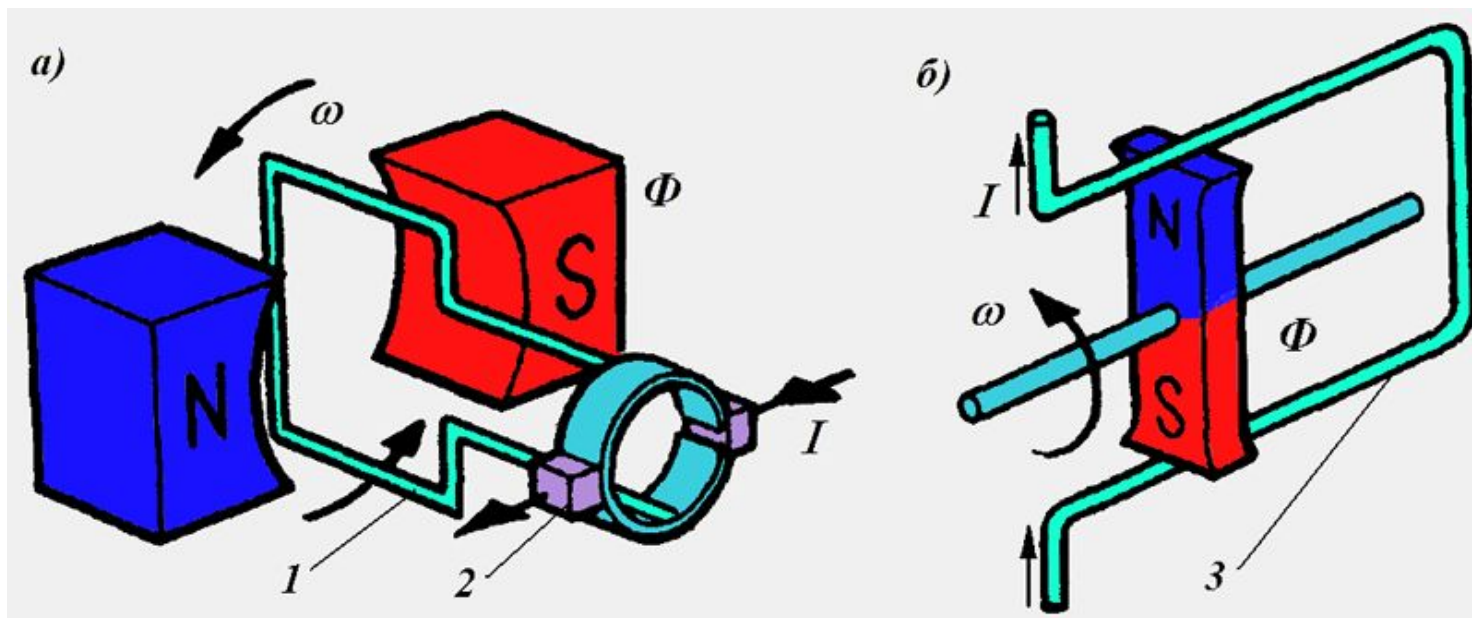




Авиационные электрические машины

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

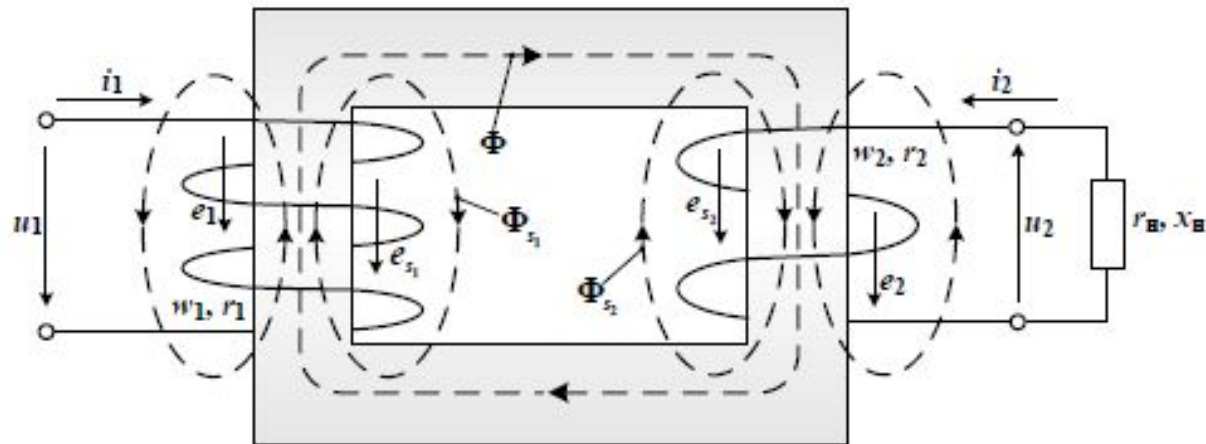
ПО НАЗНАЧЕНИЮ

ГЕНЕРАТОРЫ

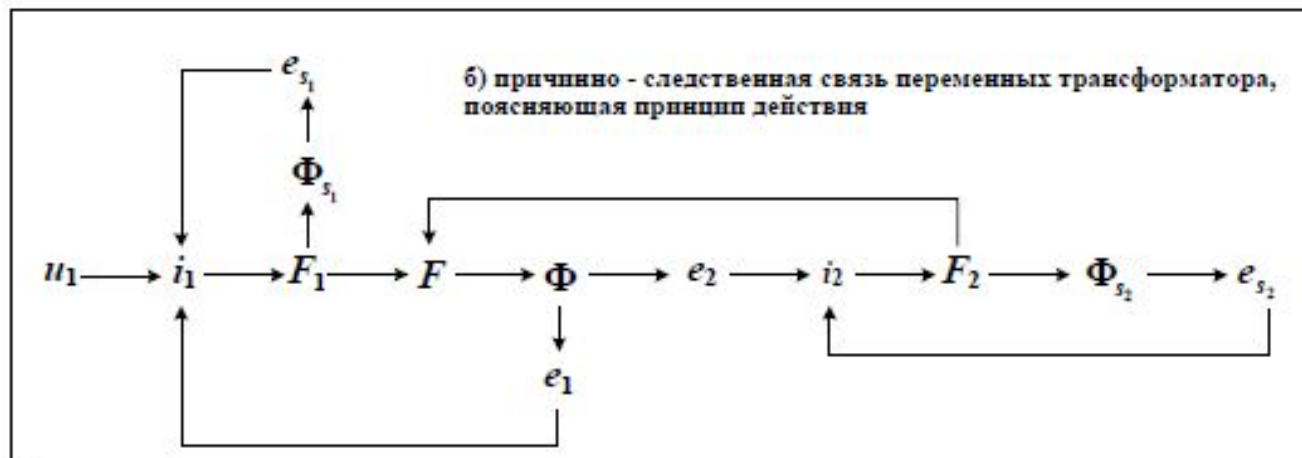
СПЕЦИАЛЬНЫЕ

ДВИГАТЕЛИ

Принцип действия и устройство однофазного трансформатора

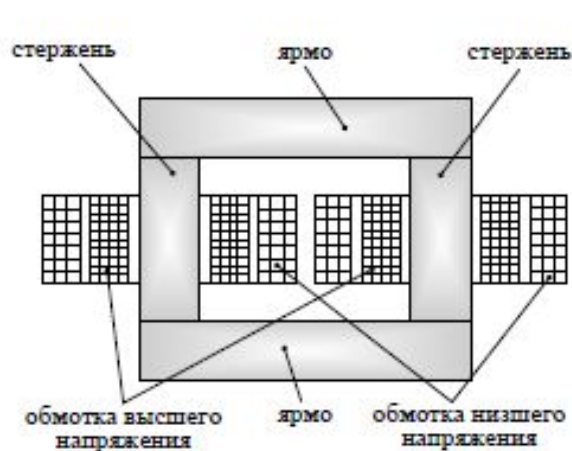


а) электромагнитная схема однофазного трансформатора

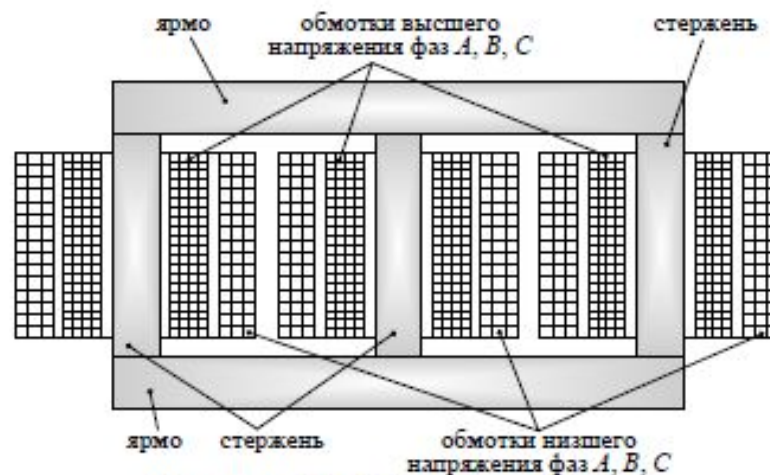


б) причинно - следственная связь переменных трансформатора, поясняющая принцип действия

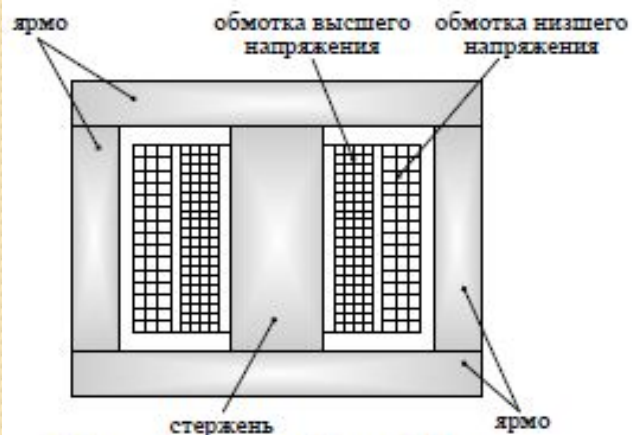
Конструкция трансформатора



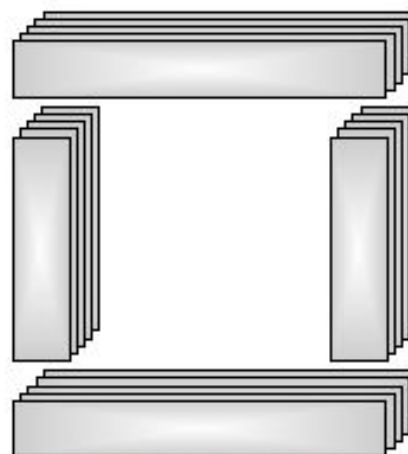
а) стержневой однофазный трансформатор



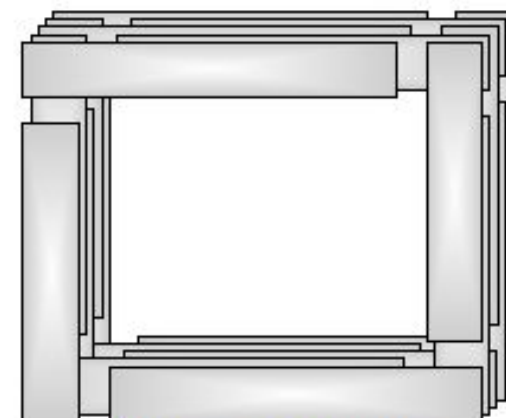
б) стержневой трёхфазный трансформатор



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

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 Φ_0), а также активные и реактивные мощности P_1, Q_1, P_2, Q_2 не изменялись при приведении.

I. Приведение тока I₂

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 E2

При сохранении магнитного тока Φ_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

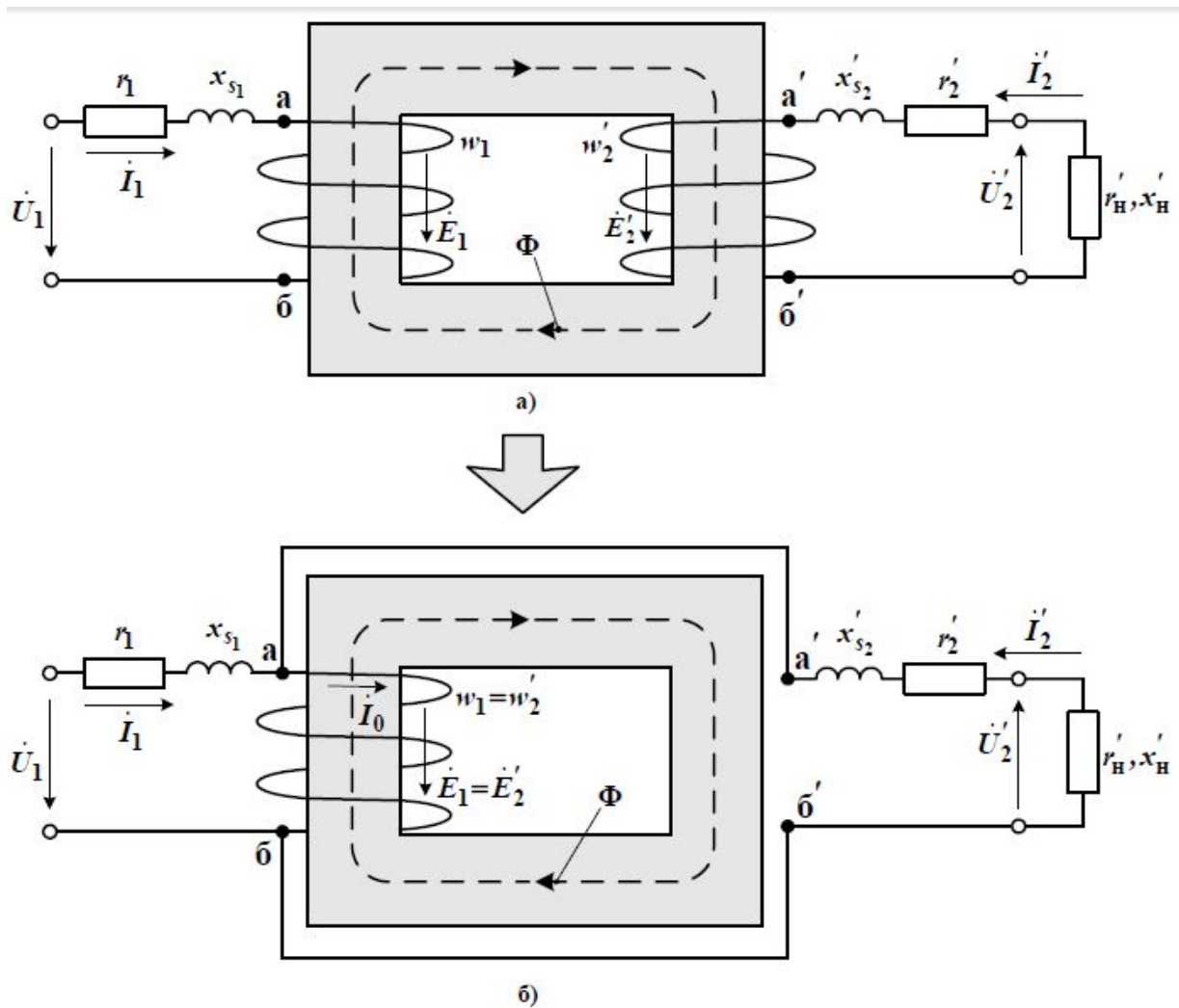
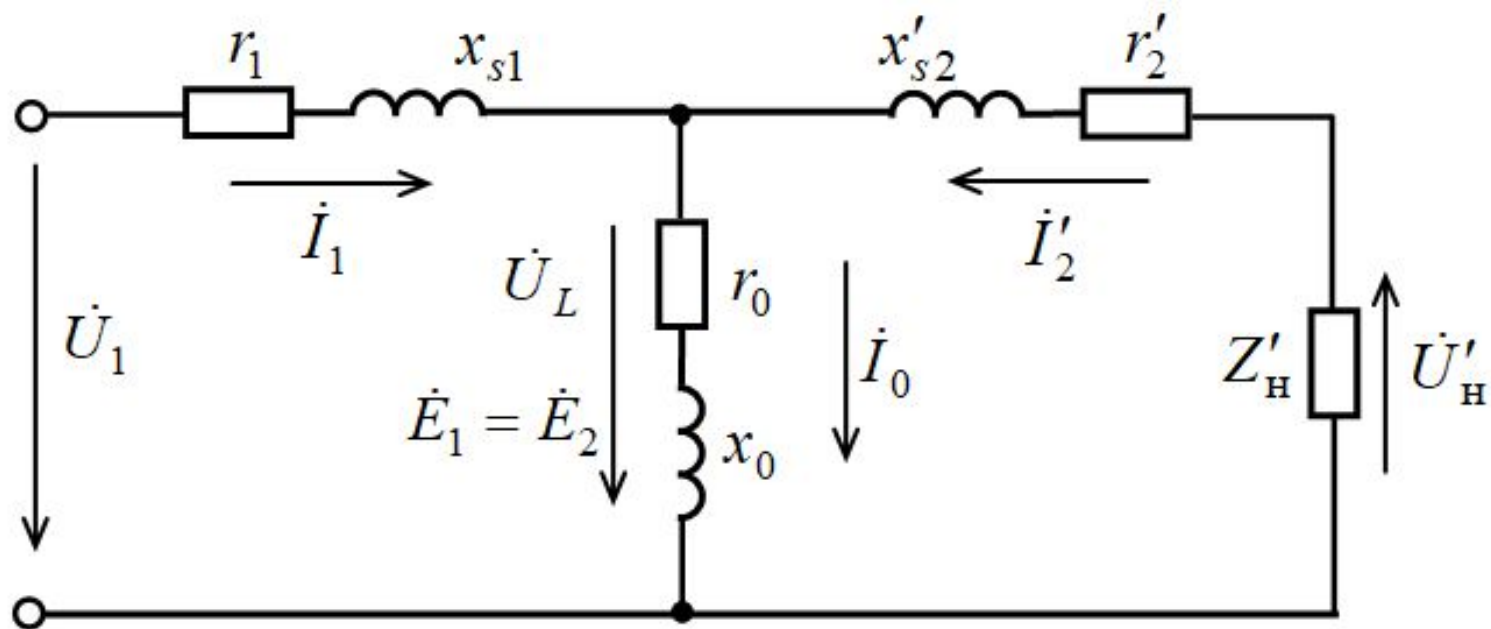


Схема замещения трансформатора



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

$$\dot{\Phi}_{om} = \Phi_{om} e^{j(\psi_{e2} + \pi/2)}; \quad \Phi_{om} = \frac{E'_2}{4,44 \cdot f \cdot w_2} = \frac{E_1}{4,44 \cdot f \cdot w_1}$$

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),

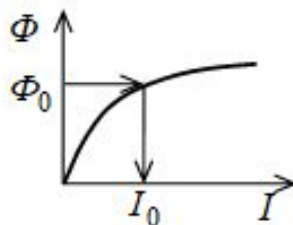


Рис. 1.3. Определение тока I_0

а угол δ – 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)

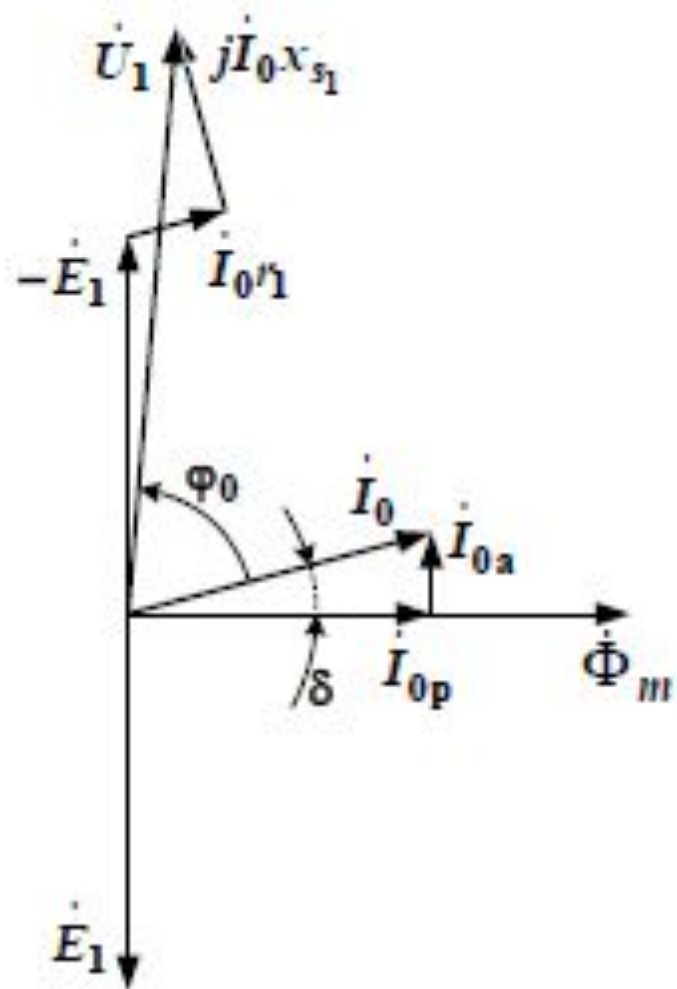
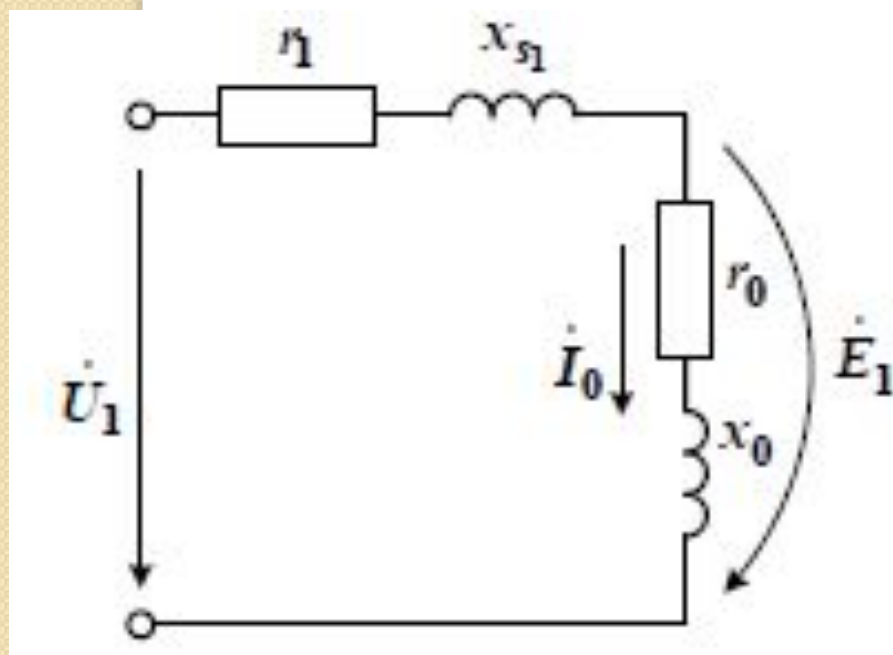
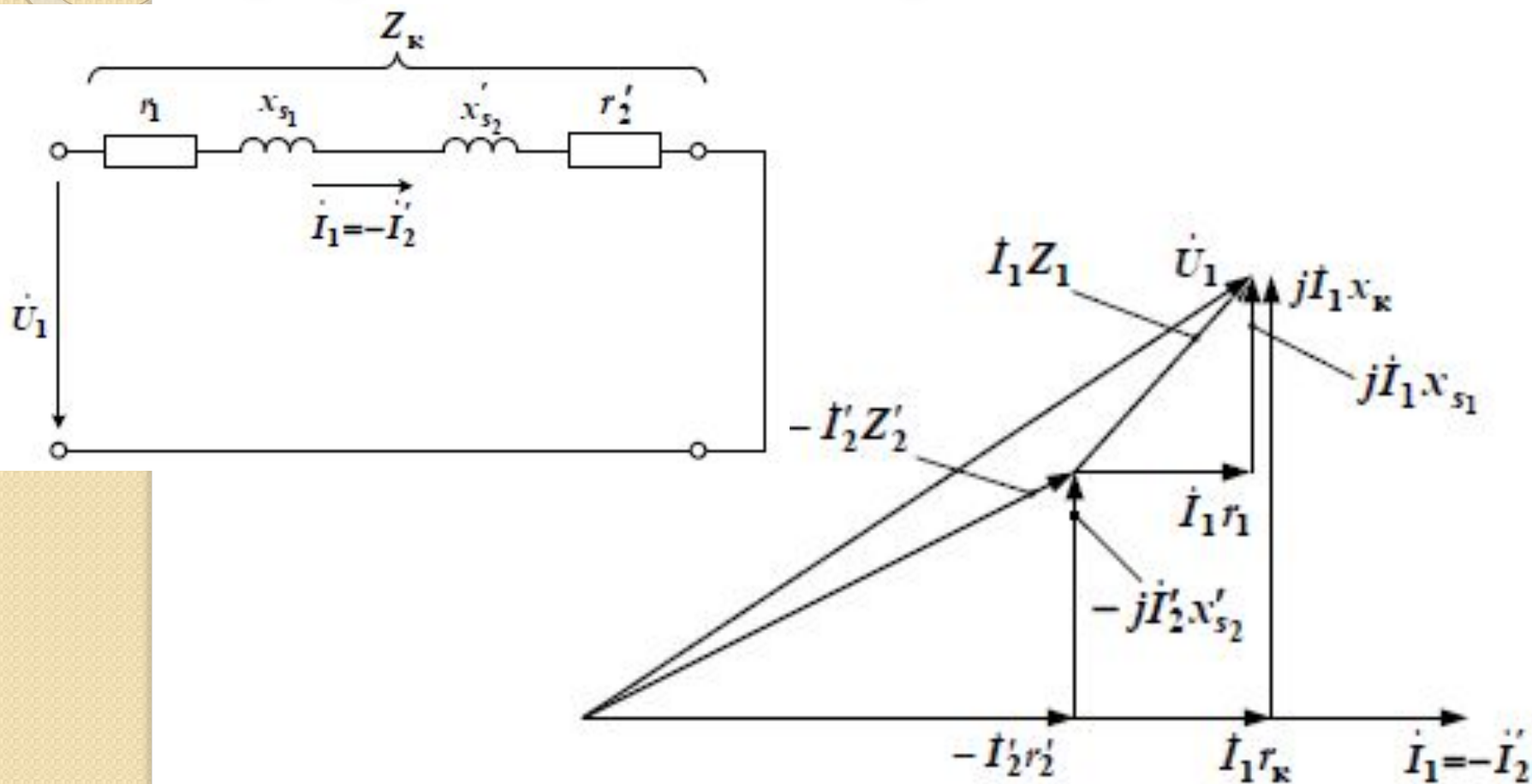
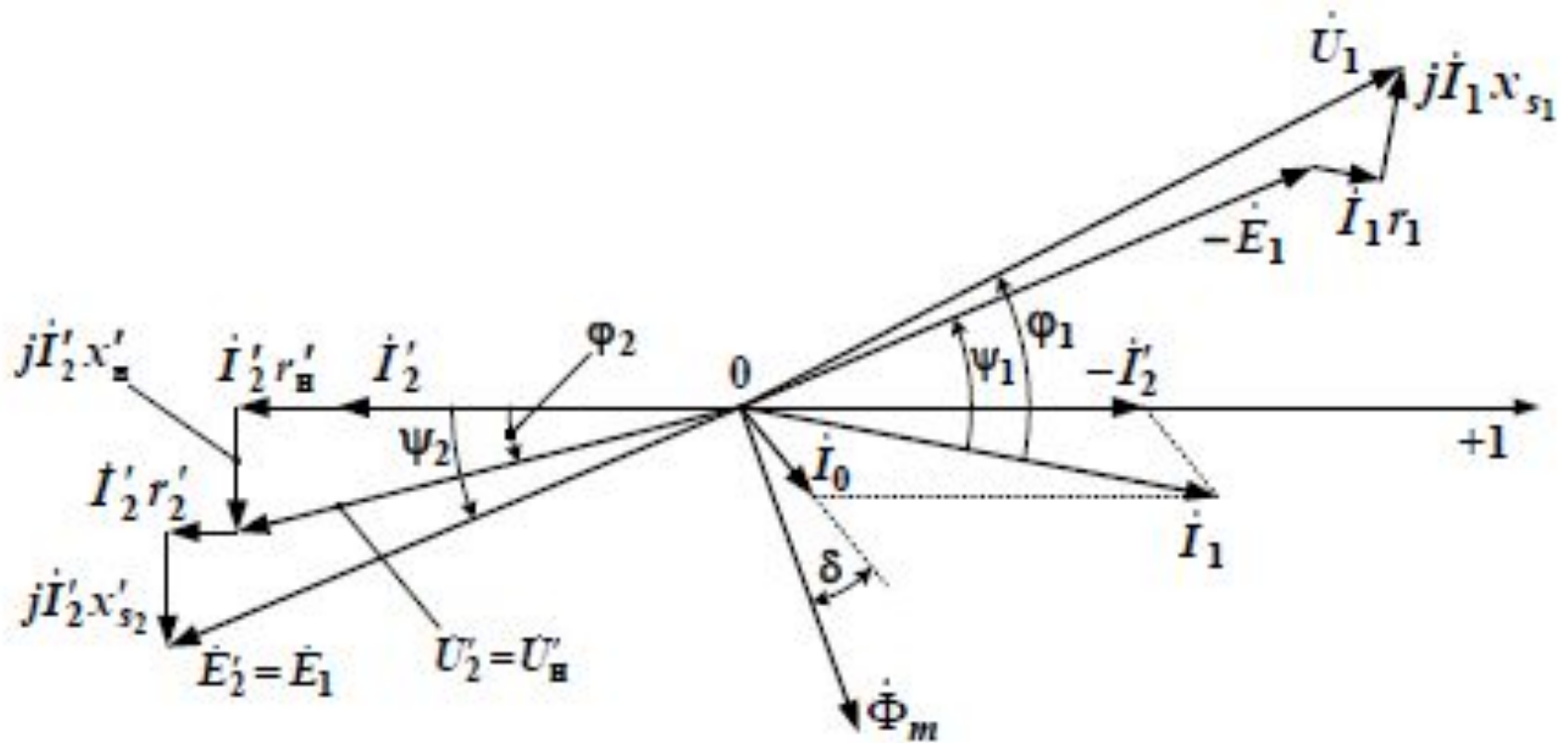


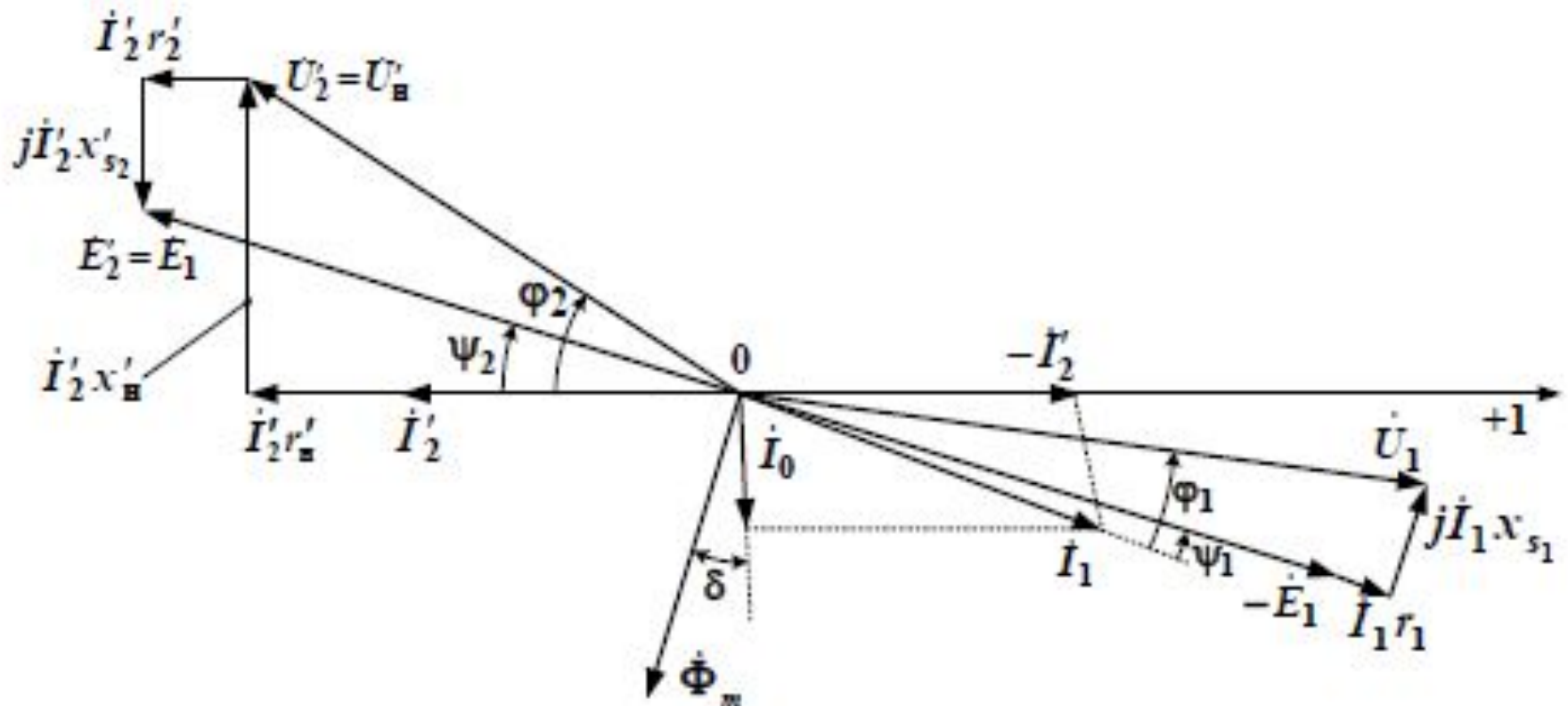
Схема замещения и векторная диаграмма трансформатора (короткое замыкание)



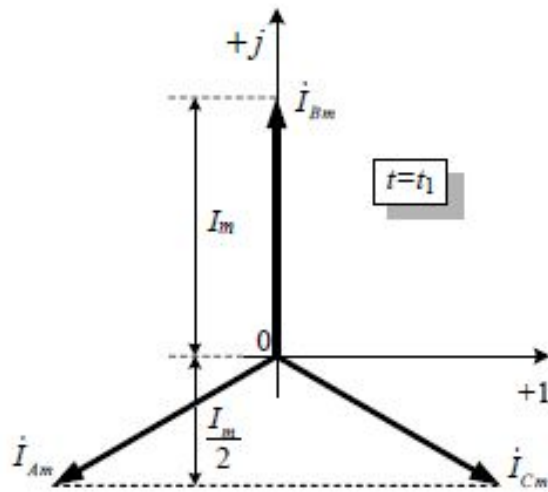
Режимы работы трансформатора (активно-индуктивная нагрузка)



Режимы работы трансформатора (активно-емкостная нагрузка)

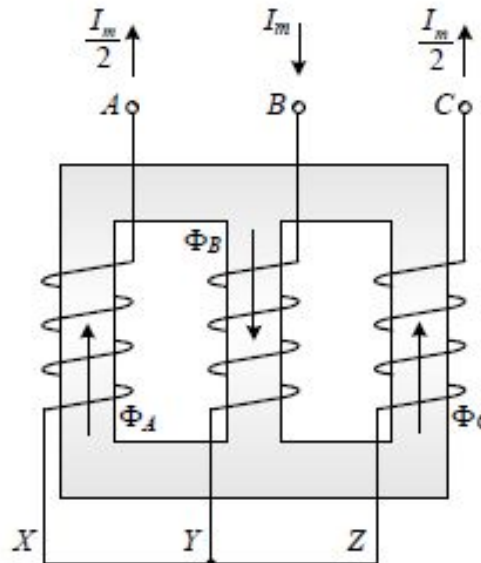


Трёхфазный трансформатор (соединение первичной обмотки)

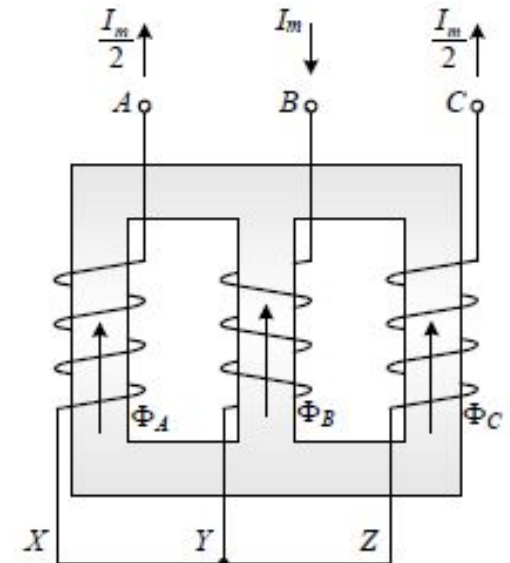


$$\begin{aligned} i_A(t_1) &= -\frac{I_m}{2} \\ i_B(t_1) &= I_m \\ i_C(t_1) &= -\frac{I_m}{2} \end{aligned}$$

а) векторная диаграмма фазных токов

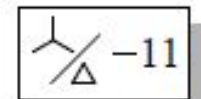
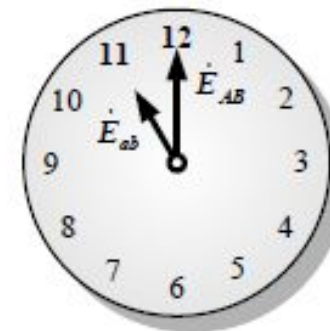
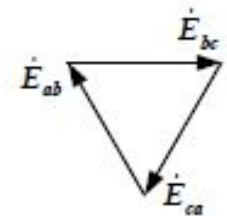
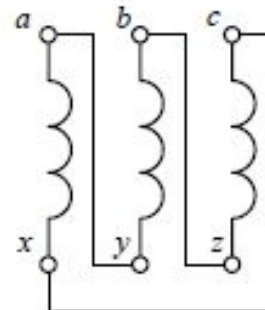
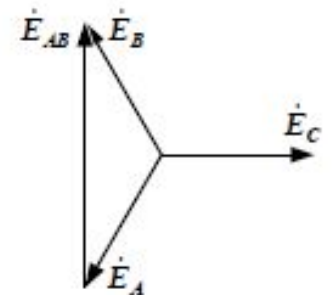
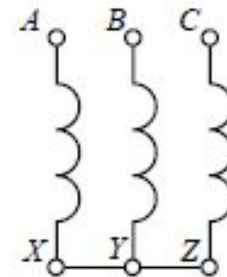
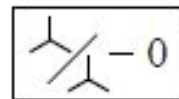
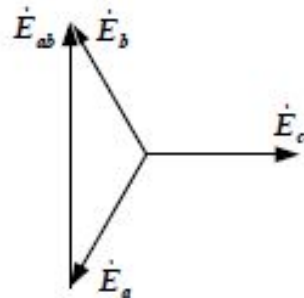
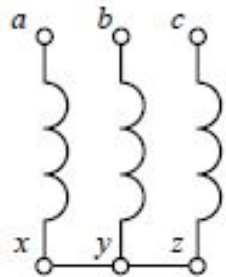
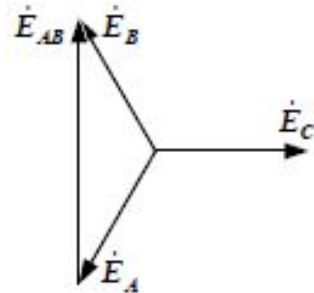
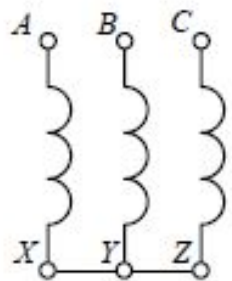


б) схема ПРАВИЛЬНОГО соединения первичной обмотки

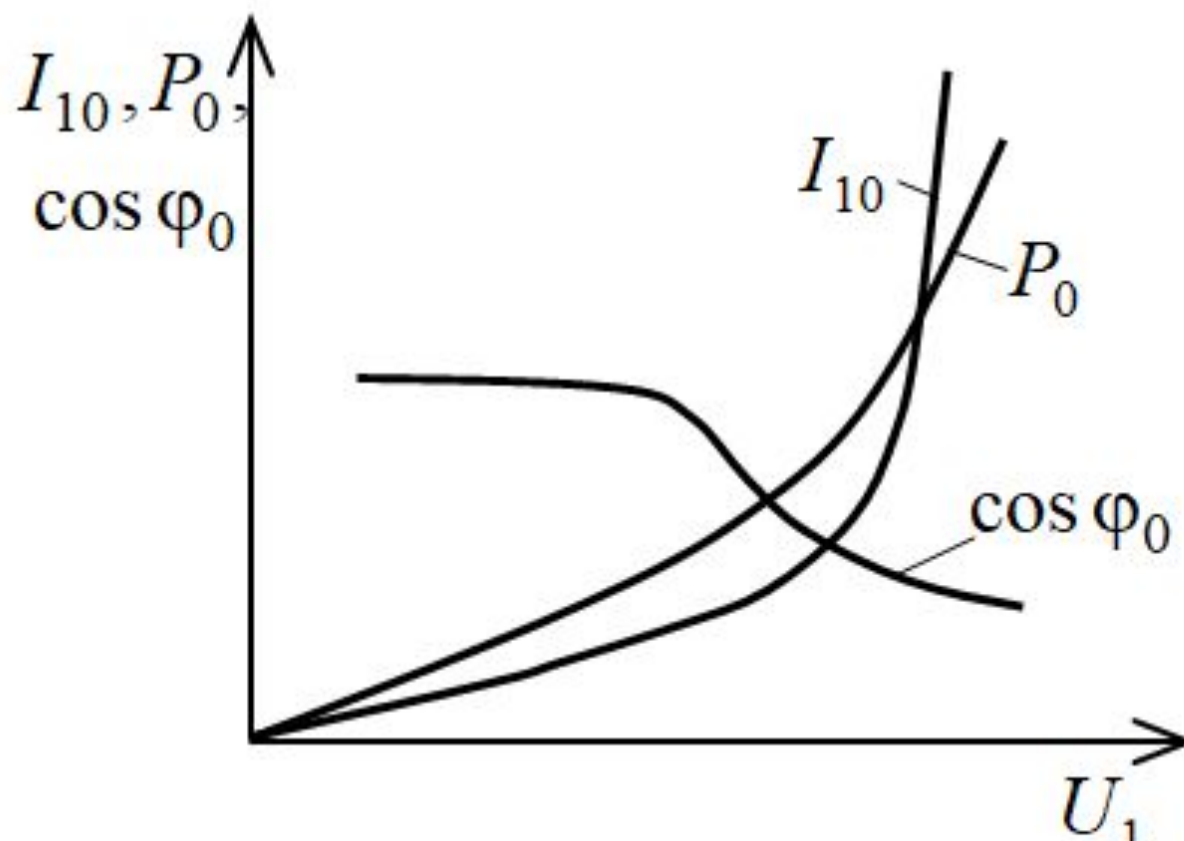


в) схема НЕПРАВИЛЬНОГО соединения первичной обмотки

Трёхфазный трансформатор (группы соединения обмоток)



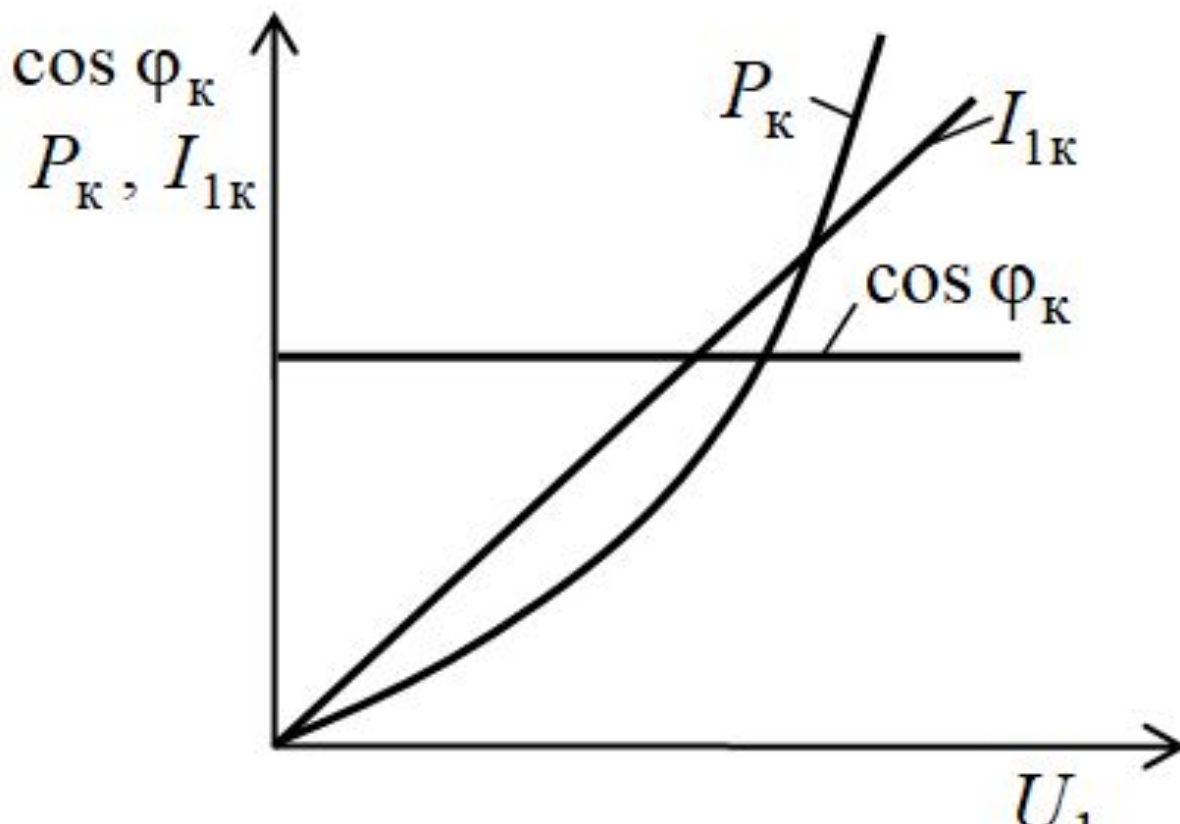
Характеристики трансформатора (холостого хода)



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

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

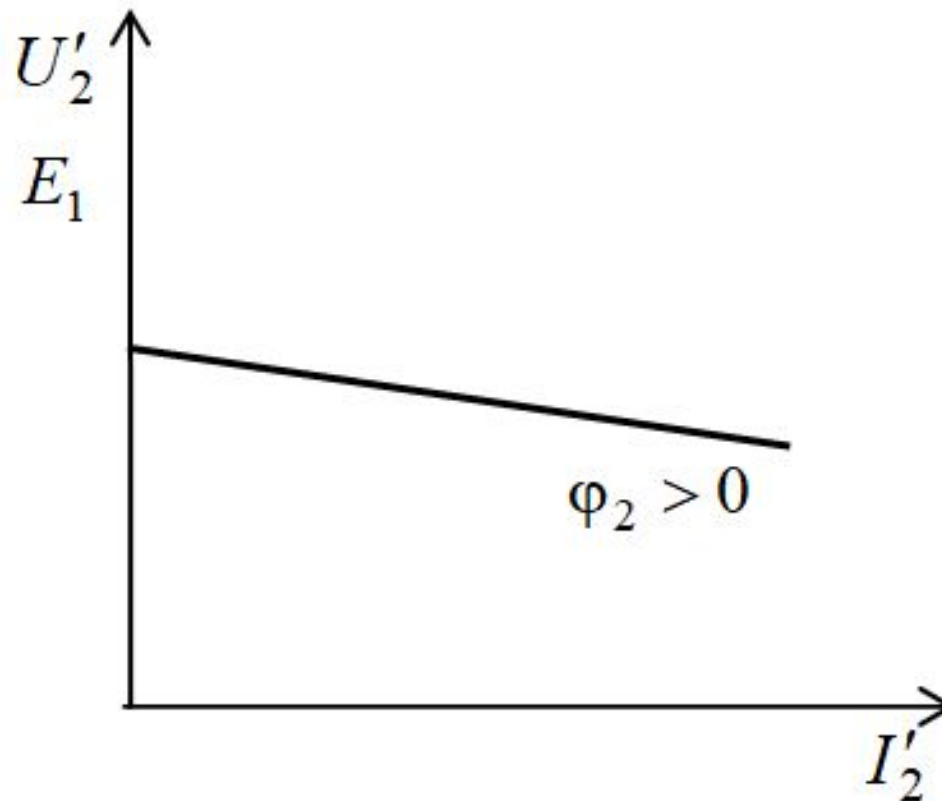
Характеристики трансформатора (короткого замыкания)



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

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

Характеристики трансформатора (внешняя)



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