

# Авиационные электрические машины

Кафедра ЭТиАЭО

Лектор – д.т.н., профессор Халютин Сергей Петрович

Тел. +7 (903) 549-84-01

email: s.khalutin@mstuca.aero

# Организационные вопросы

- Количество лекций – 15
- Лабораторные работы - 24
- СРС– 90
- Допуск к экзамену
- Экзамен
- Пересдачи....



# Источники информации



- Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. – СПб.: Питер, 2008
- Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. - СПб.: Питер, 2008
- Сапожникова Е.Ж. Авиационные электрические машины. Электрические машины постоянного тока. Пособие к выполнению лабораторных работ. – М.: МГТУ ГА, 2012
- Сапожникова Е.Ж. Электрические машины. Пособие к выполнению лабораторных работ. – М.: МГТУ ГА, 2011
- Сапожникова Е.Ж. Авиационные электрические машины. Пособие к выполнению лабораторных работ. Часть 4. Авиационные синхронные генераторы. – М.: МГТУ ГА, 2002
- Видеокурсы youtube и т.п.

# Разделы дисциплины

## Авиационные трансформаторы

- Однофазные
- Трехфазные

## Авиационные асинхронные машины

- Асинхронный двигатель
- Специальные машины

## Авиационные электрические машины постоянного тока

- Генераторы
- двигатели

## Авиационные синхронные машины

- Синхронный генератор
- Специальные машины

# Общие сведения об АЭМ

## КЛАССИФИКАЦИЯ АВИАЦИОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

АВИАЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

ПО РОДУ ТОКА

ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ПОСТОЯННОГО ТОКА

ПО ПРИНЦИПУ  
ДЕЙСТВИЯ

АСИНХРОННЫЕ

СИНХРОННЫЕ

КОЛЛЕКТОРНЫЕ

БЕСКОЛЛЕКТОРНЫЕ

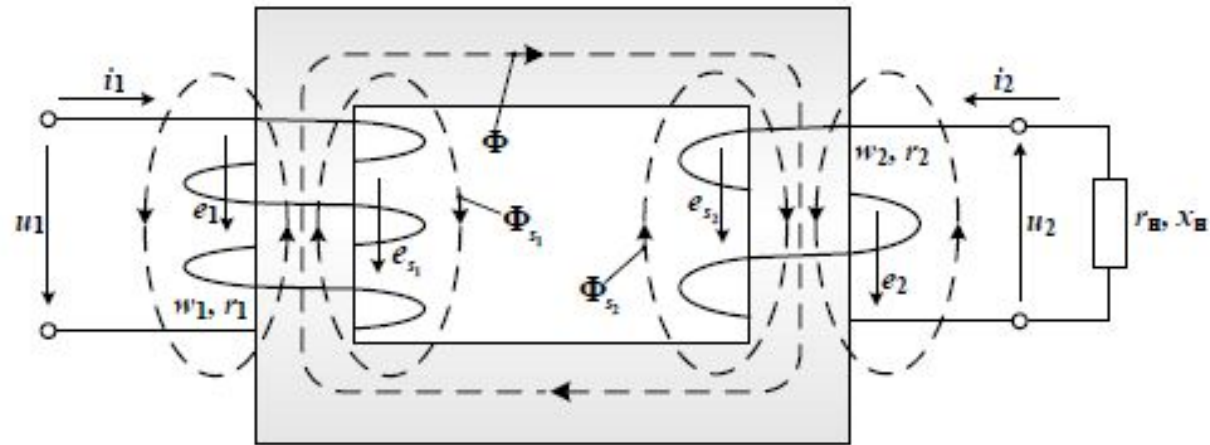
ПО НАЗНАЧЕНИЮ

ГЕНЕРАТОРЫ

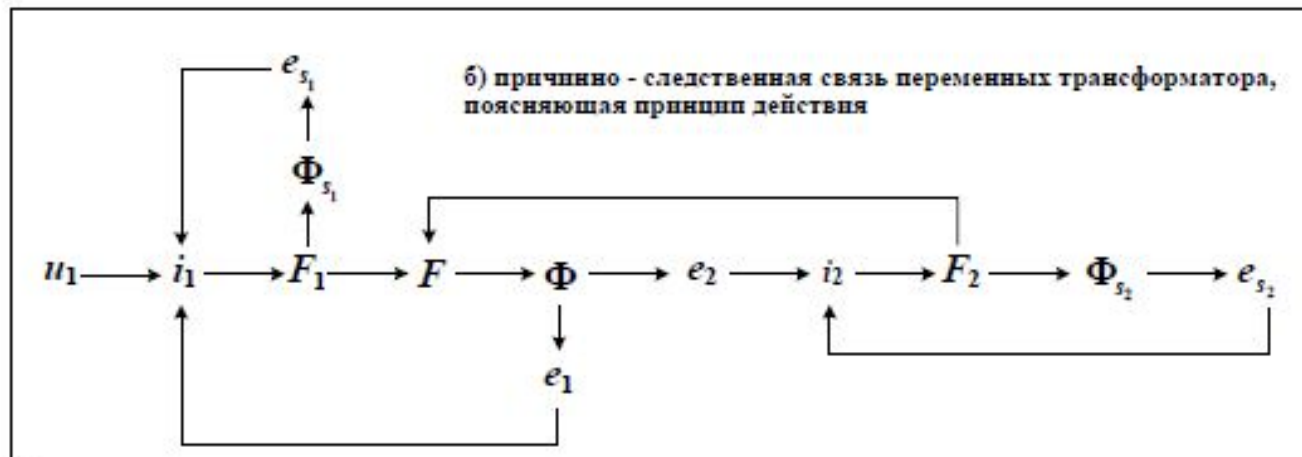
СПЕЦИАЛЬНЫЕ

ДВИГАТЕЛИ

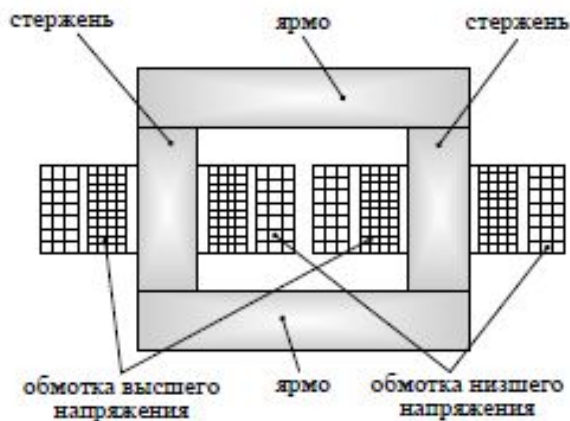
# Принцип действия и устройство однофазного трансформатора



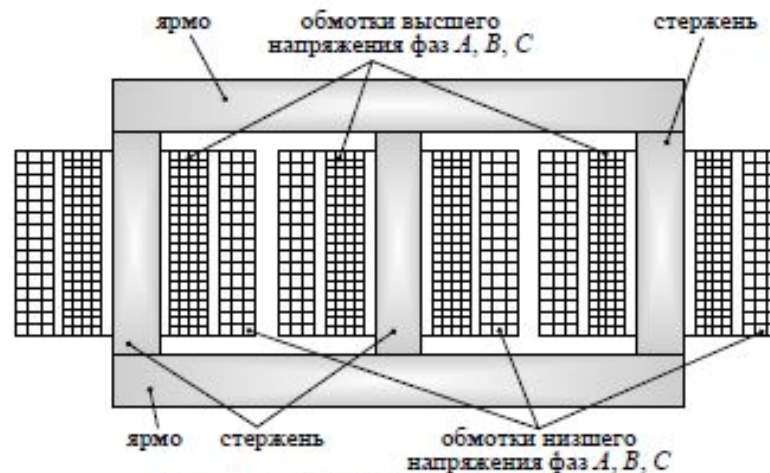
а) электромагнитная схема однофазного трансформатора



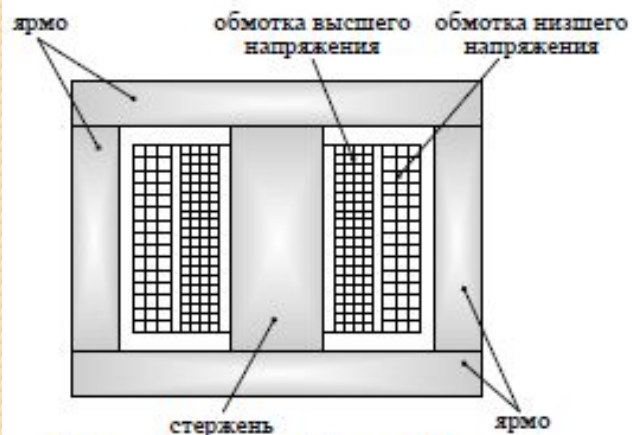
# Конструкция трансформатора



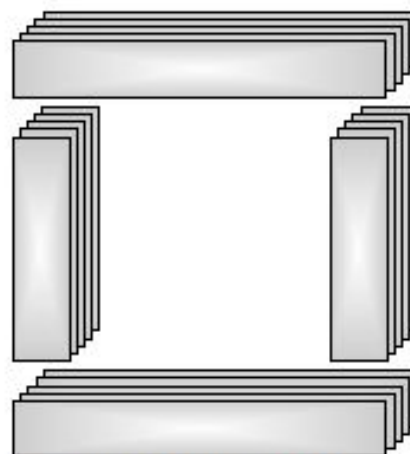
а) стержневой однофазный трансформатор



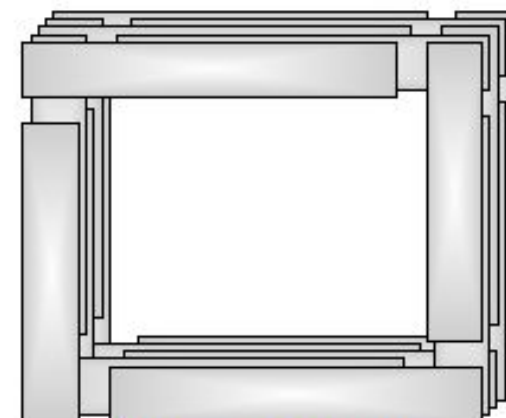
б) стержневой трёхфазный трансформатор



в) броневой однофазный трансформатор



г) стыковая конструкция магнитопровода



д) шихтованная конструкция магнитопровода

# Уравнения неприведенного трансформатора

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{I}_1 \cdot r_1 + jx_{s1} \cdot \dot{I}_1 - \dot{E}_1 \\ \dot{E}_2 = \dot{I}_2 \cdot r_2 + jx_{s2} \cdot \dot{I}_2 + \dot{U}_2 \end{cases}$$

Индуктивные сопротивления рассеяния первичной и вторичной обмоток

$$x_{s1} = \omega \cdot L_{s1}; \quad x_{s2} = \omega \cdot L_{s2}$$



# Режим нагрузки трансформатора

*Напоминание:* Уравнение первичной обмотки имеет вид

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 \cdot (r_1 + jx_{s1}) - E_1.$$

Современные трансформаторы проектируются таким образом, что

$$I_1 \cdot \sqrt{r_1^2 + x_{s1}^2} < 0,1 \cdot U_1 \text{ при } I_{10} \leq I_1 \leq I_{1\text{НОМ}}.$$

Тогда можно считать, что

$$U_1 \cong E_1 = 4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi_{0m}.$$

Анализ этой формулы показывает, что если  $U_1 - const$ , то  $\Phi_{0m} - const$ .

**Вывод:** При переходе от холостого хода к номинальному режиму работы основной магнитный поток  $\Phi_{0m}$  практически остается неизменным по величине, т.е.

$$\Phi_{0m} = const \text{ при } 0 \leq I_1 \leq I_{1\text{НОМ}} \quad (11)$$

Очевидно, что условие (11) будет выполняться тогда, когда МДС также будет неизменной, т.е.  $F - const$  или

$$\dot{I}_1 \cdot w_1 + \dot{I}_2 \cdot w_2 \cong \dot{I}_{10} \cdot w_1. \quad (12)$$

# Режим нагрузки трансформатора

Пояснение: Т.к. суммарная МДС остается практически равной МДС холостого хода  $\dot{I}_{10} \cdot w_1$ , то говорят, что в рабочем диапазоне нагрузок трансформатора имеет место «магнитное равновесие».

Строго можно записать уравнение вида

$$\dot{I}_1 \cdot w_1 + \dot{I}_2 \cdot w_2 = \dot{I}_0 \cdot w_1, \quad (13)$$

где  $\dot{I}_0$  – намагничивающий ток, под которым понимается некоторый условный (расчетный) ток, протекающий по первичной обмотке.

Ток  $\dot{I}_0$  находится из условия создания такой же МДС, какую создают токи  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$ , протекающие по первичной и вторичной обмоткам.

Очевидно, что

$$\dot{I}_0 \approx \dot{I}_{10}.$$

Замечание: Обычно  $I_{10} \ll I_1$  ( $I_{10} = (0,02 - 0,1)I_{1\text{ном}}$ ).

Тогда

$$\dot{I}_1 \cdot w_1 \cong -\dot{I}_2 \cdot w_2 \quad \text{или} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

# Приведение величин вторичной цепи к первичной

Приведение заключается в замене реального трансформатора с числом витков  $w_2$  во вторичной обмотке эквивалентным трансформатором с числом витков во вторичной обмотке  $w'_2 = w_1$ .

Т.о. вместо реального трансформатора с коэффициентом трансформации, равном  $k = \frac{w_1}{w_2}$ , рассматривается приведенный (эквивалентный) транс-

форматор с коэффициентом трансформации  $k' = \frac{w_1}{w'_2} = \frac{w_1}{w_1} = 1$ .

## Замечания:

1. Величины, характеризующие процессы в приведенном трансформаторе, называются приведенными и отмечаются штрихами.
2. Для приведенного трансформатора имеется возможность составить электрическую схему замещения.

Очевидно, что приведение должно быть проведено так, чтобы физические процессы в приведенном трансформаторе оставались такими же, как и в реальном трансформаторе.

*Для этого необходимо, чтобы магнитное поле (магнитный поток  $\Phi_0$ ), а также активные и реактивные мощности  $P_1, Q_1, P_2, Q_2$  не изменялись при приведении.*

# I. Приведение тока I<sub>2</sub>

Для сохранения магнитного потока  $\dot{\Phi}_0$  необходимо, чтобы сохранилась МДС вторичной обмотки, т.е.

$$\dot{I}_2 \cdot w_2 = \dot{I}'_2 \cdot w'_2 = I'_2 \cdot w_1.$$

Из этого условия следует, что

$$\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 \cdot \frac{w_2}{w_1} = \frac{\dot{I}_2}{k}.$$

Очевидно, что также справедливы формулы

$$i'_2 = \frac{i_2}{k} \text{ и } I'_2 = \frac{I_2}{k}.$$

Таким образом, при приведении ток вторичной обмотки уменьшается в « $k$ » раз.

## 2. Приведение ЭДС $E_2$

При сохранении магнитного тока  $\Phi_0$  ЭДС пропорциональна числу витков, т.е.

$$e'_2 = -w'_2 \frac{d\Phi_0}{dt} = -w_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = e_1 = ke_2$$

*Пояснение:* Последнее равенство в данной формуле вытекает из определения коэффициента трансформации  $k$ .

Таким образом

$$e'_2 = e_1 = ke_2$$

Очевидно, что справедливы равенства

$$\dot{E}'_2 = \dot{E}_1 = k\dot{E}_2 \text{ и } E'_2 = E_1 = kE_2.$$

Т.е. приведенная ЭДС вторичной обмотки равна ЭДС первичной обмотки.

### 3. Связь между приведенными и действительными параметрами вторичной цепи

Запишем уравнение 2-го закона Кирхгофа для вторичной цепи

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2(r_2 + jx_{s2}) + \dot{U}_2.$$

Выразим  $\dot{E}_2$  и  $\dot{I}_2$  через приведенные значения  $\dot{E}'_2$  и  $\dot{I}'_2$ :

$$\frac{1}{k} \dot{E}'_2 = k \dot{I}'_2(r_2 + jx_{s2}) + \dot{U}_2$$

или

$$\dot{E}'_2 = I'_2(k^2 r_2 + jk^2 x_{s2}) + k \dot{U}_2.$$

Введем обозначения

$$r'_2 = k^2 \cdot r_2, \quad x'_{s2} = k^2 \cdot x_{s2}, \quad \dot{U}'_2 = k \cdot \dot{U}_2.$$

В результате получим уравнение вторичной цепи в приведенных величинах:

$$\dot{E}'_2 = I'_2(r'_2 + jx'_{s2}) + k \dot{U}'_2.$$

Таким образом, при приведении вторичной обмотки к числу витков первичной обмотки активные и индуктивные сопротивления рассеяния увеличиваются в  $k^2$  раз, а напряжение на зажимах вторичной обмотки увеличивается в  $k$  раз.

## 4. Выражение для $U_2$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2(r_H + jx_H) = \dot{I}_2 Z_H,$$

где  $r_H, x_H$  - активное и реактивное сопротивления нагрузки соответственно;  
 $Z_H$  - комплексное сопротивление нагрузки.

или 
$$\frac{U'_2}{k} = k\dot{I}'_2(r_H + jx_H) = k\dot{I}'_2 Z_H$$

или 
$$\dot{U}'_2 = \dot{I}'_2(k^2 r_H + jk^2 x_H) = \dot{I}'_2 k^2 Z_H.$$

Обозначим

$$r'_H = k^2 \cdot r_H, \quad x'_H = k^2 \cdot x_H, \quad Z'_H = k^2 \cdot Z_H.$$

Получим

$$\dot{U}'_2 = \dot{I}'_2 \cdot (r'_H + jx'_H) = \dot{I}'_2 \cdot Z'_H.$$

Итак, сопротивления нагрузки при проведении увеличиваются в  $k^2$  раз.

## 5. Уравнение для МДС

$$\dot{F} = \dot{I}_0 w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2.$$

Выразим  $\dot{I}_2$  через  $\dot{I}'_2$ . Получим

$$\dot{I}_0 w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}'_2 k w_2$$

или

$$\dot{I}_0 w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}'_2 w_1$$

или

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2.$$

В результате уравнение МДС принимает вид уравнения токов (выражение для намагничивающего тока  $I_0$ ).



# Уравнения приведенного трансформатора

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 (r_1 + jx_{s1}) - \dot{E}_1$$

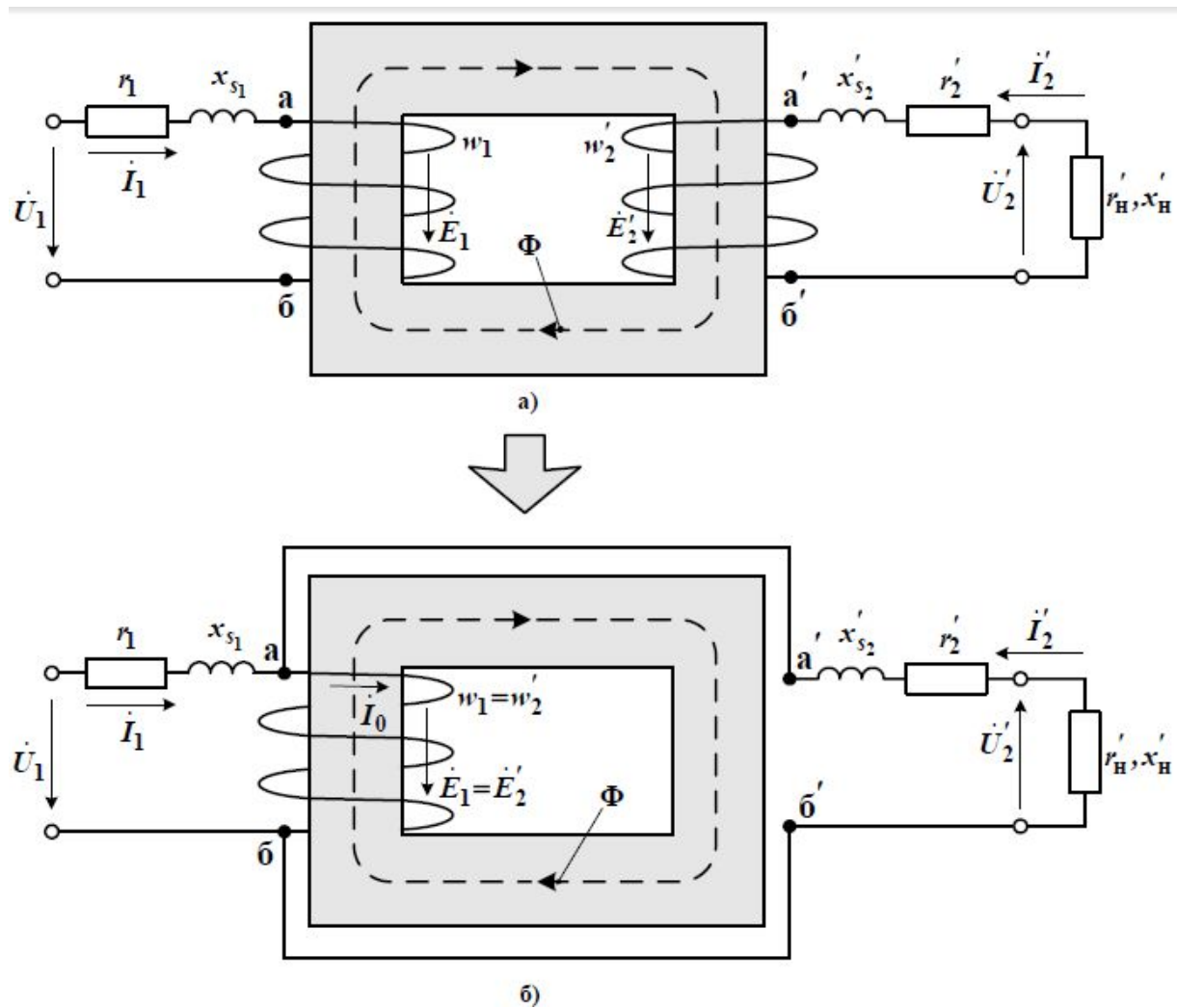
$$\dot{E}'_2 = \dot{E}_1 = \dot{I}'_2 (r'_2 + jx'_{s2}) + \dot{U}'_2$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{I}'_2 Z'_H = \dot{I}'_2 (r'_H + jx'_H)$$

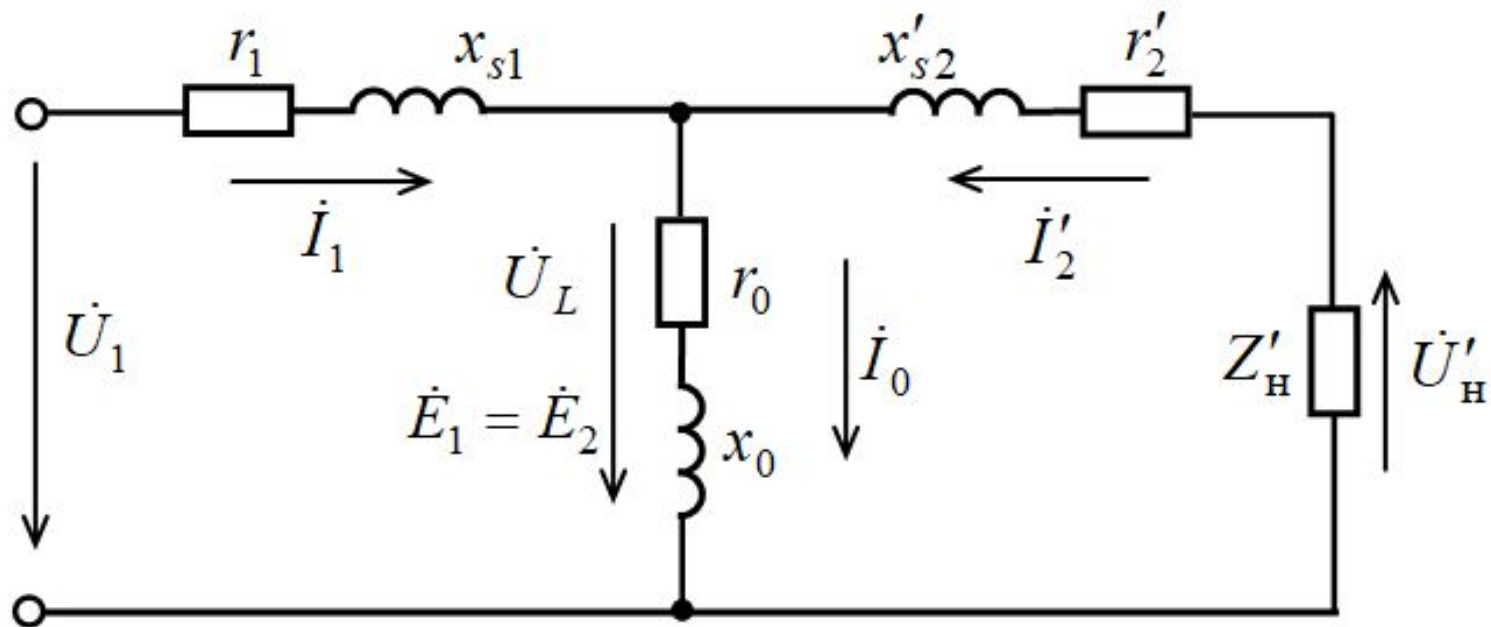
$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0$$

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{\Phi}_{om}}{\sqrt{2} \cdot w_1} Z_\mu e^{j\delta}$$

# Схема замещения трансформатора



# Схема замещения трансформатора



## Последовательность построения векторной диаграммы

1. Определим приведенные значения вторичных величин и параметров согласно формулам

$$I'_2 = \left( \frac{w_2}{w_1} \right) I_2 = \frac{1}{k} I_2; \quad Z'_H = Z_H \cdot k^2 = r'_H + jx'_H; \quad Z'_2 = Z_2 k^2 = r'_2 + jx_2$$

2. Построение начинаем с вектора  $\dot{I}'_2$ , который может быть направлен произвольно, например, совмещен с действительной отрицательной осью.

3. Определяем напряжение  $\dot{U}'_2 = \dot{U}'_H$  по уравнению  $\dot{U}'_2 = \dot{I}'_2 r'_H + j \dot{I}'_2 x'_H$ .

4. Определяем ЭДС  $\dot{E}'_2 = \dot{E}'_1$  по уравнению

$$\dot{E}'_2 = \dot{E}'_1 = \dot{I}'_2 r'_2 + j \dot{I}'_2 x'_{s2} + \dot{U}'_2.$$

5. Определяем вектор магнитного потока  $\dot{\Phi}_{om}$  по соотношениям

$$\dot{\Phi}_{om} = \Phi_{om} e^{j(\psi_{\Phi_2} + \pi/2)}; \quad \Phi_{om} = \frac{E'_2}{4,44 \cdot f \cdot w_2} = \frac{E_1}{4,44 \cdot f \cdot w_1}$$

## Последовательность построения векторной диаграммы

6. Определяем вектор тока  $\dot{I}_0$  согласно уравнению

$$\dot{I}_0 = I_0 e^{j(\psi_{\Phi_0} + \delta)}$$

Величину тока  $I_0$  определяют по кривой намагничивания трансформатора (рис.1.3),

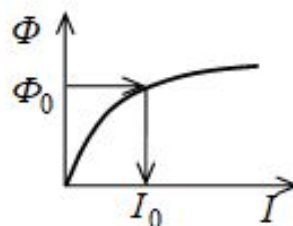


Рис. 1.3. Определение тока  $I_0$

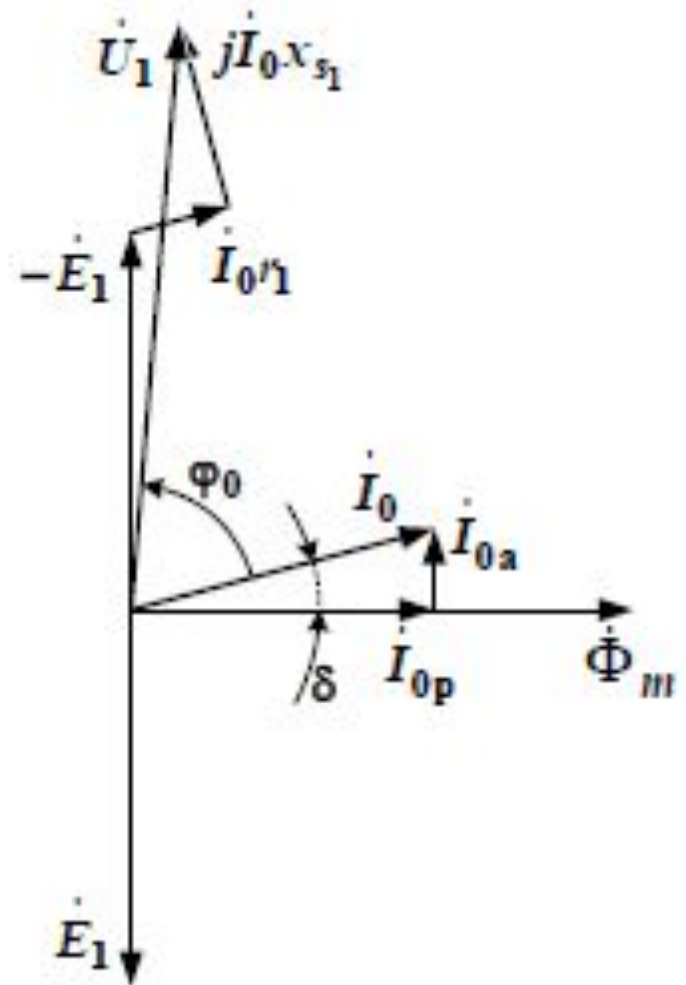
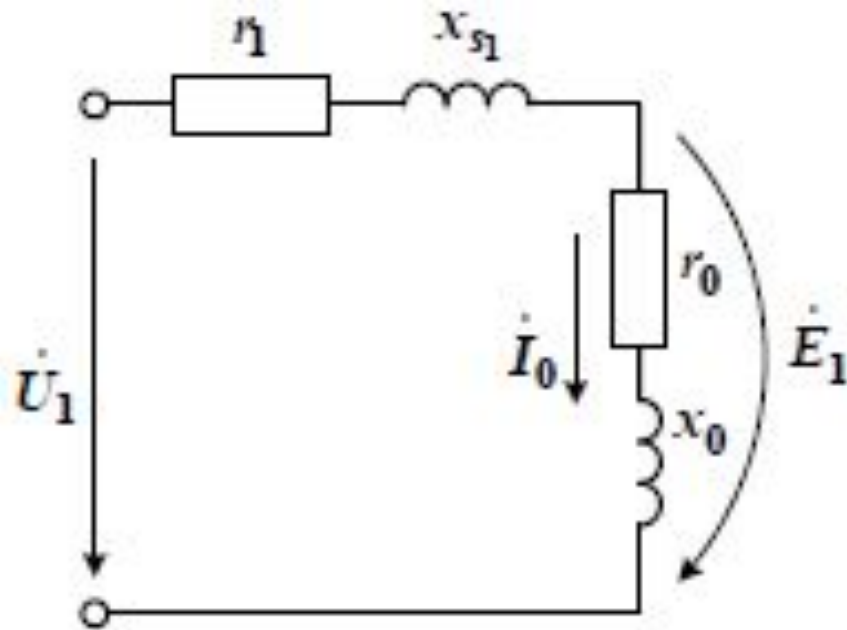
а угол  $\delta$  – из условия

$$\delta = \arcsin \frac{P_{\text{потм}}}{E_1 \cdot I_0}.$$

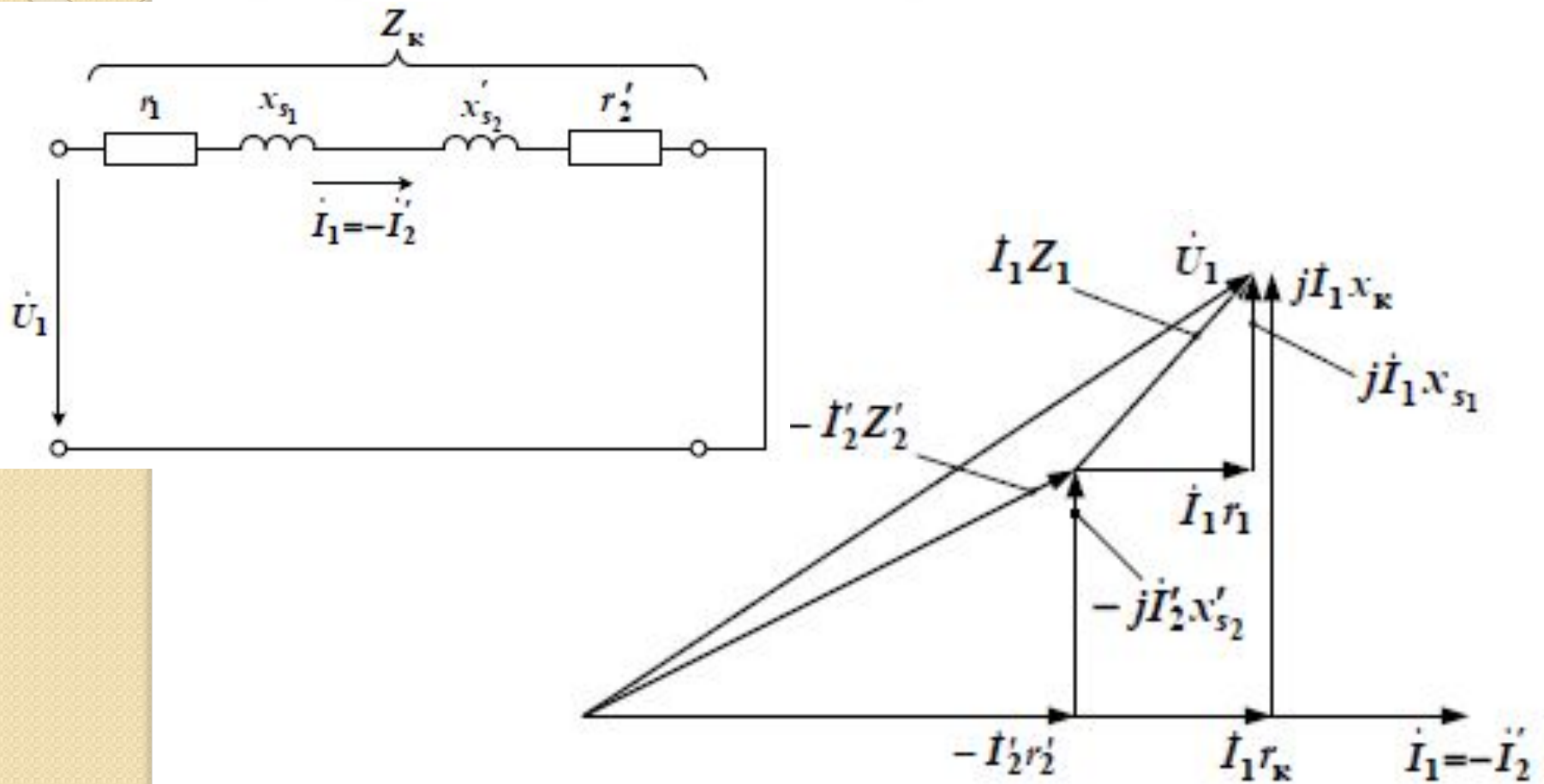
7. Определяем вектор  $\dot{I}_1$  согласно уравнению  $\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0$ .  
8. Определяем напряжение на входе  $\dot{U}_1$  по уравнению

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_{s1}.$$

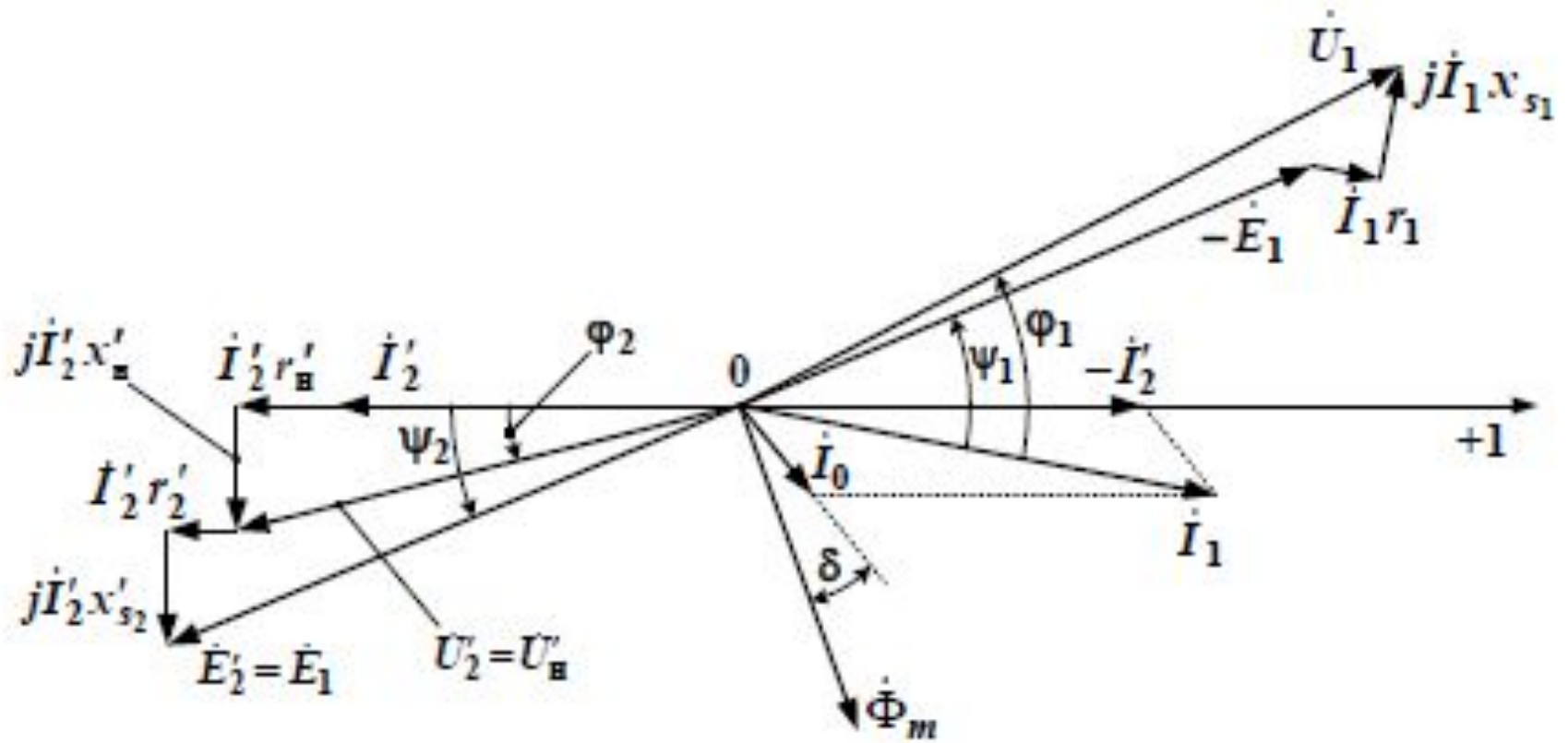
# Схема замещения и векторная диаграмма трансформатора (холостой ход)



# Схема замещения и векторная диаграмма трансформатора (короткое замыкание)

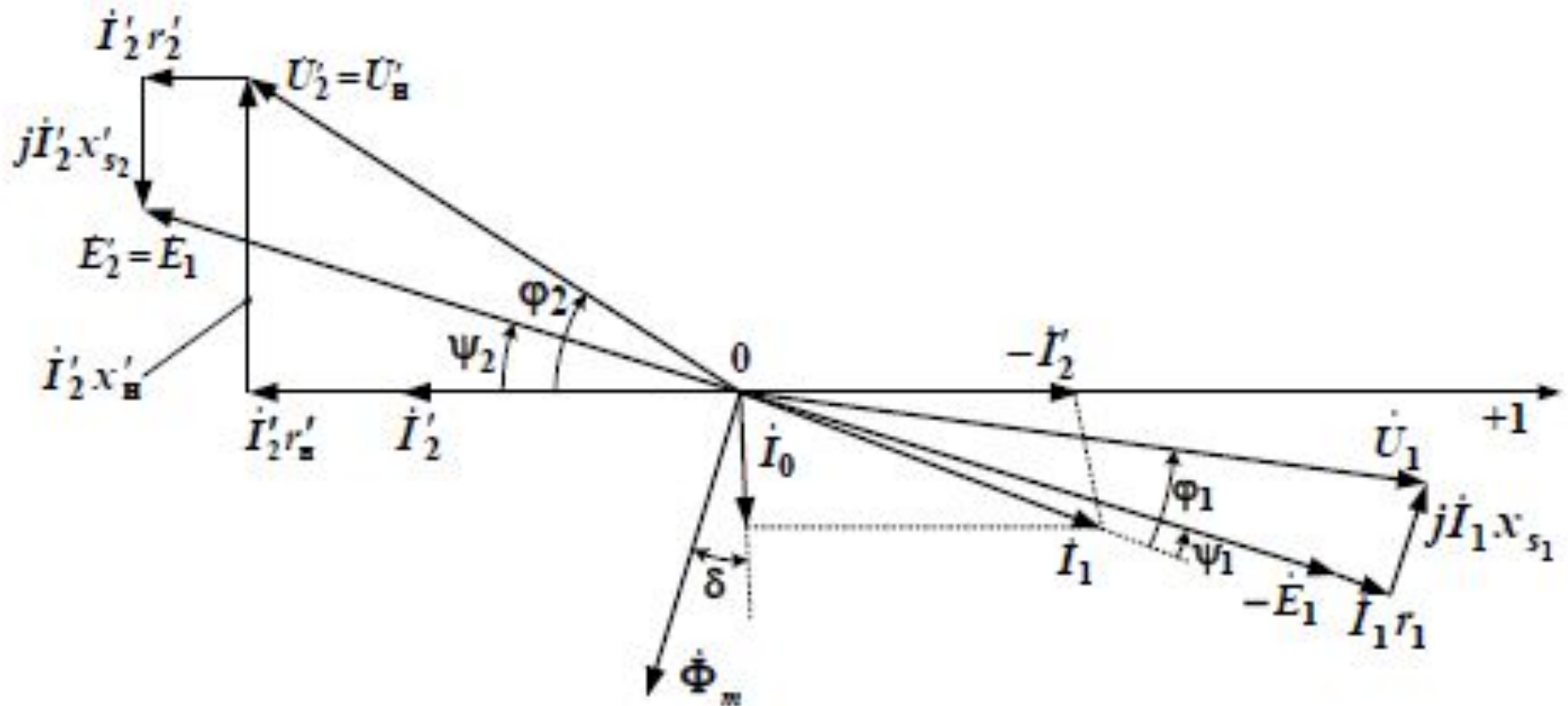


# Режимы работы трансформатора (активно-индуктивная нагрузка)

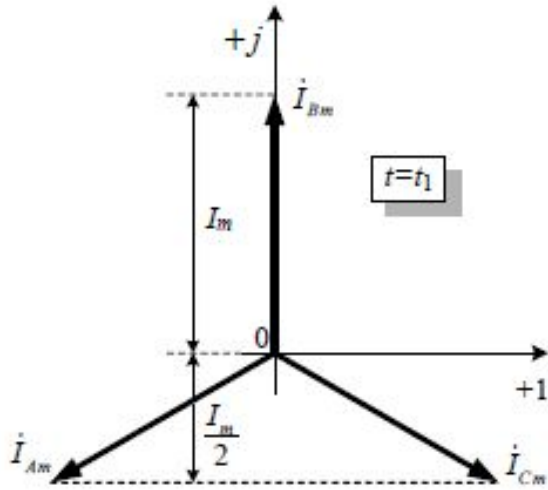




# Режимы работы трансформатора (активно-емкостная нагрузка)



# Трёхфазный трансформатор (соединение первичной обмотки)

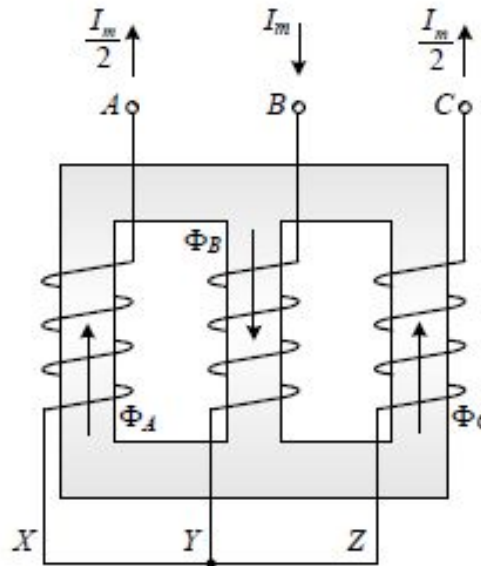


$$i_A(t_1) = -\frac{I_m}{2}$$

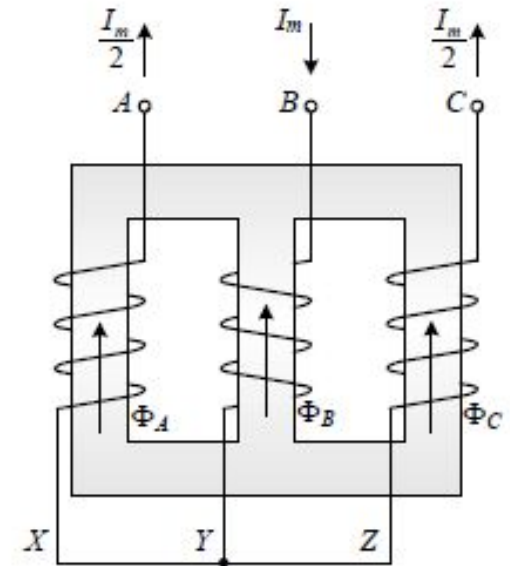
$$i_B(t_1) = I_m$$

$$i_C(t_1) = -\frac{I_m}{2}$$

а) векторная диаграмма фазных токов

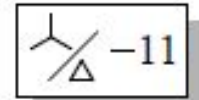
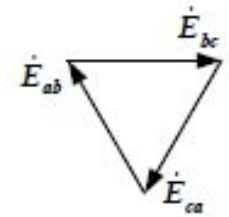
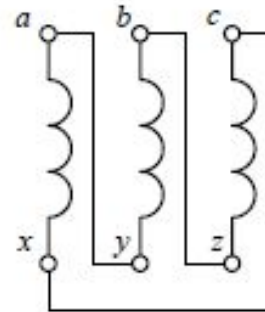
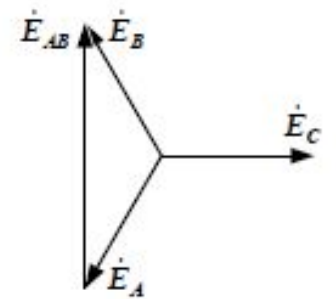
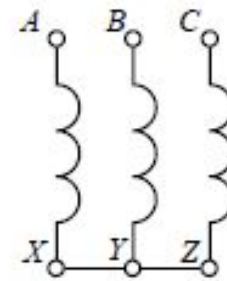
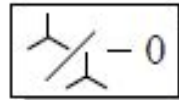
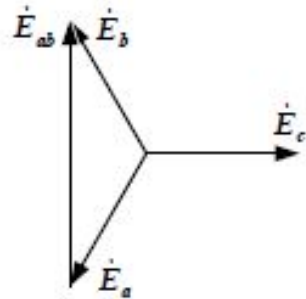
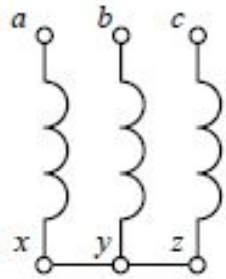
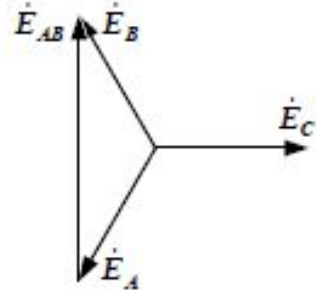
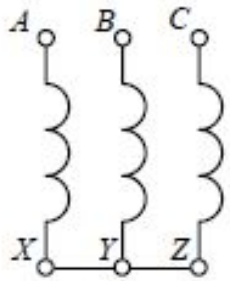


б) схема ПРАВИЛЬНОГО соединения первичной обмотки

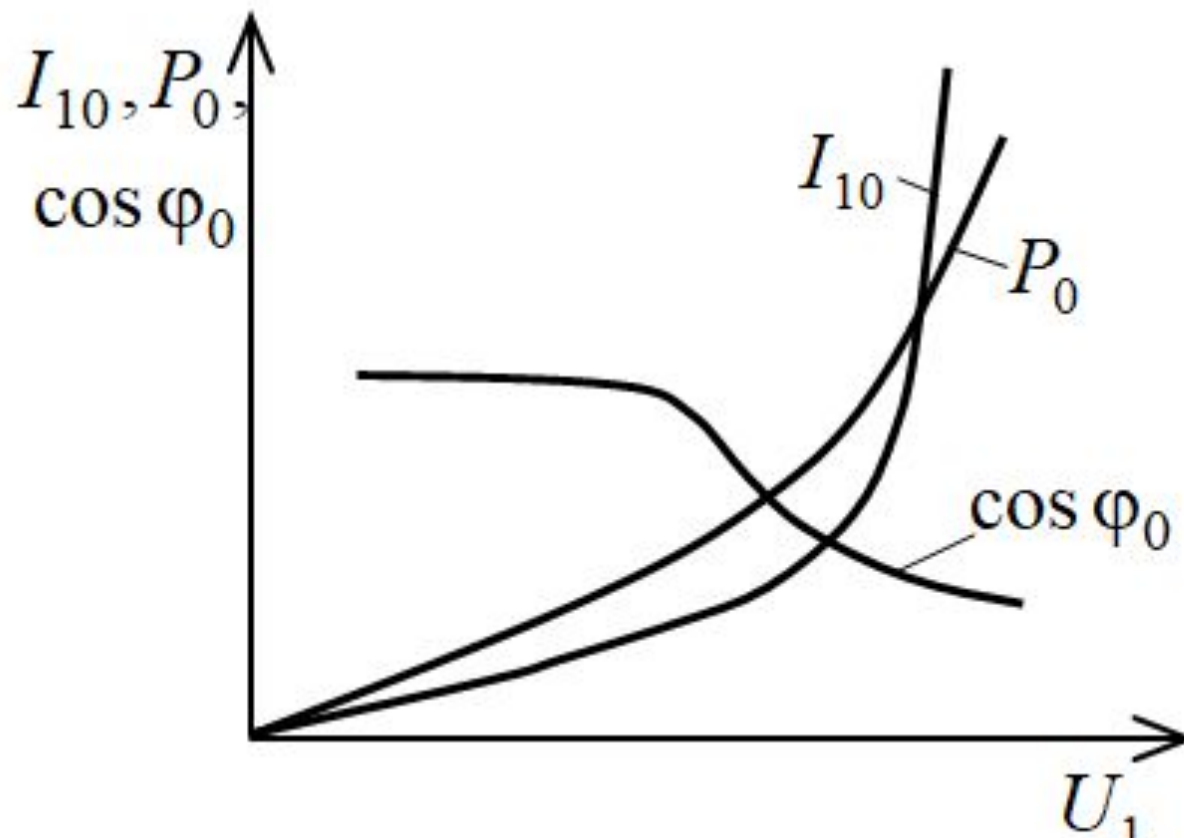


в) схема НЕПРАВИЛЬНОГО соединения первичной обмотки

# Трёхфазный трансформатор (группы соединения обмоток)



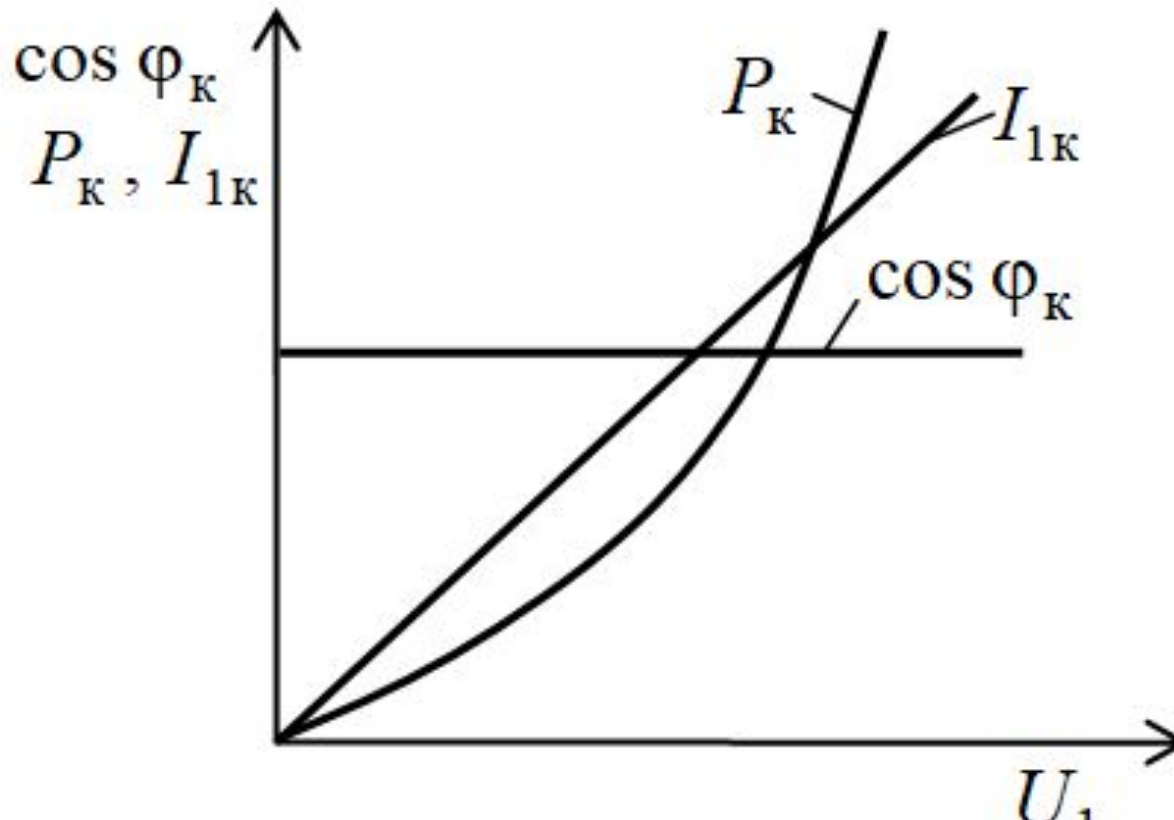
# Характеристики трансформатора (холостого хода)



$$I_{10} = f(U_1); P_0 = f(U_1); \cos \varphi_0 = f(U_1)$$

при  $I_2 = 0$  ( $z_H \rightarrow \infty$ ) и  $f = f_{\text{НОМ}}$ ,

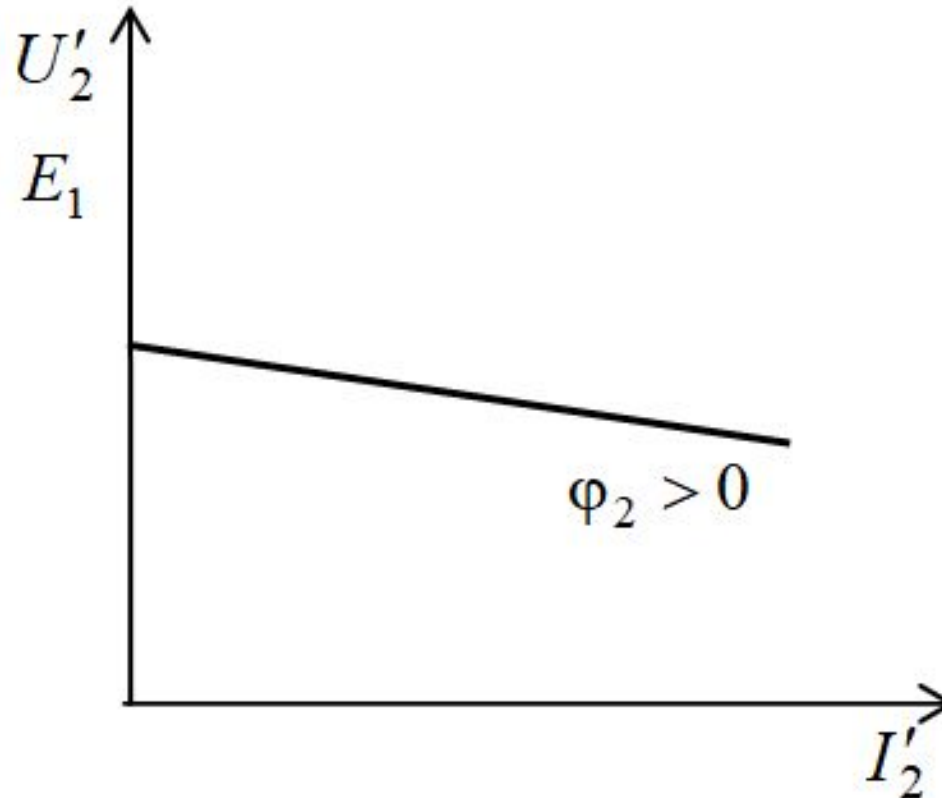
# Характеристики трансформатора (короткого замыкания)



$$I_{1k} = f(U_1), \quad P_k = f(U_1), \quad \cos \varphi_k = f(U_1)$$

$$\text{при } U'_2 = 0 \ (z_H = 0) \quad f = f_{\text{НОМ}},$$

# Характеристики трансформатора (внешняя)



$$U'_2 = f(I'_2) \text{ при } U_1 = U_{1\text{ном}}; f = f_{\text{ном}}; \cos \varphi_2 = \text{const}$$