

Трансформаторы



Содержание

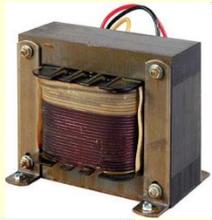
- **1. Назначение трансформаторов**
- **2. Трансформаторы: стержневой и броневой**
- **3. Устройство трансформатора**
- **4. Условно- логическая схема работы трансформатора**
- **5. Принцип действия трансформатора**
- **6. Опыт холостого хода трансформатора**
- **7. Нагрузочный режим трансформатора**
- **8. Параметры приведенной вторичной обмотки. Схема замещения трансформатора**
- **9. Уравнения МДС, токов и ЭДС обмоток трансформатора. Векторная диаграмма**
- **10. Потери напряжения, внешняя характеристика потери мощности и КПД трансформатора**
- **11 Опыт лабораторного короткого замыкания трансформатора**
- **12. Трехфазный трансформатор**
- **13. Параллельная работа трансформаторов**
- **14. Сварочный трансформатор. Автотрансформатор**
- **15. Измерительные трансформаторы**



Трансформаторы служат для преобразования переменного напряжения (тока) одной величины в напряжение (ток) другой величины той же частоты.

Трансформаторы

Силовые – для питания потребителей или передачи электроэнергии на большие расстояния



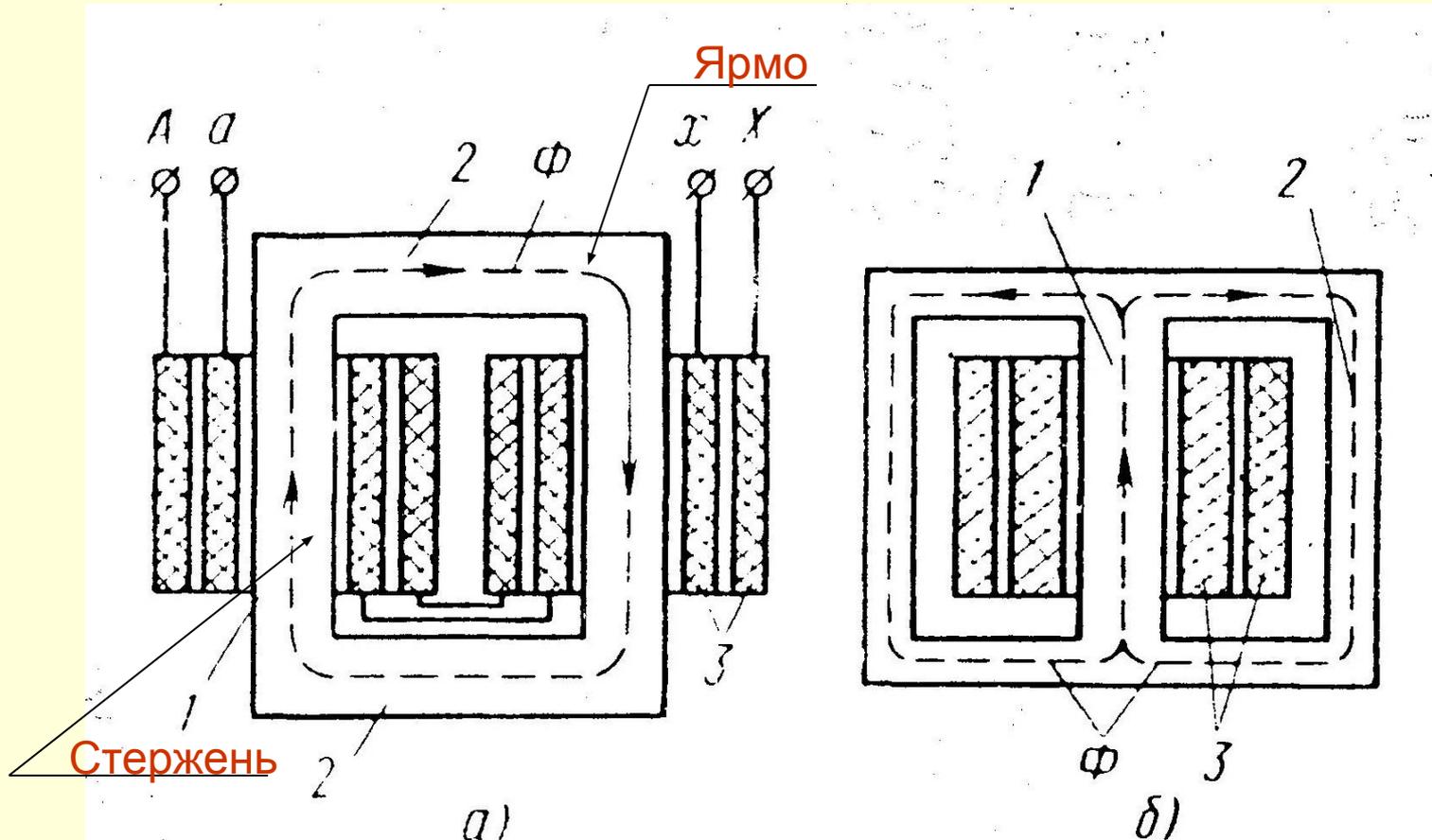
Специализированные (измерительные, сварочные, согласующие, импульсные)



Однофазный трансформатор

Трансформаторы: а – стержневой; б – броневой

1 – магнитопровод; 2 – магнитный поток Φ ; 3 – обмотки

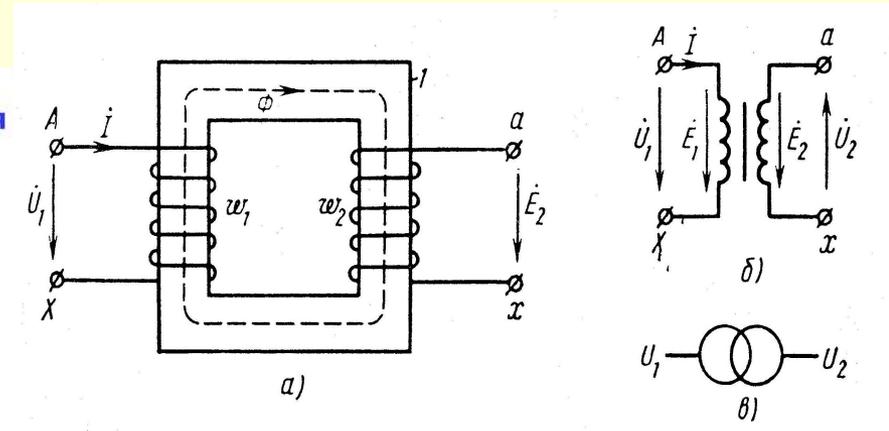
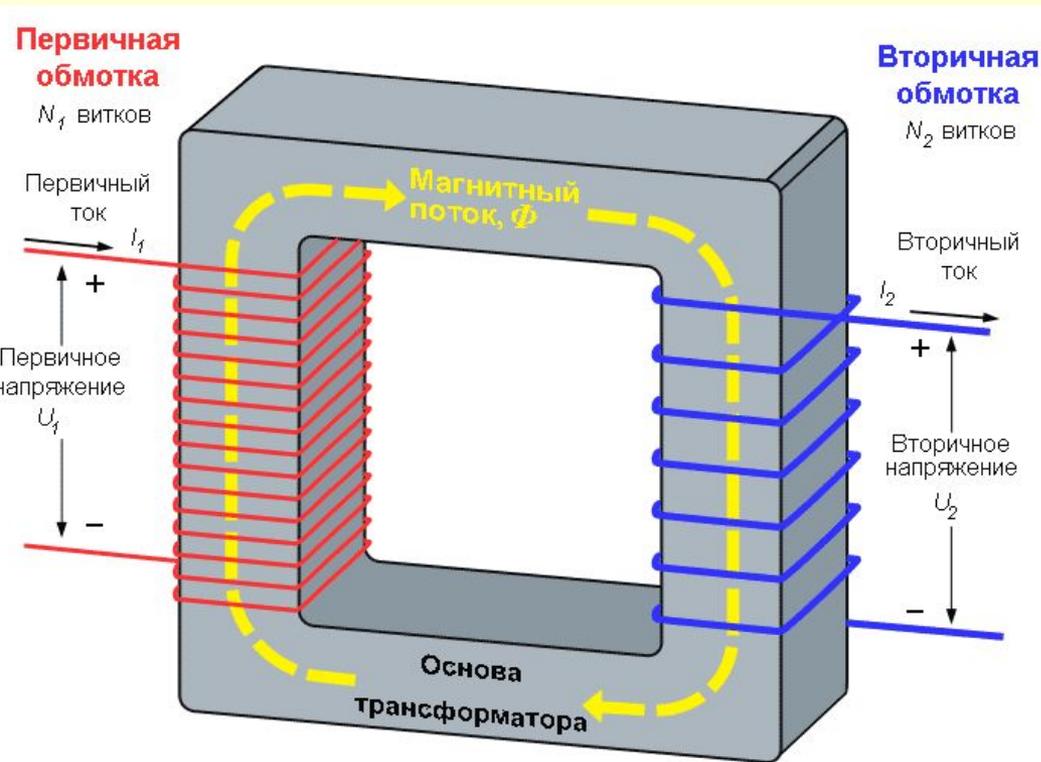


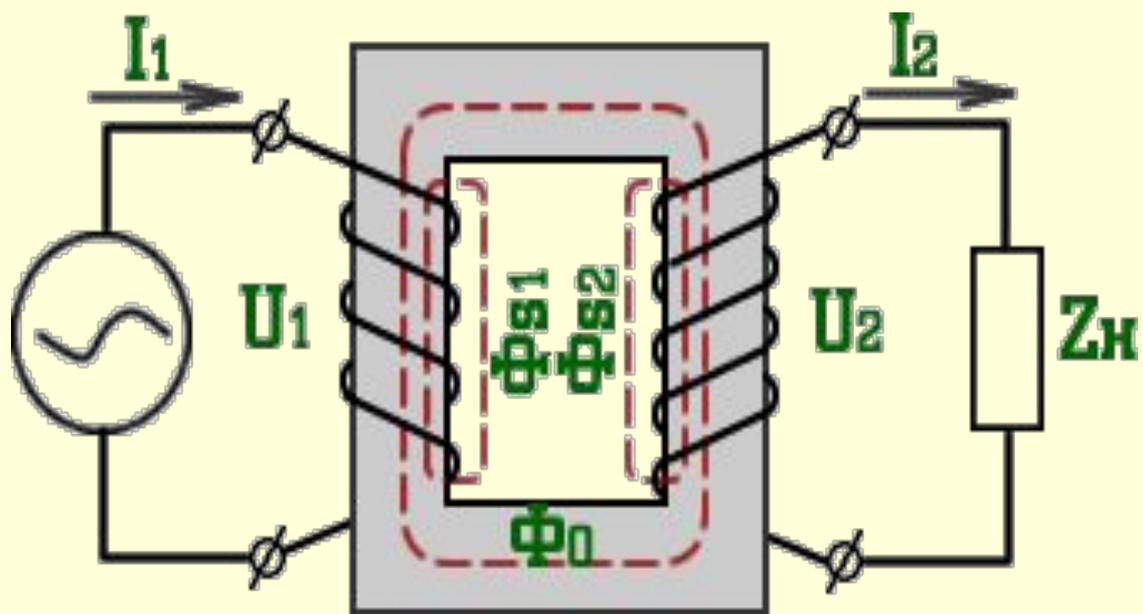
Трансформатор состоит из магнитопровода, набранного из листов электротехнической толщиной 0,35...0,5 мм, и обмотки, выполненной из медного или алюминиевого провода. Различают **первичную обмотку** (подключается к источнику питания) и **вторичную** (подключается к нагрузке).

Устройство однофазного трансформатора

Однофазный трансформатор состоит из магнитопровода из ферромагнитного материала, на котором размещены две обмотки (катушки) (а).

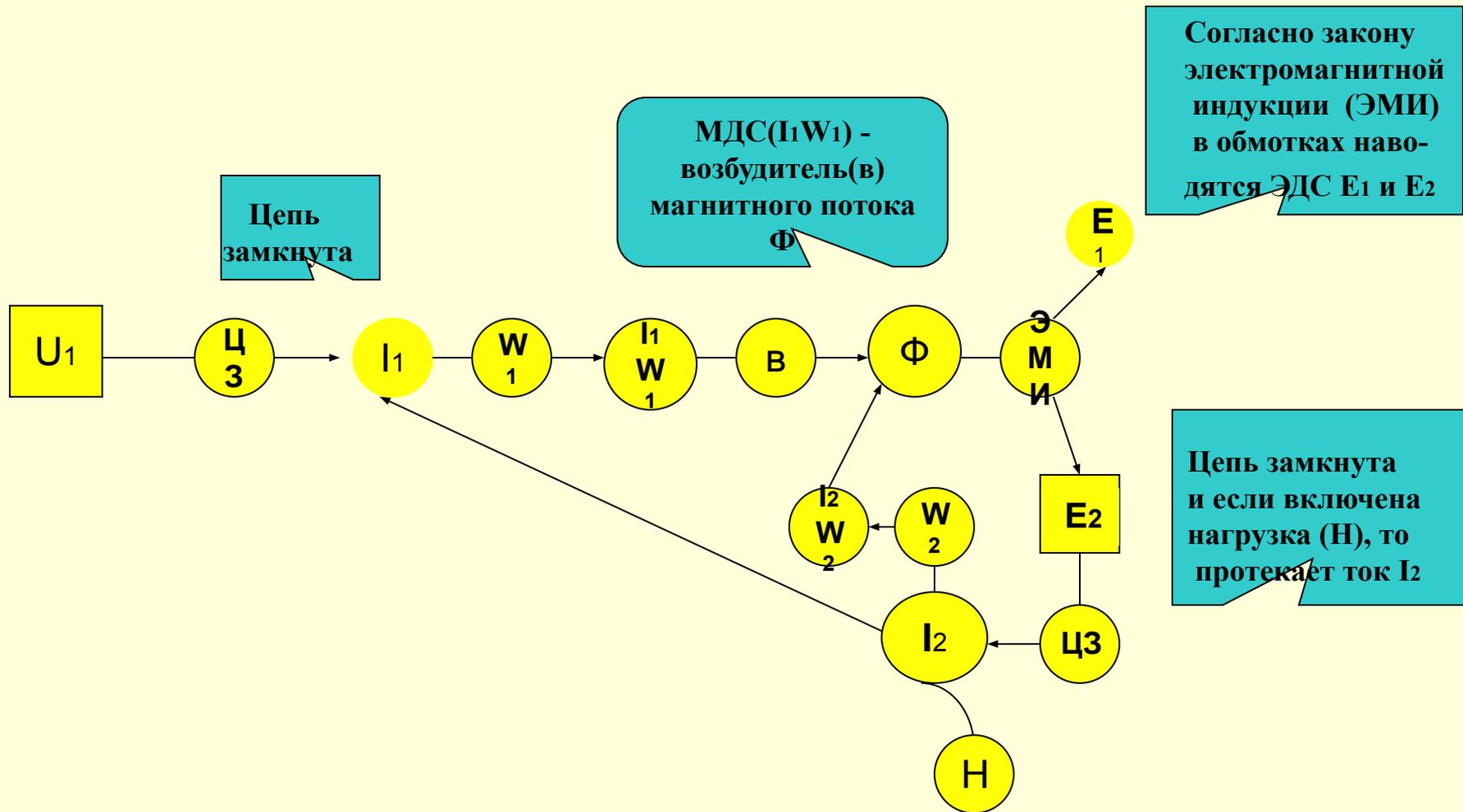
б) – обозначение трансформатора на электрических схемах; в) - обозначение на схемах электроснабжения





a)

Условно-логическая схема работы трансформатора



При синусоидальном первичном напряжении магнитный поток тоже будет синусоидальным $\Phi = \Phi_{\max} \sin \omega t$.

Магнитный поток Φ по закону электромагнитной индукции наводит в первичной обмотке ЭДС самоиндукции e_1 и во вторичной обмотке ЭДС взаимной индукции e_2 :

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Мгновенные значения e_1 и e_2 :

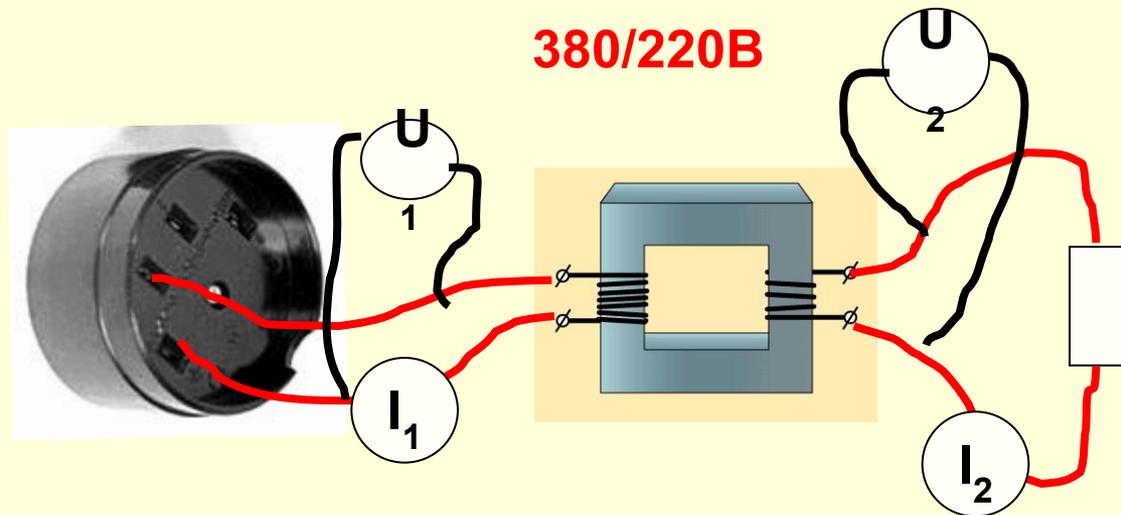
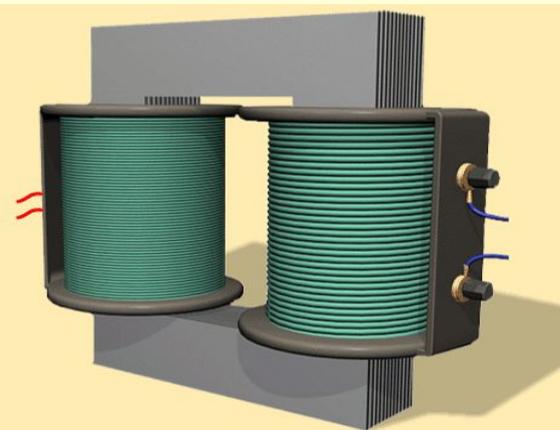
$$e_1 = -w_1 d\Phi/dt = -\omega w_1 \Phi_{\max} \cos \omega t = E_{1\max} \sin(\omega t - \pi/2)$$

$$e_2 = -w_2 d\Phi/dt = -\omega w_2 \Phi_{\max} \cos \omega t = E_{2\max} \sin(\omega t - \pi/2)$$

Действующие значения ЭДС первичной и вторичной обмоток:

$$E_1 = \frac{E_{1\max}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega w_1 \Phi_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_1 \Phi_{\max} = 4,44 f w_1 \Phi_{\max}$$

$$E_2 = \frac{E_{2\max}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega w_2 \Phi_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_2 \Phi_{\max} = 4,44 f w_2 \Phi_{\max}$$



Если напряжение $U_2 < U_1$ ($w_1 > w_2$), то трансформатор называется **понижающим**. В противном случае трансформатор называется **повышающим** ($k < 1$). В соответствии с этим различают обмотку высшего **ВН** и обмотку низшего **НН** напряжения.

Коэффициент трансформации

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2}$$

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2$$

Если, напряжение вторичной обмотки трансформатора меньше первичной в 2 раза, то ток вторичной обмотки будет больше тока первичной обмотки в 2 раза.

Параметры приведенной вторичной обмотки трансформатора

Неравенство витков первичной и вторичной обмоток, магнитная связь между обмотками усложняют расчет электрических цепей, элементами которых является трансформатор.

Для его упрощения составляют эквивалентную электрическую схему, в которой магнитная связь заменяется гальванической. Получил распространение способ приведения параметров вторичной обмотки трансформатора к первичной.

При приведении необходимо выполнить условие, чтобы энергетические параметры (мощность, потеря мощности) соответствующей обмотки не изменялись.

Основные соотношения:

Число витков первичной и вторичной обмоток в приведенном трансформаторе равны:

$$w'_2 = w_1.$$

ЭДС обмоток после приведения становятся одинаковыми

$$e_1 = e'_2 \quad \underline{E}_1 = \underline{E}'_2 = n\underline{E}_2$$

Из равенства полных мощностей приведенной и реальной обмоток

$$E'_2 I'_2 = E_2 I_2 \quad I'_2 = E_2 I_2 / E'_2 = I_2 / n$$

Приведенные сопротивления вторичной обмотки трансформатора определяются из равенства потерь активной мощности и реактивной:

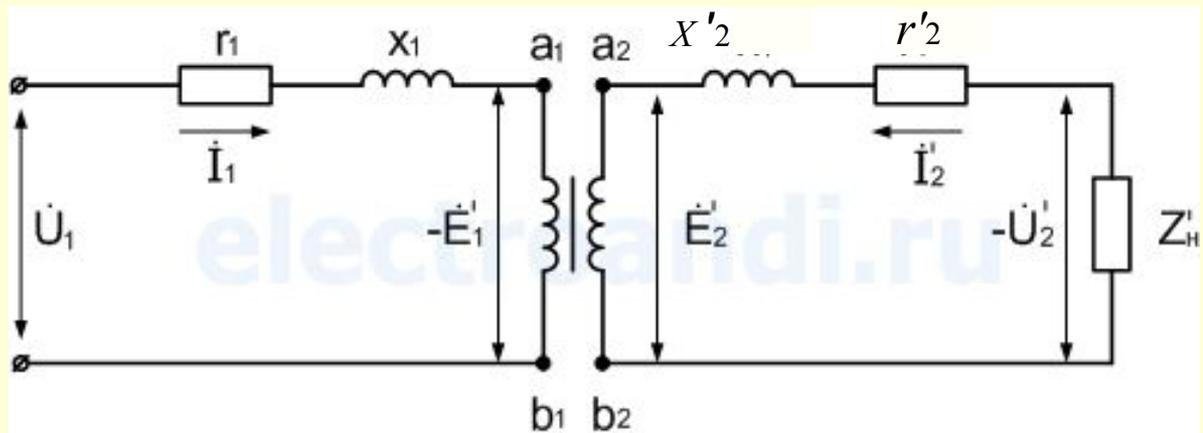
$$I'^2_2 R'_2 = I^2_2 R_2 \text{ откуда } R'_2 = (I_2 / I'_2)^2 R_2$$

$$R'_2 = n^2 R_2$$

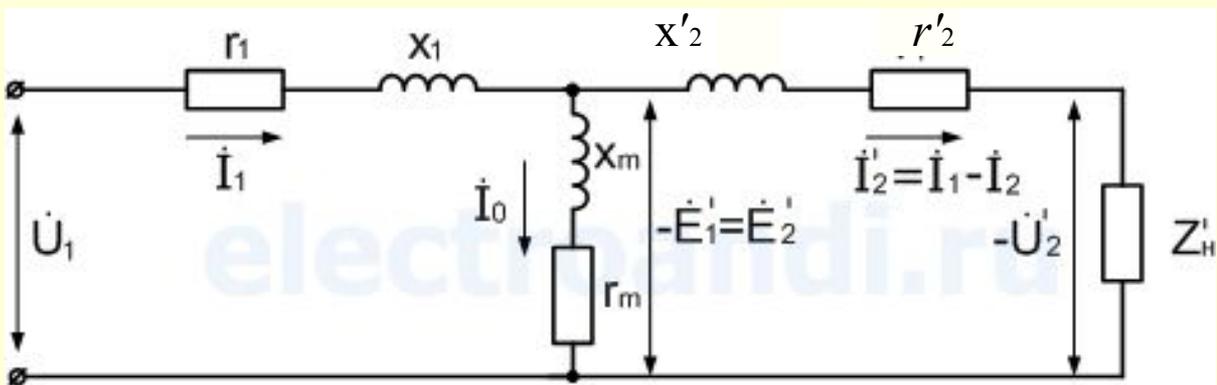
Аналогичны соотношения для индуктивного и полного сопротивлений:

$$X'_2 = n^2 X_2 = n^2 \omega L_{2s} \quad \underline{Z}'_H = n^2 \underline{Z}_H$$

Схема замещения однофазного трансформатора



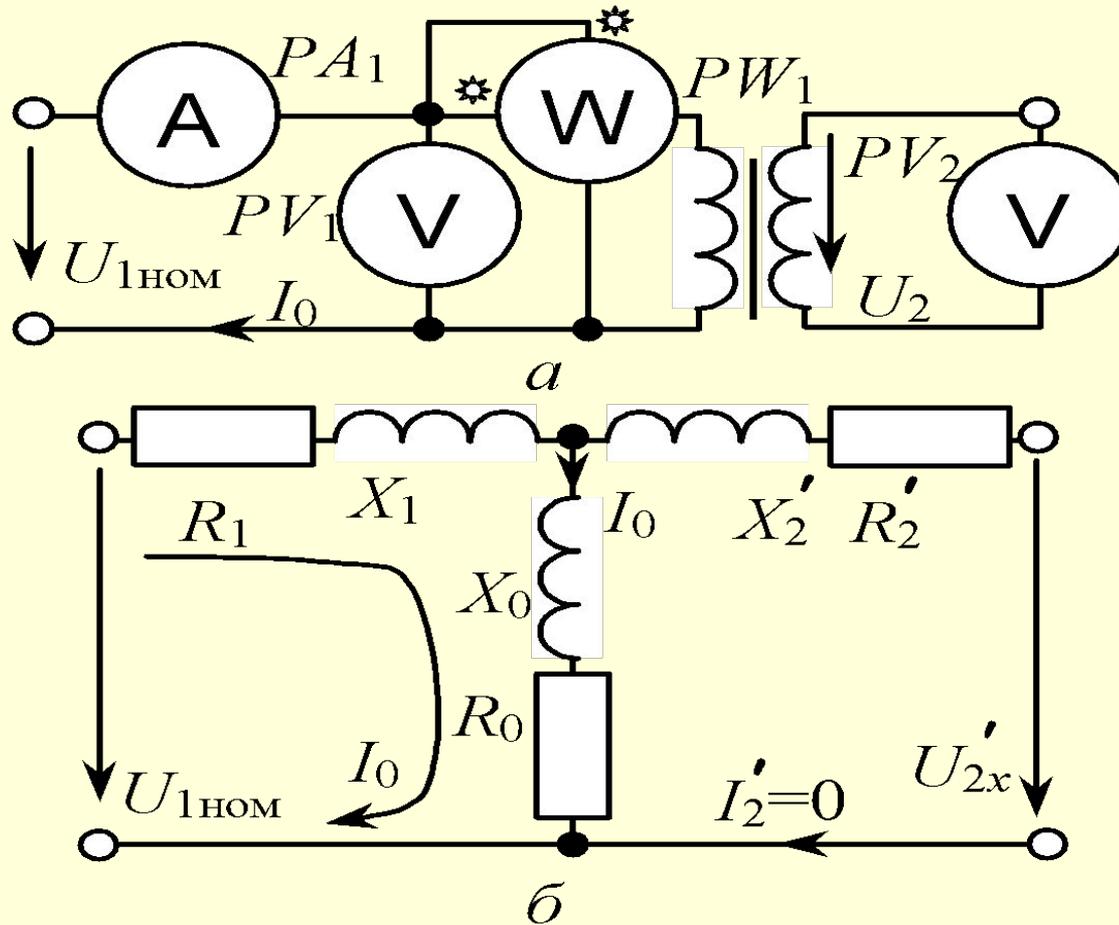
Эквивалентная схема замещения



T-образная схема замещения

Опыт холостого хода трансформатора

В опыте х.х. $U_{10} = U_{1\text{ном}}$; $I_{20} = 0$



В опыте х.х. $U_{10} = U_{1ном}; I_{20} = 0$

- Из опыта х .х. определяют:
- n – коэффициент трансформации
- $n = U_{1ном}/U_{20}$; т.к. $E_1 \sim U_{1ном}; E_2 = U_{2хх}$.
- P_0 – потери в стали;
- I_0 – ток х.х. ($I_0 = 3...5\%)I_{1ном}$)
- Z_0, R_0, X_0 – параметры цепи намагничивания схемы замещения

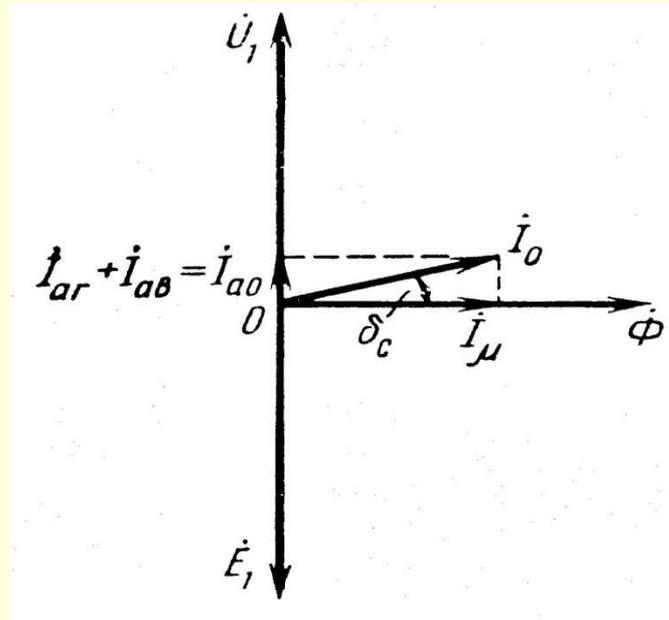
$$Z_0 = \frac{U_{1ном}}{I_0} \quad R_0 = \frac{P_x}{I_0^2} \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$$

- δ - угол магнитных потерь
- $\cos\varphi_0 = P_0 / U_{1ном} I_0$

$$\delta = \pi/2 - \varphi_0 \quad \varphi_0 = \arctg(R_0/X_0), \quad \delta \text{ составляет } 3...10^\circ$$

Так как $E_1 \sim U_{1ном}$, амплитуда Φ_m основного потока определяется амплитудой питающего напряжения и остается почти неизменной в режимах от холостого хода до номинального.

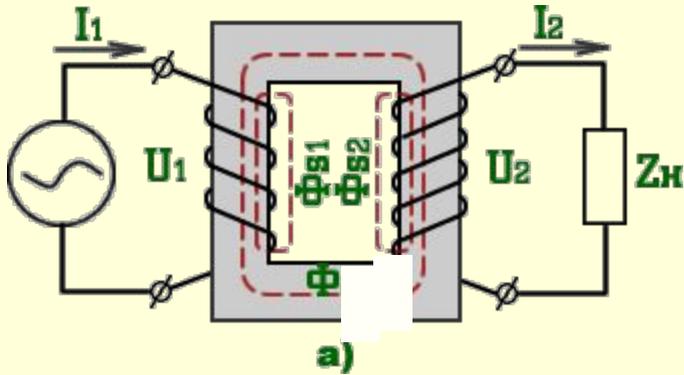
Векторная диаграмма однофазного трансформатора в режиме холостого хода



Из векторной диаграммы следует, что ток х. х. имеет реактивную составляющую значительно большую, чем активную.

Следовательно, ток х.х. почти весь идет на создание магнитного потока.

Нагрузочный режим трансформатора



- При подключении первичной обмотки трансформатора к источнику питания переменного напряжения на зажимах вторичной обмотки индуцируется переменная ЭДС E_2 и вторичная обмотка становится источником питания

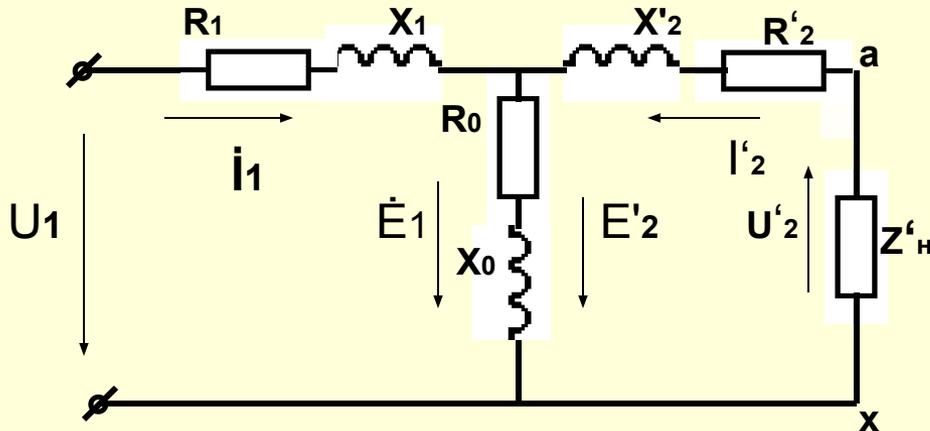
Действующие значения ЭДС первичной и вторичной обмоток:

- $E_1 = \sqrt{2}\pi f w_1 \Phi_m = 4,44 f w_1 \Phi_m$;
- $E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m$

ЭДС от потоков рассеивания:

$$\dot{E}_{1\sigma} = -jX_1 \dot{I}_1; \dot{E}_{2\sigma} = -jX_2 \dot{I}_2$$

Схема замещения трансформатора



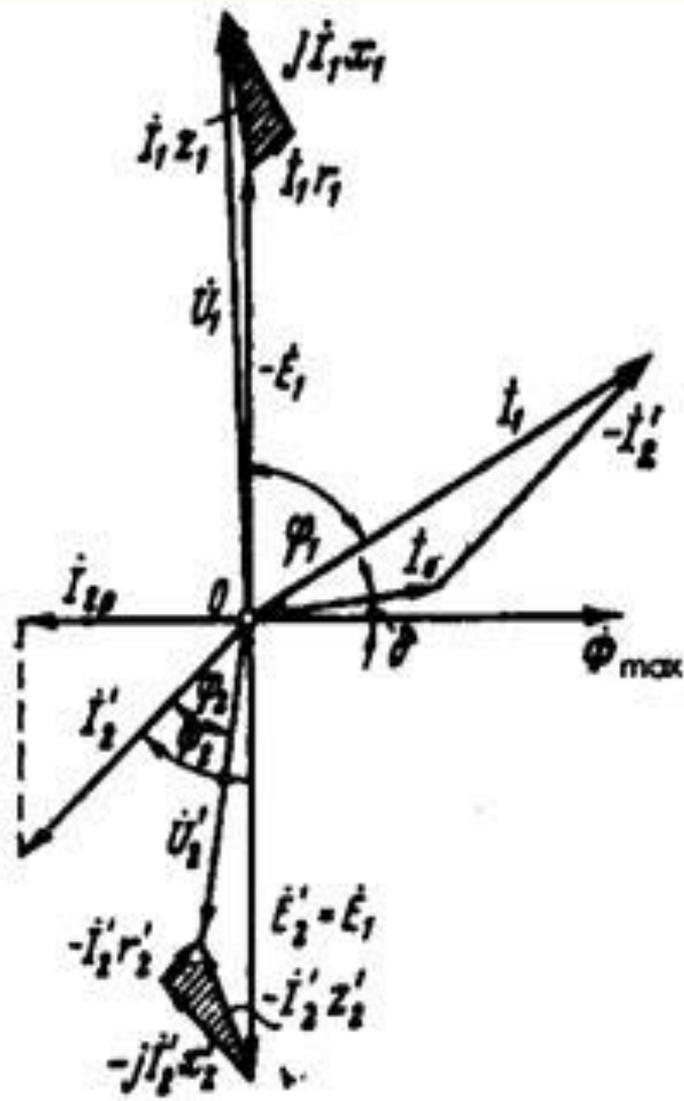
Уравнения МДС, токов и ЭДС обмоток трансформатора.

- Из постоянства амплитуды потока Φ_m , следует постоянство МДС:
- $w_1 i_1 + w_2 i_2 = w_1 i_0$.
- Разделив правую и левую части уравнения на w_1 , получаем уравнение токов:
- $i_1 = i_0 + (-i_2/n)$.

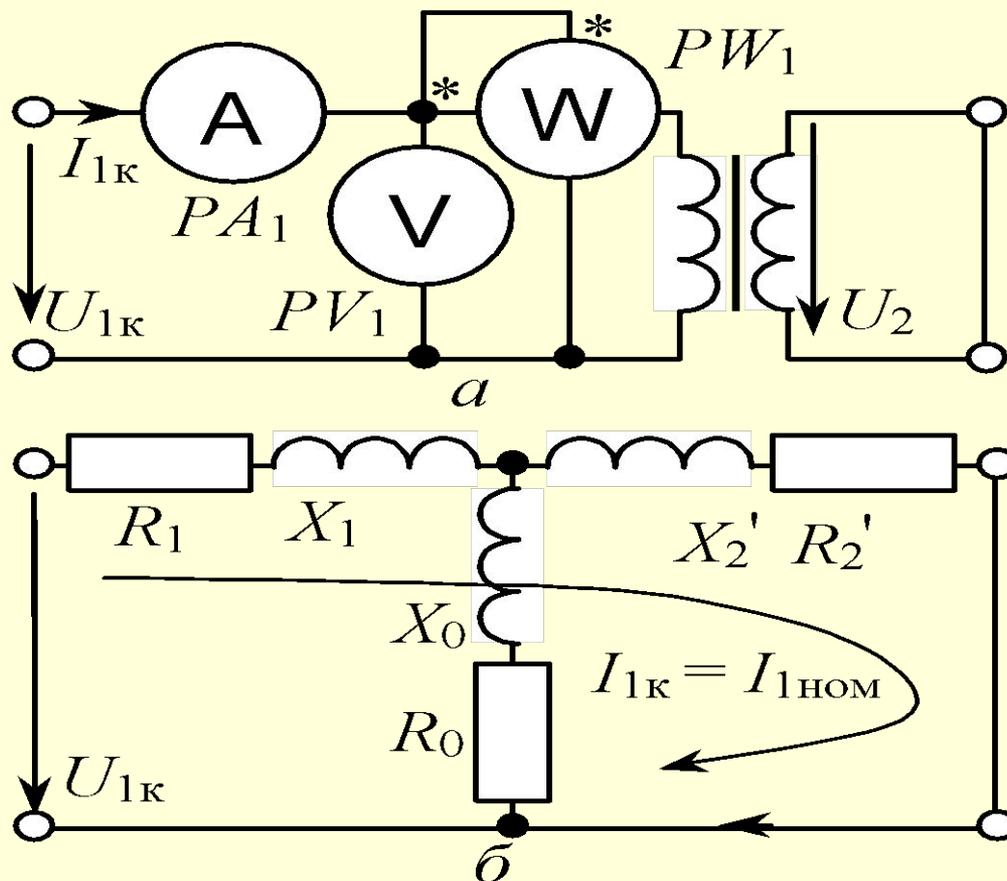
По второму закону Кирхгофа для схемы замещения трансформатора можно составить следующие уравнения:

$$U_1 = R_1 I_1 + jX_1 I_1 - E_1 \qquad U_2' = -R_2' I_2' - jX_2' I_2' + E_2'$$

Векторная диаграмма



Опыт лабораторного короткого замыкания трансформатора



• *a* – схема опыта лаб. к.з.;

• *б* – схема замещения

- В опыте к. з. $U_1 = U_{1к}; I_{1к} = I_{1ном};$
- Из опыта к. з. определяют:
- электрические потери: ΔP_k
- полное сопротивление короткого замыкания:

$$Z_k = \frac{U_{1к}}{I_{1ном}};$$

- активное сопротивление к. з.

$$R_k = \frac{\Delta P_k}{I_{1ном}^2}$$

- реактивное сопротивление к. з.

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$$

- сопротивления обмоток:

$$R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2}; X_1 = X_2' = \frac{X_k}{2}$$

Напряжение $U_{1к}$ является важным параметром трансформатора и указывается на его щитке (в %).

Активная $U_{1ка}$, %, и реактивная $U_{1кр}$, %, составляющие напряжения $U_{1к}$, %:

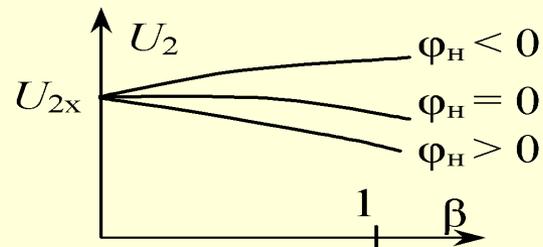
$$U_{1ка} = U_{1к} \cos\varphi_k; \quad U_{1кр} = \sqrt{(U_{1к})^2 - (U_{1ка})^2} \quad \cos\varphi_k = \Delta P_k / (U_{1к} I_{1ном})$$

ПОТЕРИ НАПРЯЖЕНИЯ В ТРАНСФОРМАТОРЕ

$$\Delta U = (U_{1\text{ном}} - U'_2) / U_{1\text{ном}} = \beta (U_{1к,а} \cos \varphi_H + U_{1к,р} \sin \varphi_H)$$

определяют вид внешней характеристики

Внешняя характеристика трансформатора –
 $U_2 = f(I_2)$ при $\cos \varphi_H = \text{const}$ и $U_1 = U_{1\text{ном}}$;



ПОТЕРИ МОЩНОСТИ И КПД ТРАНСФОРМАТОРА

- Потери мощности в трансформаторе – сумма мощностей потерь в стали сердечника (ΔP_0) и меди обмоток (ΔP_K):

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_K$$

- КПД трансформатора
- $\eta = P_2/P_1$,
- где P_2 – активная мощность, потребляемая нагрузкой; P_1 – активная мощность, потребляемая трансформатором из сети;
- Для расчета η используют формулу:

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{Н}}}{\beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{Н}} + P_x + \beta^2 P_K}$$

Оптимальный КПД при:

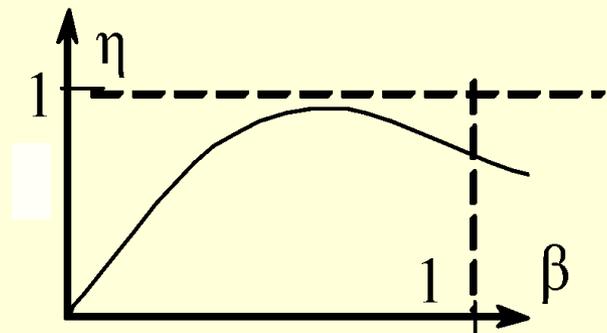
$$\beta = \sqrt{\Delta P_x / \Delta P_k}$$

$\beta = I_1/I_{1\text{НОМ}} = I_2/I_{2\text{НОМ}}$ – коэффициент нагрузки

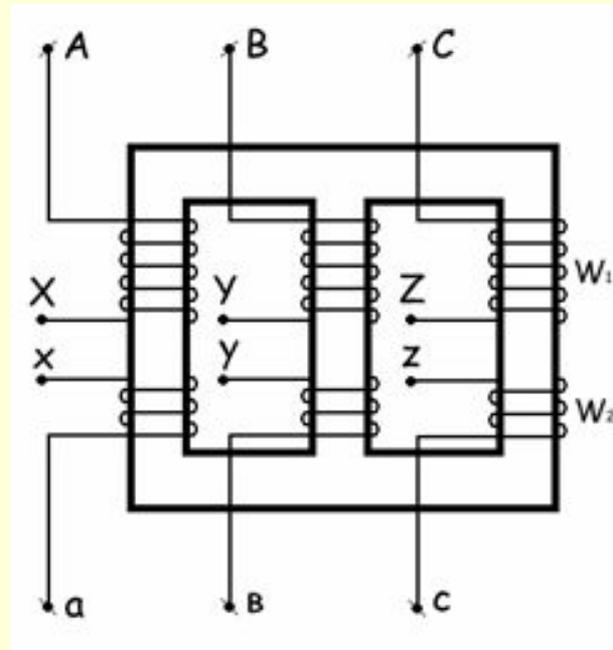


Изменение КПД в зависимости от нагрузки

$$\eta = f(\beta)$$



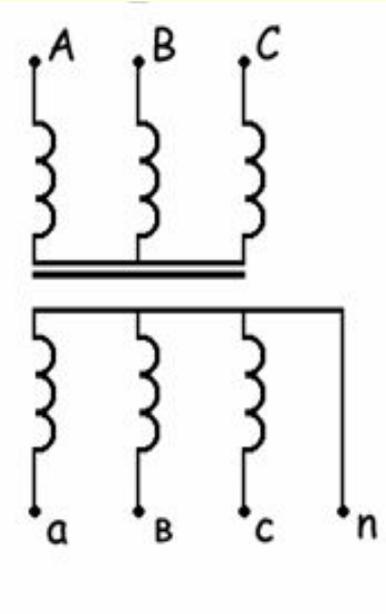
- **Трехфазную систему токов можно трансформировать или тремя однофазными трансформаторами, или одним трехфазным.**
- **Трехфазный трансформатор имеет три стержня, на которых располагаются первичные и вторичные обмотки.**



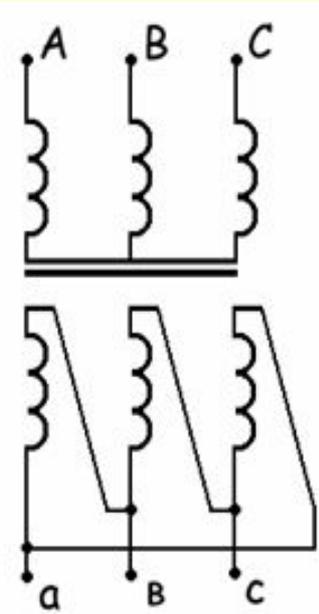
Начала и концы обмоток ВН обозначают буквами А, В, С и X, Y, Z, а НН а, b, c и x, y, z. Эти обмотки могут быть соединены звездой «Y» или треугольником «Δ».

Схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов, которые в основном используются в силовых трехфазных сетях: Y/Y_N , Y/Δ и Y_N/Δ

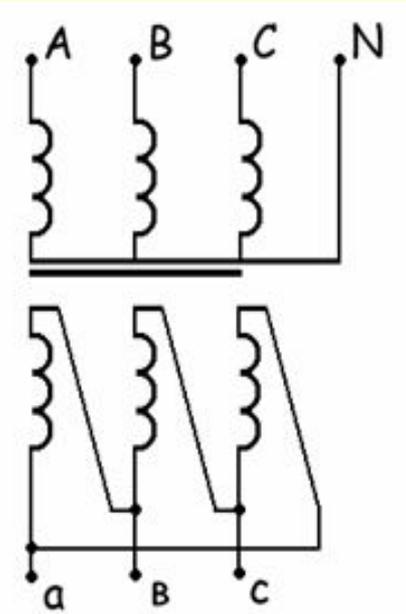
Y/Y_N



Y/Δ

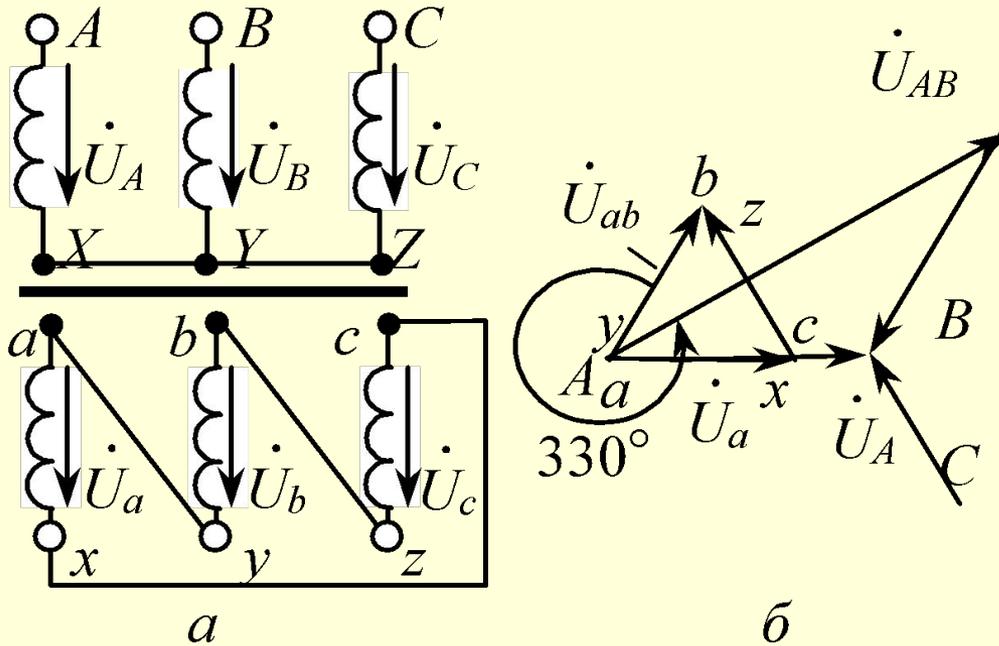


Y_N/Δ



Группы соединения трехфазного трансформатора

При параллельной работе трансформаторов и при использовании измерительных трансформаторов важны фазовые сдвиги между первичным и вторичным напряжениями. Поэтому трехфазные трансформаторы делят на группы соединений в зависимости от сдвига фаз одноименных линейных напряжений обмоток ВН и НН.



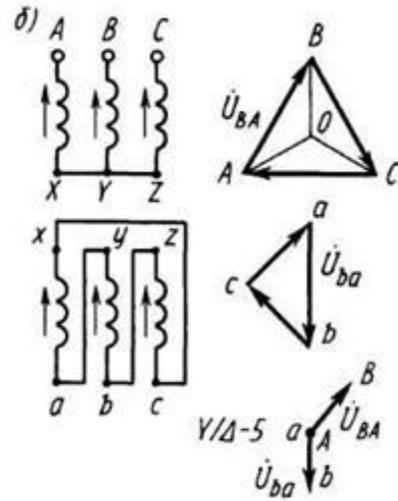
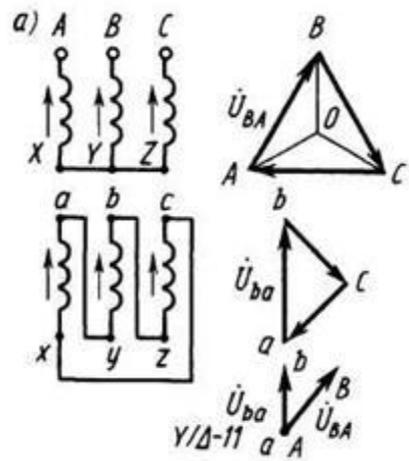
У трехфазных трансформаторов угол сдвига этих напряжений кратен 30° , что делает возможным 12 групп соединений, которые нумеруют целыми числами 0, 1, 2.....11.

- Для определения номера группы соединения нужно найти в градусах угол, на который вектор линейного напряжения обмотки НН отстает от одноименного вектора линейного напряжения обмотки ВН, и разделить этот угол на 30° . Угол отставания определяется против часовой стрелки от вектора НН к вектору ВН

•
•

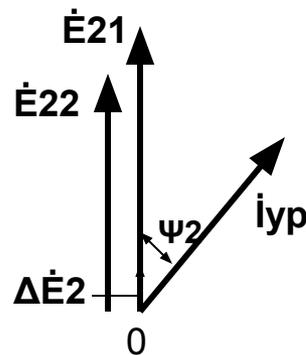
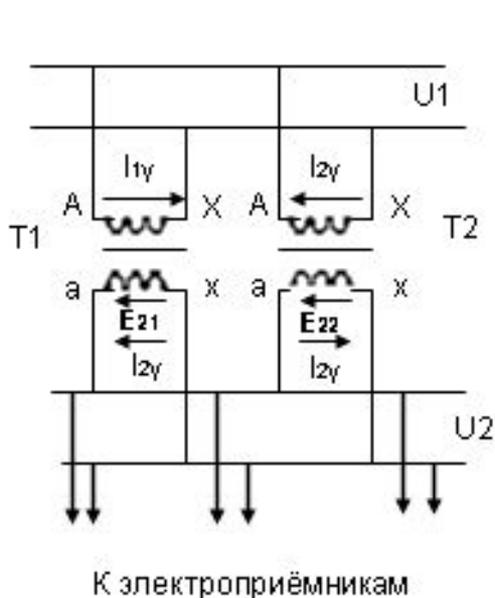
Схема трехфазного трансформатора

(а) и его векторная диаграмма (б)

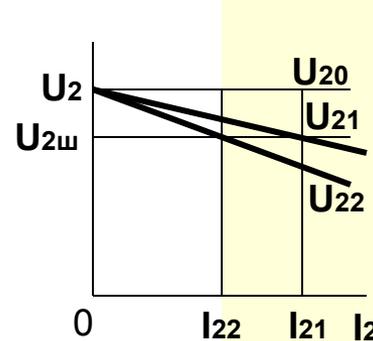


Параллельная работа трансформаторов

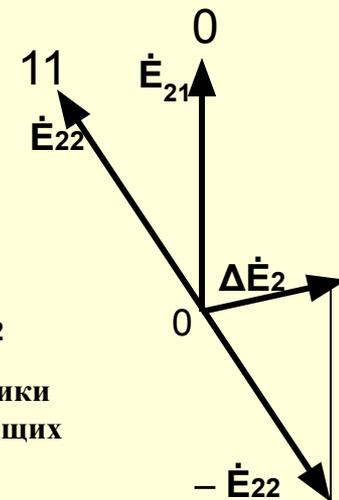
- При включении на параллельную работу к первичным обмоткам всех трансформаторов подводится одно и то же напряжение U_1 .
- Вторичные обмотки всех трансформаторов подключают к одним и тем же общим шинам, к которым подключается нагрузка. Для нормальной работы трансформаторы должны удовлетворять следующим условиям:
- 1) коэффициенты трансформации всех трансформаторов должны быть равны;
- 2) напряжения короткого замыкания всех трансформаторов должны быть равны;
- 3) все трехфазные трансформаторы должны иметь одну группу соединения обмоток



Векторная диаграмма вторичных ЭДС и уравнивающего тока параллельно работающих однофазных трансформаторов

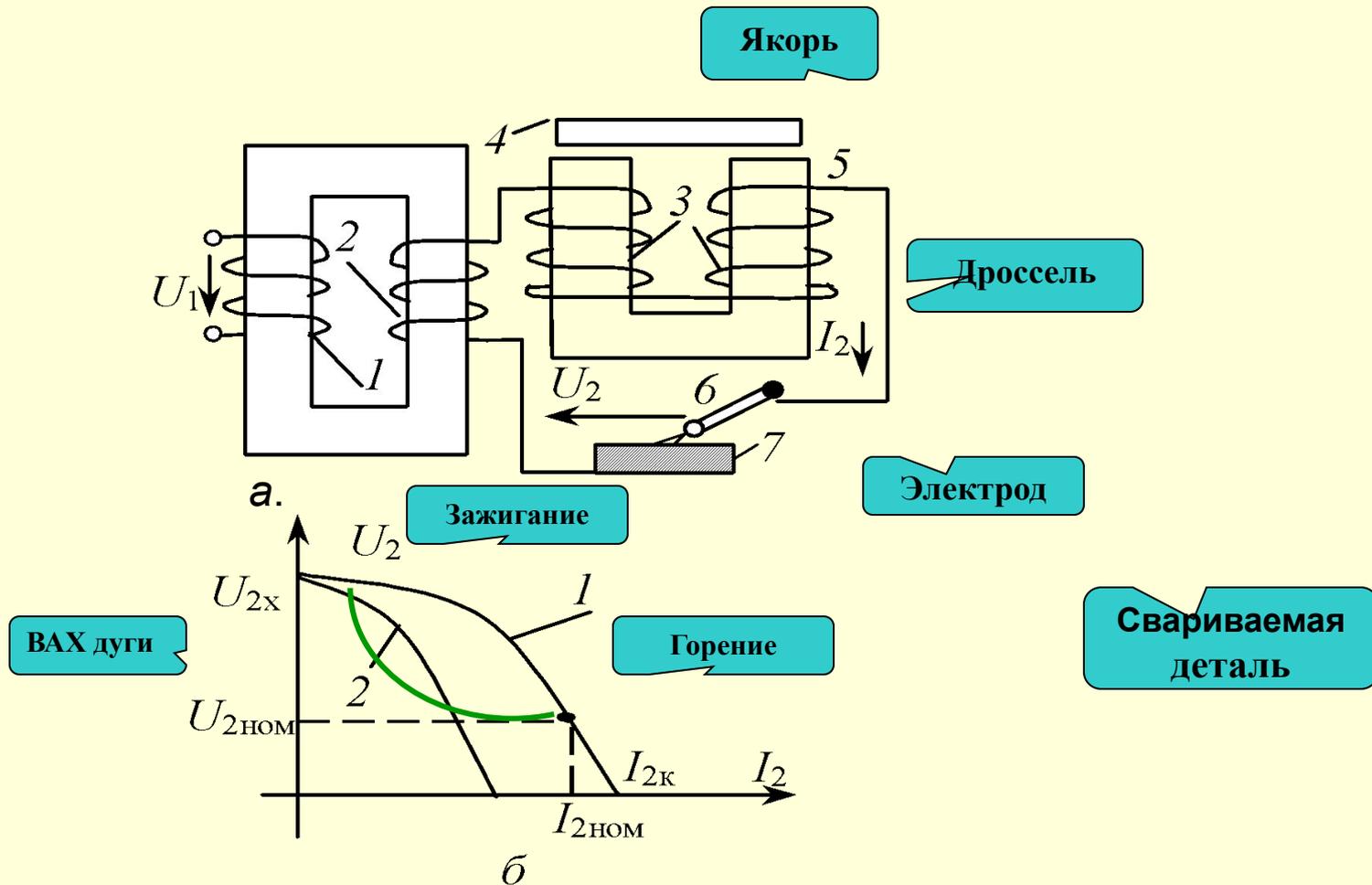


Внешние характеристики параллельно работающих трансформаторов, показывающие распределение нагрузки между ними



Векторная диаграмма вторичных линейных ЭДС параллельно работающих трехфазных трансформаторов 0 и 11 групп соединения обмоток

Сварочный трансформатор



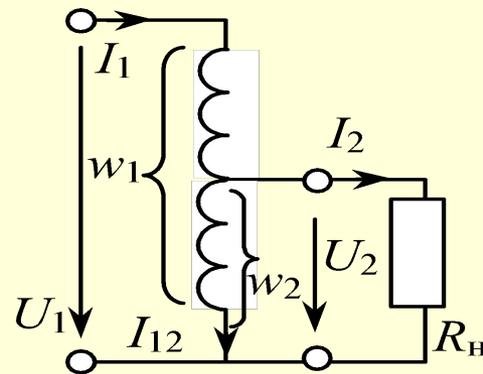
Устройство сварочного трансформатора (а):
1, 2 – обмотки трансформатора; 3 – дроссель;
4 – якорь; 5 – воздушный зазор; 6 – электрод
б – характеристики сварочного трансформатора

Автотрансформаторы

Автотрансформаторы применяются при пуске мощных асинхронных и синхронных двигателей, при соединении высоковольтных сетей с разным напряжением.

Маломощные автотрансформаторы используют в устройствах автоматики, электросвязи, радиоаппаратуре.

Широкое распространение получил лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), позволяющий плавно регулировать напряжение.



$$n = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$$

$$I_{12} = |I_2 - I_1| = nI_1 - I_1 = I_1(n - 1)$$

Измерительные трансформаторы

Схема подключения ТТ

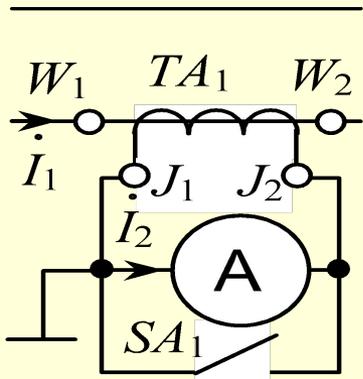
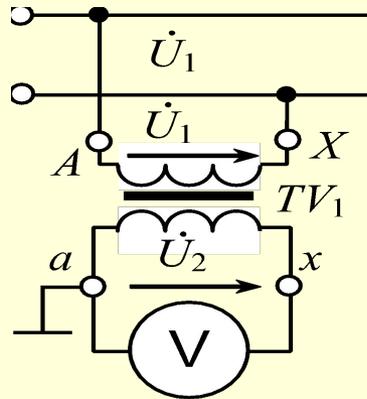


Схема подключения ТН



$$I_1 = I_2 \frac{W_2}{W_1} = \frac{I_2}{K_T}$$

$$K_T = w_1/w_2.$$

Поскольку $w_1 \ll w_2$, то измеренный ток $I_2 \ll I_1$.
Обычно у амперметра $I_{2\text{ном}} = 5 \text{ А}$,

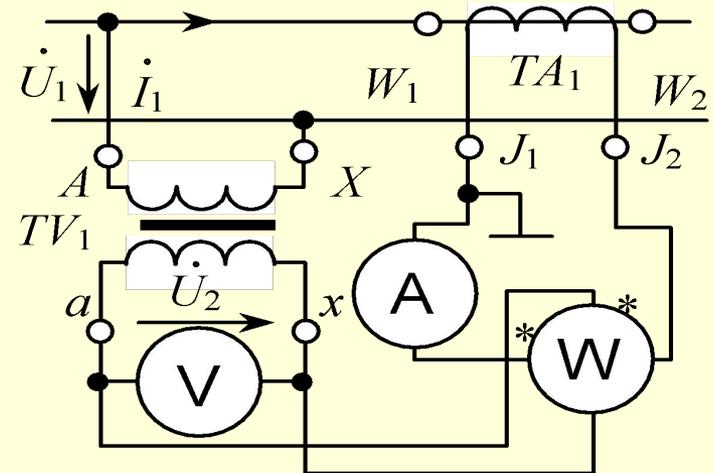
Трансформаторы тока



Трансформатор напряжения



-
-
- Схема подключения амперметра, вольтметра, ваттметра к ТТ и ТН



Вопросы для самопроверки

1. Устройство и принцип работы однофазного трансформатора.
2. Вычертите условно логическую схему трансформатора и объясните по ней его принцип работы.
3. Начертите схему опыта холостого хода трансформатора и объясните, какие величины определяются в этом опыте.
4. Что называется коэффициентом трансформации трансформатора?
5. Выведите выражения для действующих значений ЭДС, наводимых в первичной и вторичной обмотках трансформатора основным магнитным потоком.
6. Напишите уравнение МДС трансформатора.
7. Напишите уравнение токов трансформатора и объясните физический смысл составляющих тока первичной обмотки.
8. Как выражаются ЭДС рассеивания обмоток?
9. Напишите уравнения электрического состояния первичной и вторичной обмоток и объясните смысл каждого из членов этих уравнений.
10. Что называют приведенными величинами вторичной обмотки?
11. Начертите схему замещения трансформатора.
12. Почему в опыте холостого хода мощность потерь в обмотках настолько мала, что ее можно пренебречь?
13. Начертите схему опыта короткого замыкания трансформатора и объясните, какие величины определяются в этом режиме?
14. Почему в опыте короткого замыкания мощность потерь в стали настолько мала, что ею можно пренебречь?
15. Сформулируйте определение напряжения короткого замыкания и назовите его примерное значение.
16. Напишите выражения процентного изменения напряжения трансформатора.
17. При какой степени нагрузки наблюдается максимальное значение КПД силовых трансформаторов.
19. Объясните, почему трансформатор работает при постоянном магнитном потоке?
20. Изобразите схематически трехфазный трансформатор.
21. Какие схемы соединения обмоток трансформатора и его группы вы знаете?