

Лекция 2. Схема замещения, опыты холостого хода и короткого замыкания, потери и КПД Т. Внешняя характеристика трансформатора.



Цель лекции: изучить с помощью аналитического и графического описания характеристик трансформатора схемы замещения, опыты холостого хода и короткого замыкания, потери и КПД, внешнюю характеристику трансформатора.

Вопросы:

1. Принцип действия трансформатора
2. Приведение параметров вторичной обмотки к первичной.
3. Схема замещения трансформатора.
4. Векторная диаграмма приведенного трансформатора активно-реактивной нагрузки..
5. Режим холостого хода трансформатора.
6. Опыт холостого хода трансформатора.
7. Опыт короткого замыкания трансформатора.
8. Потери энергии в трансформаторе.
9. Коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора
10. Внешняя характеристика трансформатора



ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трансформатор - это статическое электромагнитное устройство, **имеющее** две или большее количество индуктивно связанных обмоток и **предназначенное** для преобразования посредством электромагнитной индукции одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока, имеющую другие характеристики.

Состоит из двух или более электрически не связанных между собой **обмоток** с изоляцией - размещены на замкнутом магнитопроводе.

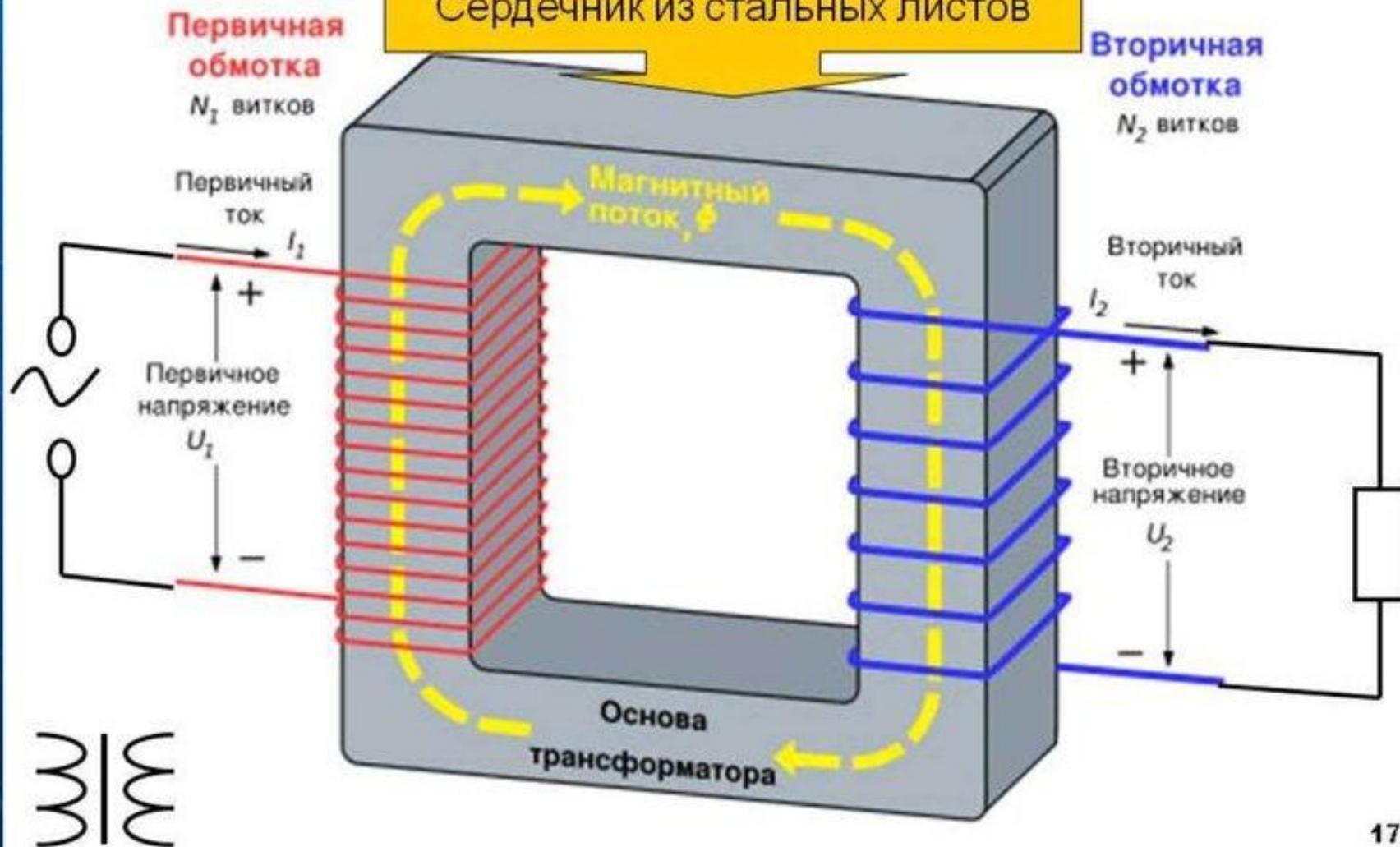
Магнитопровод с обмотками - **активная** часть трансформатора.

Вспомогательные элементы:

- корпус или герметичный бак,
- вводы с изоляторами,
- устройство регулирования напряжения,
- система охлаждения,
- измерительные и защитные устройства,
- крепёжные элементы.

Устройство трансформатора

Сердечник из стальных листов



По виду охлаждения с воздушным (сухие трансформаторы)



масляным (масляные трансформаторы) охлаждением



По числу трансформируемых фаз

- однофазные
- многофазные

По числу обмоток

- двухобмоточные
- многообмоточные (одна первичная и две или более вторичных обмоток)

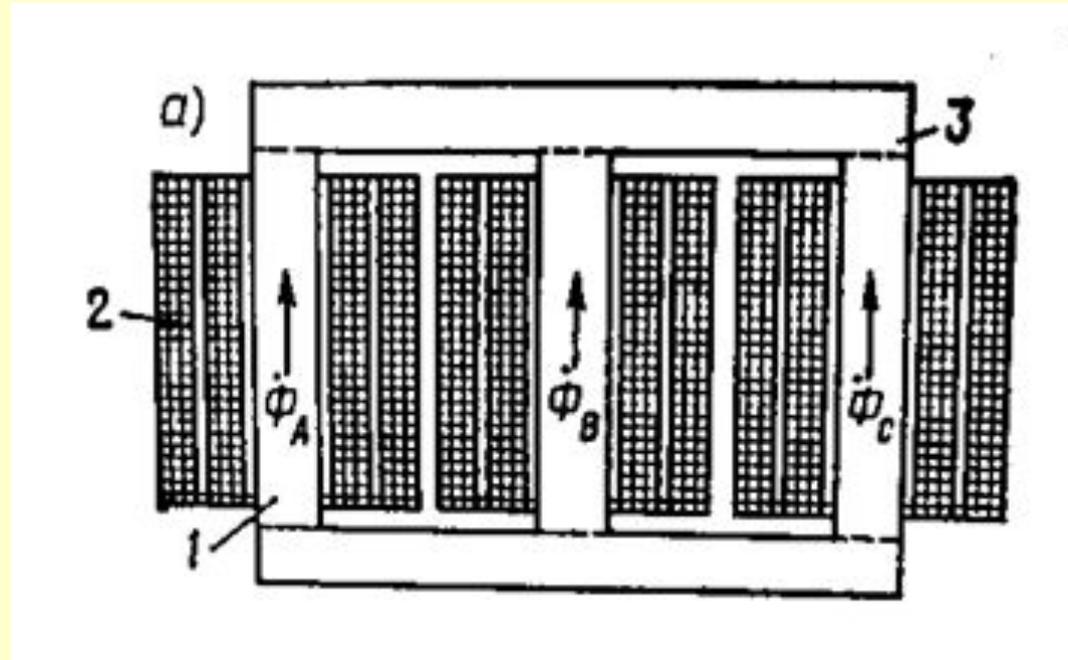
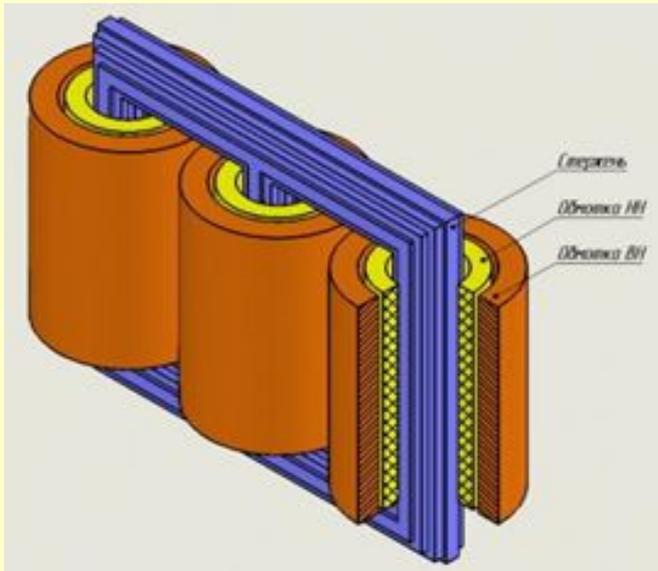
По конструкции обмоток

- концентрические
- чередующиеся

Магнитопровод

1. Проводит магнитный поток
 2. На нём размещаются обмотки
- Магнитопровод изготавливают из тонких листов электротехнической стали – **шихтованным** - для ослабления вихревых **ТОКОВ**

Стержневые магнитопроводы



1-стержень

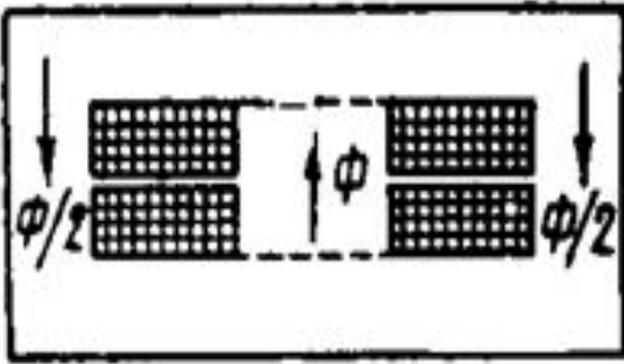
2-обмотка ВН и НН

3-ярмо

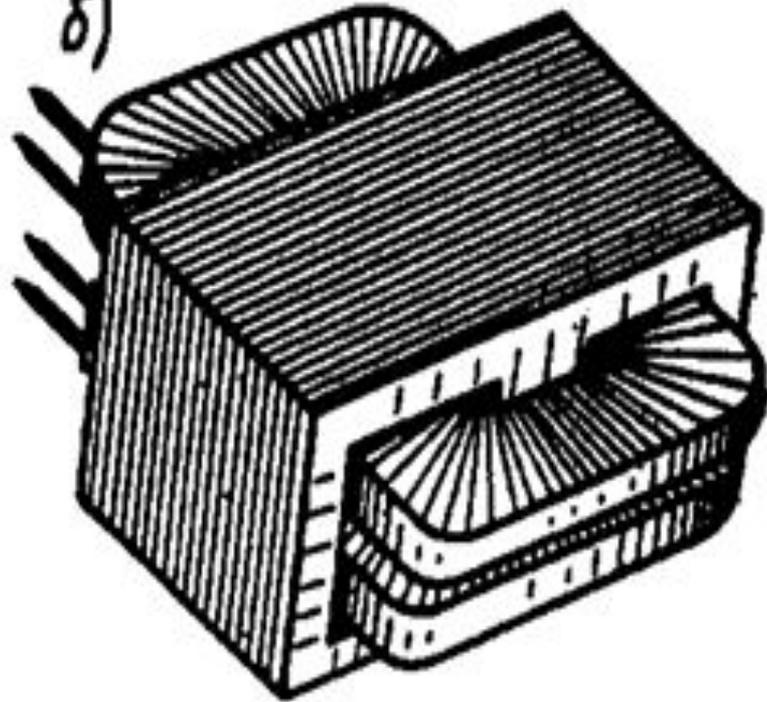
Магнитопровод броневое типа

- В стержне магнитный поток в два раза больше, чем в ярме, поэтому ярма делают меньшего сечения.
- Однофазный трансформатор броневое типа

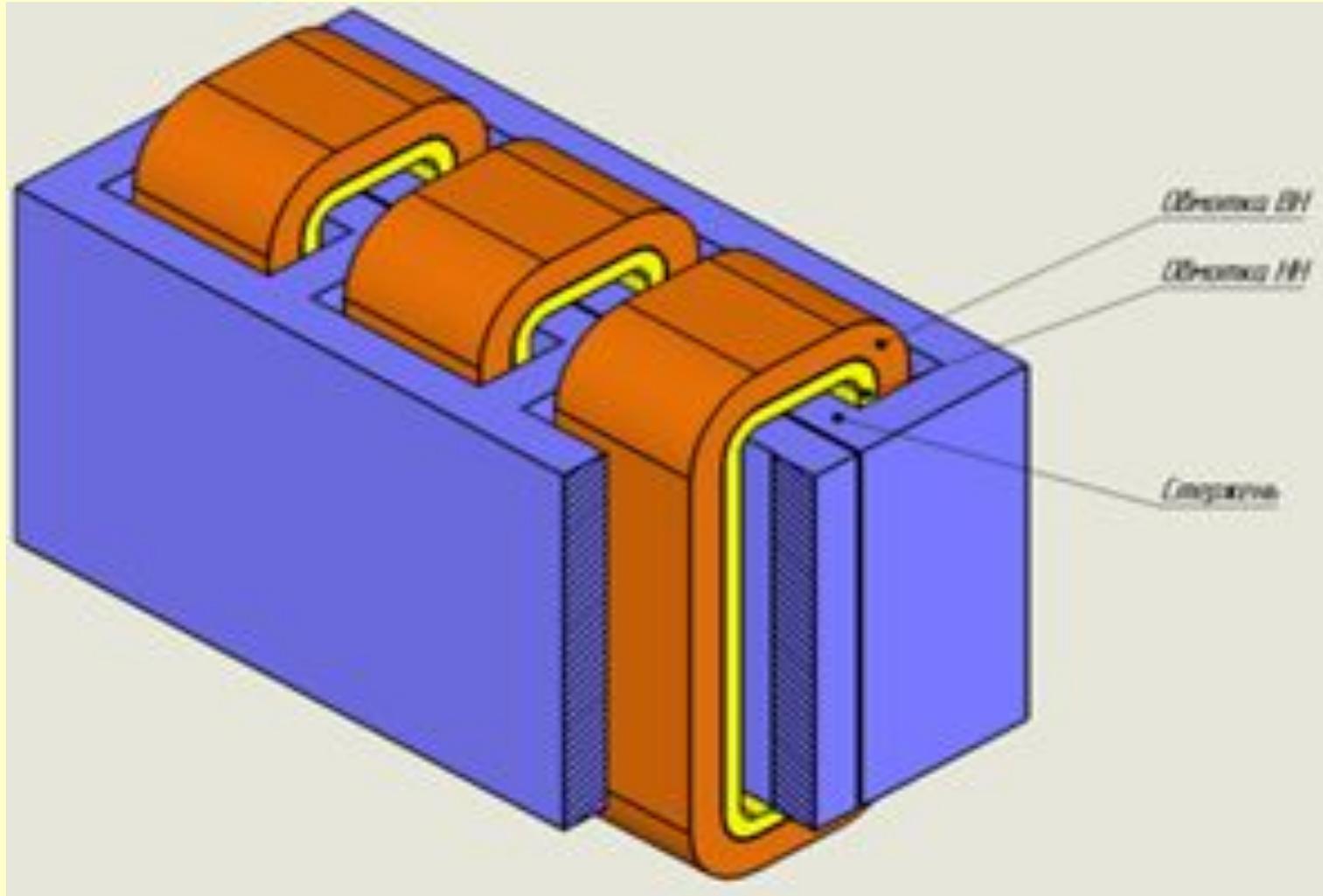
а)



б)



Трехфазный броневой трансформатор



Применение

- Сложные в изготовлении, поэтому применяются в основном в трансформаторах малой мощности – радиотрансформаторах.

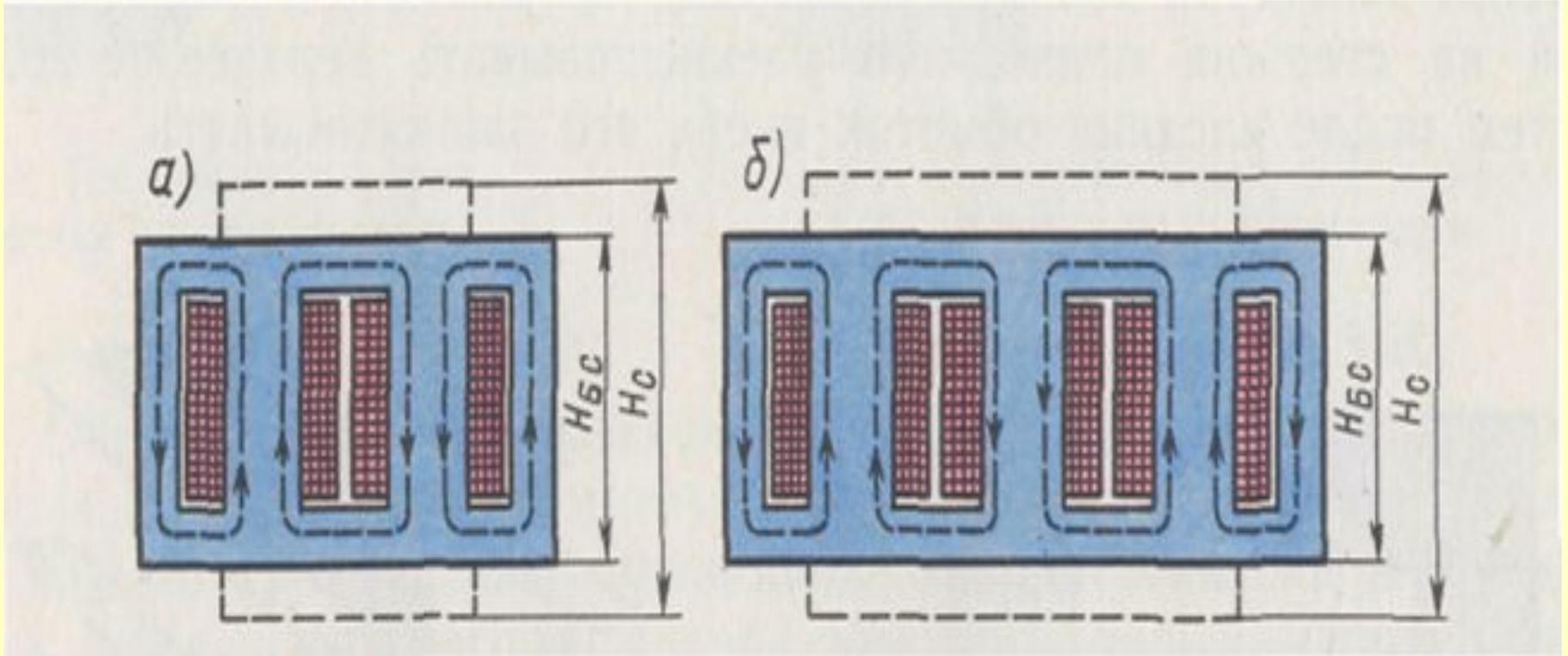
Магнитопровод бронестержневого типа

- Исп-ся в тр-ах большой мощности
- + позволяет уменьшить высоту магнитопровода, а значит высоту тр-ра
- - повышенный расход стали

Магнитопроводы бронестержневых трансформаторов:

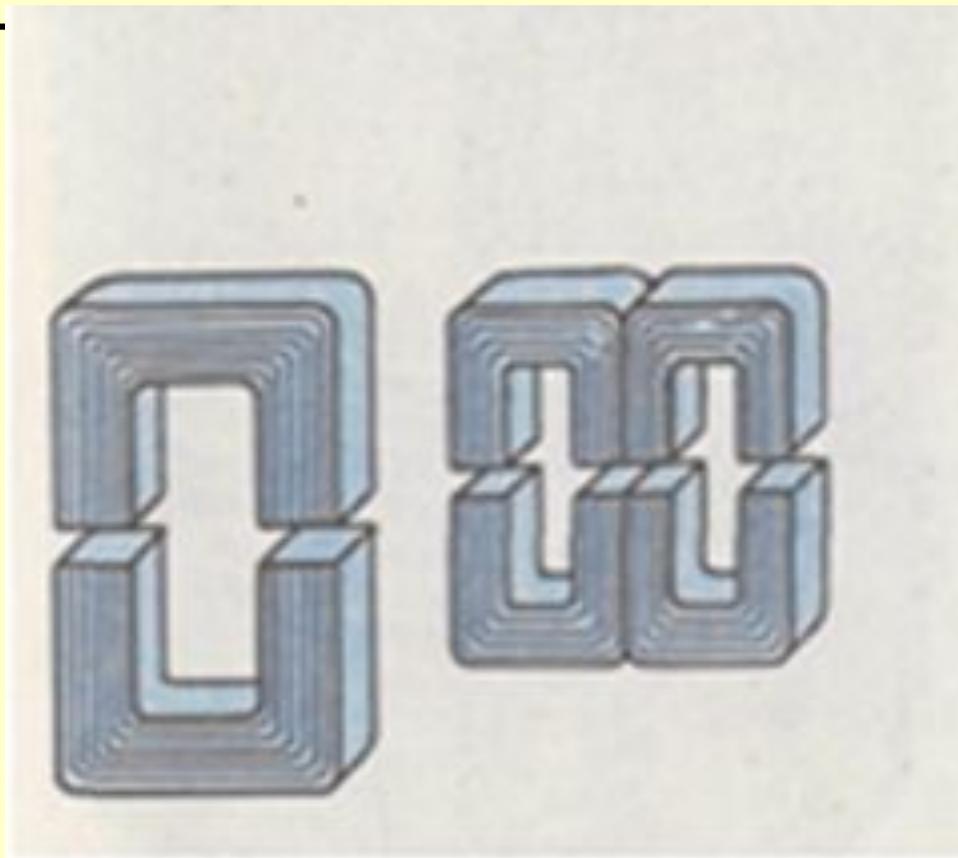
а — однофазного;

б — трехфазного



Ленточные магнитопроводы

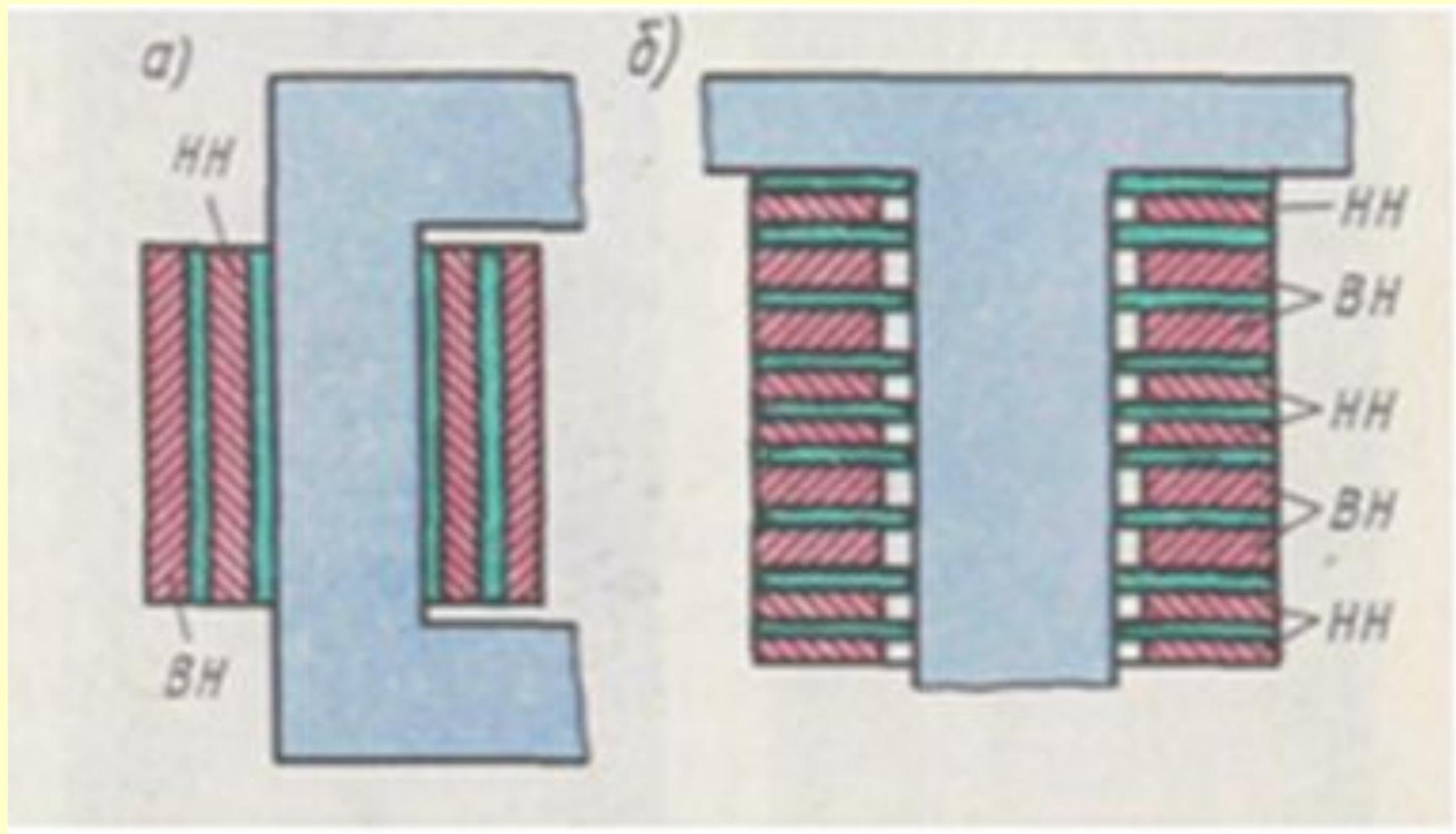
- Для малой мощности из стальной ленты. Разрезают, насаживают обмотки, затем скреп



Обмотки

- Для средней и большой мощности из проводов прямоугольного сечения, изолированных х\б пряжей или кабельной бумагой.

По расположению на магнитопроводе бывают **концентрические** и **чередующиеся**.



- **Концентрические** обмотки размещают на одном стержне – ближе к магнитопроводу размещают обмотку НН, так как она требует меньшей изоляции от стержня. Дальше – высшего.
- **Чередующиеся (дисковые)** обмотки выполняют в виде отдельных секций (дисков). применяются реже, обычно в трансформаторах спец. назначения.

Принцип действия трансформатора

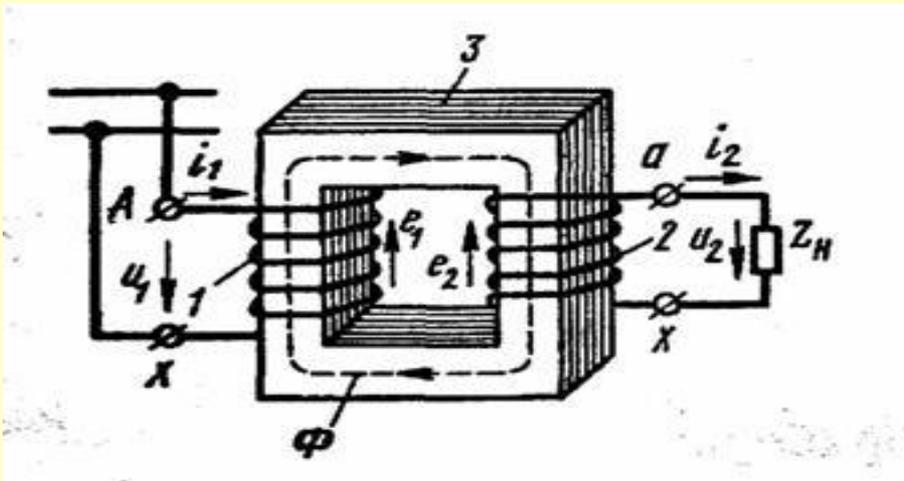


Рисунок 12

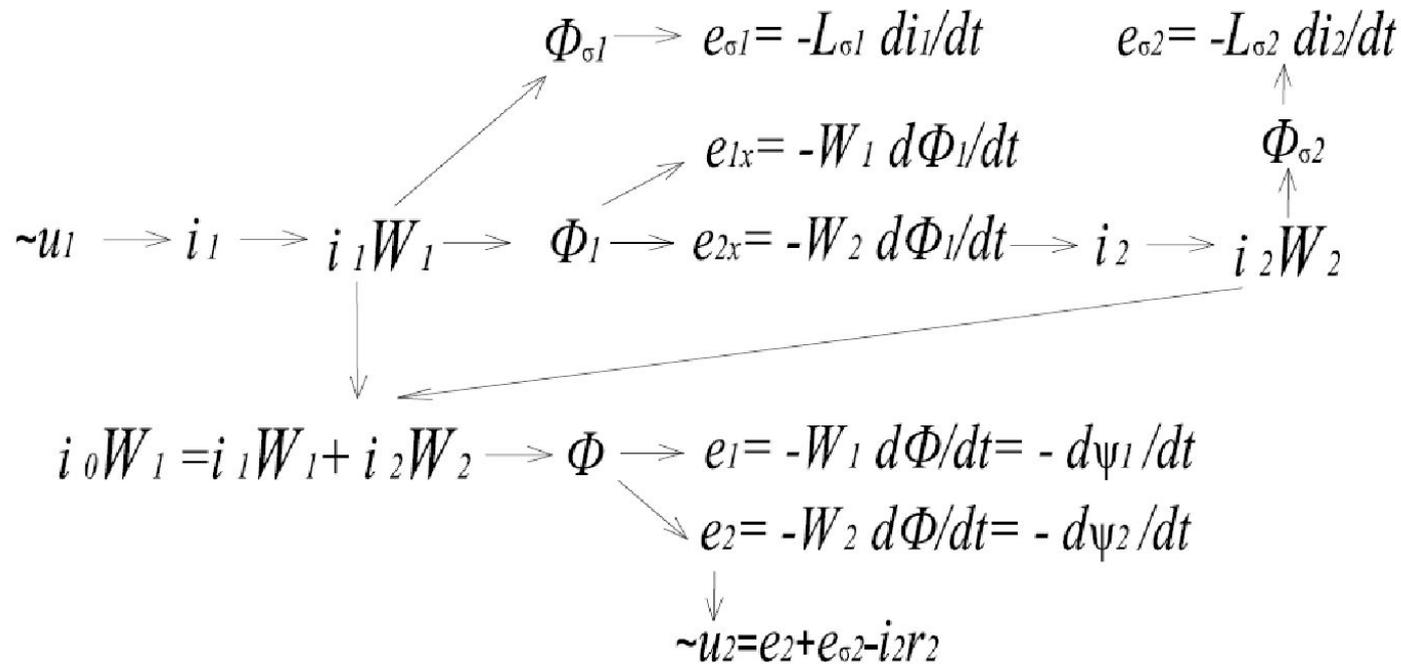
- 1 – первичная обмотка – к сети
- 2 – вторичная обмотка – нагрузка
- 3 – магнитопровод

U_1 – переменное напряжение

i_1 – переменный ток - создаёт переменное магнитное поле с магнитодвижущей силой (МДС) $i_1 W_1$.

$\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ – потоки рассеяния

$L_{\sigma 1}$ и $L_{\sigma 2}$ – индуктивности рассеяния 1-ой и 2-ой обмоток



$$e_B = -d\Phi_1/dt.$$

$$u_1 = e_1 - i_1 r_1 + u_{11},$$

Коэффициент трансформации: $k_T = \frac{W_1}{W_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{E_1}{E_2}$

В режиме холостого хода $U_2 = E_2$ а $U_1 \approx E_1$. Тогда $k_T = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_1}{U_2}$

$U_2 = U_1 \frac{W_2}{W_1} = \frac{U_1}{k_T}$. $W_2 > W_1$ ($k_T < 1$) - *повышающий* трансформатор
 $W_2 < W_1$ ($k_T > 1$) - *понижающий* трансформатор

Мощности S_1 на первичной и S_2 на вторичной стороне практически одинаковы

$$S_1 = m_1 U_1 I_1 \approx S_2 = m_1 U_2 I_2 \quad k_T = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Т.е., при уменьшении вторичного напряжения в k_T раз по сравнению с первичным, ток во вторичной обмотке увеличится в k_T раз и наоборот.

Трансформатор изменяет сопротивление подключенной к нему нагрузки R в k_T^2 раз относительно цепи источника питания:

$$R' = \frac{P_1}{m_1 I_1^2} \approx \frac{P_2}{m_1 I_1^2} = \frac{m_1 I_2^2 R}{m_1 I_1^2} = k_T^2 R$$

где P_1 – мощность, потребляемая трансформатором от источника питания;
 $P_2 = m_1 I_2^2 R \approx P_1$ – мощность, потребляемая нагрузкой с сопротивлением R от трансформатора.

Трансформатор может работать только в цепях переменного тока.

Для полного описания режимов трансформатора необходимо построение векторной диаграммы. Однако совершенно несоизмеримыми для построения оказываются векторы электрических величин первичной и вторичной обмоток. Поэтому используют следующий прием: **реальный трансформатор искусственно заменяют другим, приведенным, у которого число витков первичной и вторичной обмоток одинаковы.** При этом мощности, потери и фазовые соотношения также должны быть одинаковыми. Обычно параметры вторичной обмотки приводят к первичной. Тогда из **условий приведения $W_2' = W_1$** получаем:

2. Приведение параметров вторичной обмотки к первичной

Название величин	Реальный Т	Приведенный Т
Количество витков	W_2	$W_2' = W_1$
ЭДС	E_2	$E_2' = E_2 \frac{W_1}{W_2}$
Напряжение	U_2	$U_2' = U_2 \frac{W_1}{W_2}$
Сила тока	I_2	$I_2' = I_2 \frac{W_2}{W_1}$
Активное сопротивление	r_2	$r_2' = r_2 \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2$
Индуктивное сопротивление	x_2	$x_2' = x_2 \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2$
Полное сопротивление	Z_2	$Z_2' = Z_2 \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2$

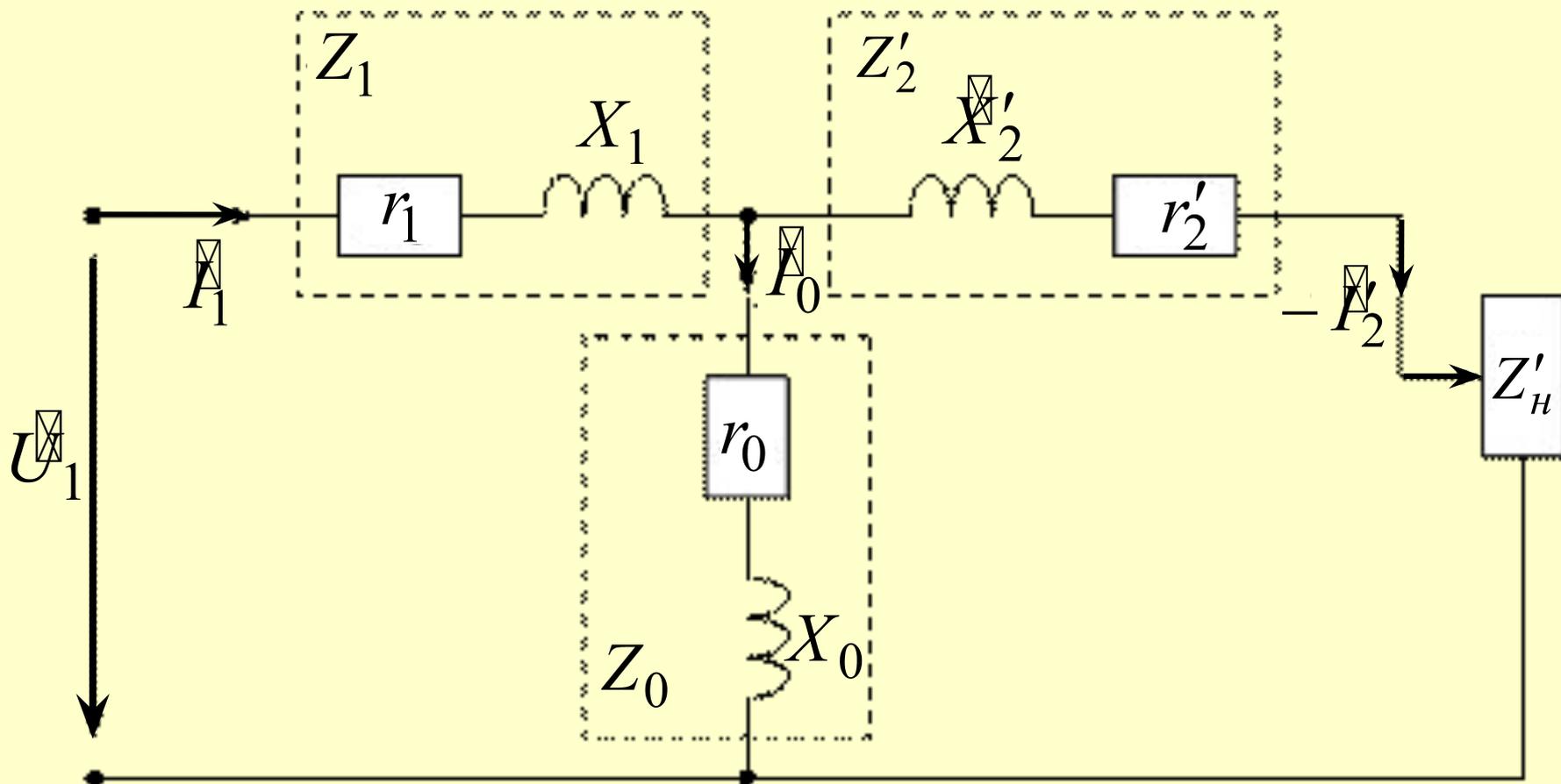
Формулы описывающие работу приведенного трансформатора

$$\left. \begin{aligned} 1) \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_1); \\ 2) \dot{U}'_2 &= \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2(r'_2 + jx'_2); \\ 3) I_0 &= I_1 + I'_2. \end{aligned} \right\}$$

Вместо реального трансформатора мы получаем энергетически эквивалентный трансформатор с коэффициентом трансформации $K_{12} = 1$, который называется *приведенный*.

3. Схема замещения трансформатора

Схема замещения вводится для упрощения анализа электромагнитных процессов в трансформаторе, в которой магнитная связь заменяется электрической.



Обозначения:

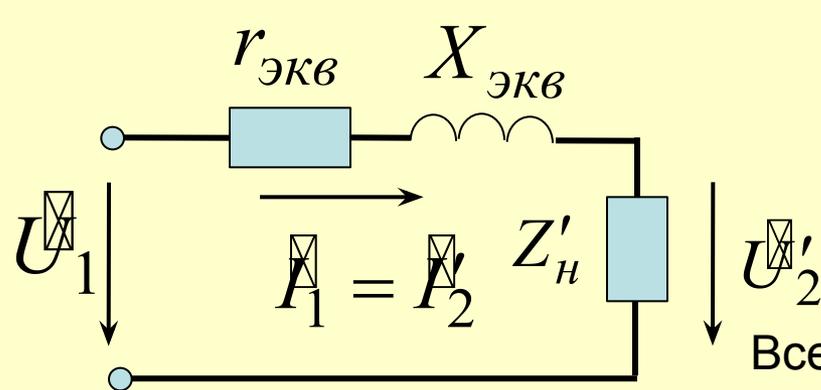
r_0 — **активное сопротивление** учитывает потери в магнитопроводе (на вихревые токи и на гистерезис);

X_0 — **индуктивное сопротивление**, учитывает намагниченность материала сердечника и зависит от марки материала;

r_1, r_2 — учитывают потери на нагрев обмоток первичной и вторичной цепей;

X_1, X_2 — индуктивности рассеяния основного потока в обмотках первичной и вторичной цепей;

Упрощенная схема замещения



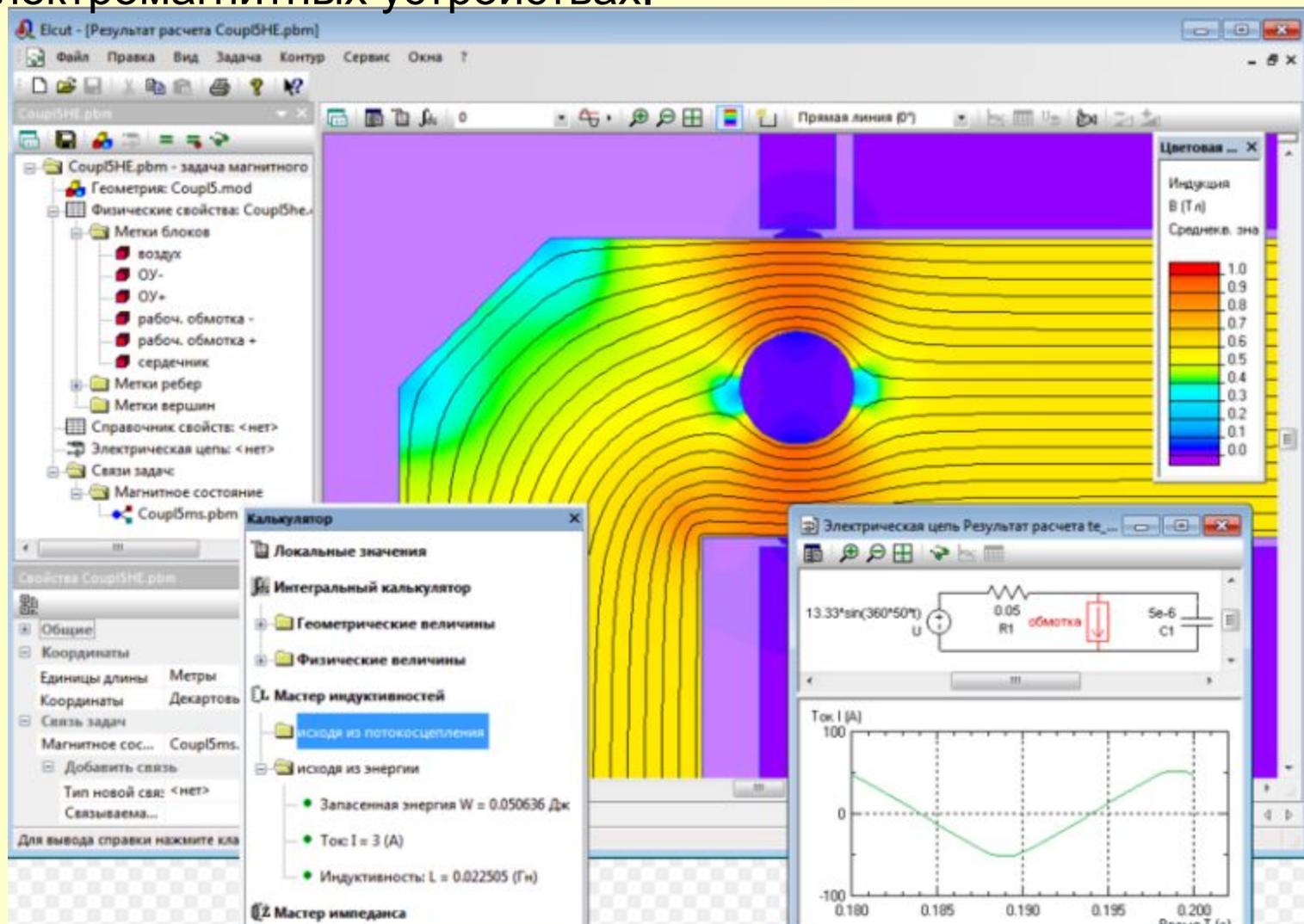
$$r_{экв} = r_1 + r_2'$$

$$X_{экв} = X_1 + X_2'$$

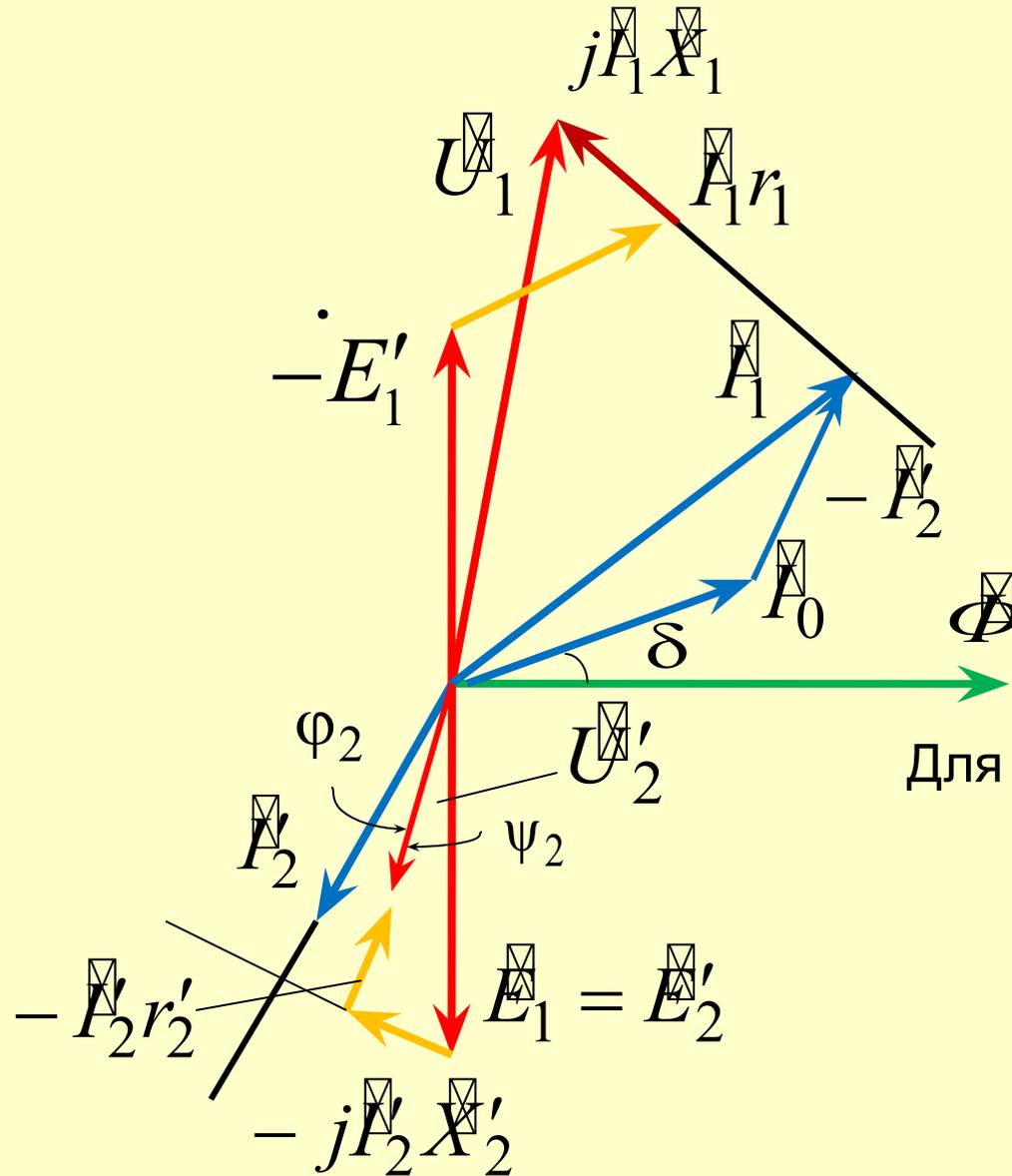
Z_n - полное сопротивление нагрузки

Все параметры в схеме замещения, кроме Z_n , являются постоянными для данного трансформатора, и могут быть определены из опытов холостого хода и короткого замыкания.

ELCUT — это компьютерная программа — это компьютерная программа для проведения инженерного анализа и двумерного моделирования методом конечных элементов (МКЭ) магнитных полей в электромагнитных устройствах.



4. Векторная диаграмма приведенного трансформатора активно-реактивной нагрузки



- 1) $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_1)$;
- 2) $\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2(r'_2 + jx'_2)$;
- 3) $I_0 = I_1 + I'_2$.

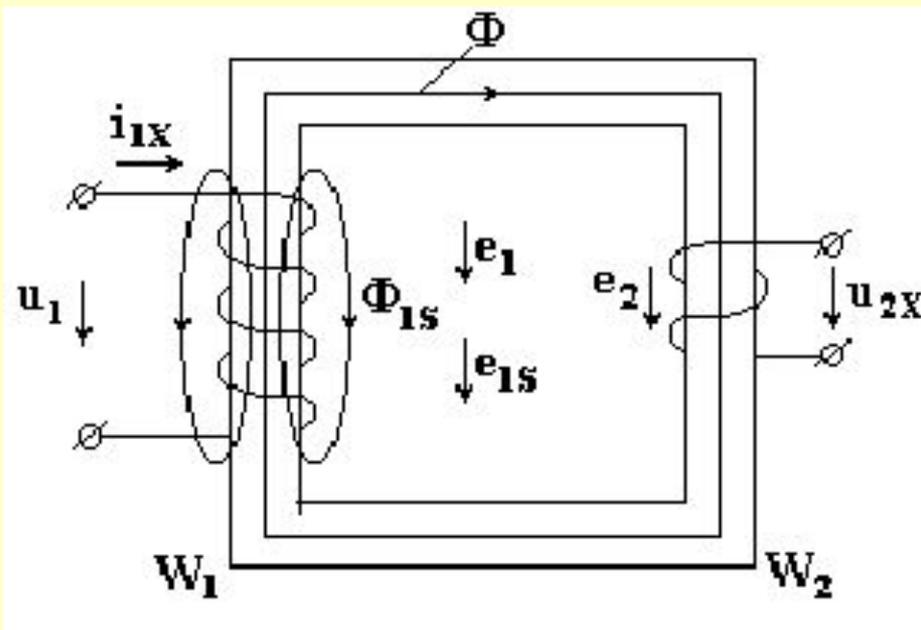
Для построения вектора \dot{I}'_2

$$\psi_2 = \arctg\left(\frac{X'_2 + X'_H}{r'_2 + r'_H}\right)$$

$$\varphi_2 = \arctg\left(\frac{X'_H}{r'_H}\right)$$

5. Режим холостого хода трансформатора

Под холостым ходом трансформатора понимается режим его работы при разомкнутой вторичной обмотке.



ЭДС, индуцированная в первичной обмотке трансформатора основным магнитным потоком

$$e_1 = -W_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

Основной магнитный поток изменяется по синусоидальному закону

$$\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t$$

Φ_m - максимальное или амплитудное значение основного магнитного потока;
 $\omega = 2\pi f$ - угловая частота;
 f - частота переменного напряжения.

Мгновенное значение ЭДС

$$\begin{aligned} e_1 &= -W_1 \cdot \omega \cdot \Phi_m \cdot \cos \omega t = \\ &= -W_1 \cdot \omega \cdot \Phi_m \cdot \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$

Максимальное значение

$$E_{1m} = W_1 \cdot \omega \cdot \Phi_m = 2\pi \cdot f \cdot W_1 \cdot \Phi_m$$

Действующее значение ЭДС в первичной обмотке

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot W_1 \cdot \Phi_m = \\ = 4,44 \cdot f \cdot W_1 \cdot \Phi_m$$

Для вторичной обмотки получаем аналогичную формулу

$$E_2 = 4,44 \cdot f \cdot W_2 \cdot \Phi_m$$

откуда

$$U_1 = -e_1 - e_{1s} + i_{1x} \cdot r_1 = -e_1 + i_{1x} \cdot r_1 + L_{1s} \cdot \frac{di_{1x}}{dt} \quad (1)$$

Магнитный поток рассеяния индуцирует в первичной обмотке ЭДС рассеяния

$$e_{1s} = -L_{1s} \cdot \frac{di_{1x}}{dt}$$

L_{1s} - индуктивность рассеяния в первичной обмотке.

Запишем уравнение по второму закону Кирхгофа для первичной обмотки

$$e_1 + e_{1s} = -U_1 + i_{1x} \cdot r_1$$

Запишем уравнение (1) в комплексной форме

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_{1x} \cdot r_1 + j\omega L_{1s} \cdot \underline{I}_{1x} = -\underline{E}_1 + \underline{I}_{1x} \cdot r_1 + jX_{1s} \cdot \underline{I}_{1x} \quad (2)$$

$X_{1s} = \omega L_{1s}$ - индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки.

Работа Т в режиме холостого хода

векторная диаграмма

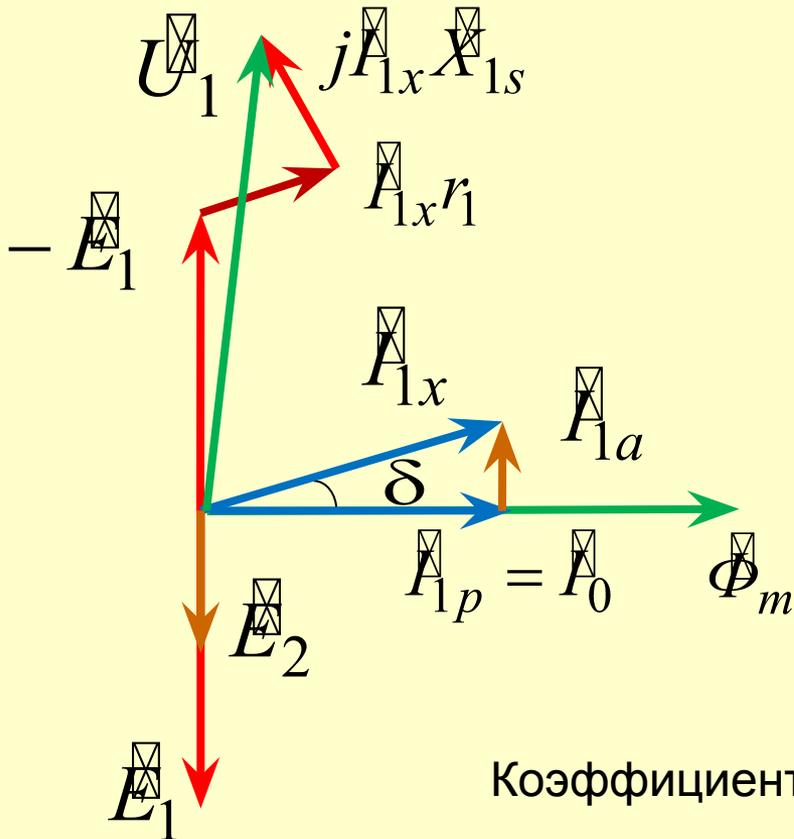
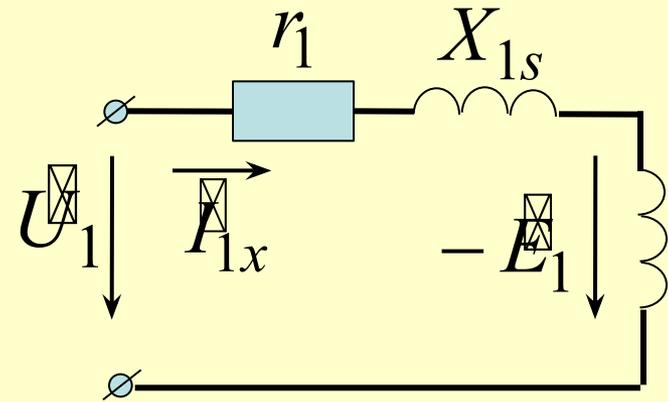


схема замещения



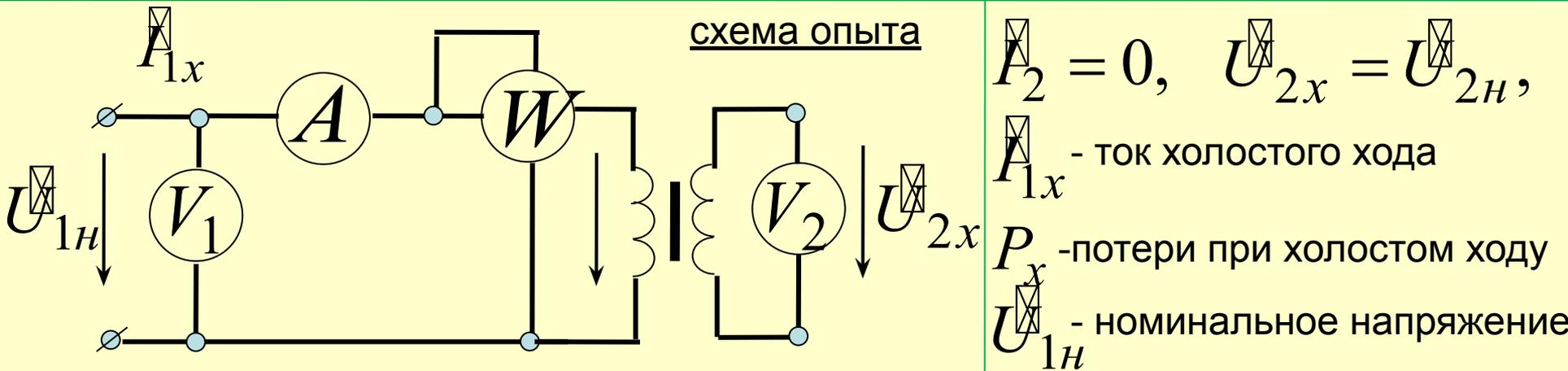
В режиме холостого хода

$$U_{2x} = E_2$$

$$U_1 \approx E_1$$

$$K_{mp} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2}$$

6. Опыт холостого хода трансформатора



Цель опыта определения: коэффициента трансформации K_T , потерь холостого хода P_x , тока холостого хода I_{1x} , параметров намагничивающей ветви схемы замещения r_M и x_M , Ом.

Коэффициент трансформации:

понижающий $K_{тр} = \frac{U_{1H}}{U_{2H}}$ повышающий $K_{тр} = \frac{U_{2H}}{U_{1H}}$

Ток холостого хода в процентах от номинального определяется:

$$I_{x\%} = \frac{I_x \cdot 100\%}{I_{1H}}, \quad I_{1H} = \frac{S_H}{U_1}, \quad S_H \text{ - номинальная мощность трансформатора, кВ*А.}$$

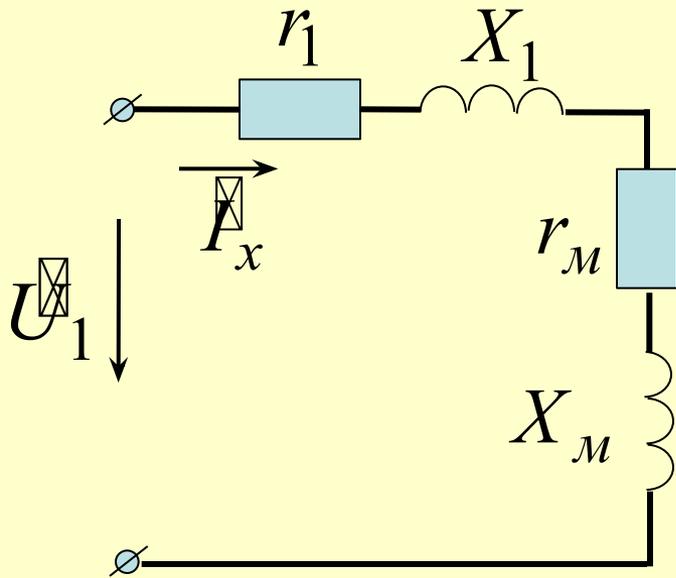
I_{1H} - номинальный ток первичной обмотки трансформатора, А.

Потери холостого хода определяются по ваттметру: $P_x = \Delta P_c + I_x^2 r_1$,
где ΔP_c — потери в стали, Вт.

Потери холостого хода равны потерям в стали.

Если потери холостого хода больше, чем паспортные — магнитная система перегружена, если меньше — наоборот.

Схема замещения опыта холостого хода



Индуктивное сопротивление:

$$x_M = \sqrt{z_M^2 - r_M^2}.$$

**Активное сопротивление
намагничивающей ветви**

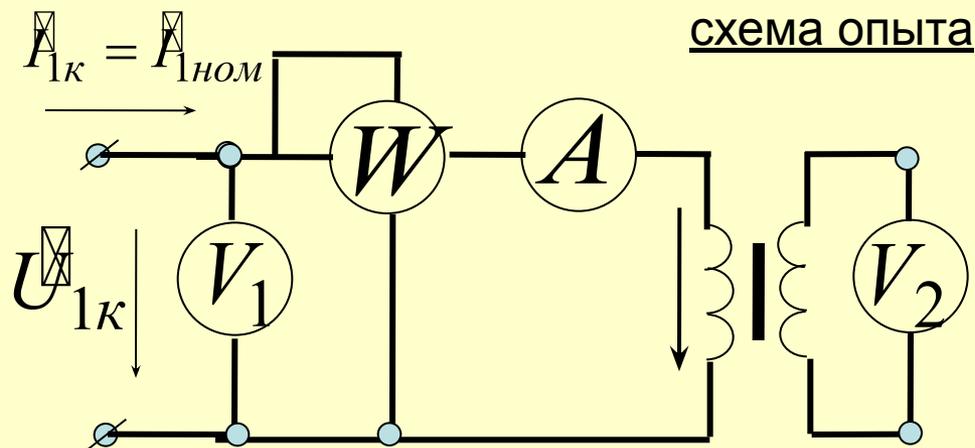
$$r_M = \frac{P_x}{I_x^2} - r_1,$$

r_1 -определится из опыта
короткого замыкания

**Полное сопротивление
намагничивающей ветви**

$$z_M = \frac{U_1}{I_x} - z_1.$$

7. Опыт короткого замыкания трансформатора



Вторичная обмотка трансформатора замкнута. Напряжение увеличивается до значения номинального тока.

Цель опыта — определение:
 а) потерь короткого замыкания трансформатора, P_K , Вт; (ваттметр)

б) напряжения короткого замыкания, %;

$$U_K$$

в) параметров схемы замещения (Ом)

$$r_1 \quad r_2 \quad x_1 \quad x_2$$

По потерям короткого замыкания можно судить о оптимальной плотности тока в обмотках и о сечениях проводов:

- **потери короткого замыкания больше нормы**

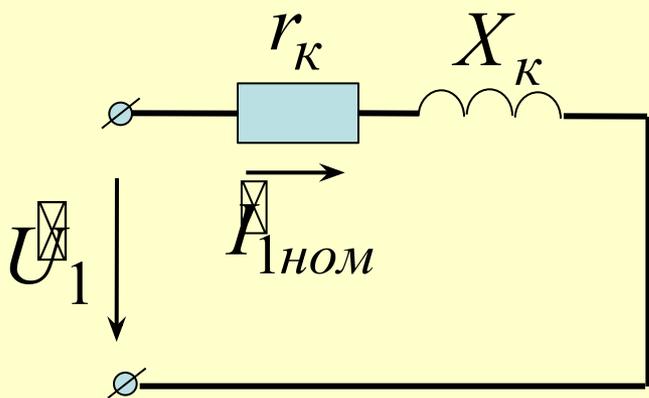
— сечение проводов обмоток занижено,

- **если меньше** — наоборот завышено.

Потери короткого замыкания трансформатора равны потерям в обмотках.

$$P_K = I_1^2 r_1 + I_2'^2 r_2'$$

Схема замещения Т в опыте короткого замыкания



Мощность потерь при коротком замыкании и номинальных токах

$$P_{к,ном} = r_1 I_{1ном}^2 + r_2 I_{1ном}^2$$

Полное сопротивление

$$Z_k = \frac{U_k}{I_{1ном}}$$

Суммарное активное сопротивление обеих обмоток

$$r_k = r_1 + r_2' = \frac{P_{к,ном}}{I_{1ном}^2}$$

Реактивное сопротивление

$$X_k = X_1 + X_2' = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}$$

Напряжение короткого замыкания

$$U_{1к} = Z_k I_{1ном}$$

$U_{1к}$ составляет 5—8 % $U_{1ном}$

Значение $U_{к\%}$ указано на щитке Т

$$U_{к\%} = \frac{Z_k I_{1ном}}{U_{1ном}} \cdot 100\%$$

Активная составляющая напряжения короткого замыкания

$$U_{a,к\%} = \frac{r_k I_{1ном}}{U_{1ном}} \cdot 100\% = \frac{P_{к,ном}}{S_{ном}} \cdot 100\%$$

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания

$$U_{p,к\%} = \frac{X_k I_{1ном}}{U_{1ном}} \cdot 100\%$$

Процентные значения напряжения связаны между собой соотношением:

$$U_k = \sqrt{U_{a,к}^2 + U_{p,к}^2}$$

8. Потери энергии в трансформаторе.

1. **Электрические потери** (переменные потери) обусловлены нагревом обмоток при прохождении по ним тока (потери в медных проводах обмотки).

$$P_{\text{эл}} = m I_1^2 r_1 + m (I'_2)^2 r'_2$$

m - число фаз трансформатора

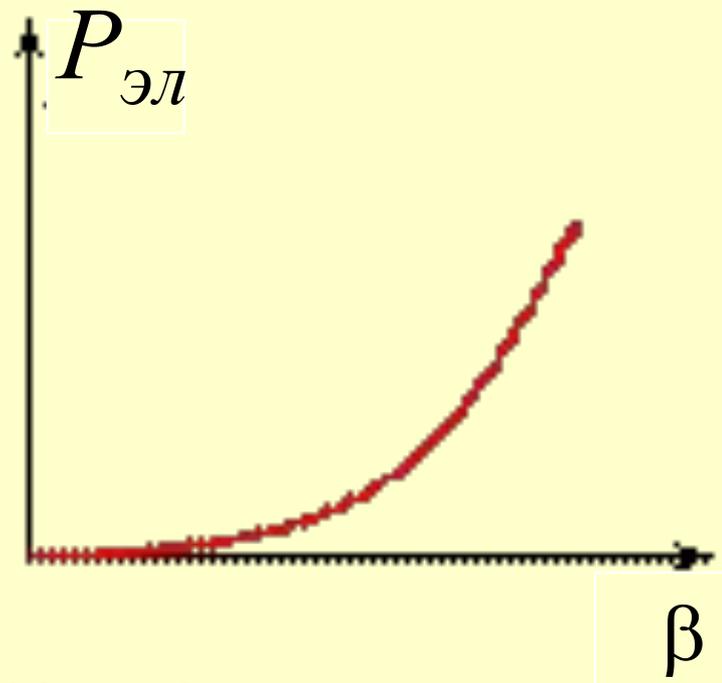
эти потери определяются опытным путём, измеряя мощность короткого замыкания при номинальных токах в обмотках

$$P_{\text{эл}} = \beta^2 P_{\text{кн}}$$

β - степень загрузки трансформатора

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

$I_1, I_{1н}$ - реальный и номинальные токи первичной стороны трансформатора, А;



Потери в обмотках = потерям короткого замыкания.

2. **Магнитные потери** (потери в стали) происходят в магнитопроводе. Причина их лежит в систематическом перемагничивании магнитопровода переменным магнитным полем.

$$P_{\text{маг}} = P_{\sigma} + P_{\text{в.т.}}$$

P_{σ} - потери вследствие гистерезиса;

$P_{\text{в.т.}}$ - потери вследствие вихревых токов.

Магнитные потери не зависят от нагрузки трансформатора.
Потери в стали = потерям холостого хода

Общие потери

$$P_{\Sigma} = P_{\text{хн}} + \beta^2 P_{\text{кн}}$$

$P_{\text{х.н.}}$ - определяется в опыте холостого хода;

$P_{\text{к.н.}}$ - определяется в опыте короткого замыкания

Для практических расчетов используется формула:

$$P_{\text{х}} = K_{\text{д}} (P_{\text{с}} \cdot G_{\text{с}} + P_{\text{я}} \cdot G_{\text{я}}),$$

$P_{\text{с}}, P_{\text{я}}$ — удельные потери соответственно стержней и ярем магнитопровода, Вт/кг;

$G_{\text{с}}, G_{\text{я}}$ — масса стержней и ярем магнитопровода, кг;

$K_{\text{д}}$ — коэффициент учитывающий дополнительные потери.

9. Коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора.

Коэффициент полезного действия трансформатора равен отношению активной мощности на выходе вторичной обмотки к активной мощности на входе первичной обмотки.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{\Sigma}}$$

P_1 - мощность, поступающая из сети в первичную нагрузку

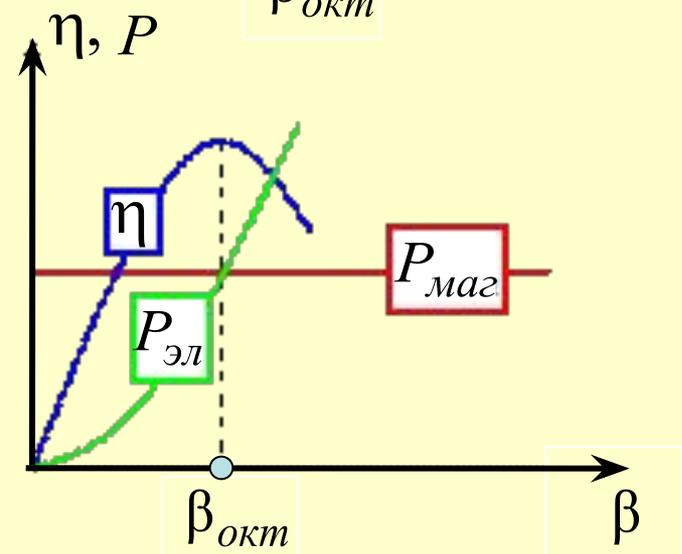
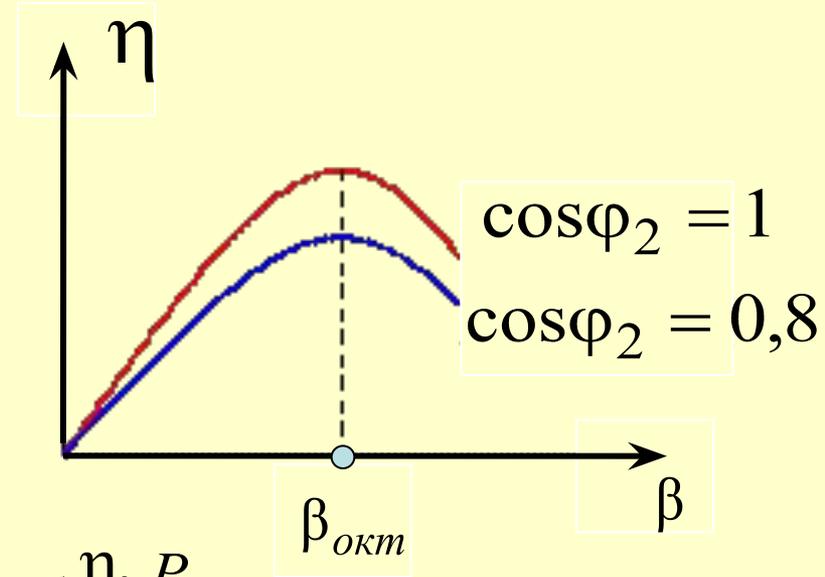
С учетом нагрузки трансформатора

$$P_2 = \beta \cdot I_{2H} U_{2H} \cos\varphi_2, \quad \beta = \frac{I_1}{I_{1H}}$$

$$\eta = \frac{\beta \cdot I_{2H} \cdot U_{2H} \cdot \cos\varphi_2}{\beta \cdot I_{2H} \cdot U_{2H} \cdot \cos\varphi_2 + \beta^2 \cdot P_K + P_X}$$

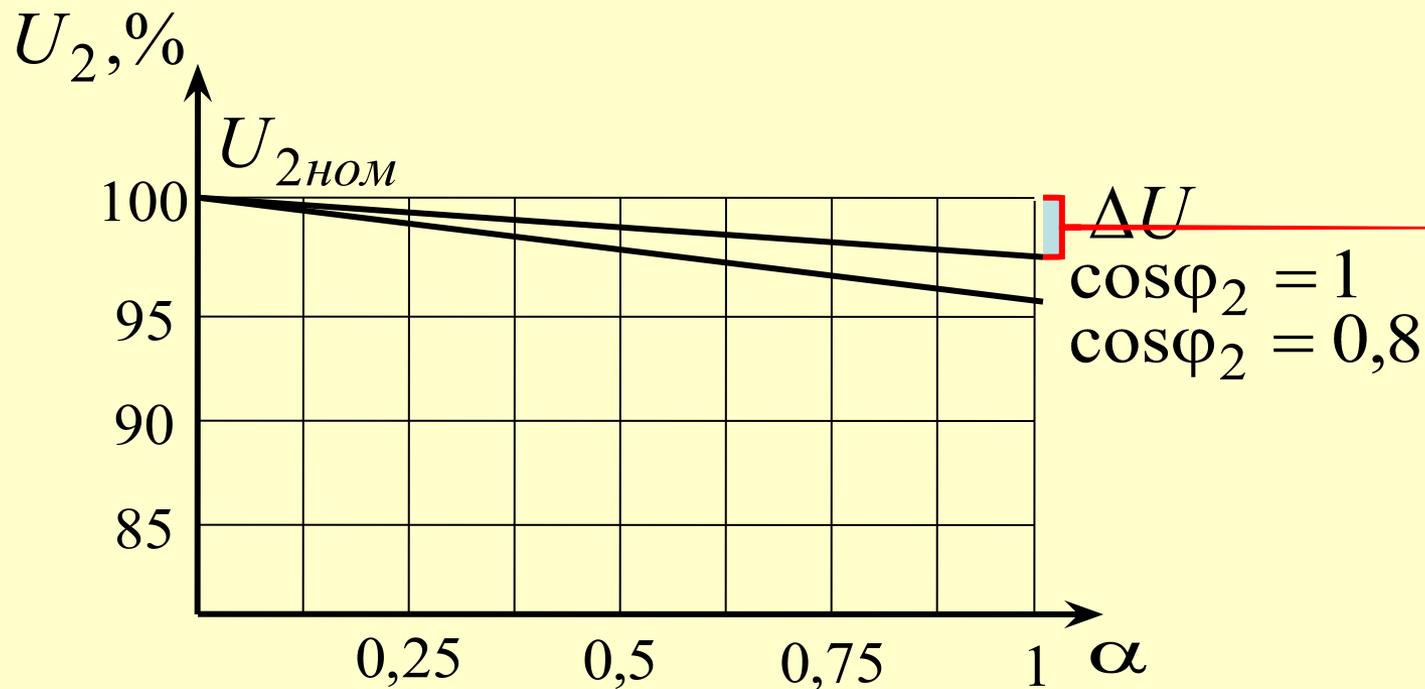
Для силовых Т оптимальный коэффициент трансформации лежит в пределах 0,5-0,7

$$\beta_{окт} = \sqrt{\frac{P_{хн}}{P_{кн}}}$$



10. Внешняя характеристика трансформатора

Внешняя характеристика Т - зависимость между вторичными током и напряжением при изменении нагрузки, неизменном значении первичного напряжения U_1 и заданном коэффициенте мощности $\cos \varphi_2$ во вторичной цепи.

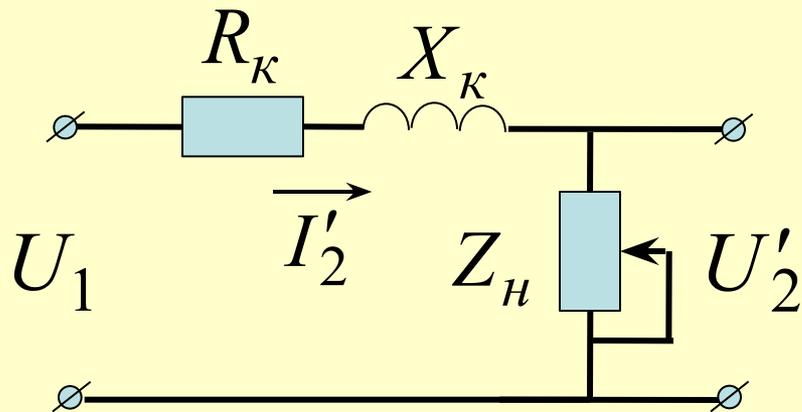


U_2 - вторичное напряжение;
 α - величина нагрузки;
 ΔU - изменения напряжения.

Положения характеристик зависят от мощности и характера нагрузки трансформатора

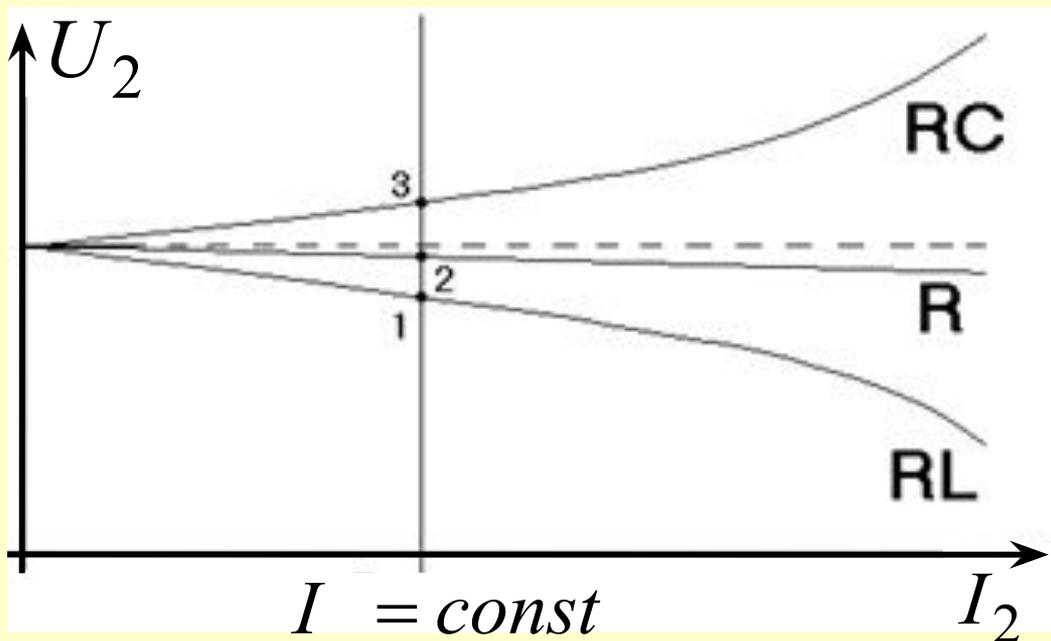
Внешняя характеристика T - зависимость выходного напряжения от тока нагрузки с учетом его характера (активная - R, активно- емкостная - RC, активно – индуктивная - RL).

Схема замещения трансформатора принимает вид:



По второму закону Кирхгофа запишем уравнение для схемы замещения T:

$$U_2 = U_1 - IZ_K = U_1 - I(jX_K + R_K)$$



Векторная диаграмма для фиксированного значения тока нагрузки $I = const$.

активная - R

активно –
индуктивная - RL

активно-
емкостная - RC

