

**Глава 2.
Трансформаторы**

**Тема 1
Принцип действия и
конструкция
трансформаторов**

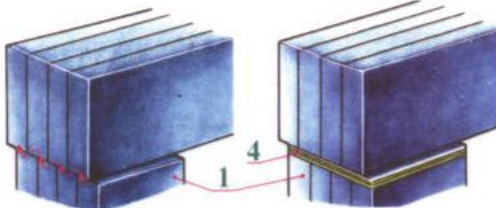
Шихтованный двухрамный магнитопровод однофазного трансформатора

ТИПЫ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

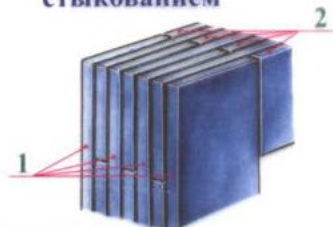
Стыковое соединение стержня и яра

БЕЗ ПРОКЛАДКИ

С ИЗОЛИРУЮЩЕЙ ПРОКЛАДКОЙ



Сборка (шихтовка) пластин впереплёт с прямым стыкованием



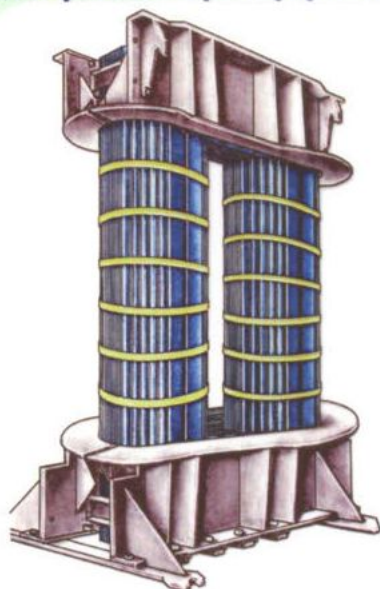
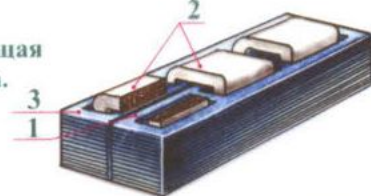
Основные типы конструкций магнитопроводов

СТЕРЖНЕВАЯ

- 1 - стержень;
- 2 - обмотка;
- 3 - яро;
- 4 - изолирующая прокладка.



БРОНЕВАЯ



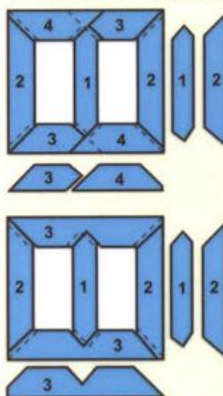
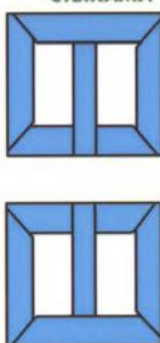
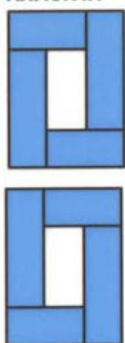
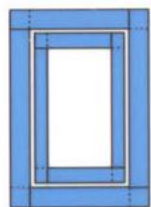
Схемы шихтовки магнитопроводов

С ПРЯМЫМИ СТЫКАМИ ПЛАСТИН

С КОМБИНИРОВАННЫМИ СТЫКАМИ

С КОСЫМИ СТЫКАМИ

Схема двухрамной магнитной системы



Направление магнитного потока в углах магнитопровода



Пространственная навитная магнитная система



Пространственная стыковая магнитная система



Трёхфазная плоская магнитная система



Плоские навитные магнитные системы

СТЕРЖНЕВАЯ

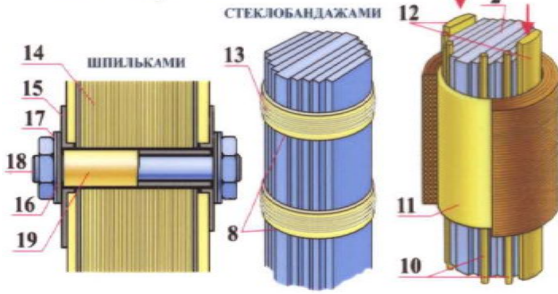
ТОРОИДАЛЬНАЯ

ТРЕХФАЗНАЯ

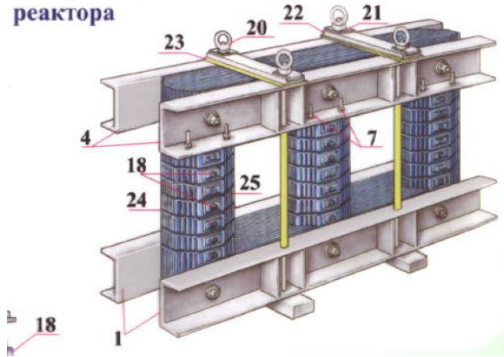


Прессовка стержней магнитопровода

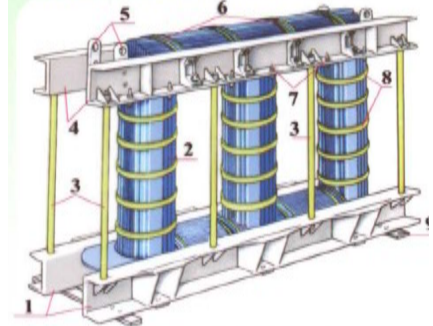
ДЕРЕВЯННЫМИ (БУКОВЫМИ) ПЛАНКАМИ И СТЕРЖНЯМИ



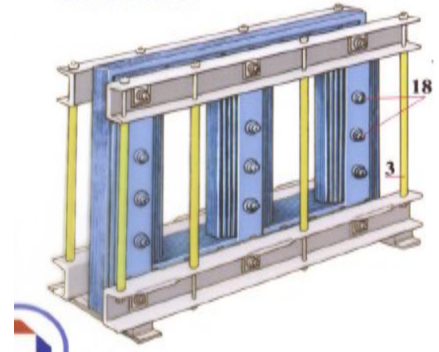
Магнитная система трёхфазного реактора



Трёхфазная магнитная система с прессовкой стержней стеклобандажами

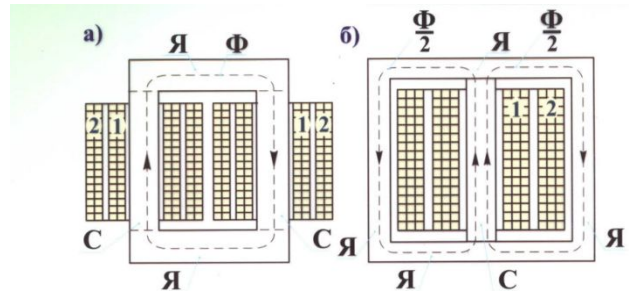
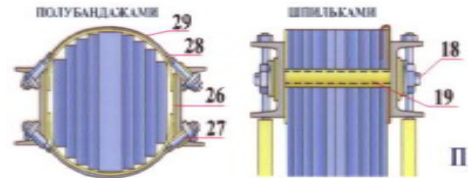


Трёхфазная магнитная система с прессовкой шпильками



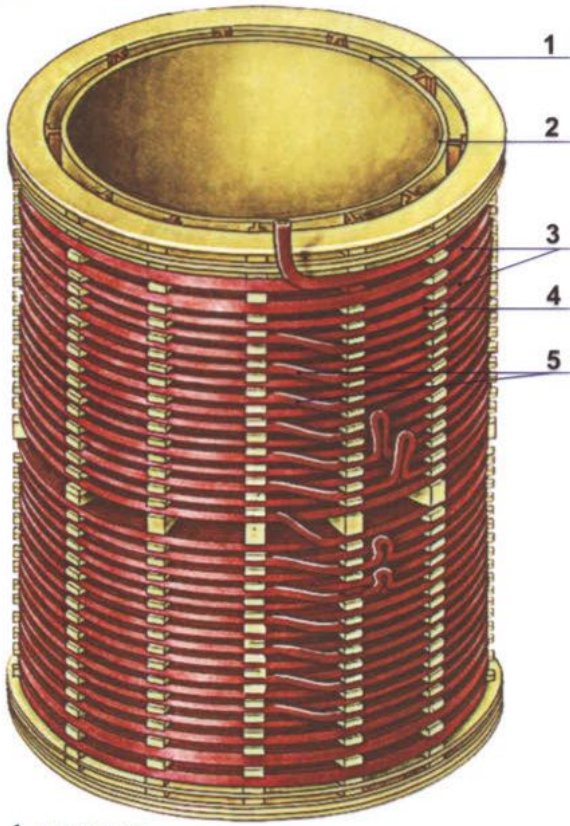
- 1-нижние ярмовые балки;
- 2- стержень магнитопровода;
- 3- вертикальные связующие шпильки с бумажно-бакелитовыми трубками;
- 4-верхние ярмовые балки;
- 5- подъемные планки;
- 6- полубандажи (стяжки);
- 7- винты для прессовки обмоток;
- 8- стеклобандажи;
- 9- стальные опорные пластины;
- 10- деревянные стержни;
- 11- бумажно-бакелитовый цилиндр;
- 12- деревянные клинья;
- 13- полоса электрокартона;
- 14- активная (электротехническая) сталь стержня;
- 15- изолирующая (гетинаксовая) угловая шайба;
- 16- изолирующая (электрокартонная) шайба;
- 17- шайба стальная ;
- 18- шпилька стальная;
- 19- трубка бумажно-бакелитовая;
- 20- подъемное кольцо;
- 21- замковая пластина;
- 22- верхняя опорная пластина;
- 23- изолирующая пластина;
- 24- немагнитные пластины , образующие “зазоры” стержня;
- 25- вставка стержня реактора;
- 26- изолирующая пластина;
- 27- шпилька полубандажа;
- 28- изолирующая полоса электрокартона;
- 29- стальная полоса полубандажа.

14
15
17
18
16
19



Устройство однофазного стержневого (а) и броневое (б) трансформаторов

Общий вид непрерывной катушечной обмотки



- 1- цилиндр;
- 2- внутренняя рейка;
- 3- обмоточный провод;
- 4- прокладки;
- 5- наружные переходы проводов;
- 6- коробка из электрокартона;
- 7- лента киперная.

Намотка непрерывной обмотки

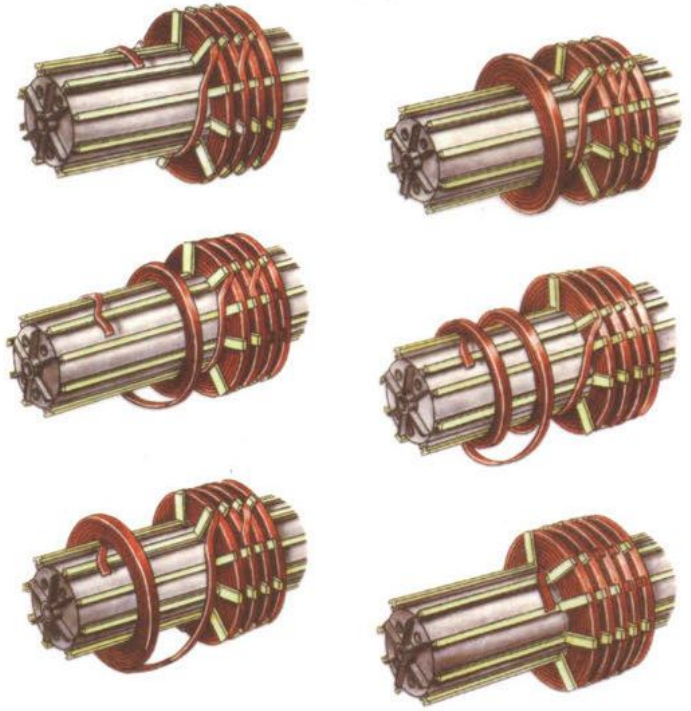
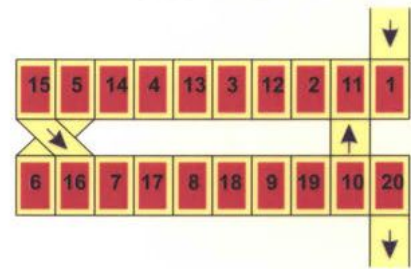
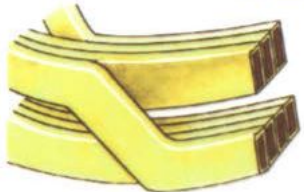


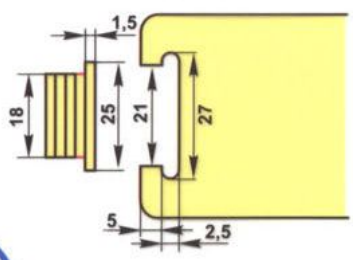
Схема намотки петлевой обмотки



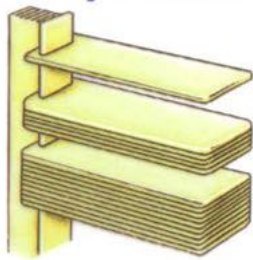
Изоляция перехода



Форма поперечного сечения реек



Форма межкатушечных прокладок



Двойная дисковая катушка

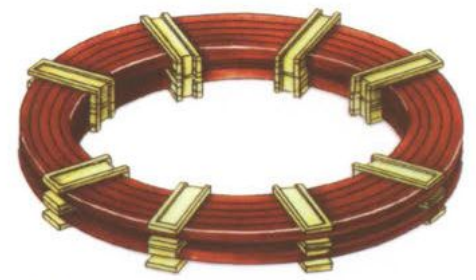
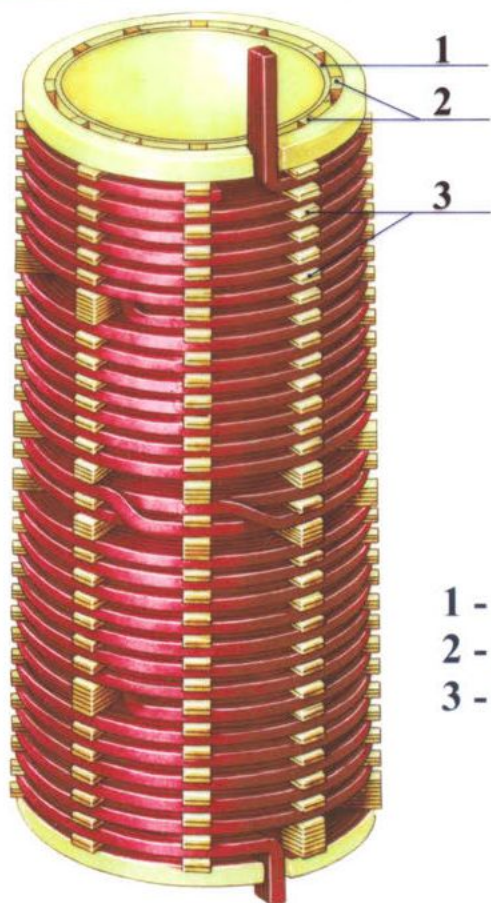
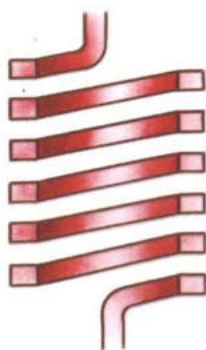


Схема транспозиции параллельных проводов

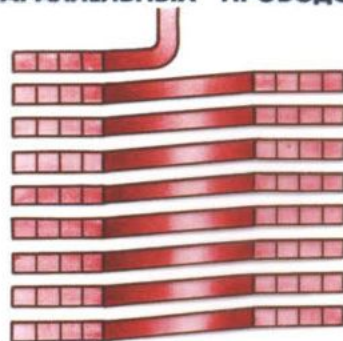




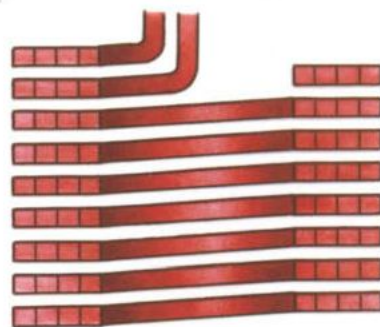
ОДНОХОДОВАЯ



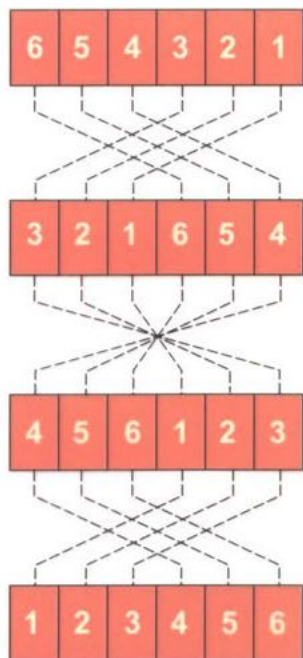
ОДНОХОДОВАЯ ИЗ ЧЕТЫРЕХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОВОДОВ



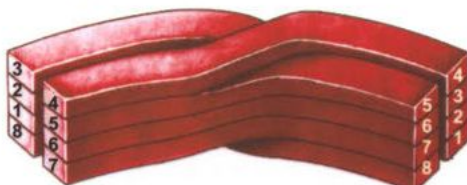
ДВУХХОДОВАЯ



- 1 - цилиндр;
- 2 - рейки;
- 3 - прокладки.



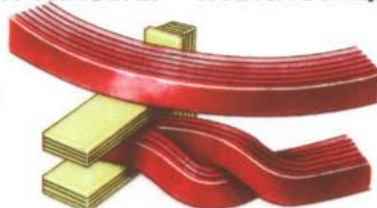
ДВУХХОДОВАЯ ОБМОТКА



ОБЩАЯ ТРАНСПОЗИЦИЯ

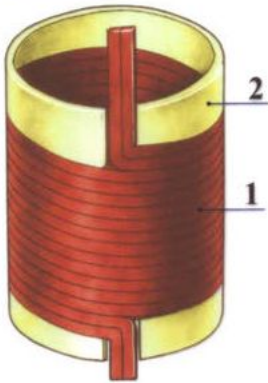


ГРУППОВАЯ ТРАНСПОЗИЦИЯ

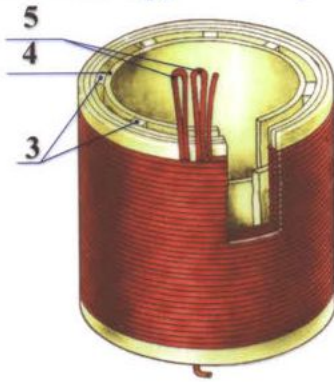


ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ОБМОТКИ

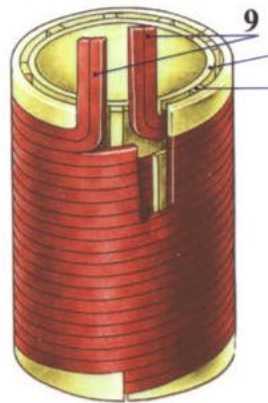
Цилиндрическая однослойная обмотка



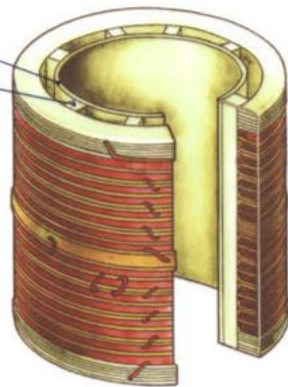
Цилиндрическая многослойная обмотка из круглого провода



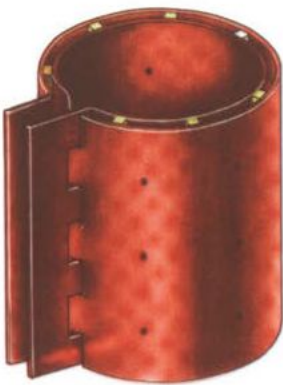
Цилиндрическая двухслойная обмотка



Катушечная многослойная обмотка



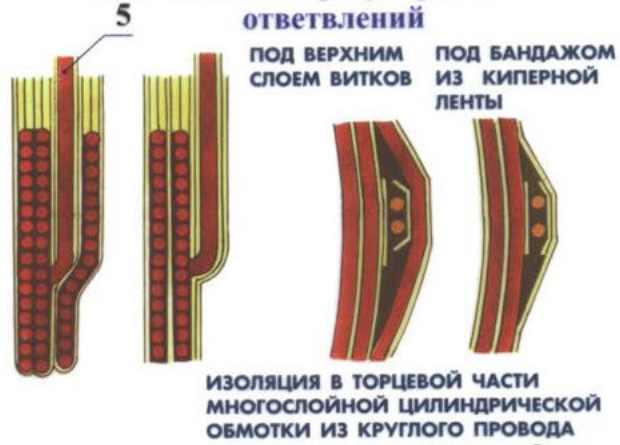
Листовая обмотка электропечного трансформатора



Цилиндрическая обмотка из фольги

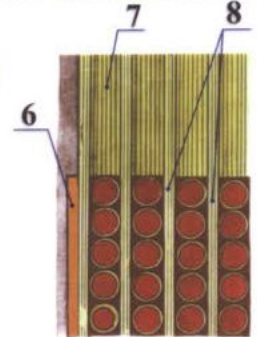


Расположение регулировочных ответвлений

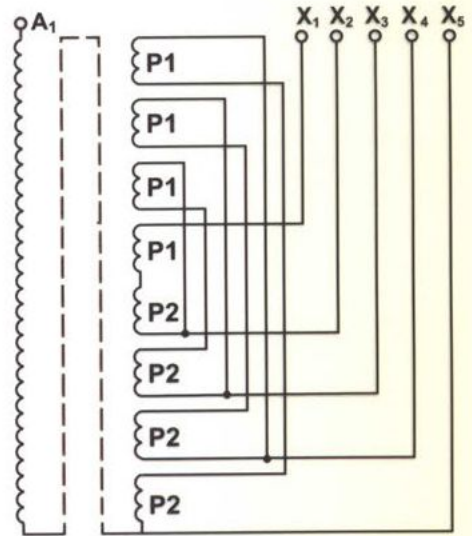


ИЗОЛЯЦИЯ В ТОРЦЕВОЙ ЧАСТИ МНОГОСЛОЙНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБМОТКИ ИЗ КРУГЛОГО ПРОВОДА

ВЫПОЛНЕНИЕ ОТВЕТВЛЕНИЙ



Магнитно-симметричная схема многослойной обмотки с пятью регулировочными ответвлениями



1 - витки прямоугольного провода;

2 - разрезные выравнивающие кольца;

3 - вертикальные рейки;

4 - бумажно-бакелитовый цилиндр;

5 - внутренние ответвления обмотки;

6 - экран;

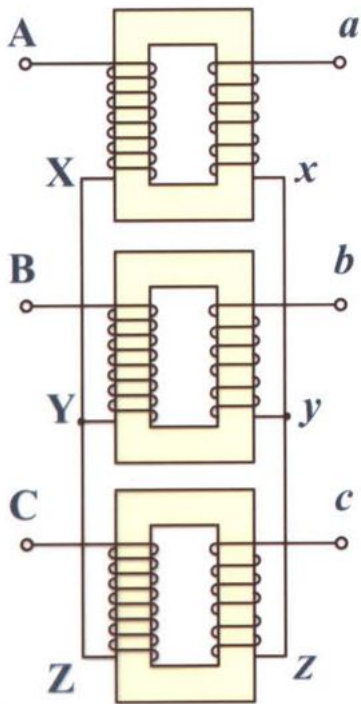
7 - бортики из электрокартона;

8 - междуслойная изоляция;

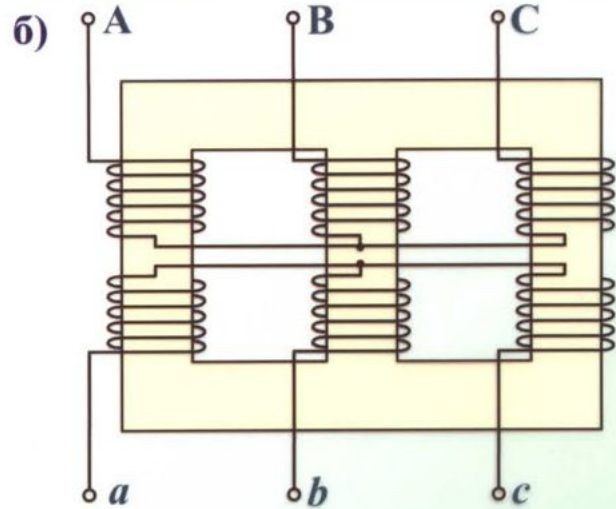
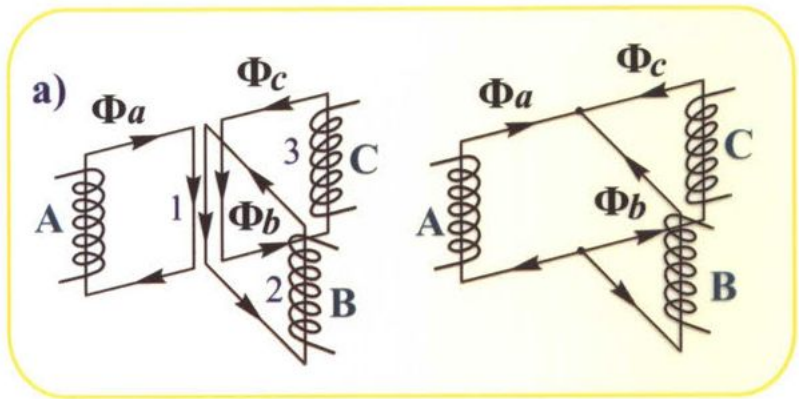
9 - выводы обмотки.

**Глава 2.
Трансформаторы**

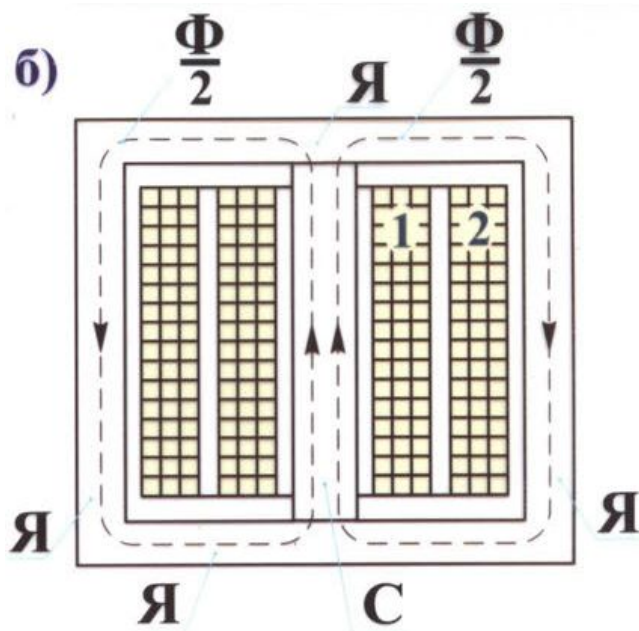
**Тема 2
Трехфазные
трансформаторы**

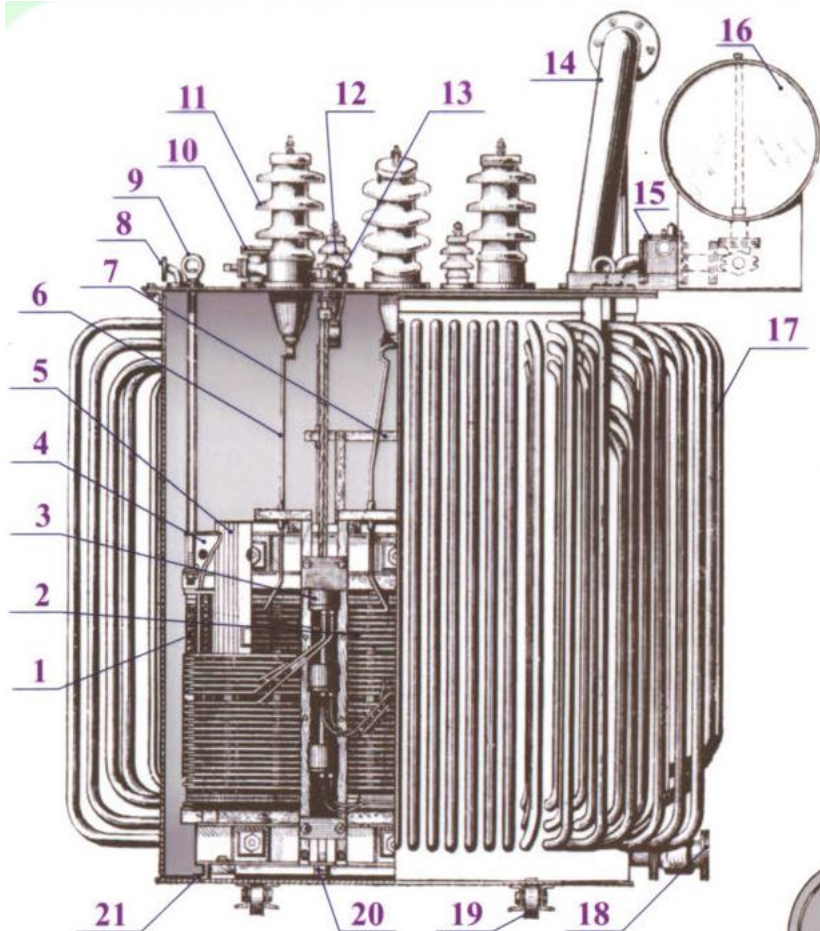


Трёхфазная трансформаторная группа



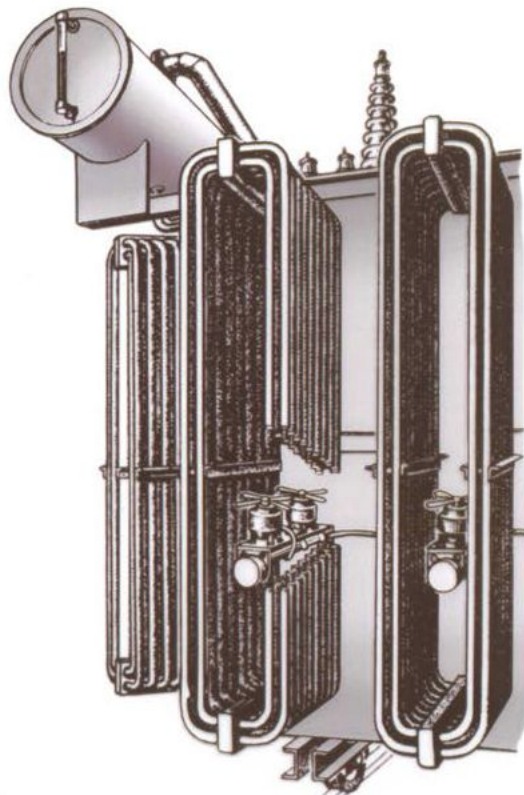
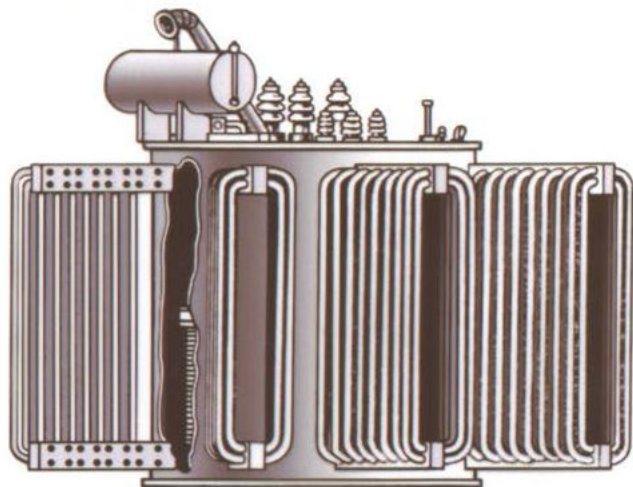
Принцип образования трёхфазного трёхстержневого трансформатора

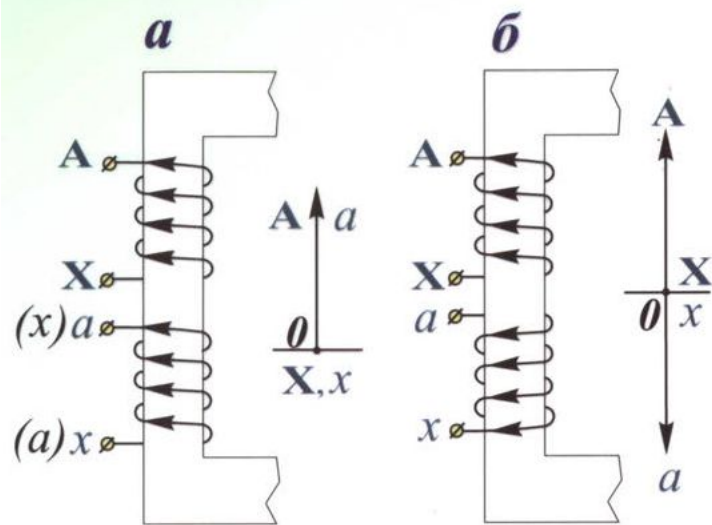




- 1- обмотка ВН;
- 2- обмотка НН;
- 3- переключатель регулировочных отводов обмотки ВН;
- 4- балка, прессирующая ярмо;
- 5- шихтованный магнитопровод;
- 6- отводы ВН;
- 7- отводы НН;
- 8- патрубок для присоединения вакуумного насоса;
- 9- кольцо для подъёма выемной части;
- 10- кран для заливки масла;
- 11- ввод (изолятор) ВН;
- 12- ввод (изолятор) НН;
- 13- привод переключателя;
- 14- выхлопная труба;
- 15- газовое реле;
- 16- расширитель;
- 17- трубчатый бак;
- 18- кран для слива масла.

- 19- транспортный ролик;
- 20- вертикальная шпилька для стягивания прессирующих балок ярма;
- 21- упорный угольник на дне бака.

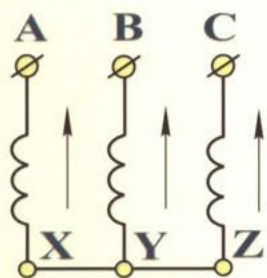




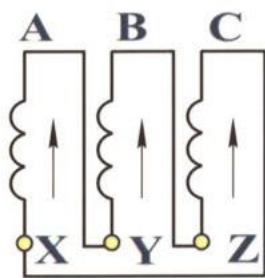
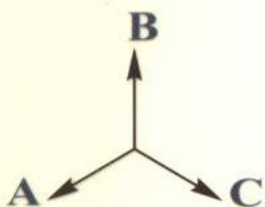
Зависимость фазы ЭДС обмотки от направления намотки витков и маркировки зажимов



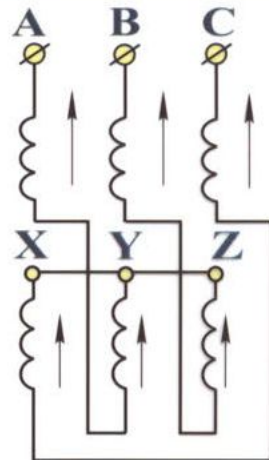
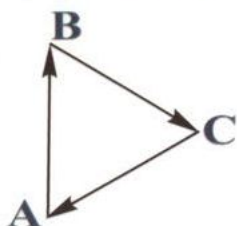
Группы 0 и 6 соединений обмоток однофазных трансформаторов



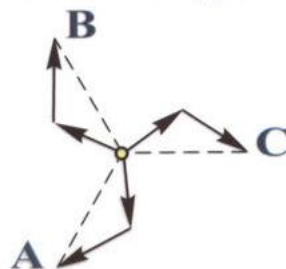
Звезда



Треугольник

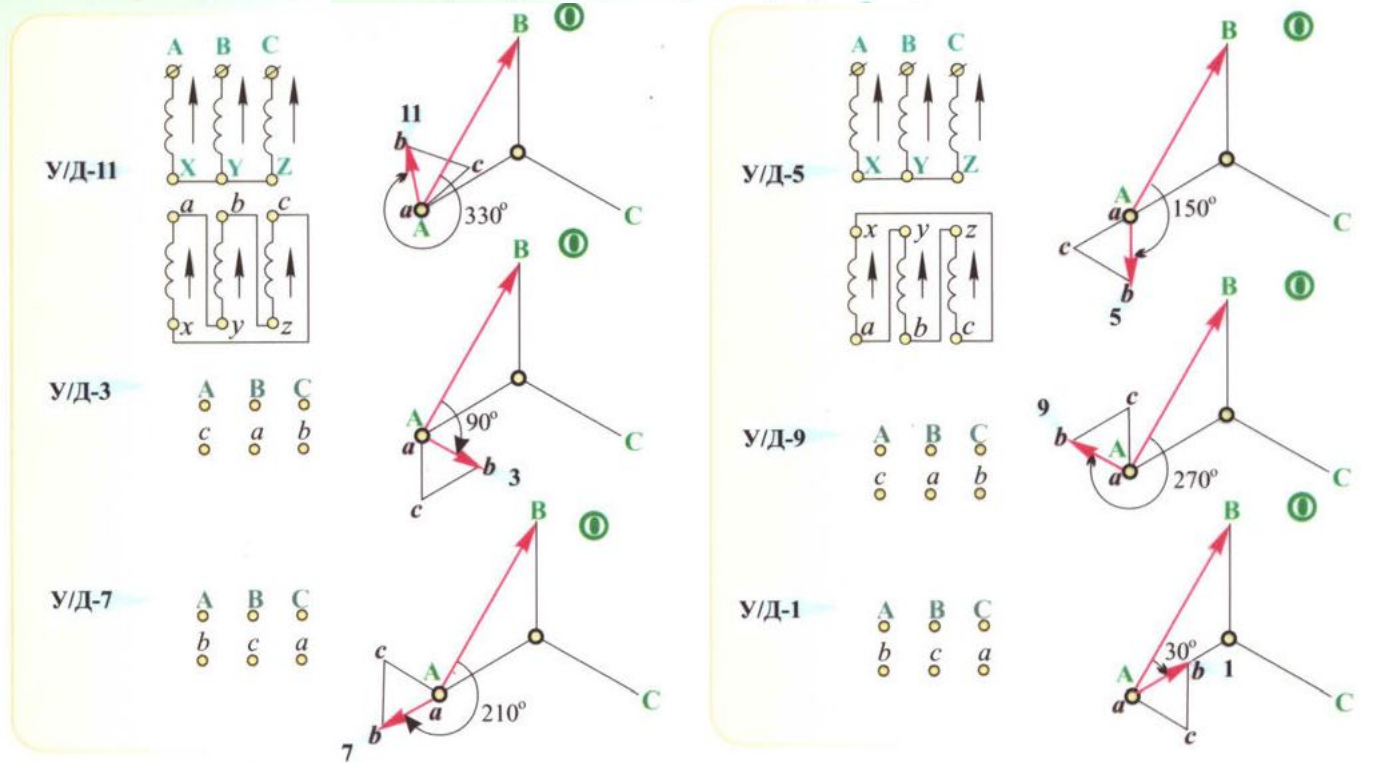


Зигзаг-звезда

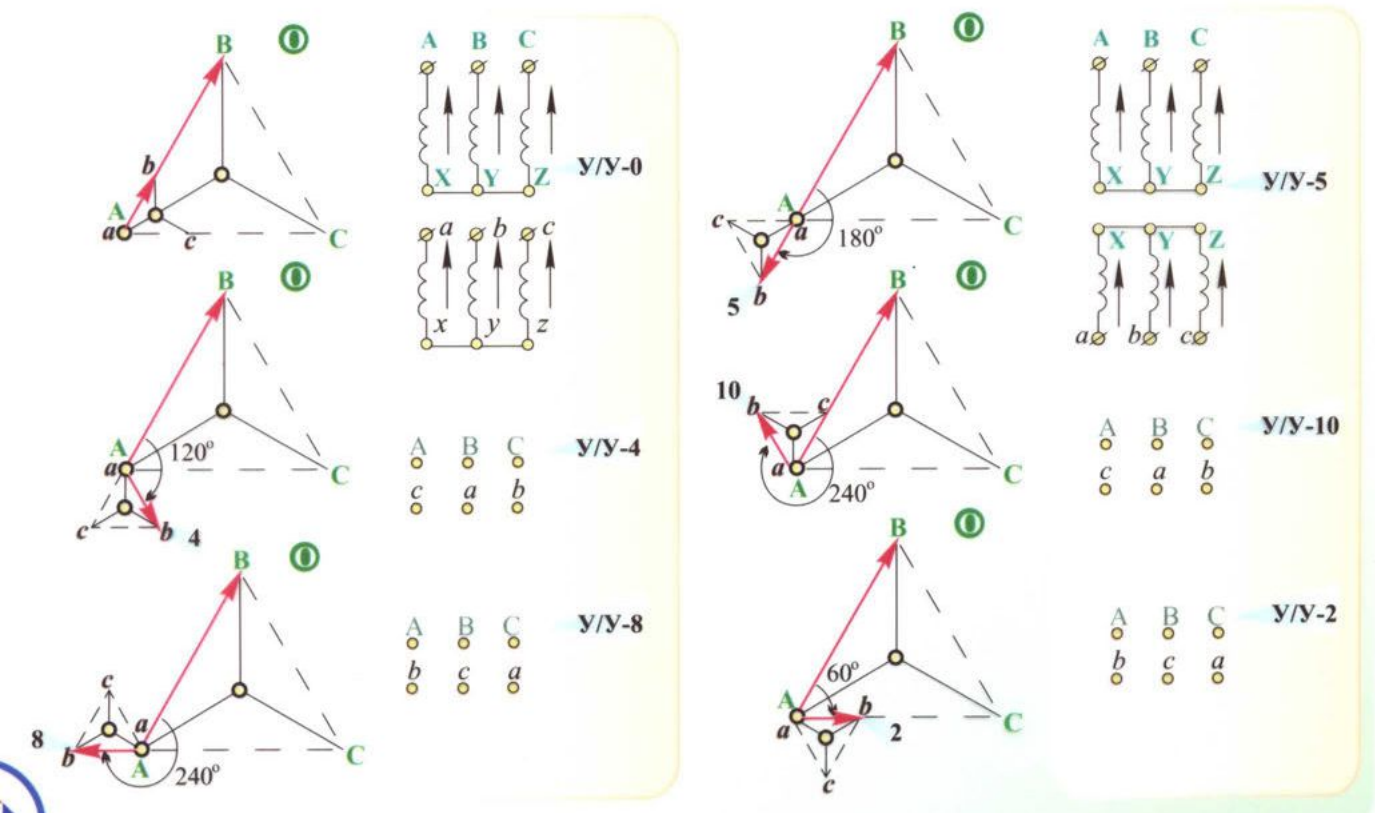


Схемы соединений трёхфазных трансформаторов

Нечётные группы соединений обмоток трёхфазных трансформаторов



Чётные группы соединений обмоток трёхфазных трансформаторов



Режим холостого хода

$$Z_H \rightarrow \infty, I_2 = 0$$

$$U_{20} = E_2, I_1 = I_0 = (1 \div 10)\% \cdot I_{1H}$$

$$U_1 = E_1 = 4,44\omega_1 f \Phi_m$$

Выводы

Амплитуда магнитного потока в сердечнике Φ_m пропорциональна приложенному к обмотке напряжению и не зависит от режима работы

Режим короткого замыкания

$$Z_H = 0, U_2 = 0, I_{2КЗ} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}$$
$$I_{2КЗ} \gg I_{2H}$$

Для большинства трансформаторов режим короткого замыкания - аварийный режим

Режим нагрузки

$$0 < Z_H < \infty$$

Действует две МДС, каждая из которых создает свой магнитный поток

$$\Phi_1 = \frac{I_1 \omega_1}{R_{МАГН}}, \Phi_2 = \frac{I_2 \omega_2}{R_{МАГН}}$$

Результирующий магнитный поток

$$\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2$$

Уравнение магнитодвижущих сил

$$\dot{I}_0 \omega_1 = \dot{I}_1 \omega_1 + \dot{I}_2 \omega_2$$

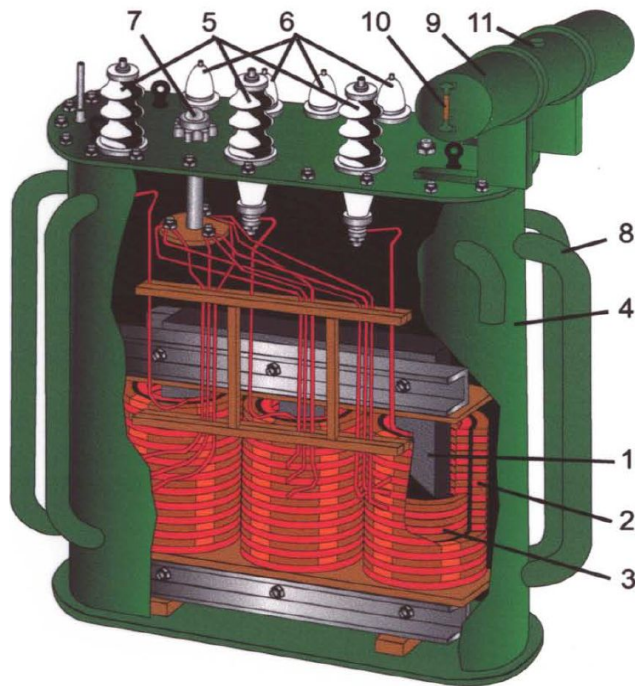
Ток первичной обмотки

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

Зависит от тока вторичной обмотки (тока нагрузки)

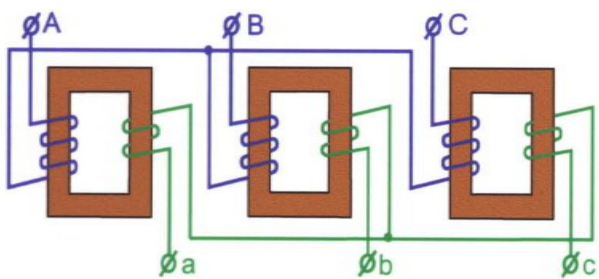
Чем больше ток нагрузки, тем больше потребляемый из сети ток.

041



Силовой трехфазный трансформатор.

- 1- магнитопровод;
- 2- обмотка высокого напряжения;
- 3- обмотка низкого напряжения;
- 4- стальной бак с трансформаторным маслом;
- 5,6 - изоляторы;
- 7- переключатель;
- 8- охлаждающие трубы;
- 9- расширительный бачок;
- 10- измеритель уровня масла;
- 11- заливное отверстие.



Трансформатор с несвязанной магнитной цепью

Схемы соединения обмоток

$Y/Y_0, Y_0/\Delta, \Delta/Y, \Delta/\Delta$

Коэффициенты трансформации

$$K \cdot K_{\phi} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{\omega_1}{\omega_2}, \quad K_L = \frac{U_{1Л}}{U_{2Л}}$$

Трансформатор с несвязанной магнитной цепью

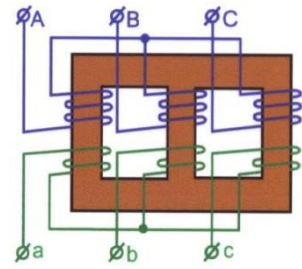
Схемы соединения обмоток

$Y/Y_0, Y_0/\Delta, \Delta/Y, \Delta/\Delta$

Коэффициенты трансформации

$$K \cdot K_{\phi} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{\omega_1}{\omega_2}, \quad K_L = \frac{U_{1Л}}{U_{2Л}}$$

При схеме $Y/Y, \Delta/\Delta$ $K_{\phi} = K_L$



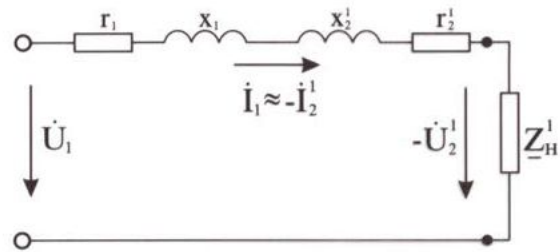
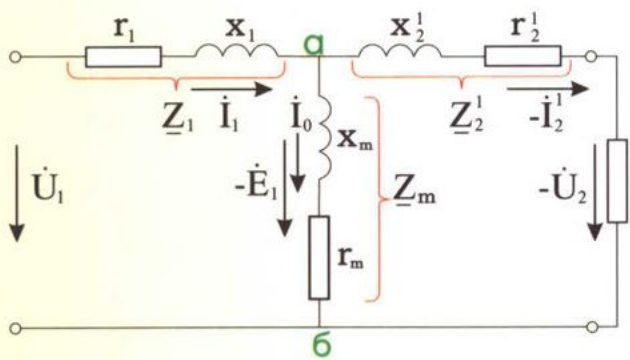
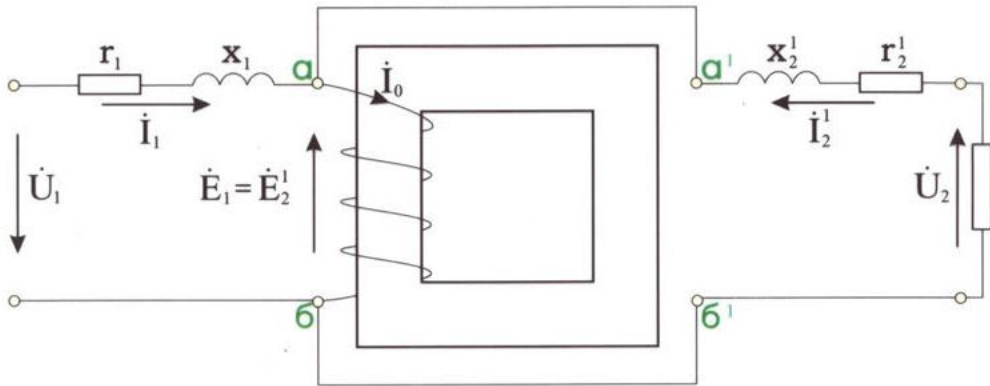
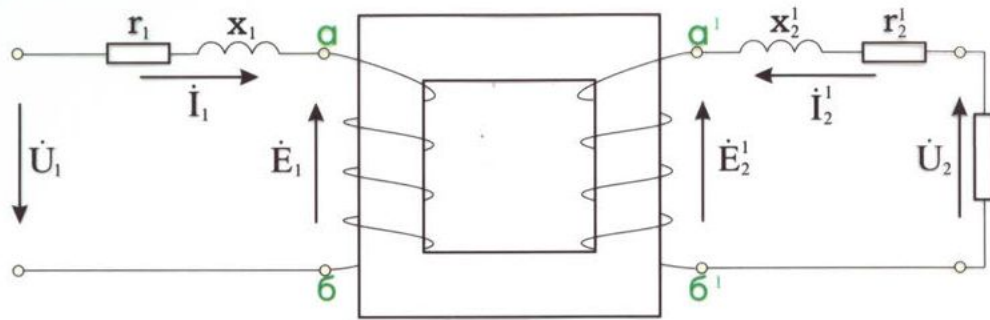
Трансформатор со связанной магнитной цепью

Группа соединения обмоток - сдвиг по фазе между линейными на первичной и вторичной стороне, отсчитанному по часовой стрелке и деленному на 30.

Согласно ГОСТ допускается 0(12) и 11 группы соединения.

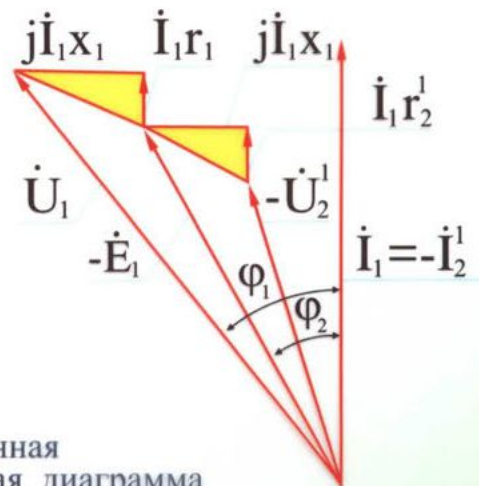
Глава 2.
Трансформаторы

Тема 3
Схема замещения
трансформатора



Упрощенная схема замещения

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_1 \frac{1}{\underline{Z}_1 + \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_H'}}} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_{\text{ЭКВ}}}$$

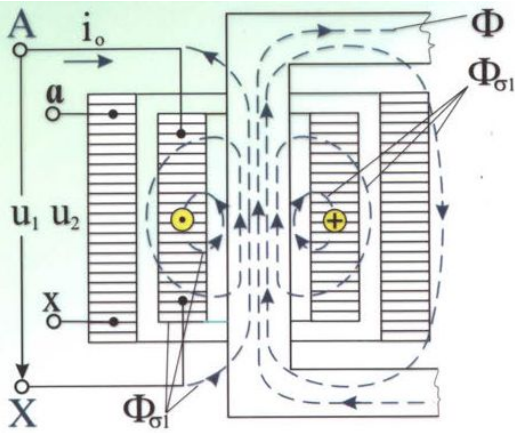


Упрощенная векторная диаграмма

Глава 2.
Трансформаторы

Тема 4

**Холостой ход
трансформатора**



Картина потоков при холостом ходе

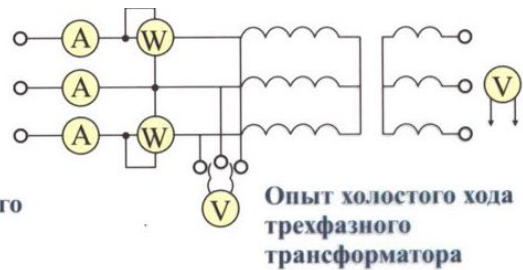
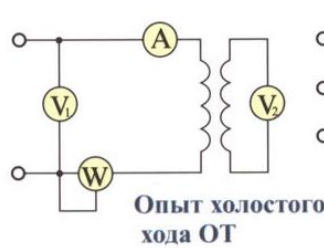
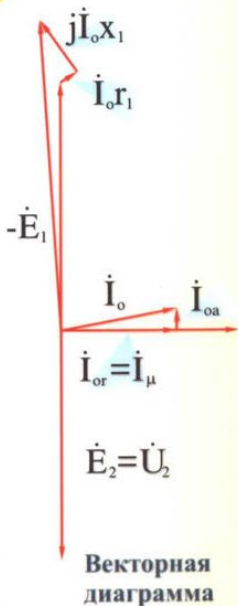
$$\begin{aligned}
 u_1 + e_1 + e_{\sigma 1} &= i_0 r_1 \\
 u_1 &= -e_1 - e_{\sigma 1} + i_0 r_1 \\
 \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + i_0 r_1 \\
 \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + j \dot{I}_0 x_1 + \dot{I}_0 r_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 \dot{Z}_1 \\
 \dot{U}_1 &\approx -\dot{E}_1
 \end{aligned}$$

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2}$$

$$I_0 = \frac{E_1}{Z_m} \approx \frac{U_1}{Z_m} \quad Z_m \approx \frac{U_1}{I_0} \quad r_m = \frac{P_{\text{MГ}}}{I_0^2} \approx \frac{P_0}{I_0^2} \quad x_m = \sqrt{Z_m^2 + r_m^2}$$

$$E_1 = 4,44 W_1 f \Phi \quad E_2 = 4,44 W_2 f \Phi$$

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} \approx \frac{U}{U_{20}}$$



Режим холостого хода

$$Z_{\text{H}} \rightarrow \infty \quad , \quad I_2 = 0$$

$$U_{20} = E_2 \quad , \quad I_1 = I_0 = (1 \div 10)\% \cdot I_{1\text{H}}$$

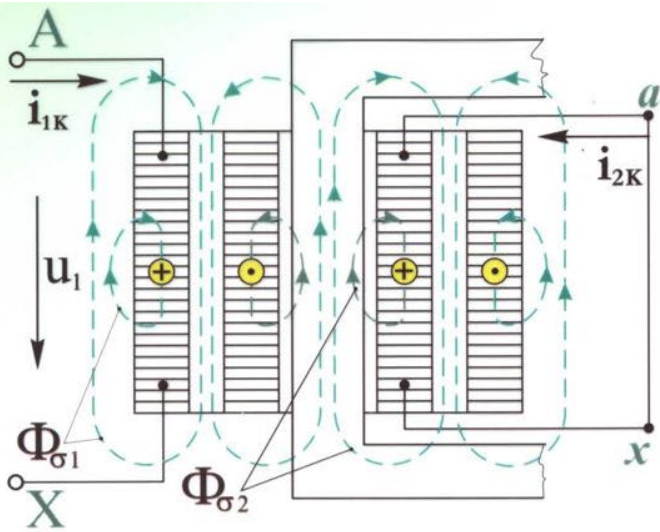
$$U_1 = E_1 = 4,44\omega_1 f \Phi_m$$

Выводы

Амплитуда магнитного потока в сердечнике Φ_m пропорциональна приложенному к обмотке напряжению и не зависит от режима работы

**Глава 2.
Трансформаторы**

**Тема 5
Короткое замыкание
трансформатора**



Картина потоков при коротком замыкании

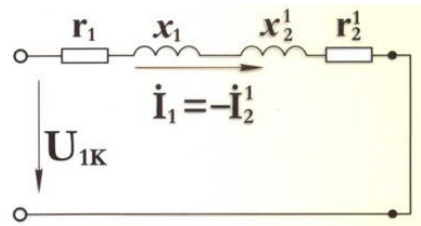


Схема замещения при коротком замыкании (КЗ)

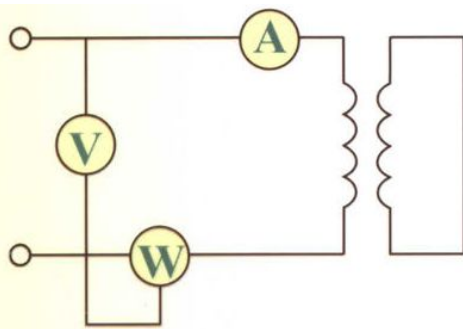
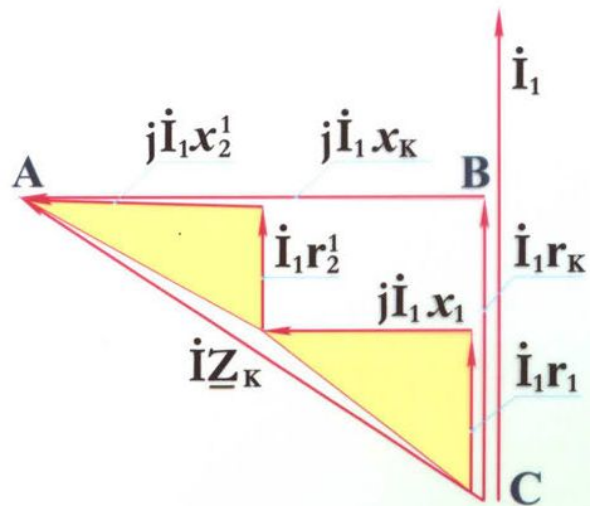
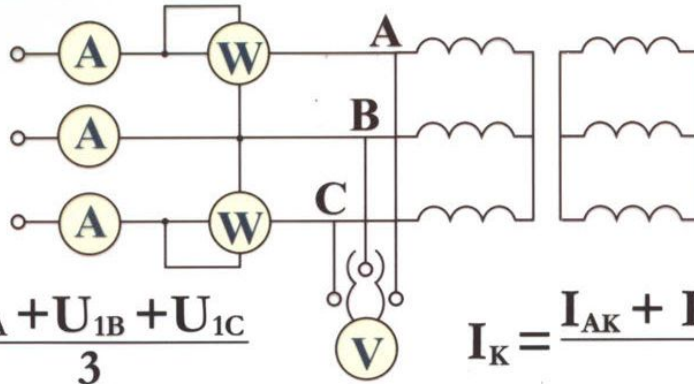


Схема опыта КЗ однофазного трансформатора



Треугольник КЗ



$$U_{1K} = \frac{U_{1A} + U_{1B} + U_{1C}}{3} \quad I_K = \frac{I_{AK} + I_{BK} + I_{CK}}{3}$$

Схема опыта К3 трёхфазного трансформатора

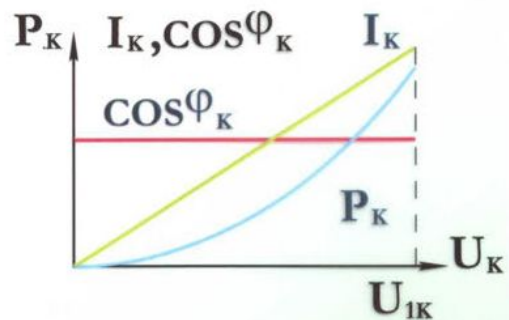
$$z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1K}}; \quad P_K \approx P_{эл}; \quad r_K = \frac{P_K}{I_{1K}^2}; \quad x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}$$

$$r_{K75} = r_K \frac{235+75}{235+9}; \quad z_{K75} = \sqrt{r_{K75}^2 + x_K^2}$$

$$u_K = \frac{U_{1K}}{U_{1H}} 100\% = \frac{I_{1H} z_{K75}}{U_{1H}} 100\%$$

$$u_{Ka} = \frac{I_{1H} r_{K75}}{U_{1H}} 100\%$$

$$u_{Kr} = \frac{I_{1H} x_K}{U_{1H}} 100\% = \sqrt{u_K^2 - u_{Ka}^2}$$



Характеристики К3

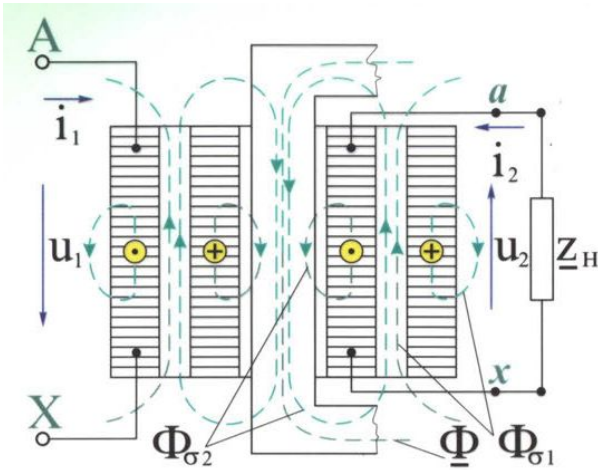
Режим короткого замыкания

$$Z_H = 0, U_2 = 0, I_{2КЗ} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}$$
$$I_{2КЗ} \gg I_{2Н}$$

Для большинства трансформаторов режим короткого замыкания - аварийный режим

**Глава 2.
Трансформаторы**

**Тема 6
Работа трансформатора под
нагрузкой**



Приведенный трансформатор

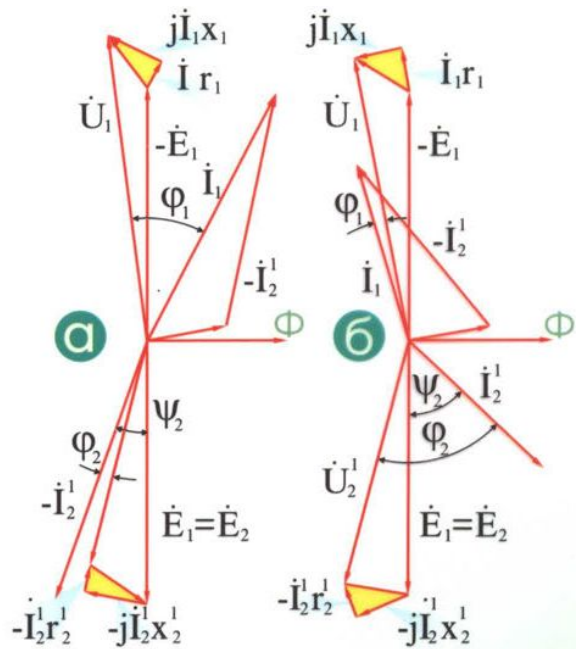
$$\begin{aligned}
 u_1 &= -e_1 - e_{\sigma 1} + i_1 r_1; \\
 u_2 &= e_2 + e_{\sigma 2} - i_2 r_2 \\
 e_1 &= -W_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt}; \\
 e_{\sigma 1} &= -L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt}; \quad e_{\sigma 2} = -L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} \\
 \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_1 r_1; \\
 \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} - \dot{I}_2 r_2 \\
 \dot{E}_{\sigma 1} &= -j\omega L_{\sigma 1} \dot{I}_1 = -jx_1 \dot{I}_1; \\
 \dot{E}_{\sigma 2} &= -j\omega L_{\sigma 2} \dot{I}_2 = -jx_2 \dot{I}_2 \\
 \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1; \\
 \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 r_2 - j\dot{I}_2 x_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \\
 \dot{I}_1 W_1 &= \dot{I}_0 W_1 - \dot{I}_2 W_2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U_2^1 &= U_2 \frac{W_1}{W_2}; & E_2^1 &= E_2 \cdot \frac{W_1}{W_2}; \\
 I_2^1 &= I_2 \frac{W_2}{W_1}; & r_2^1 &= \left(r_2 \frac{W_1}{W_2} \right)^2; \\
 x_2^1 &= \left(x_2 \frac{W_1}{W_2} \right)^2; & Z_H^1 &= Z_H \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2;
 \end{aligned}$$

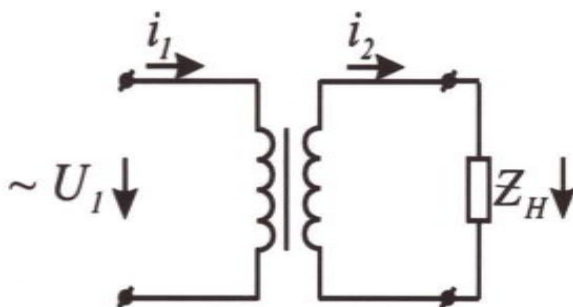
$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1;$$

$$\dot{U}_2^1 = \dot{E}_2^1 - \dot{I}_2^1 r_2^1 - j\dot{I}_2^1 x_2^1;$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2^1$$



Векторные диаграммы при активно-индуктивной (а) и активно-емкостной (б) нагрузках



Магнитный поток в сердечнике Φ_m не зависит от режима работы трансформатора, в том числе от нагрузки, а зависит от подведенного напряжения U_1

$$\Phi_m \propto U_1$$

Ток вторичной обмотки зависит от сопротивления нагрузки Z_H . Чем больше Z_H , тем меньше ток I_1 .

Ток первичной обмотки трансформатора I_1 зависит от тока I_2 . Чем больше I_2 , тем $> I_1$.

Это отражает свойство саморегулирования трансформатора.

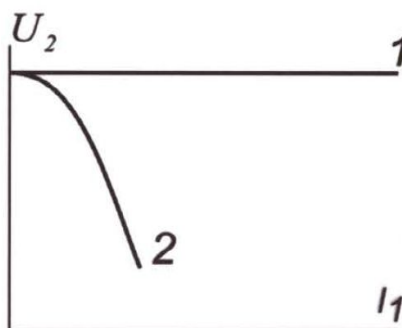
Внешняя характеристика трансформатора

Из уравнения равновесия вторичной обмотки

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2(R_2 + jX_2)$$

следует, что вторичное напряжение зависит от сопротивления вторичной обмотки

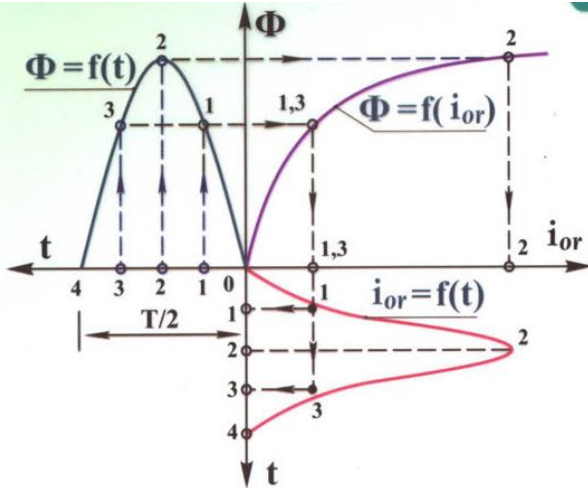
$$R_2 + jX_2$$



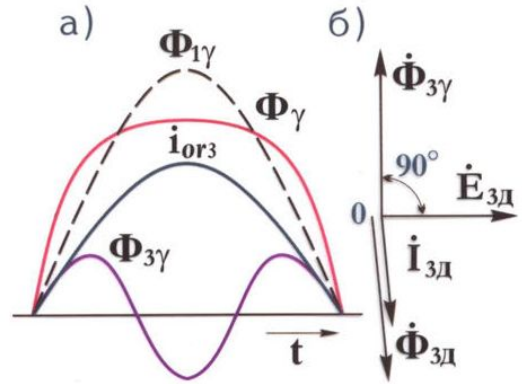
Внешняя характеристика при малом сопротивлении вторичной обмотки 1 и при повышенном сопротивлении вторичной обмотки 2.

**Глава 2.
Трансформаторы**

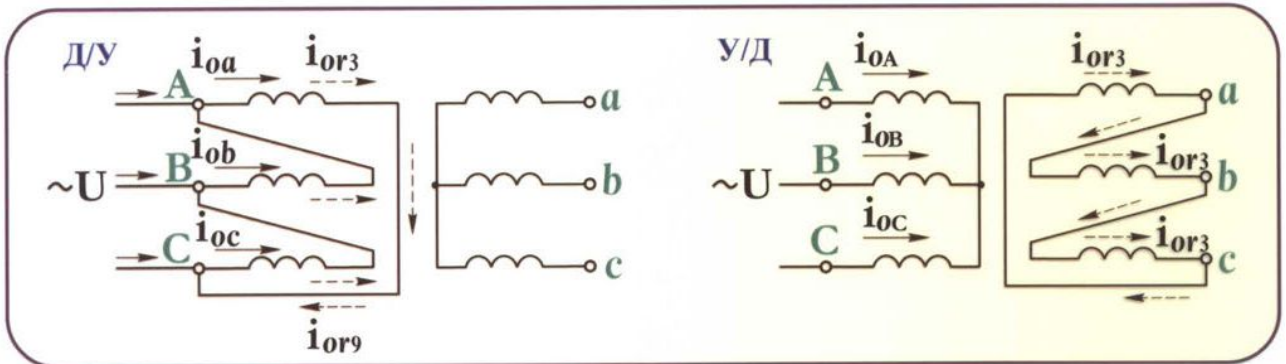
**Тема 7
Намагничивание
магнитопроводов
трансформатора**



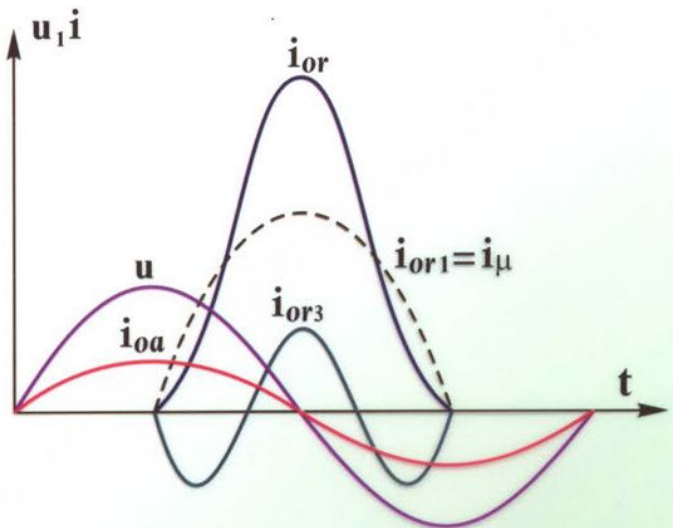
Определение реактивной составляющей тока холостого хода однофазного трансформатора



Форма кривой потока в магнитопроводе трёхфазного трансформатора с соединением обмоток по способу У/Д (а) и векторная диаграмма потоков и токов третьей гармоники (б)

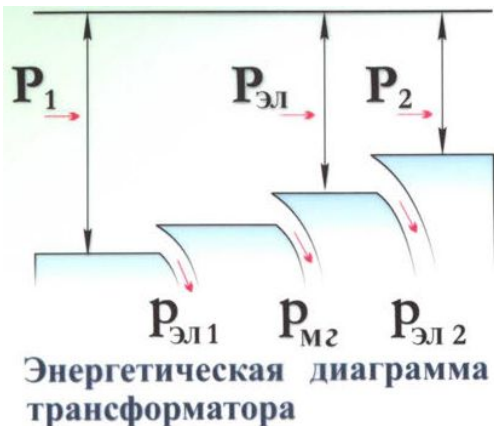


Реактивная составляющая тока холостого хода однофазного трансформатора и в фазе первичной обмотки трехфазного трансформатора с соединением обмоток Д/У



**Глава 2.
Трансформаторы**

**Тема 8
Потери , КПД и
характеристики
трансформатора**



$$\frac{d\eta}{dk_{H2}} = 0$$

$$P_o = k_{H2}^2 P_{KH75}$$

$$k_{H2m} = \sqrt{\frac{P_o}{P_{KH75}}}$$

$$P_2 = P_1 - p_{эл} - P_{M2}$$

$$P_{M2} \approx P_o$$

$$p_{эл} = p_{эл1} + p_{эл2} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 =$$

$$I_2^2 (r_{175}^1 + r_{275}) = I_2^2 r_{K75} = k_{H2}^2 I_{2H}^2 r_{K75} \approx k_{H2}^2 P_{KH75}$$

$$k_{H2} = I_2 / I_{2H} \quad r_{175}^1 = \frac{r_{175}}{k^2}$$

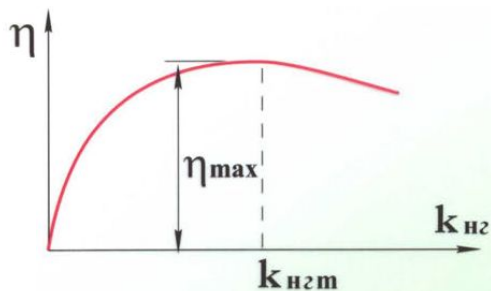
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{k_{H2} S_H \cos\varphi_2}{k_{H2} S_H \cos\varphi_2 + P_o + k_{H2}^2 P_{KH75}}$$

$$S_H = U_{2H} I_{2H}$$

$$P_{KH75} = I_{2H}^2 r_{K75} \quad \text{- однофазный трансформатор}$$

$$S_H = 3U_{2H} I_{2H}$$

$$P_{KH75} = 3I_{2H}^2 r_{K75} \quad \text{- трёхфазный трансформатор}$$

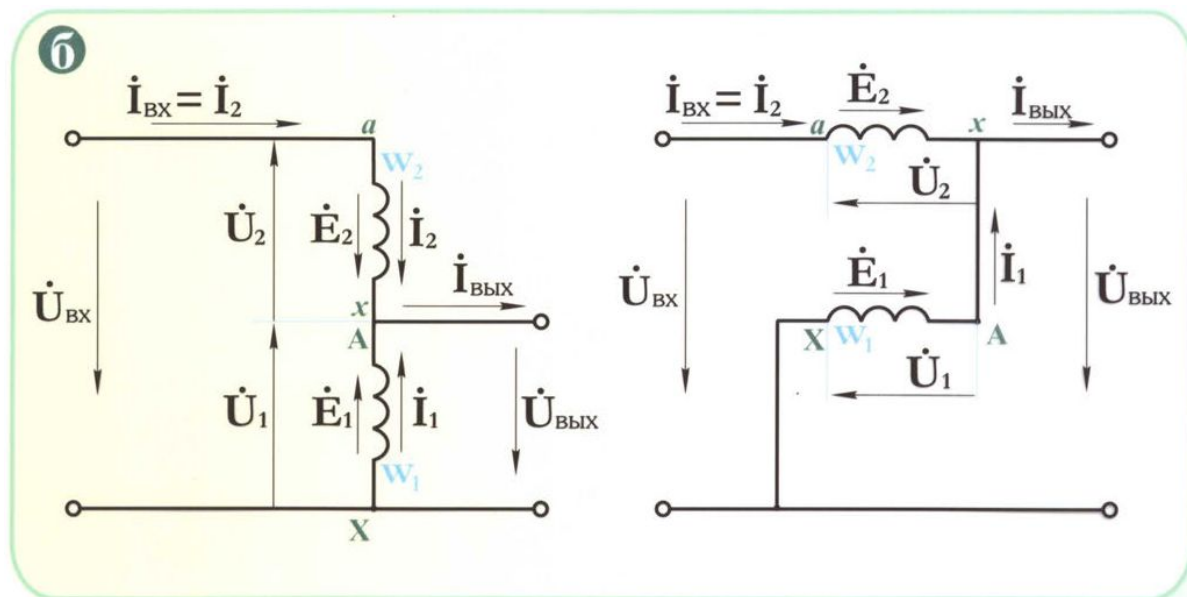
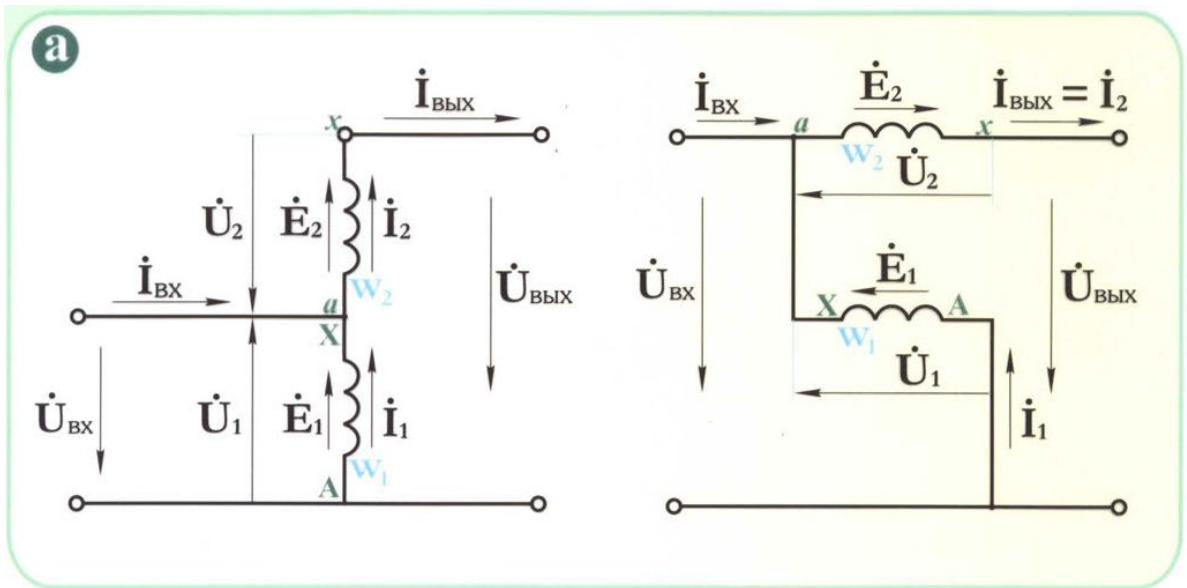


Зависимость КПД трансформатора от нагрузки

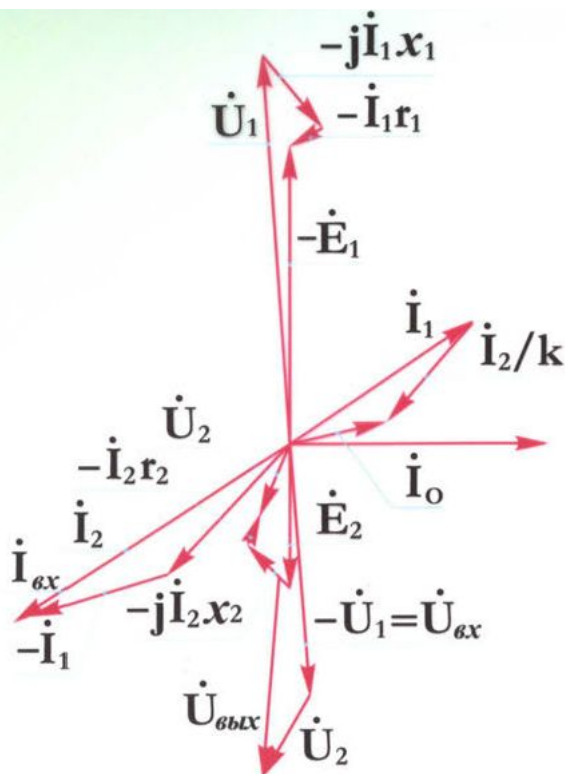
**Глава 2.
Трансформаторы**

Тема 9

Автотрансформаторы



Схемы включения однофазных автотрансформаторов: **а** -повышающего ; **б** - понижающего



$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_1$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 \underline{Z}_2$$

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2/k$$

$$k = \frac{W_1}{W_2}$$

Уравнения напряжения
и токов (схема а)

Векторная диаграмма (а)

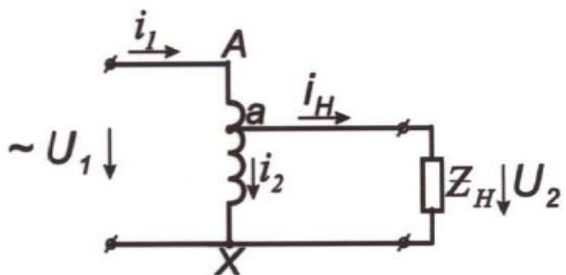
$$S_{ат} = U_{вх} \cdot I_{вх} \approx U_1 I_{вх} \approx U_{вых} I_2$$

$$S_{расч} = U_1 I_1 \approx U_2 I_2$$

$$\frac{S_{расч}}{S_{ат}} = \frac{U_2 I_2}{U_{вых} I_2} = \frac{U_2}{U_{вых}} = \frac{U_{вых} - U_{вх}}{U_{вых}} = \frac{k_{ат} - 1}{k_{ат}}, \text{ где } k_{ат} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$$

$$S_{расч} = S_{ат} \frac{k_{ат} - 1}{k_{ат}} = S_{ат} \left(1 - \frac{1}{1 + 1/k} \right)$$

$S_{расч}$ и $S_{ат}$ — проходная и расчётная мощности



Бывают однофазные и трехфазные, понижающие и повышающие
Часть энергии передается с помощью магнитного поля, часть - по проводам.

Уравнение МДС

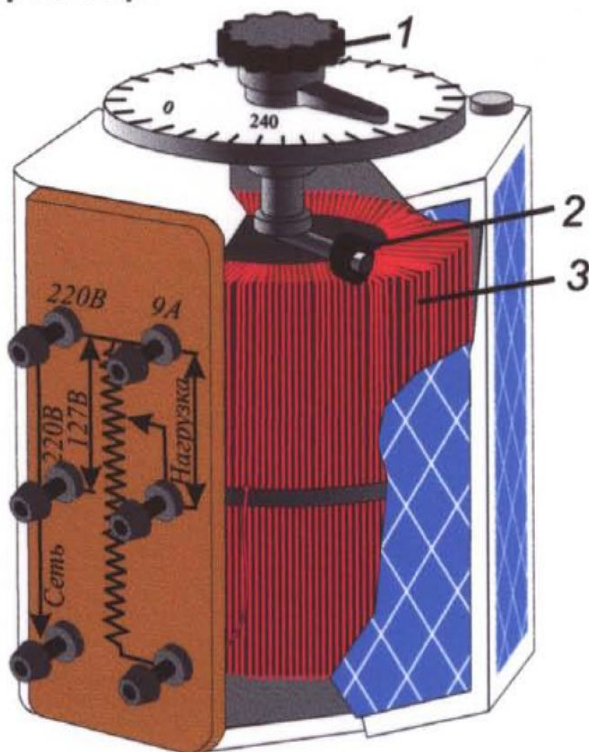
$$\dot{I}_1(\omega_1 - \omega_2) + \dot{I}_2 \omega_2 = 0$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_H$$

$$\text{Отсюда } I_2 = I_H \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}$$

Ток вторичной обмотки автотрансформатора I_2 меньше тока нагрузки.

На изготовление автотрансформатора идет меньше меди и стали, чем на трансформатор.

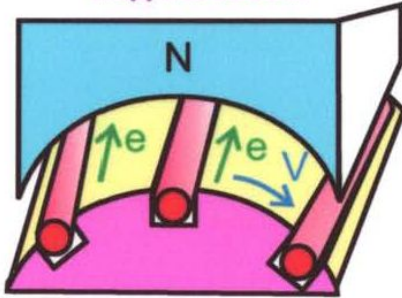


Общий вид лабораторного автотрансформатора

- 1 – ручка скользящего контакта;
- 2 – скользящий контакт;
- 3 – обмотка.

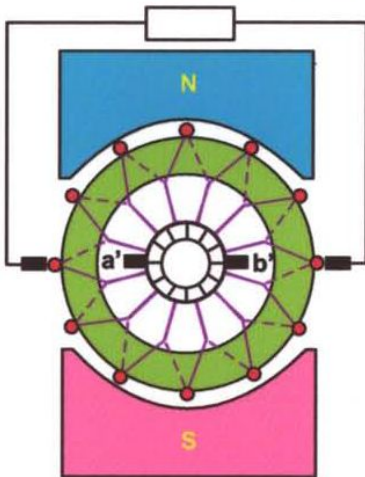
Электродвижущая сила якоря (ЭДС) и электромагнитный момент

Схема движения проводника под полюсом

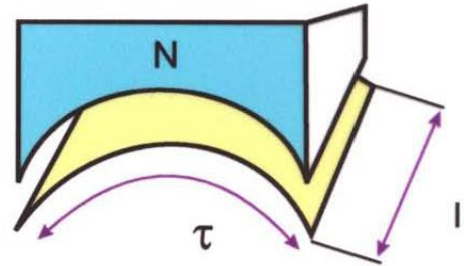


Соединение обмотки якоря с пластинами коллектора

Соединение обмотки якоря с пластинами коллектора

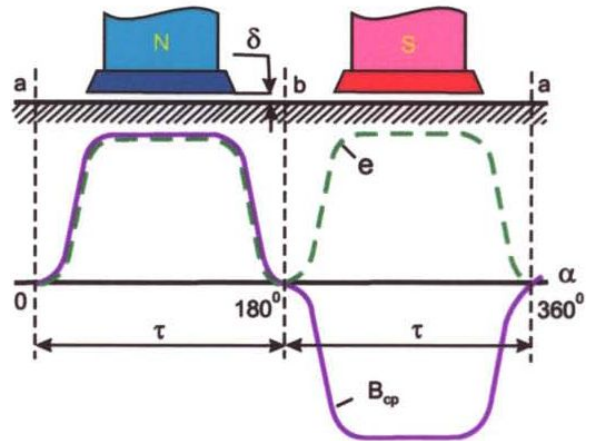


Площадь полюсного деления



Распределение магнитной индукции в зазоре и ЭДС двухполюсной машины

Распределение магнитной индукции в зазоре и ЭДС двухполюсной машины



ЭДС машины постоянного тока

$$E = \frac{pN}{60a} \Phi \omega = \frac{pN}{2pa} \Phi \omega = k\Phi \omega$$

- 2p - число пар полюсов;
- N - число проводников обмотки якоря;
- Φ - магнитный поток одного полюса, Вб;
- 2a - число параллельных ветвей обмотки якоря;

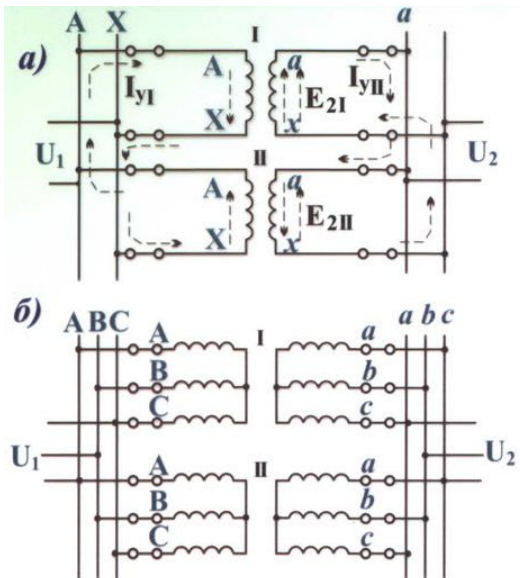
Электромагнитный момент машины постоянного тока

$$M_{эм} = \frac{pN}{2pa} \Phi I_я = k\Phi I_я$$

- ω - угловая скорость якоря, 1/с;
- M_{эм} - электромагнитный момент, Н·м;
- E - ЭДС машины, В;
- I_я - ток якоря, А;
- p - частота вращения якоря, об/мин;

**Глава 2.
Трансформаторы**

**Тема 10
Параллельная работа
трансформаторов**



Схемы параллельной работы однофазных (а) и трёхфазных (б) двухобмоточных трансформаторов

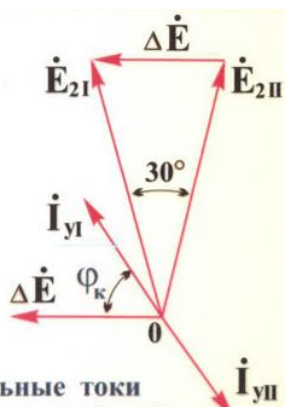


$$I_1 Z_{K1} = I_2 Z_{K2} = I_3 Z_{K3} = \dots = I_n Z_{Kn} ; I_1 Z_{K1} = I_2 Z_{K2} = I_3 Z_{K3} = \dots = I_n Z_{Kn}$$

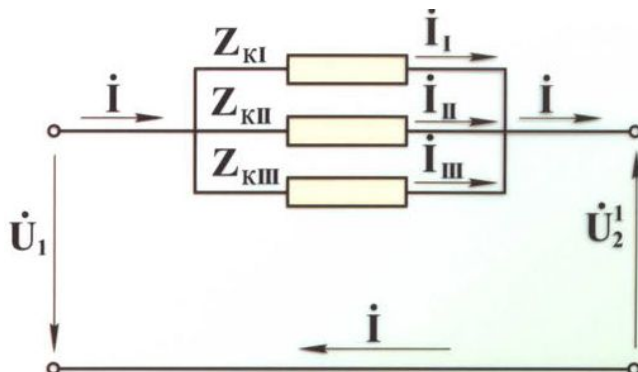
$$I_1 : I_2 : I_3 = \frac{1}{Z_{K1}} : \frac{1}{Z_{K2}} : \frac{1}{Z_{K3}} \text{ ИЛИ } I_1 : I_2 : I_3 = \frac{I_{НОМ I}}{I_{НОМ I} Z_{K1}} : \frac{I_{НОМ II}}{I_{НОМ II} Z_{K2}} : \frac{I_{НОМ III}}{I_{НОМ III} Z_{K3}}$$

После умножения левой части на $U_2 \cos \varphi_2$, а правой на $U_{НОМ}^2 / 100\%$:

$$P_1 : P_2 : P_3 = \frac{S_{НОМ I}}{u_{K1}} : \frac{S_{НОМ II}}{u_{K2}} : \frac{S_{НОМ III}}{u_{K3}}$$



Уравнительные токи при параллельной работе трансформаторов У/Д-11 и У/У -0



Упрощённая схема замещения трансформаторов при параллельной работе