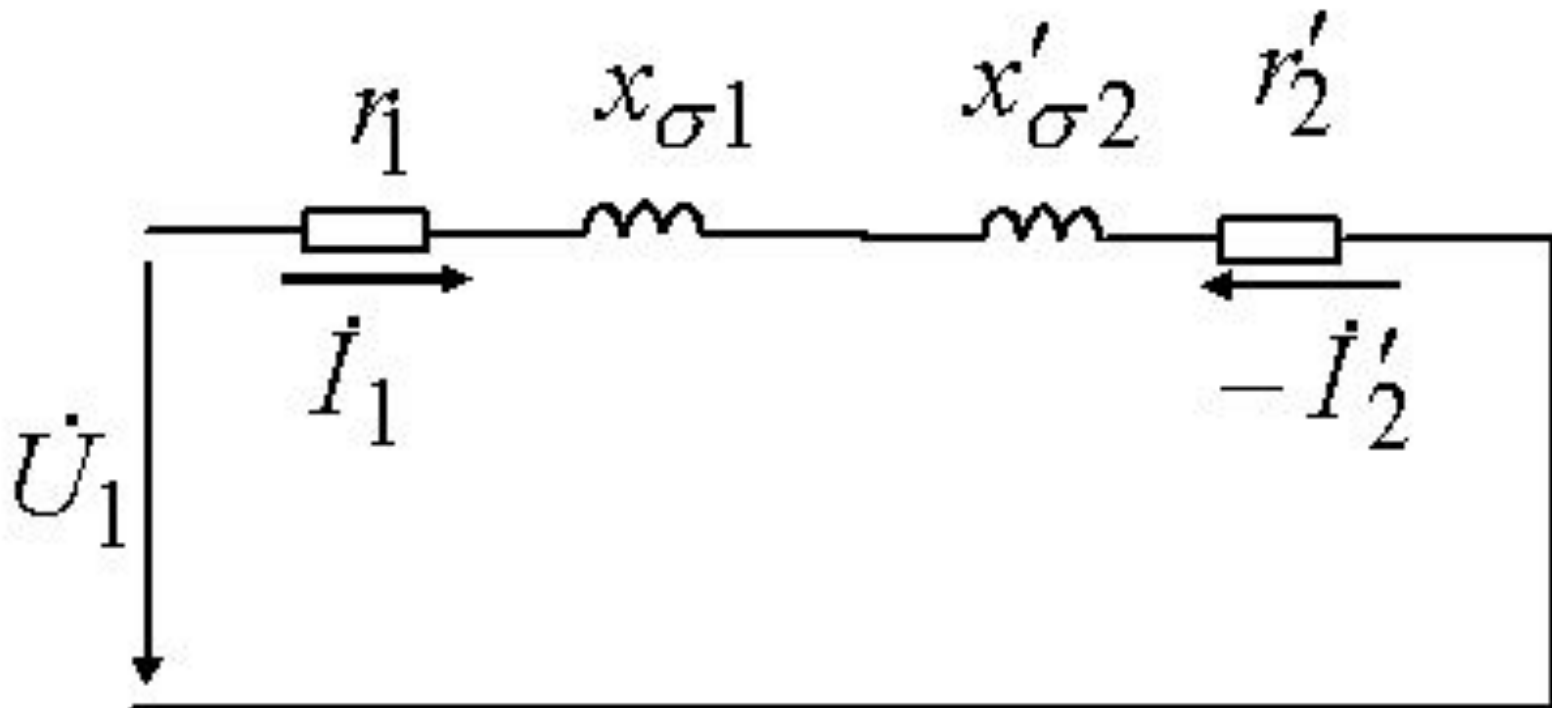
$$P_c = P_0 = P_{x_x}$$

- Векторная диаграмма холостого хода



# Короткое замыкание

- Схема



- В режиме КЗ:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{L}_H &= 0, \quad U'_2 = 0, \\ U_1 &= U_k, \\ A_1 &= -A'_2 = A_{k1}. \end{aligned} \right\} (14)$$

- В условиях эксплуатации КЗ трансформатора при номинальном напряжении  $U_1 = U_{1n}$  представляют большую опасность для трансформатора, так как установившиеся токи КЗ превышают номинальные токи в 10-30 раз.

Опыт КЗ для трансформатора опасности не представляет, так как проводится при пониженном напряжении, при котором токи в обмотках трансформатора равны номинальным.

Пониженное напряжение называют **напряжением короткого замыкания** и обычно выражают в процентах от номинального напряжения

$$u_k = \left( \frac{U_k}{U_{1H}} \right) \cdot 100 = 5 - 10 \%$$

- Магнитный поток пропорционален напряжению первичной обмотки

$$\Phi_m = \frac{E_1}{4,44 \cdot f_1 \cdot w_1} \approx \frac{U_1}{4,44 \cdot f_1 \cdot w_1}$$

- При пониженном напряжении магнитный поток незначительный и для его создания требуется незначительный ток намагничивания, т.е. ток холостого хода.

- Следовательно, в опыте КЗ током и потоком намагничивания можно пренебречь и поэтому:
- 1. Схема замещения не содержит ветви намагничивания:
- 2. Можно пренебречь потерями в железе магнитопровода и считать
- мощность КЗ – электрическими потерями в обмотках трансформатора.



- Потери короткого замыкания

$$\left. \begin{aligned} P_k &= I_1^2 \cdot r_1 + I_2'^2 \cdot r_2' \\ &= I_{1k}^2 \cdot r_k, \\ I_{1k} &= I_{1H}, \quad r_k = r_1 + r_2'. \end{aligned} \right\} (15)$$

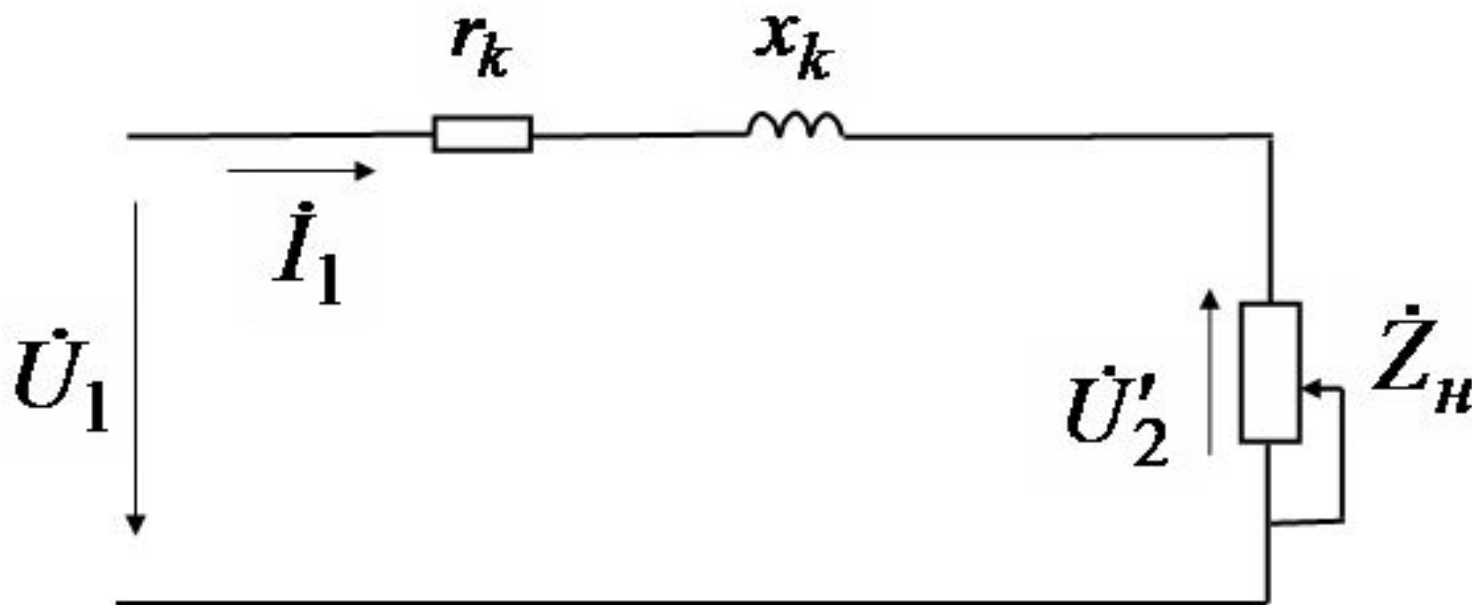
- Уравнение трансформатора при КЗ

$$\begin{aligned}
 U_k &= A_k \cdot (r_1 + r_2') + \\
 &+ JA_k \cdot (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2}) = \\
 &= A_k \cdot r_k + JA_k \cdot x_k = \\
 &= A_k \cdot Z_k. \quad (16)
 \end{aligned}$$

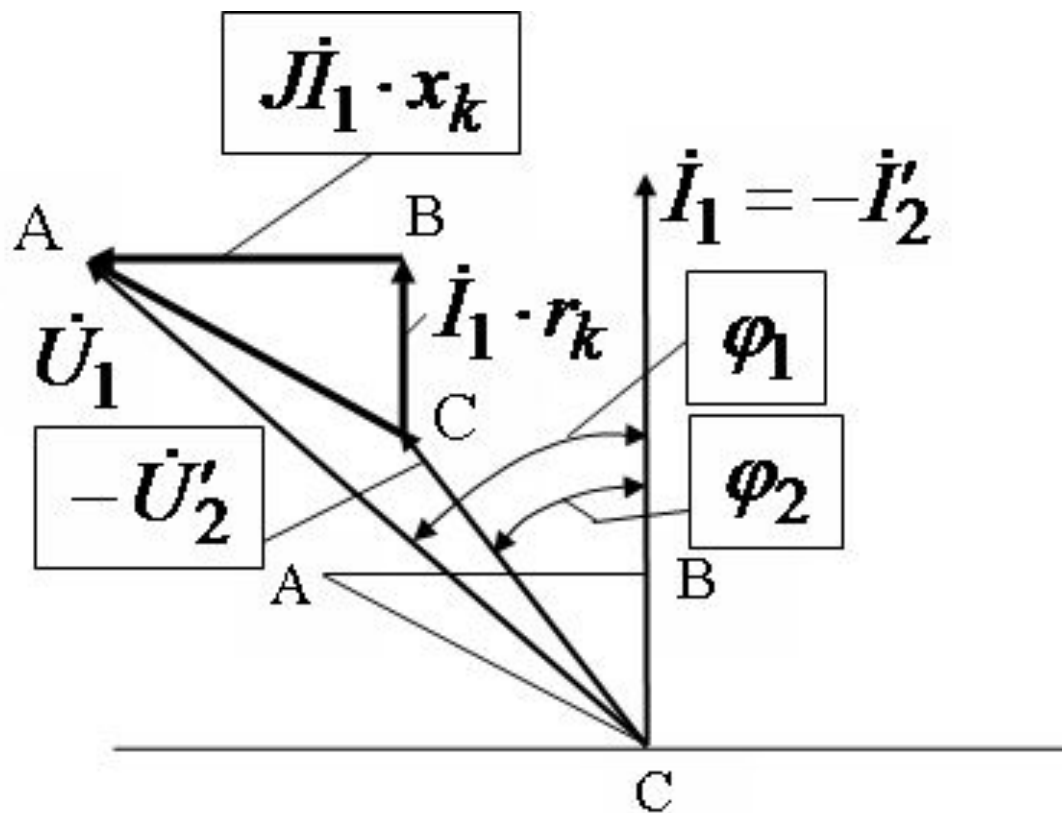
- Параметры КЗ

$$\left. \begin{aligned} r_k &= r_1 + r_2', \\ x_k &= x_{\sigma 1} + x_{\sigma 2}', \\ Z_k &= \sqrt{r_k^2 + x_k^2}. \end{aligned} \right\} (17)$$

- В силовых трансформаторах пренебрегают током холостого хода и пользуются «упрощенной схемой замещения» трансформатора

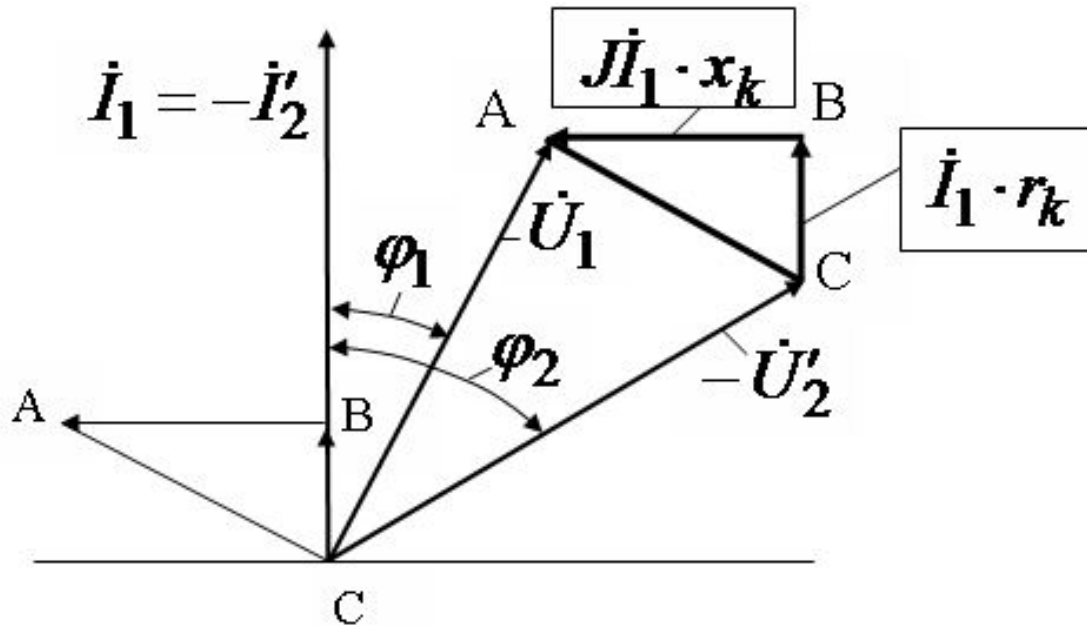


- Упрощенная векторная диаграмма
- (активно-индуктивная нагрузка)



# Активно-емкостная

- Векторная диаграмма



- Треугольник ABC – треугольник короткого замыкания.
- Стороны треугольника:

$$BC = U_{ka} = I_1 \cdot r_k,$$

$$AB = U_{kp} = I_1 \cdot x_k,$$

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

(18)

# Внешние характеристики трансформатора

- Изменения тока нагрузки приводит к изменению вторичного напряжения вследствие падения напряжений в обмотках трансформатора.  
Изменение вторичного напряжения оценивается в процентах



- по формулам:

$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_{2H}}{U_{20}} \cdot 100 =$$

$$= \frac{U'_{20} - U'_{2H}}{U'_{20}} \cdot 100.$$

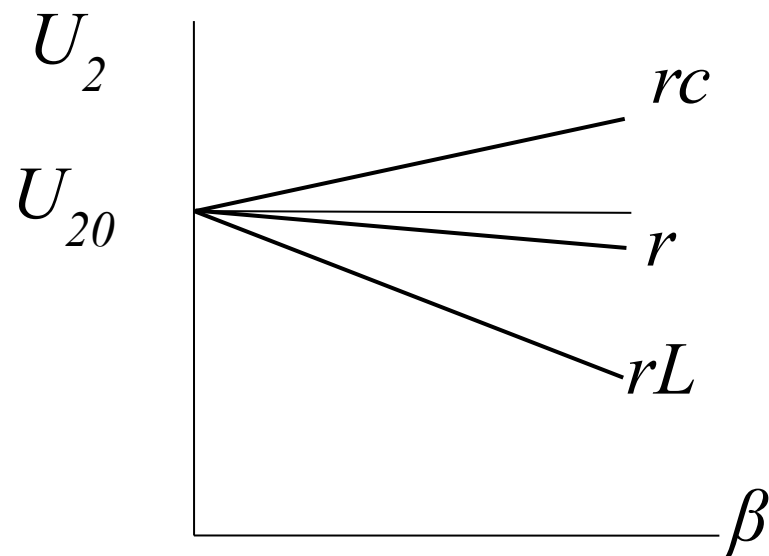
- где  $U_{20}$  и  $U_{2H}$  — напряжения вторичной обмотки при ХХ и номинальной нагрузке.

- Из упрощенной векторной диаграммы получим формулу расчета  $\Delta U$  (%):

$$\Delta U = \beta \cdot (U_{ka} \cdot \cos \varphi_2 + U_{kp} \cdot \sin \varphi_2) \cdot \frac{100}{U'_{20}}, \quad (19)$$

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2H}} = \frac{I_2}{I_{2H}}.$$

- Внешняя характеристика



$$U_2 = U_{20} \cdot \left(1 - \frac{\Delta U}{100}\right), \quad (21)$$

где  $\Delta U$  в %.

# КПД трансформатора

- Работа трансформатора сопровождается потерями активной мощности в обмотках трансформатора и железе магнитопровода.
- Электрические потери в обмотках

$$P_{\text{эл}} = P_{\text{эл}1} + P_{\text{эл}2} =$$
$$= m \cdot I_1^2 \cdot r_1 + m \cdot I_2'^2 \cdot r_2'. \quad (21)$$

- Потери в железе магнитопровода

$$P_c = p_{уд} \cdot B^2 \cdot f^{1,3} \cdot G_c. (22)$$

- Формулами (21), (22) расчета потерь пользуются обычно на стадии проектирования трансформатора. Для изготовленных трансформаторов потери определяются:

**электрические в обмотках** - из опыта КЗ при

$$I_k = I_{1н}$$

- Т.е.

$$P_{\text{эл}} = \beta^2 \cdot P_{\text{кн}} \cdot (23)$$

- **Электрические потери** в обмотках называют **переменными потерями**.
- **Потери в железе** определяют **из опыта ХХ** при номинальном напряжении
- $U_{10} = U_{\text{н}}$  и частоте  $f_1 = \text{const}$

- Т.е.

$$P_c = P_{0H} = P_{xx} \cdot (24)$$

- Потери ХХ называют **постоянными потерями**.
- Суммарные потери:

$$\Sigma p = P_{0H} + \beta^2 \cdot P_{KH} \cdot$$

- Полезная и подведенная активная мощность:

$$\left. \begin{aligned} P_2 &= \beta \cdot S_{ном} \cdot \cos \varphi_2. \\ P_1 &= P_2 + \Sigma p. \end{aligned} \right\}$$



# КПД трансформатора

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma p} = \\ &= \frac{\beta \cdot S_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_2 + P_{0H} + \beta^2 \cdot P_{KH}} \cdot (25)\end{aligned}$$

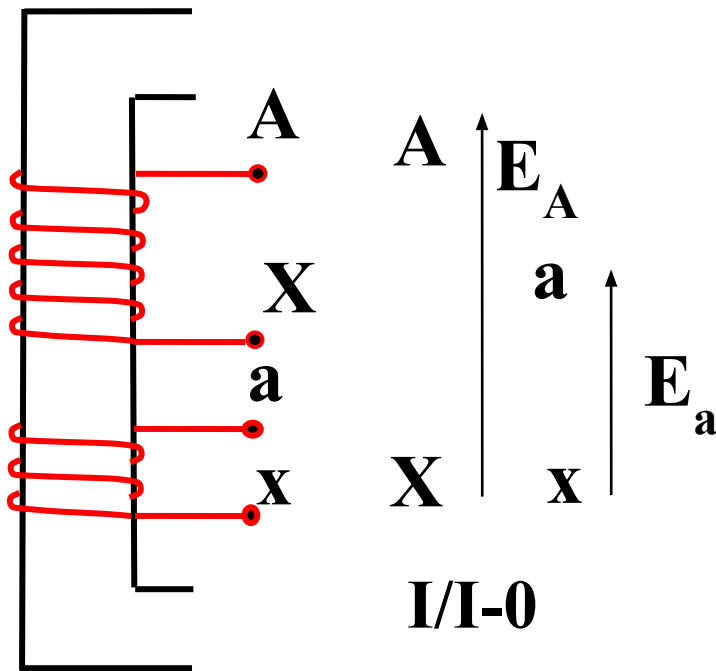
- Анализ выражения (25):
- 1. Чем больше  $\cos \varphi_2$ , тем больше КПД;
- 2. КПД достигает максимума при равенстве переменных потерь постоянным. Из этого условия получим

$$\left. \begin{aligned} \beta^2 \cdot P_{кн} &= P_{0н}, \\ \beta &= \sqrt{P_{0н} / P_{кн}} \end{aligned} \right\}$$

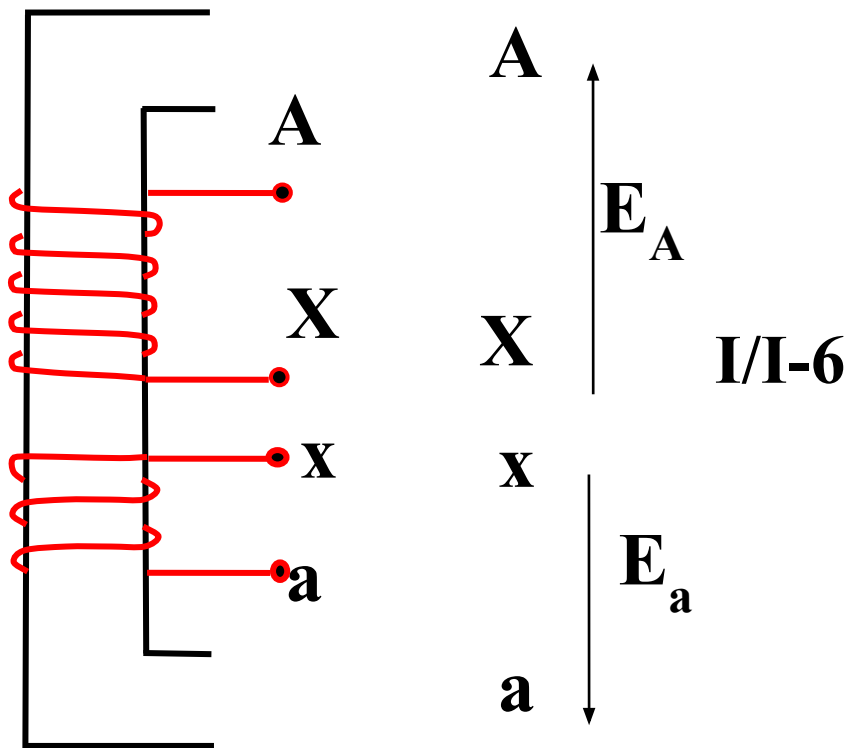
- Обычно  $\beta=0,45-0,65$ .

# Схемы и группы

- Однофазный трансформатор



# Однофазный трансформатор



# Трехфазный трансформатор

- Y/Y

