



СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Принцип действия трансформатора



Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две или большее число индуктивно связанных обмоток, и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока.

Принцип действия трансформатора

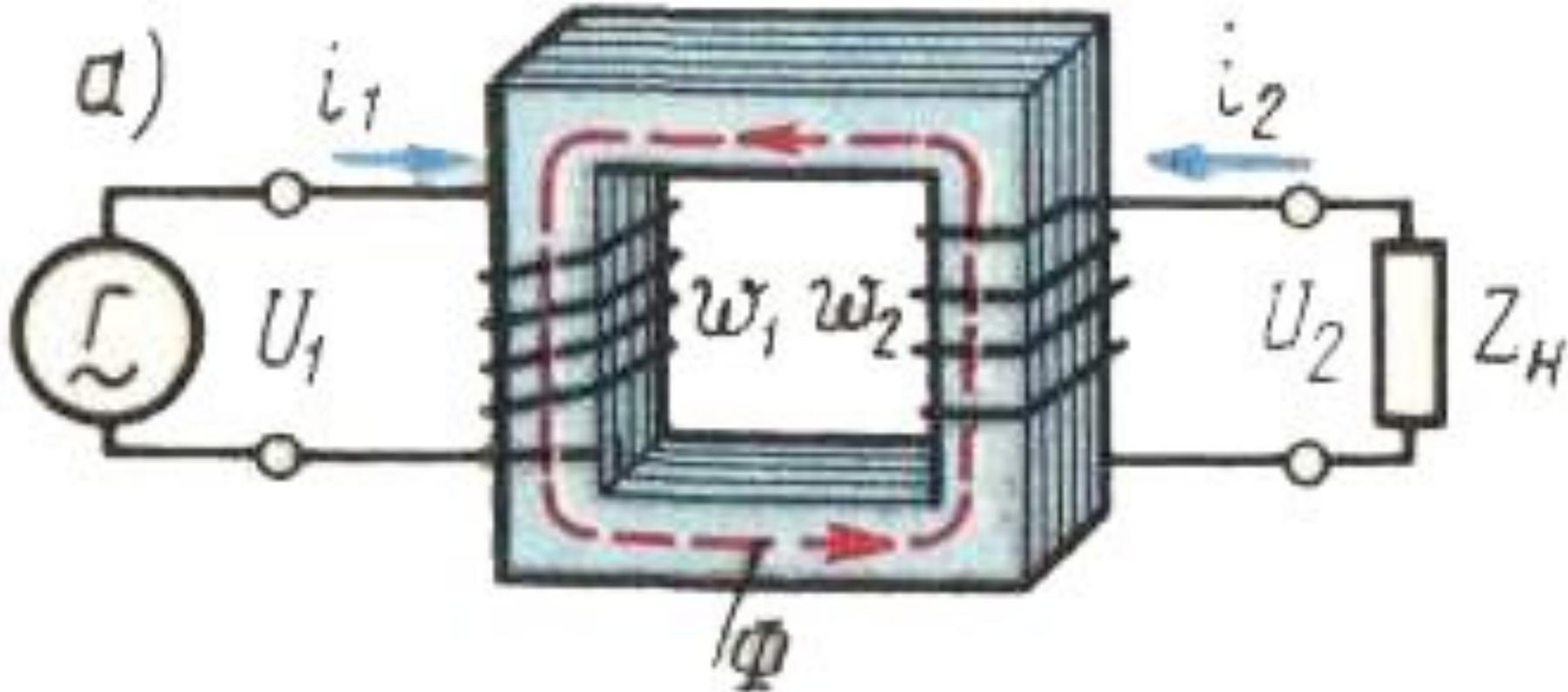


Рис. 29. Электромагнитная система однофазного трансформатора:
1 – первичная обмотка, 2 – вторичная обмотка, 3 – магнитопровод

Отношение ЭДС первичного напряжения к ЭДС вторичного напряжения (или отношение их чисел витков) называют *коэффициентом трансформации*

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2}. \quad (1)$$

При увеличении вторичного напряжения трансформатора в k раз (по сравнению с первичным) ток во вторичной обмотке соответственно уменьшается в k раз

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{U_2}{U_1} \frac{E_2}{E_1} \approx \frac{W_2}{W_1} \approx \frac{1}{k}.$$



Уравнения напряжений трансформатора

Максимальное значение ЭДС

$$E_{1\max} = \omega \cdot w_1 \cdot \Phi_{\max} \quad (2)$$

Действующее значение первичной ЭДС (В):

$$E_1 = \frac{E_{1\max}}{\sqrt{2}} = \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \right) w_1 \cdot f \cdot \Phi_{\max} = 44,4 \cdot w_1 \cdot f \cdot \Phi_{\max} \quad (3)$$

Для вторичной ЭДС

$$E_2 = 44,4 \cdot w_2 \cdot f \cdot \Phi_{\max} \quad (4)$$

Коэффициент трансформации:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \quad (5)$$

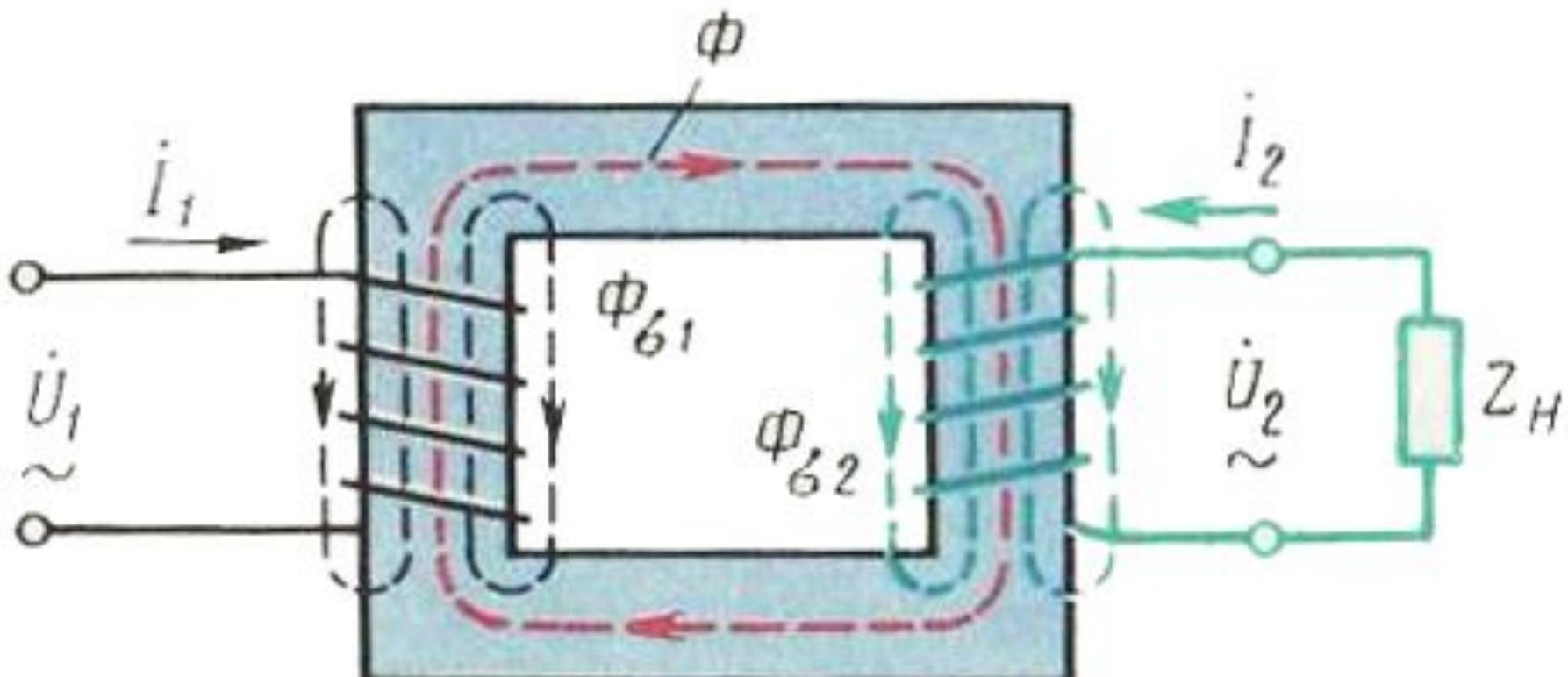


Рис. 30. - Магнитные потоки в однофазном трансформаторе

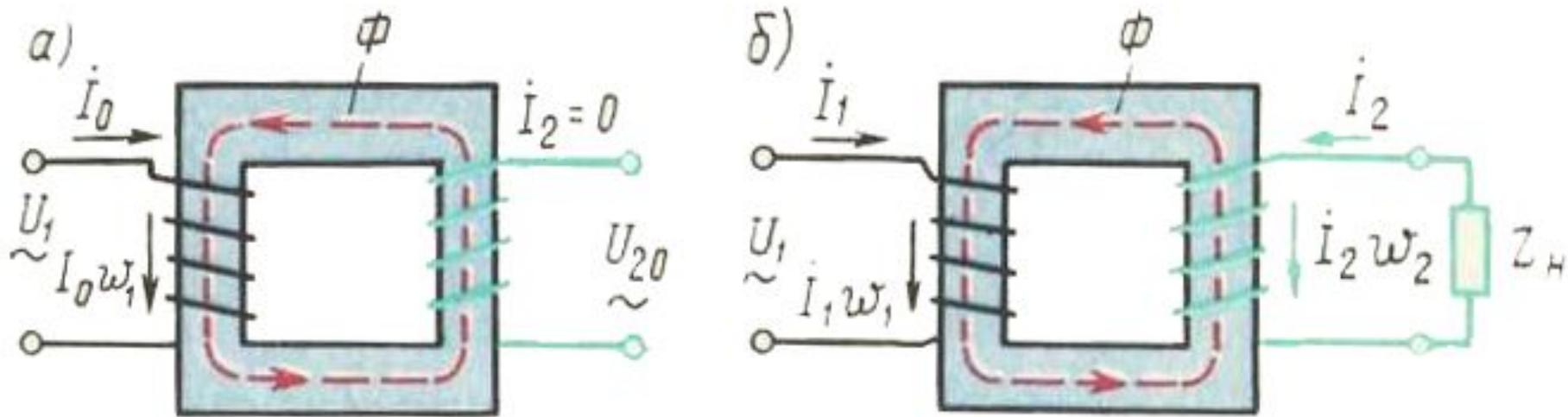


Рис. 31. – Режимы холостого хода (а) и нагрузки (б) в однофазном трансформаторе

Уравнение МДС трансформатора:

$$\dot{I}_0 \cdot w_1 = \dot{I}_1 \cdot w_1 + \dot{I}_2 \cdot w_2 \quad (6)$$

Уравнение токов трансформатора:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\dot{I}_2 \right) \quad (7)$$

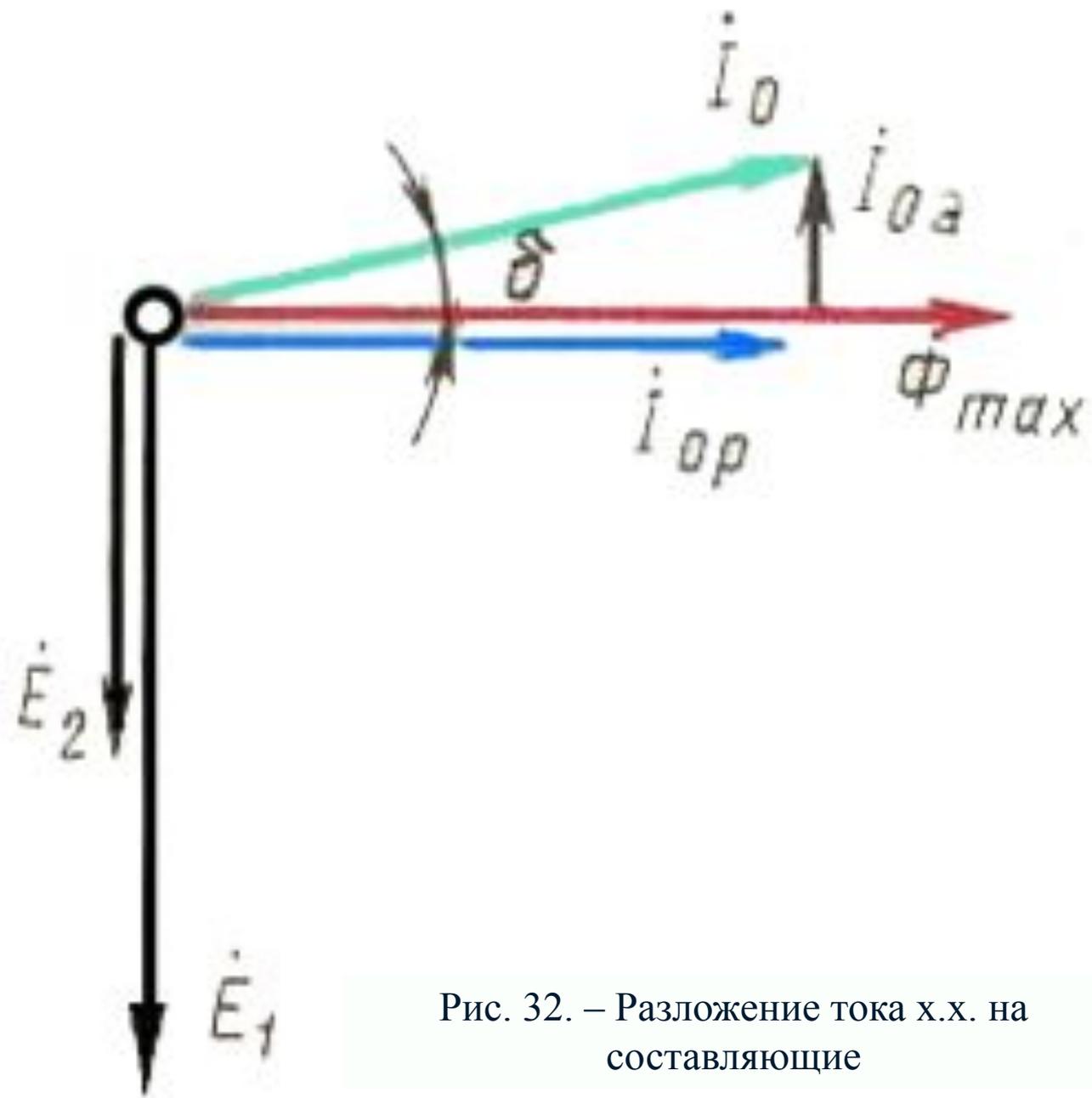


Рис. 32. – Разложение тока х.х. на составляющие

Приведение параметров вторичной обмотки и схема замещения приведенного трансформатора

Уравнения напряжений и токов для приведенного трансформатора

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \left(-\dot{E}_1 \right) + \dot{I}_1 Z_1 = \left(-\dot{E}_1 \right) + j \cdot \dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1 \\ \dot{U}'_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_1 = \dot{E}_2 - j \cdot \dot{I}_2 x'_2 - \dot{I}_2 r'_2 \\ \dot{I}_2 &= \dot{I}_0 + \left(-\dot{I}_2 \right) \end{aligned} \quad (8)$$

Эти уравнения устанавливают аналитическую связь между параметрами трансформатора во всем диапазоне нагрузок от режима х.х. до номинальной.

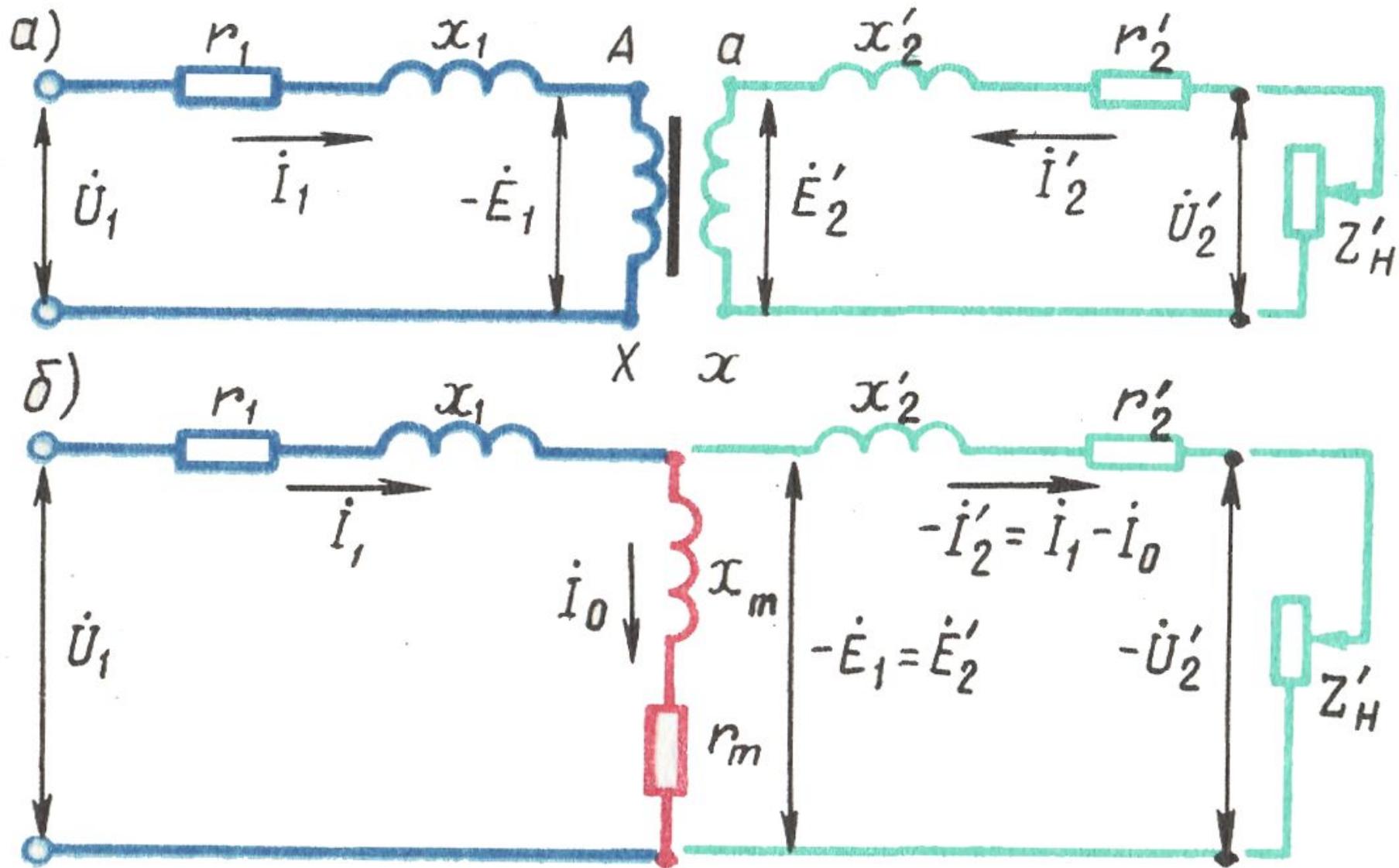


Рис. 33. – Эквивалентная схема (а) и схема замещения (б) приведённого трансформатора

Векторная диаграмма трансформатора

Построение диаграммы (рис. 34) следует начинать с вектора максимального значения основного магнитного потока

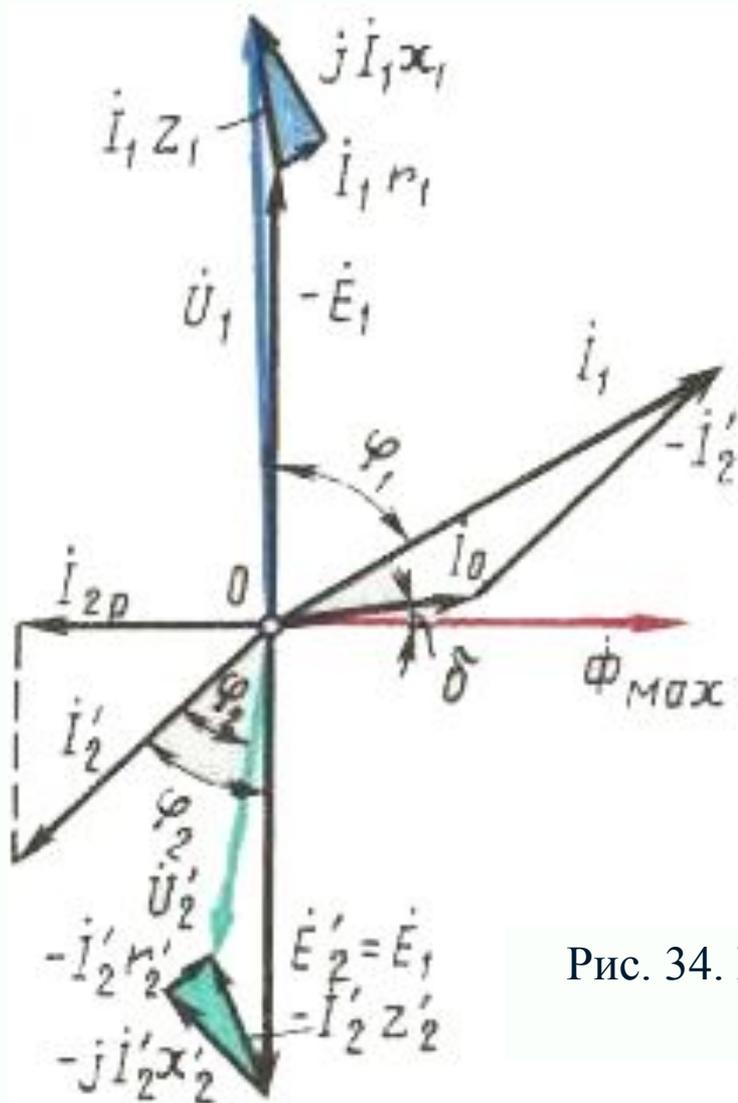


Рис. 34. Векторные диаграммы трансформатора при активно-индуктивной



**Опытное определение параметров схемы замещения
трансформаторов.
Опыты ХХ и к.з. КПД трансформатора.**

Опыт холостого хода.

В этом случае уравнения напряжений и токов

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \left(-\dot{E}_1 \right) + j \cdot \dot{I}_0 \cdot x_1 + \dot{I}_0 \cdot r_1; \\ \dot{U}_{20} &= \dot{E}_2; \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_0. \end{aligned} \right\} (9)$$

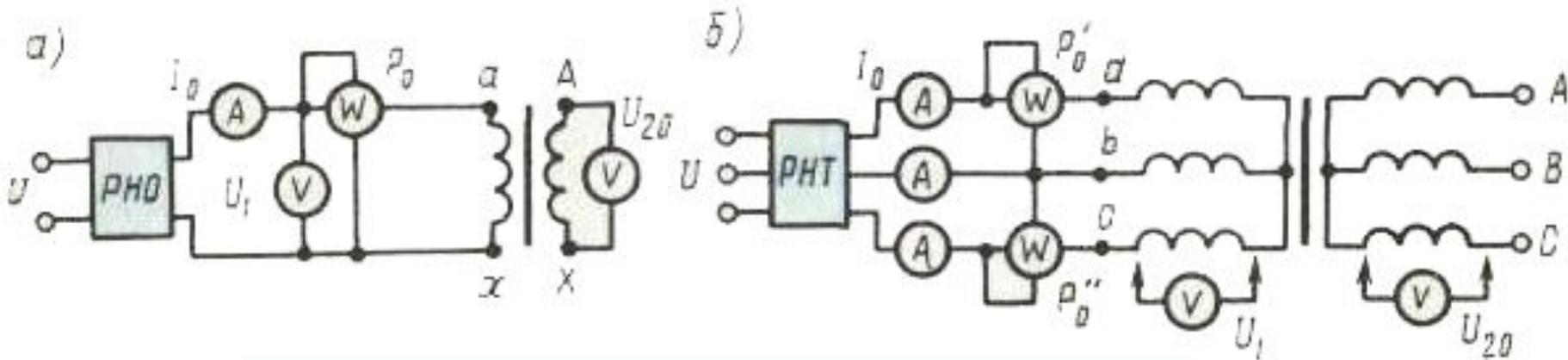


Рис. 35. Схемы опыта х.х. трансформаторов однофазного (а), трёхфазного (б)

Характеристики х.х. строят по средним фазным значениям тока и напряжения для трех фаз:

$$I_0 = \frac{I_{0a} + I_{0b} + I_{0c}}{3} \quad (10)$$

$$U_1 = \frac{U_{1a} + U_{1b} + U_{1c}}{3} \quad (11)$$

Коэффициент мощности для однофазного трансформатора

$$\cos \varphi_0 = \frac{D_0}{U_1 \cdot I_0} \quad (13)$$

для трехфазного трансформатора

$$\cos \varphi_0 = \frac{P'_0 + P''_0}{3 \cdot U_1 \cdot I_0} = \frac{P_0}{3 \cdot U_1 \cdot I_0} \quad (14)$$

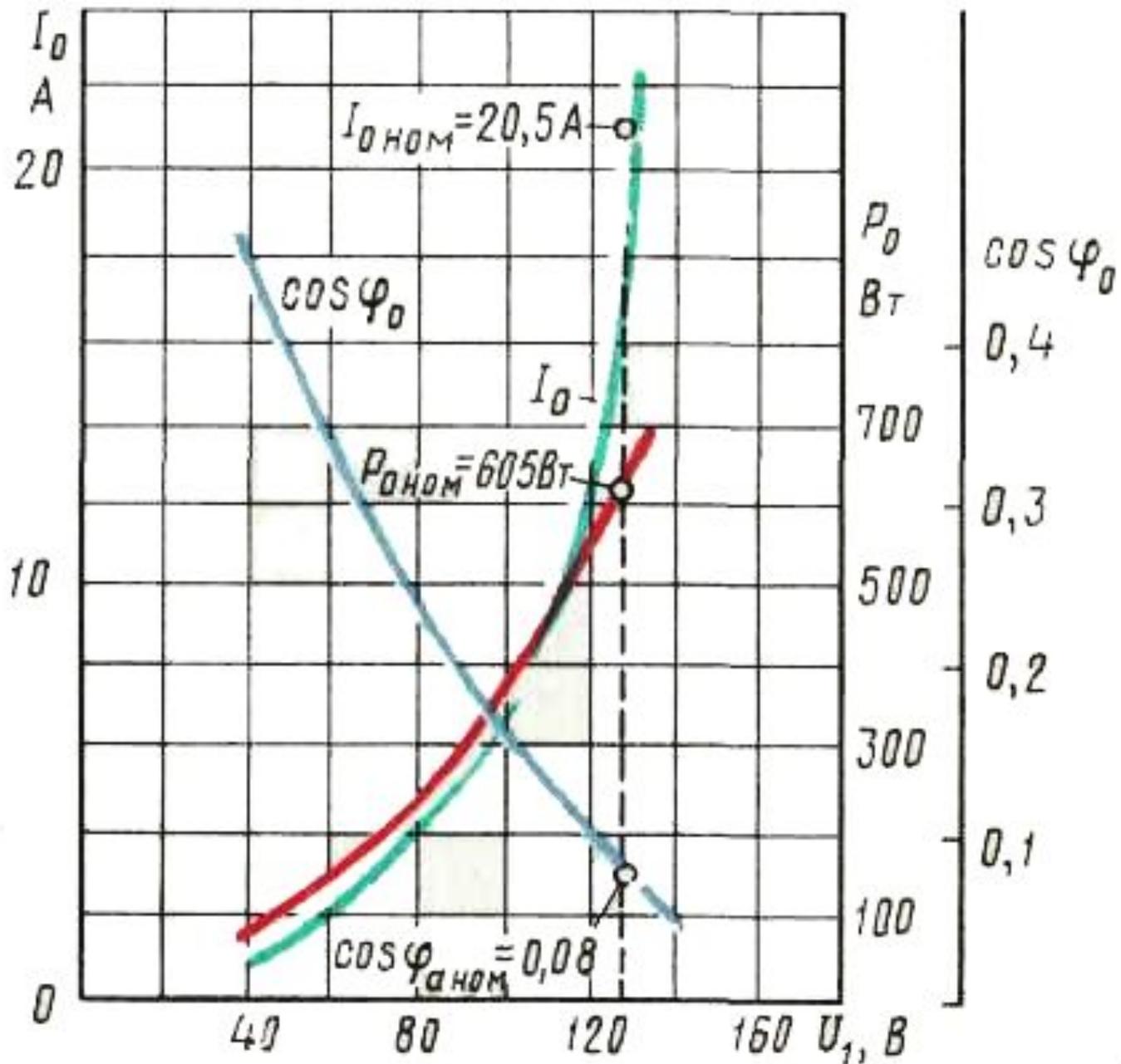


Рис. 36. Характеристики х.х. трансформатора

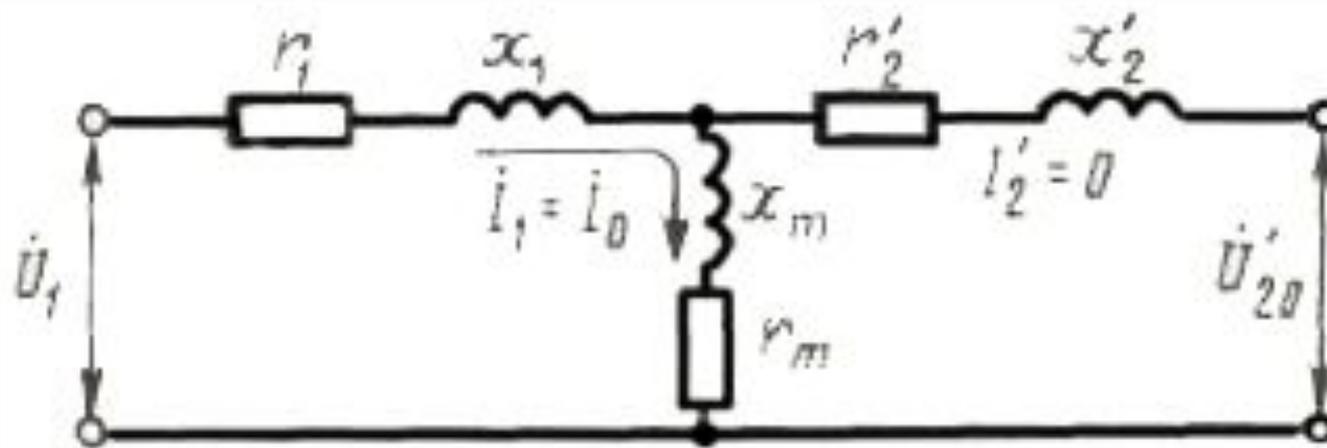


Рис. 37. Схема замещения трансформатора в режиме х.х.

Опыт короткого замыкания.

Значения напряжения к.з. и тока к.з. определяют как средние для трех фаз:

$$U_K = \frac{U_{KA} + U_{KB} + U_{KC}}{3} \quad (15)$$

$$I_{1K} = \frac{I_{KA} + I_{KB} + I_{KC}}{3} \quad (16)$$

Коэффициент мощности при опыте к.з.

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{3 \cdot U_K \cdot I_{1K}} \quad (17)$$

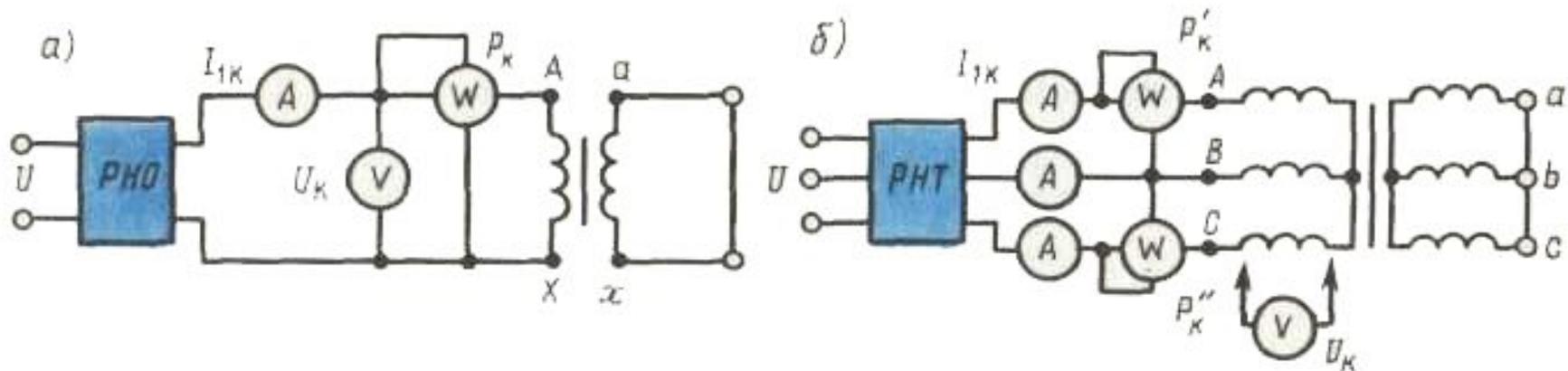


Рис. 38. Схемы опыта к.з. трансформаторов однофазного (а), трехфазного (б)

Мощность к.з.

$$P_K = P'_K + P''_K \quad (18)$$

Номинальное напряжение к.з.

$$u_K = \frac{U_K}{U_{1НОМ}} \cdot 100 \quad (19)$$

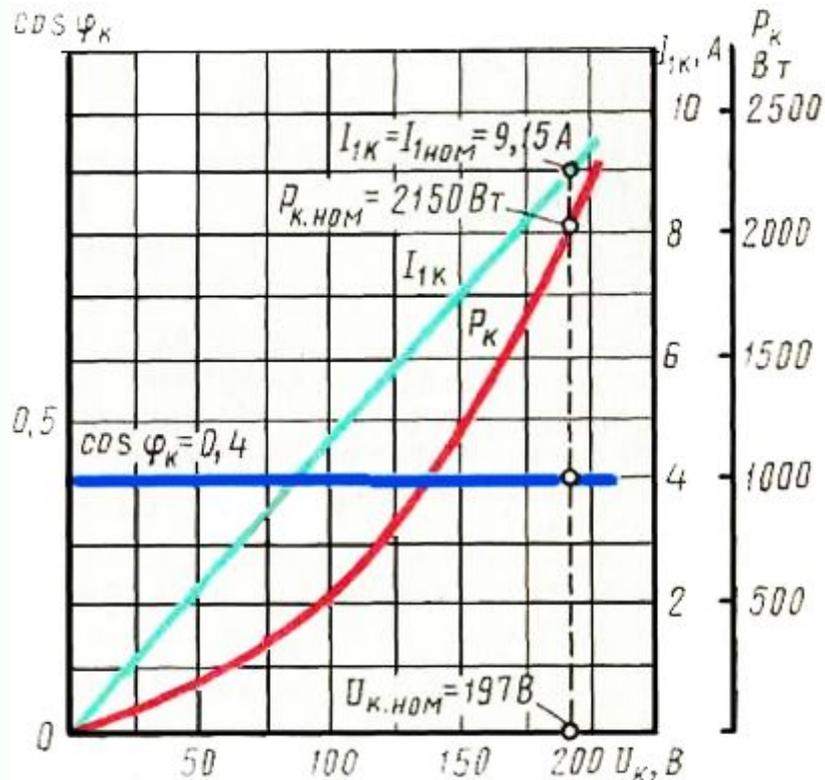
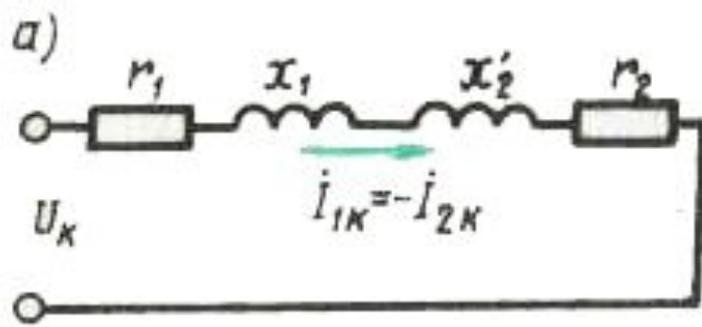


Рис. 39. Характеристики к.з. трансформатора



Мощность к.з.

$$P_K = I_{1K}^2 \cdot r_1 + I_{1K}^2 \cdot r'_K = I_{1K}^2 \cdot r_K \quad (20)$$

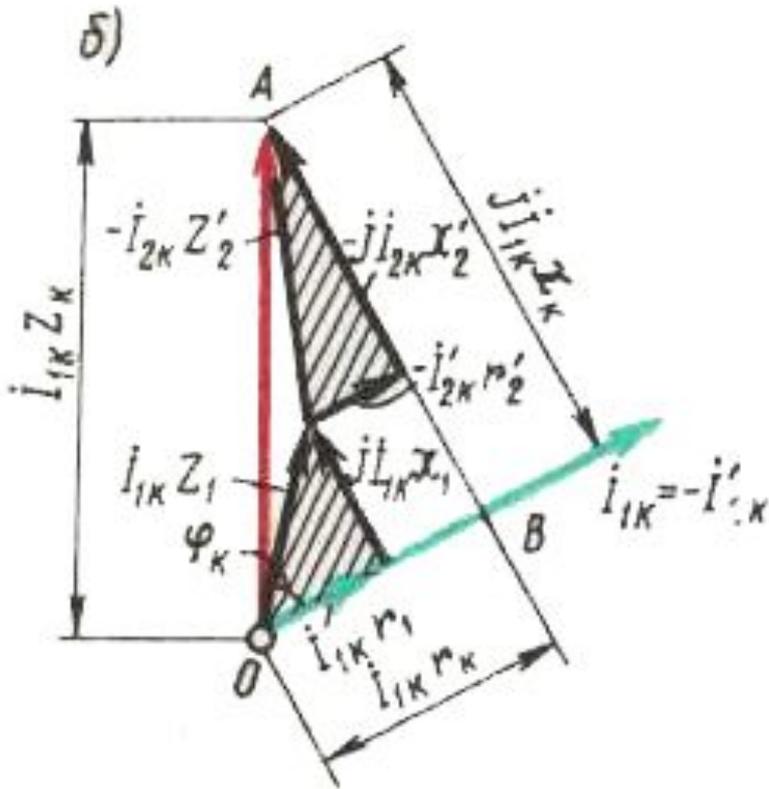
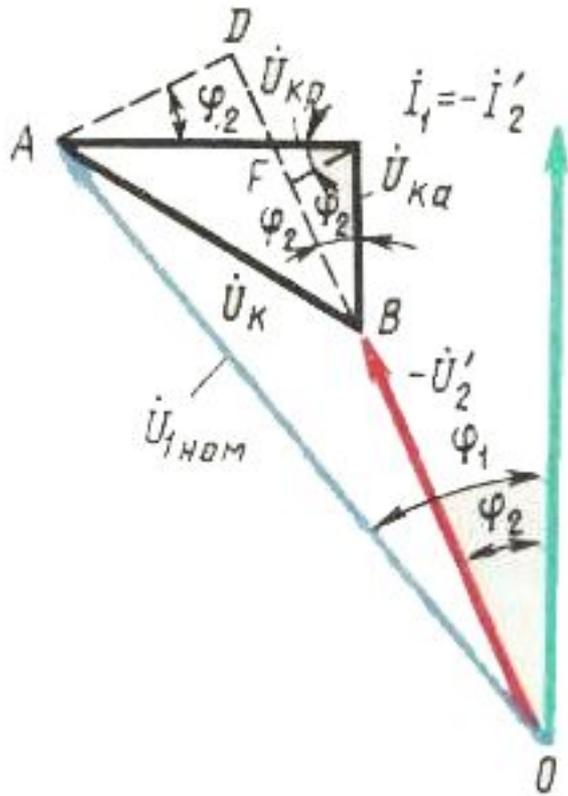


Рис. 40. Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) трансформатора в режиме к.з.

Внешняя характеристика трансформатора



Изменение вторичного напряжения трансформатора при увеличении нагрузки от х.х. до номинальной является важнейшей характеристикой трансформатора и определяется выражением

$$\Delta U_{\text{НОМ}} = \frac{U_{1\text{НОМ}} - U'_2}{U_{1\text{НОМ}}} \cdot 100 \quad (21)$$

Рис. 41. К выводу формулы

$$\Delta U_{\text{НОМ}}$$

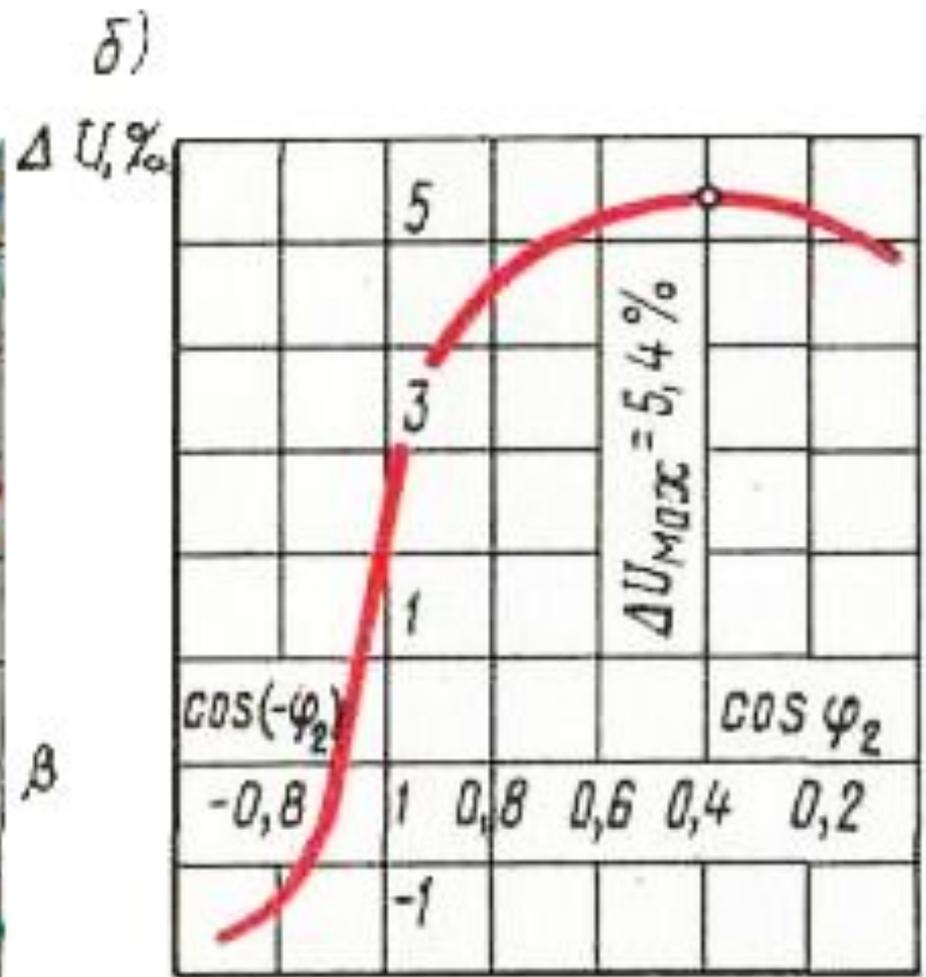
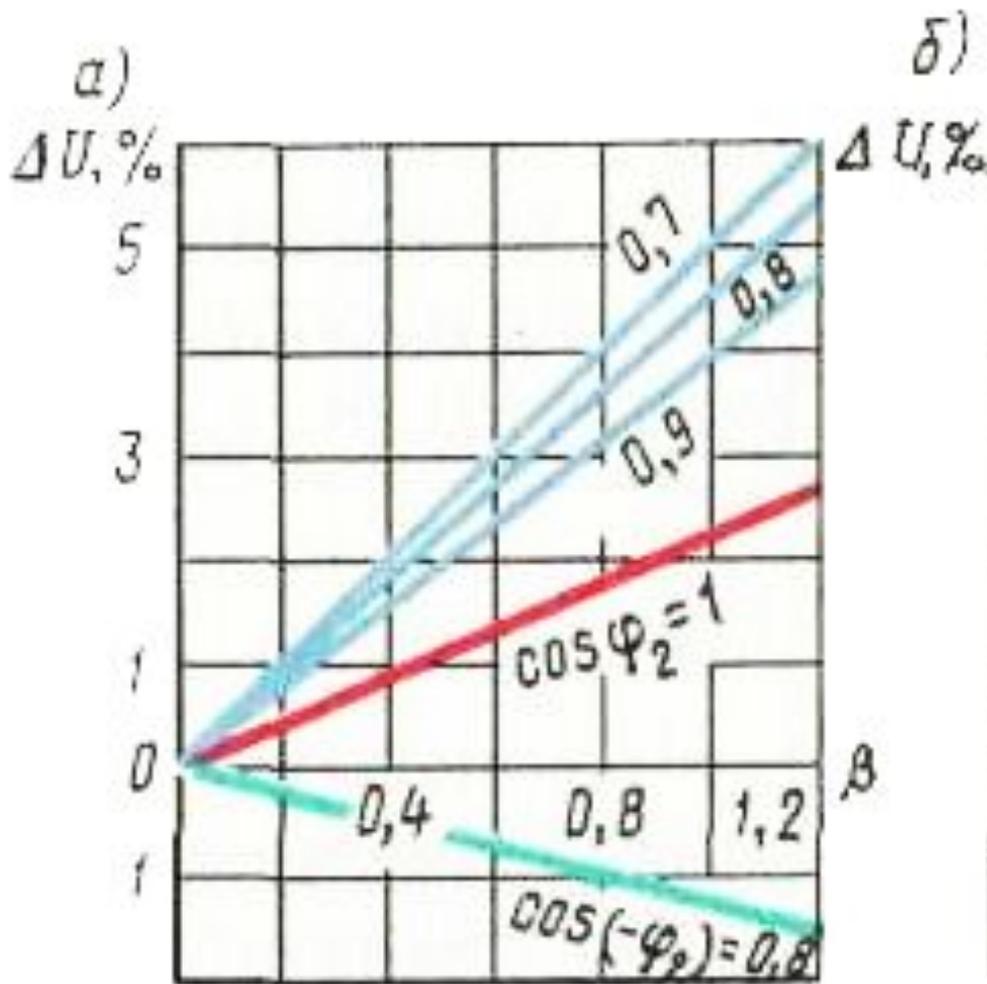


Рис. 42. Зависимость ΔU величины нагрузки (а) и коэффициента мощности нагрузки (б) трехфазного трансформатора (100 кВ·А, 6,3/0,22 кВ, $u_k = 5,4\%$, $\cos \varphi_k = 0,4$)

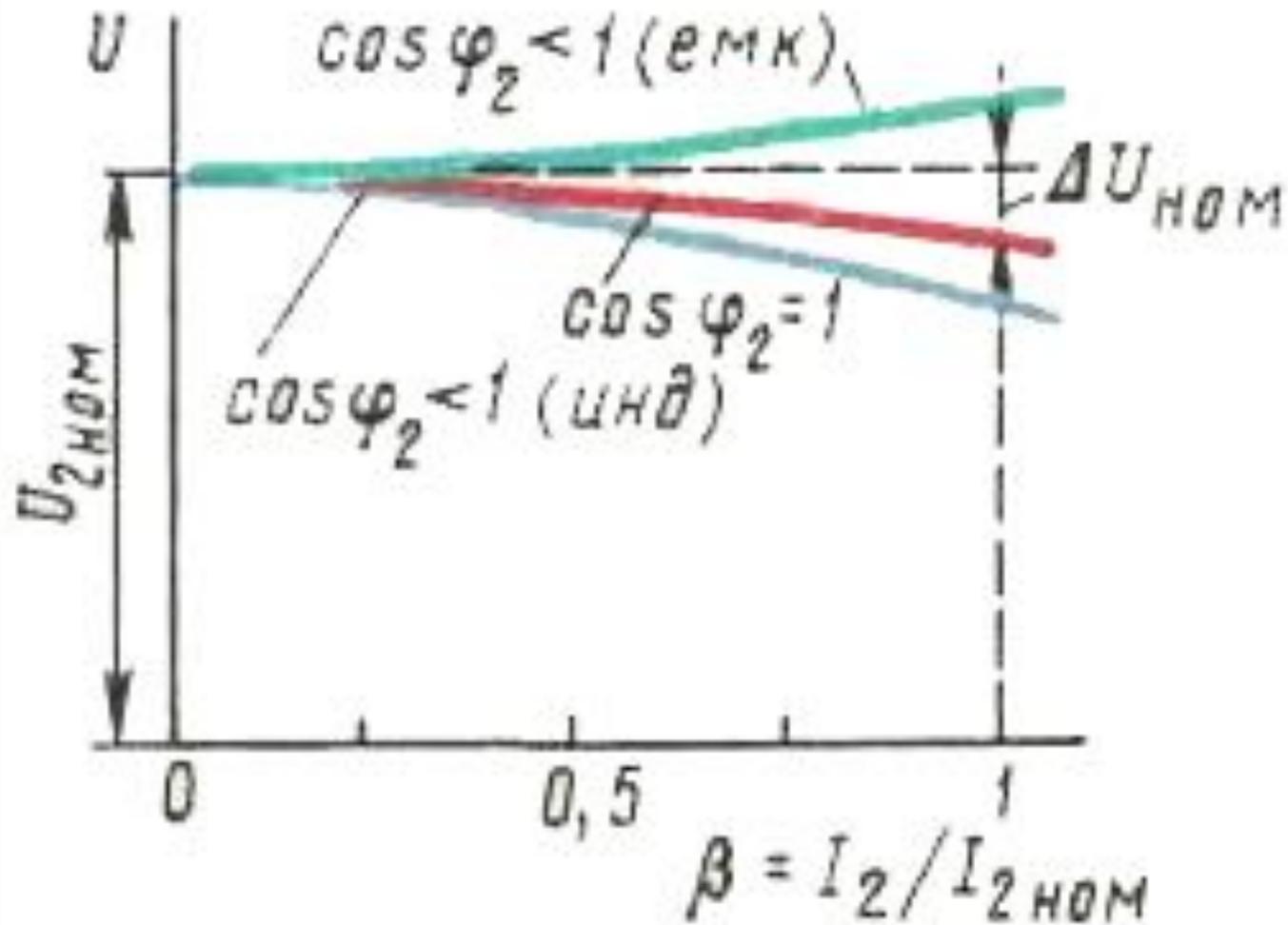


Рис. 43. Внешние характеристики трансформатора

Потери и КПД трансформатора

Электрические потери.

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} = m \cdot I_1^2 \cdot r_1 + m \cdot I_2'^2 \cdot r_2' \quad (22)$$

Магнитные потери.

$$P_M = P_{\Gamma} + P_{B.T} \quad (23)$$

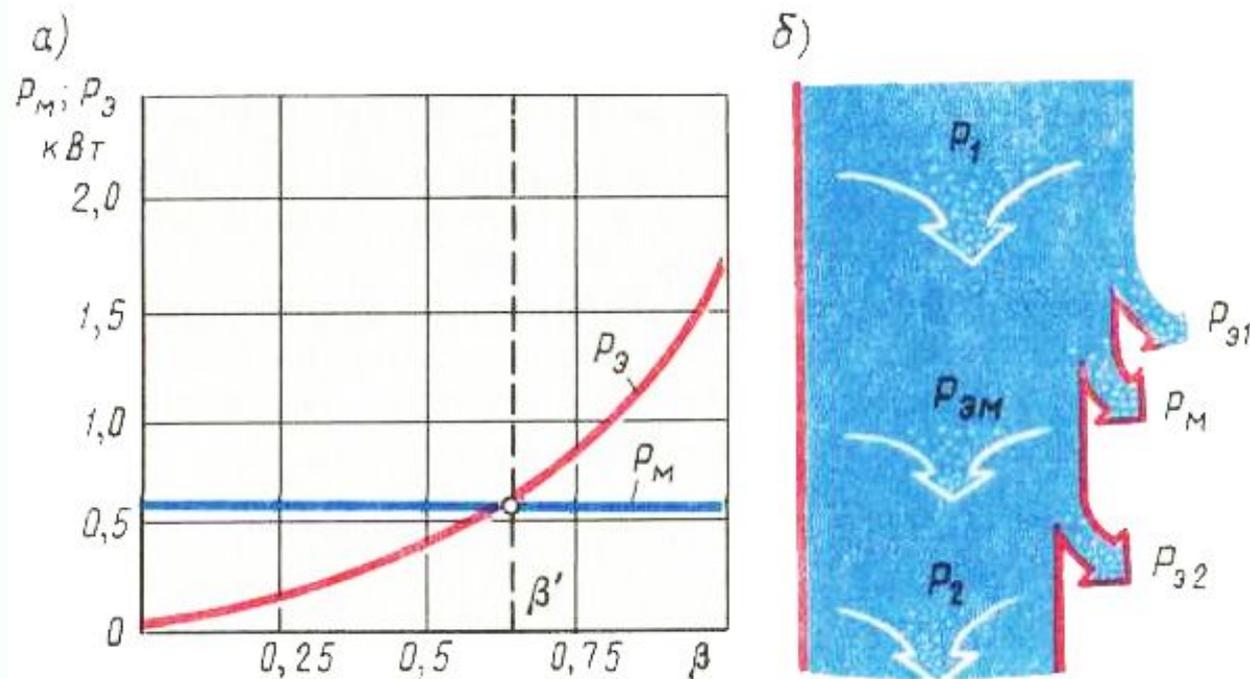


Рис. 44. Зависимость потерь трансформатора от его нагрузки (а) и энергетическая диаграмма (б) трансформатора

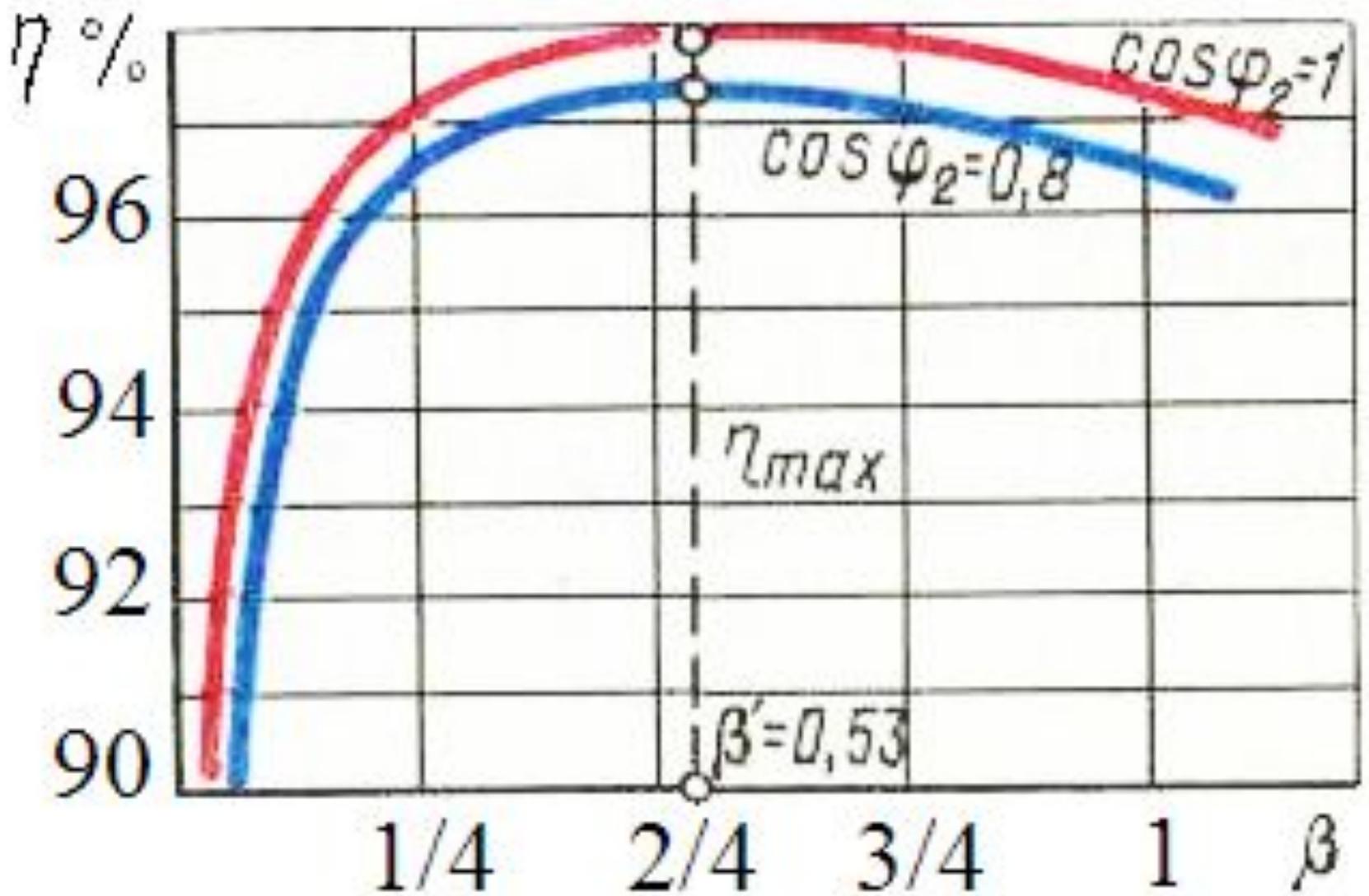


Рис. 45. График зависимости КПД трансформатора от нагрузки



Группы соединения обмоток и параллельная работа трансформаторов
Группы соединения обмоток

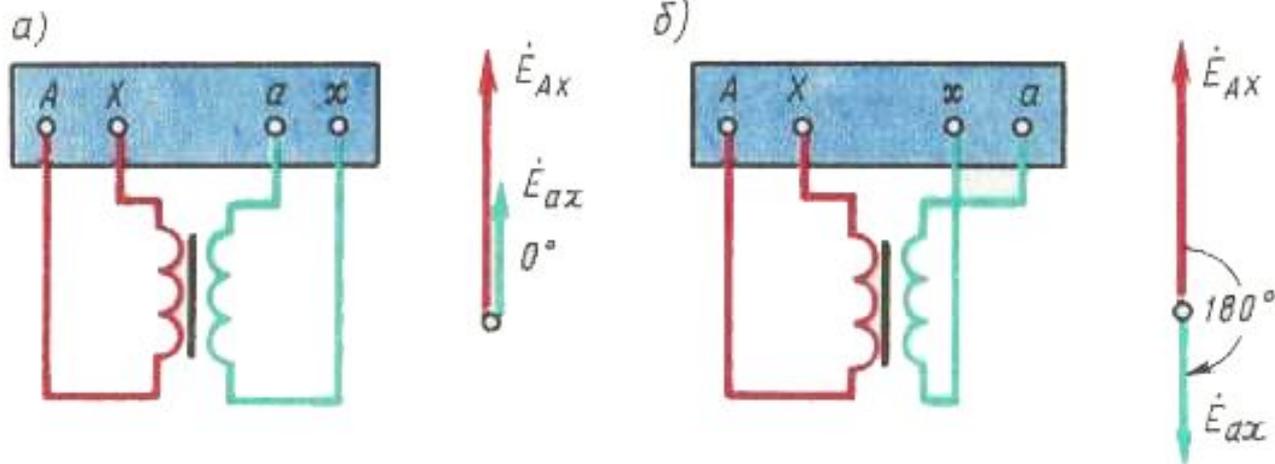


Рис. 46. Группы соединения обмоток однофазных трансформаторов:
a – группа I/I – 0; *б* – группа I/I – 6

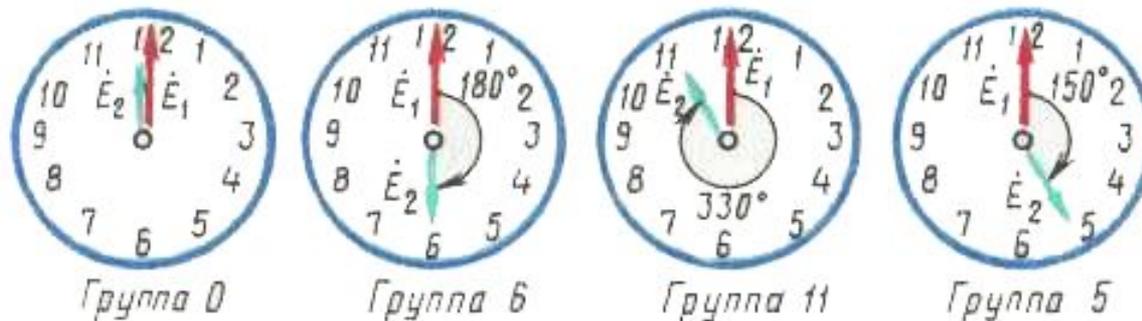


Рис. 47. Сравнение положения стрелок часов с обозначением групп соединения

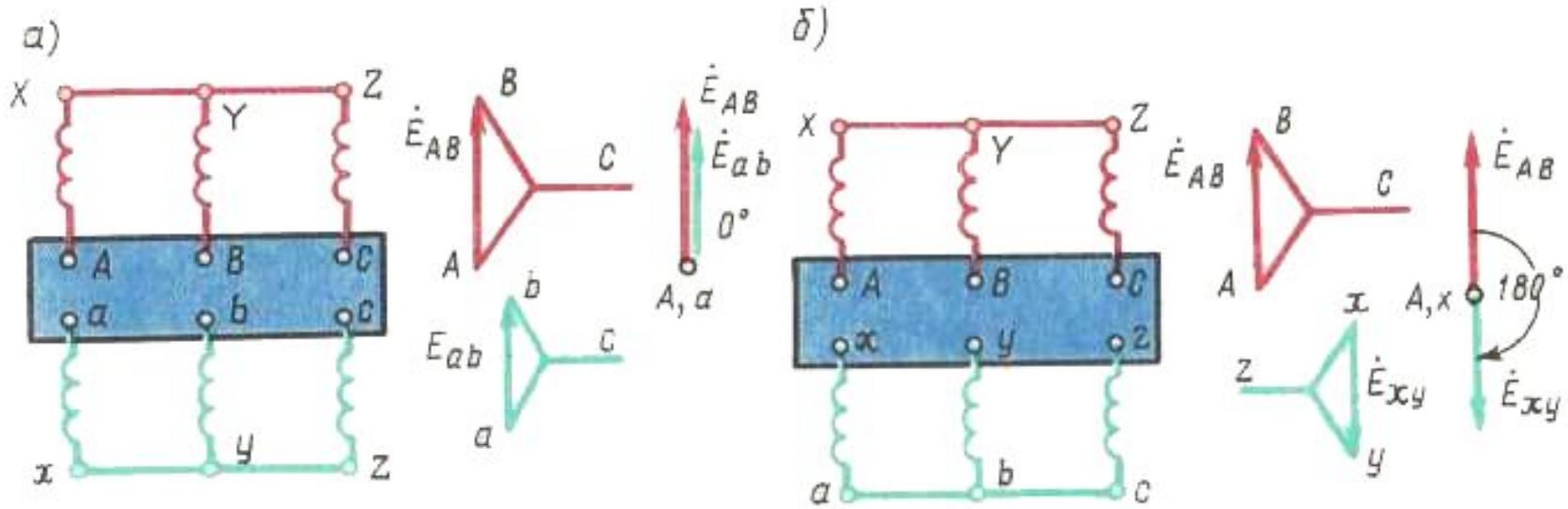


Рис. 48. Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы:
 а – для группы Y/Y – 0; б – для группы Y/Y – 6

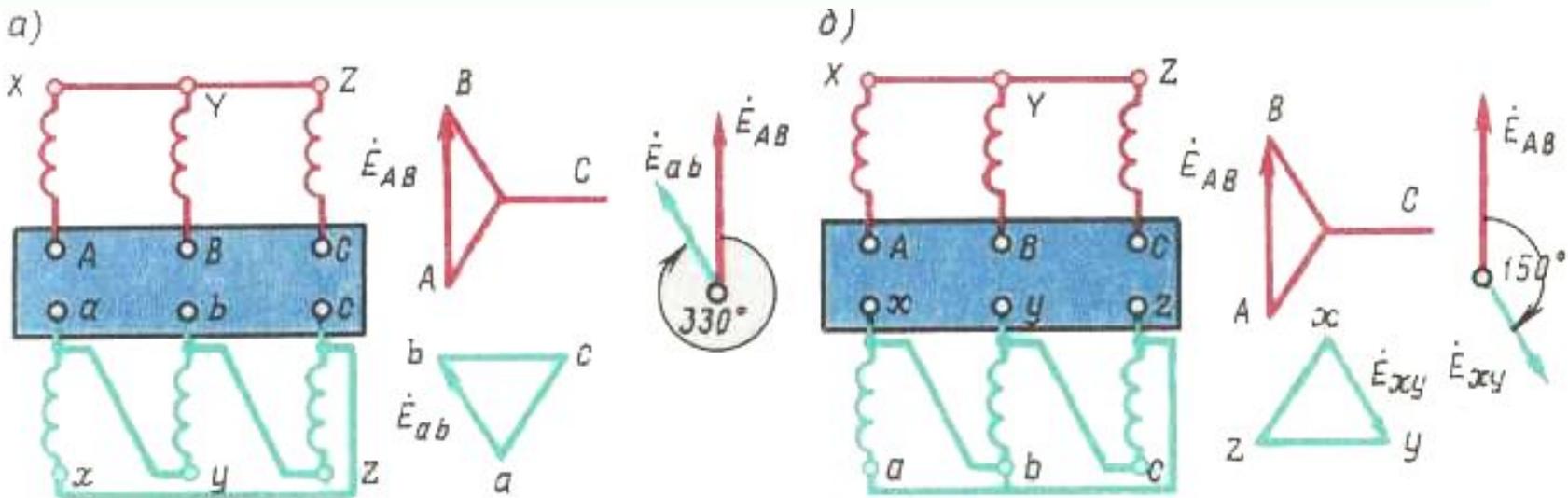


Рис. 49. Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы:
 а – для группы Y/ Δ – 11; б – для группы Y/ Δ – 5

Схемы соединения обмоток		Диаграммы векторов ЭДС		Условные обозначения
ВН	НН	ВН	НН	

Рис. 50. Схемы и группы соединения обмоток трехфазных двухобмоточных трансформаторов

Параллельная работа трансформаторов

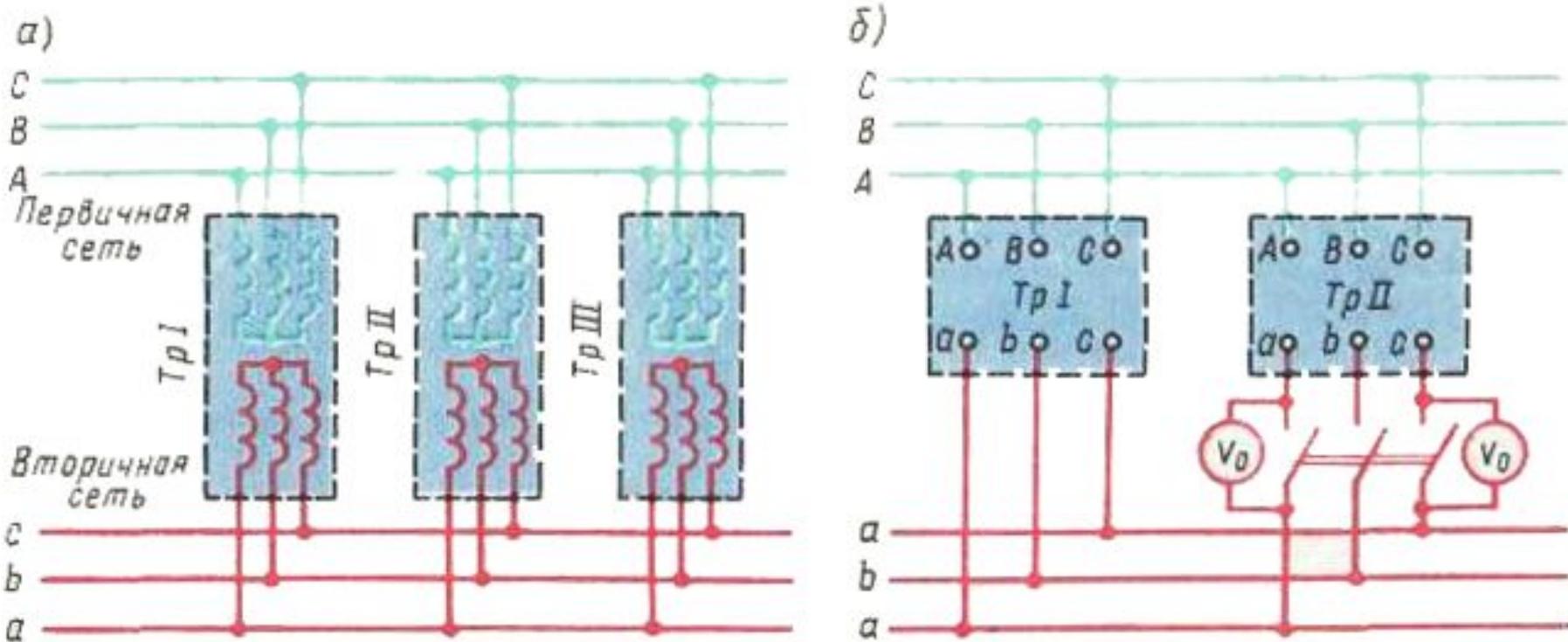
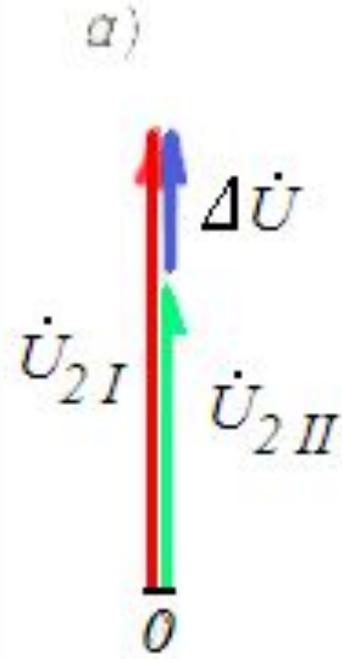


Рис. 51. Включение трансформаторов на параллельную работу

1. При одинаковом первичном напряжении вторичные напряжения должны быть равны.



$$\dot{I}_{ур} = \Delta \dot{U} / (Z_{кII} + Z_{кII}), \quad (24)$$

2. Трансформаторы должны принадлежать к одной группе соединения.

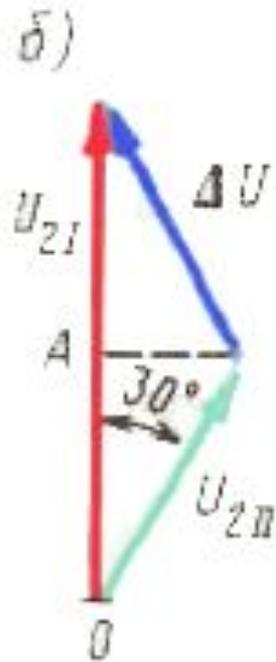


Рис. 52. Появление напряжения ΔU при несоблюдении условий включения трансформаторов на параллельную работу

3. Трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения к. з.:

$$u_{kI} = u_{kII} = u_{kIII} \dots$$

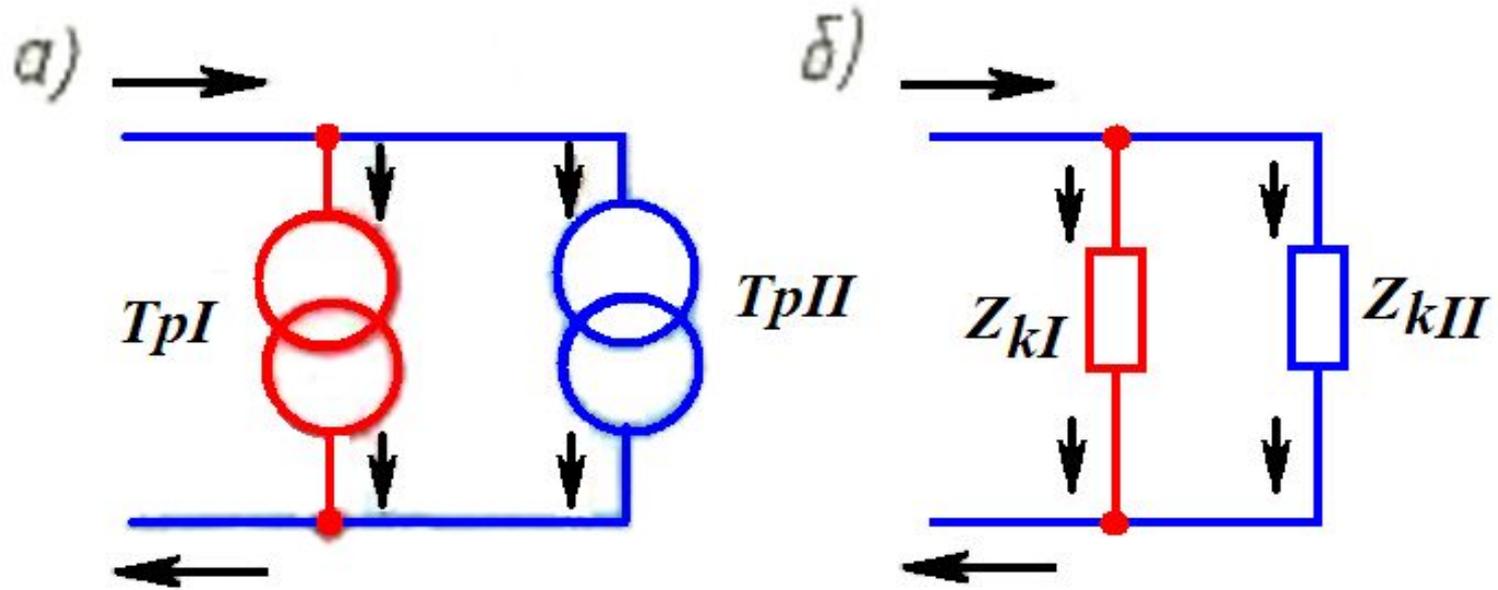


Рис. 53. К понятию о распределении нагрузки при параллельной работе трансформаторов