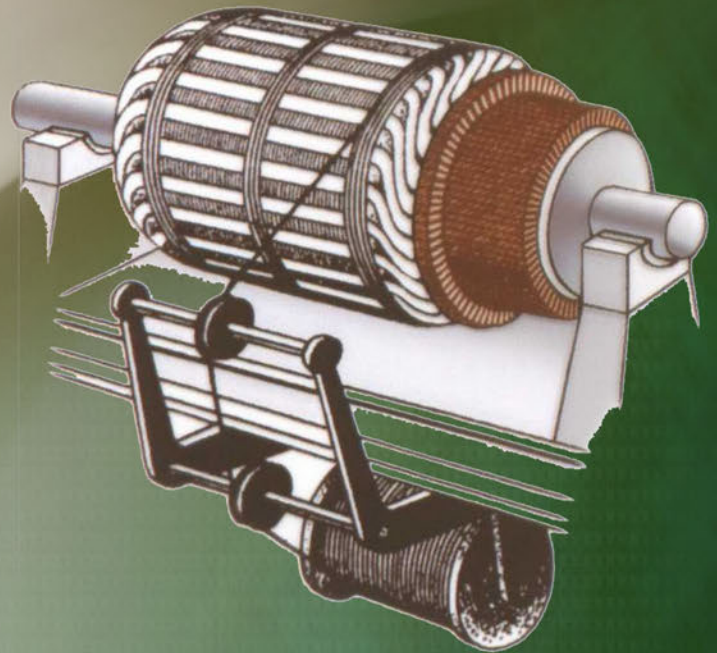
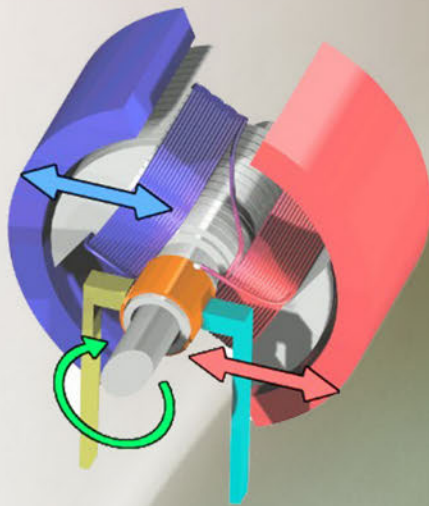
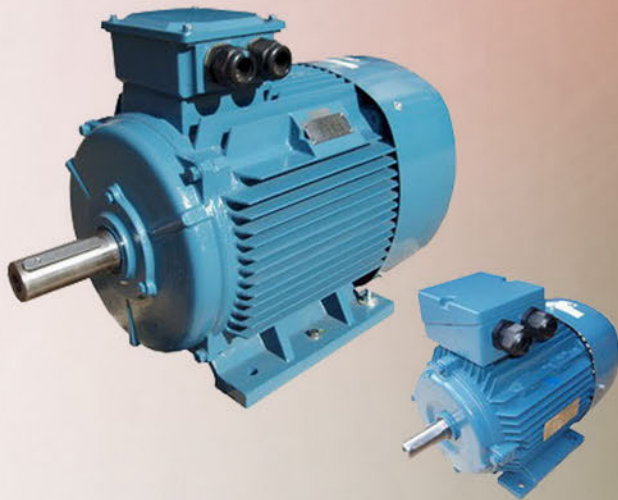


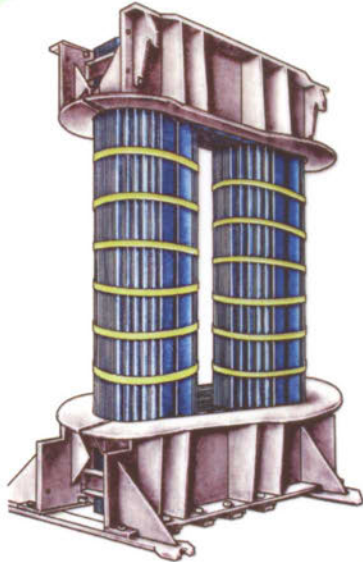
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Плакаты,
схемы



ТРАНСФОРМАТОРЫ

Шихтованный двухрамный магнитопровод однофазного трансформатора

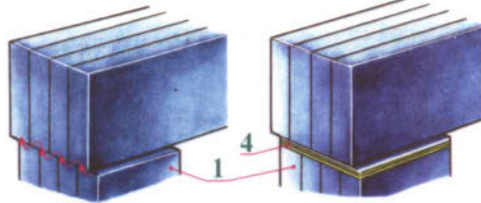


ТИПЫ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

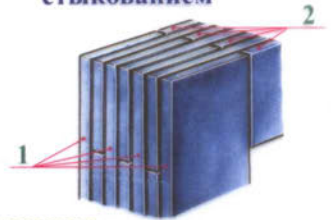
Стыковое соединение стержня и ярма

БЕЗ ПРОКЛАДКИ

С ИЗОЛИРУЮЩЕЙ ПРОКЛАДКОЙ



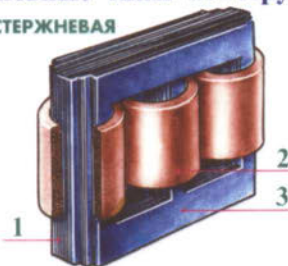
Сборка (шихтовка) пластин вперелёт с прямым стыкованием



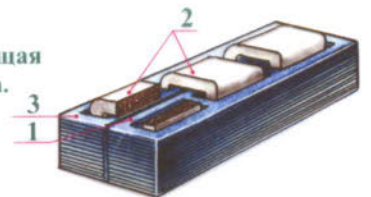
Основные типы конструкций магнитопроводов

СТЕРЖНЕВАЯ

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



БРОНЕВАЯ



Схемы шихтовки магнитопроводов

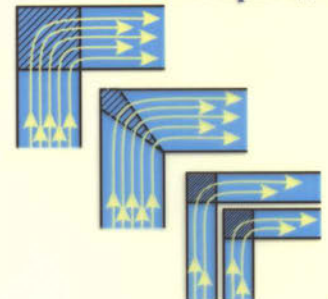
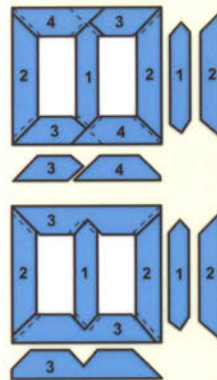
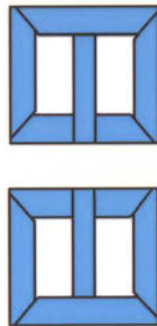
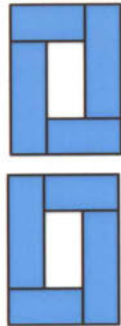
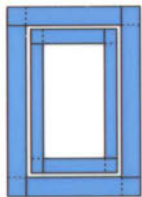
С ПРЯМЫМИ СТЫКАМИ ПЛАСТИН

С КОМБИНИРОВАННЫМИ СТЫКАМИ

С КОСЫМИ СТЫКАМИ

Направление магнитного потока в углах магнитопровода

Схема двухрамной магнитной системы



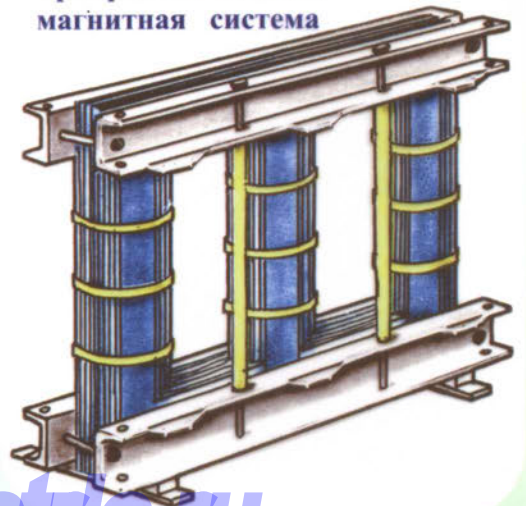
Пространственная навитная магнитная система



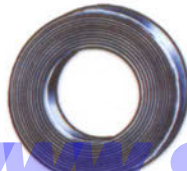
Пространственная стыковая магнитная система



Трёхфазная плоская магнитная система

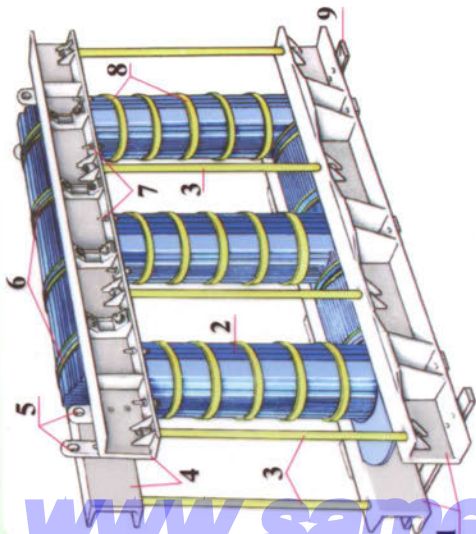


Плоские навитные магнитные системы

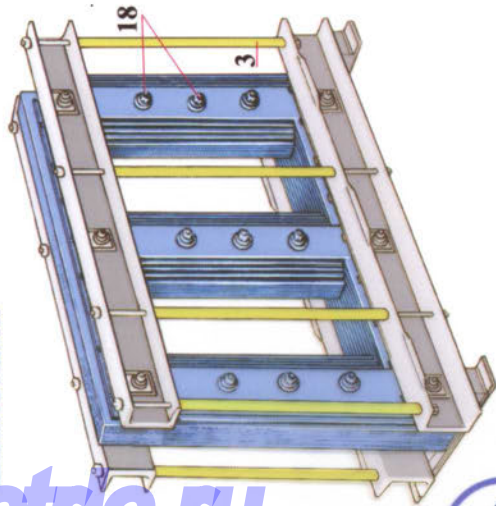


ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трёхфазная магнитная система с прессовкой стержней стеклобандажами

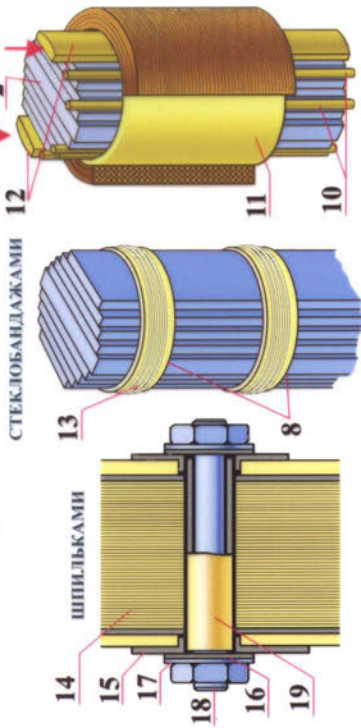


Трёхфазная магнитная система с прессовкой шпильками



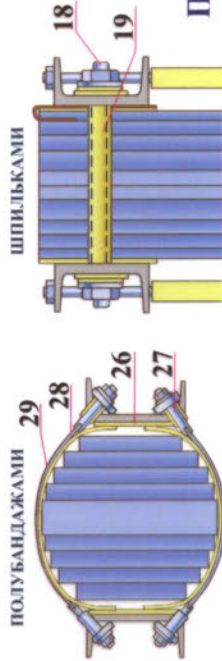
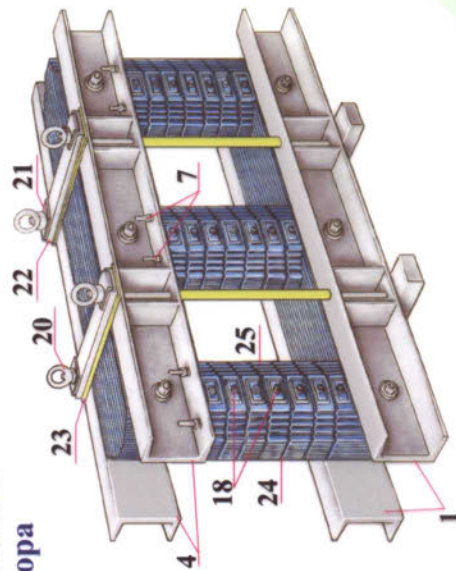
- 1-нижние ярмовые балки;
- 2-стержень магнитопровода;
- 3-вертикальные связующие шпильки с бумажно-бакелитовыми трубками;
- 4-верхние ярмовые балки;
- 5-подъемные планки;
- 6-полубандажи (стяжки);
- 7-винты для прессовки обмоток;
- 8-стеклобандажи;
- 9-стальные опорные стержни;
- 10-бумажно-бакелитовый цилиндр;
- 12-деревянные клинья;
- 13-полоса электрокартона;
- 14-активная (электротехническая) сталь стержня;

Прессовка стержней магнитопровода



- 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-изолирующие пластины, образующие "зазоры" стержня;
- 24-немагнитные пластины, образующие "зазоры" стержня;
- 25-вставка стержня реактора;
- 26-изолирующая пластина;
- 27-шпилька полубандажа;
- 28-изолирующая полоса электрокартона;
- 29-стальная полоса полубандажа.

Магнитная система трёхфазного реактора



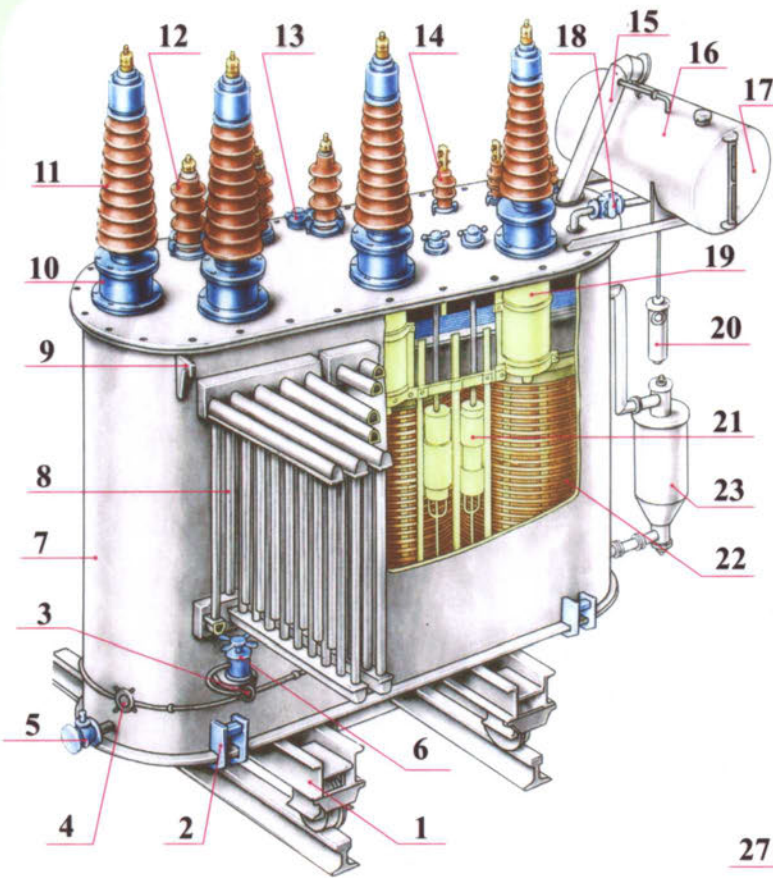
Прессовка ярма магнитопровода



ТРАНСФОРМАТОРЫ

**СИЛОВОЙ ТРАНСФОРМАТОР.
РЕАКТОР**

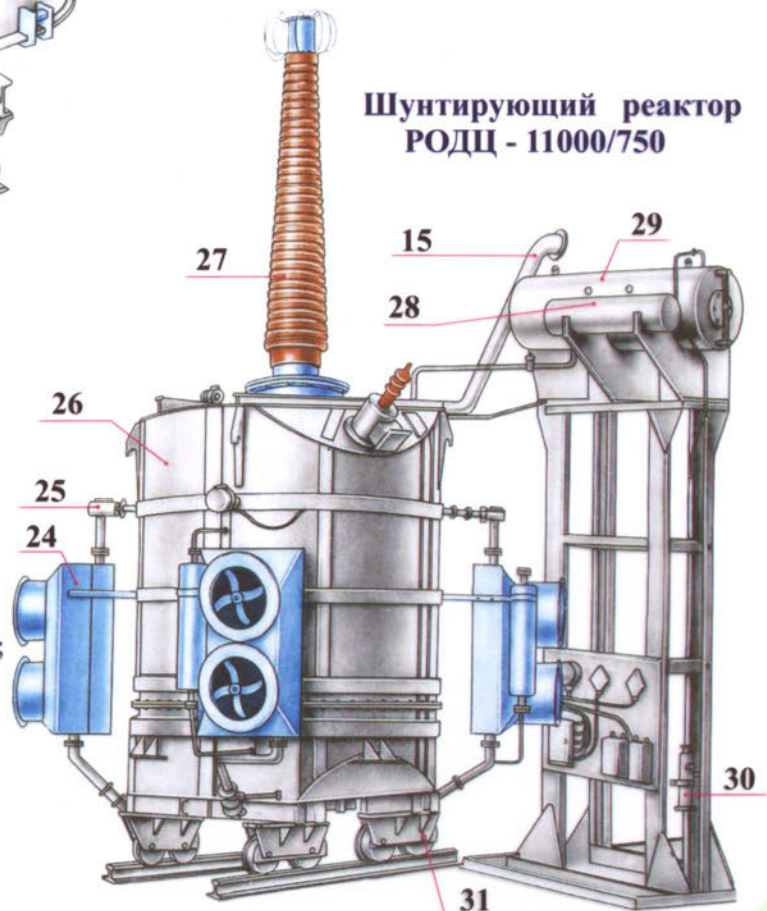
Трехфазный трехобмоточный трансформатор ТДТГ - 16000/110



- 1- каретка однокатовая;
- 2- площадка для установки домкрата;
- 3- распределительная коробка;
- 4- кран для слива масла;
- 6- электроventильатор;
- 7- бак трансформатора;
- 8- радиатор охлаждения;
- 9- крюк для подъема полностью собранного трансформатора;
- 10- переходный фланец (адаптер) с трансформаторами тока;
- 11- ввод ВН (110 кВ);
- 12- ввод СН (35 кВ);
- 13- привод переключающего устройства;
- 14- ввод СН (10 кВ);
- 15- предохранительная труба.

- 16- расширитель;
- 17- маслоуказатель;
- 18- газовое реле;
- 19- бумажно-бакелитовый цилиндр ввода 110 кВ;
- 20- воздухоосушитель;
- 21- переключающее устройство ПБВ;
- 22- обмотка ВН;
- 23- термосифонный фильтр;
- 24- маслоохладитель типа ДЦ;
- 25- центробежный электронасос ЭЦТ;
- 26- бак реактора;
- 27- герметичный ввод 750 кВ;
- 28- расширитель ввода 750 кВ (бачок давления);
- 29- расширитель реактора;
- 30- воздухоосушитель;
- 31- каретка двухкатная.

Шунтирующий реактор РОДЦ - 11000/750



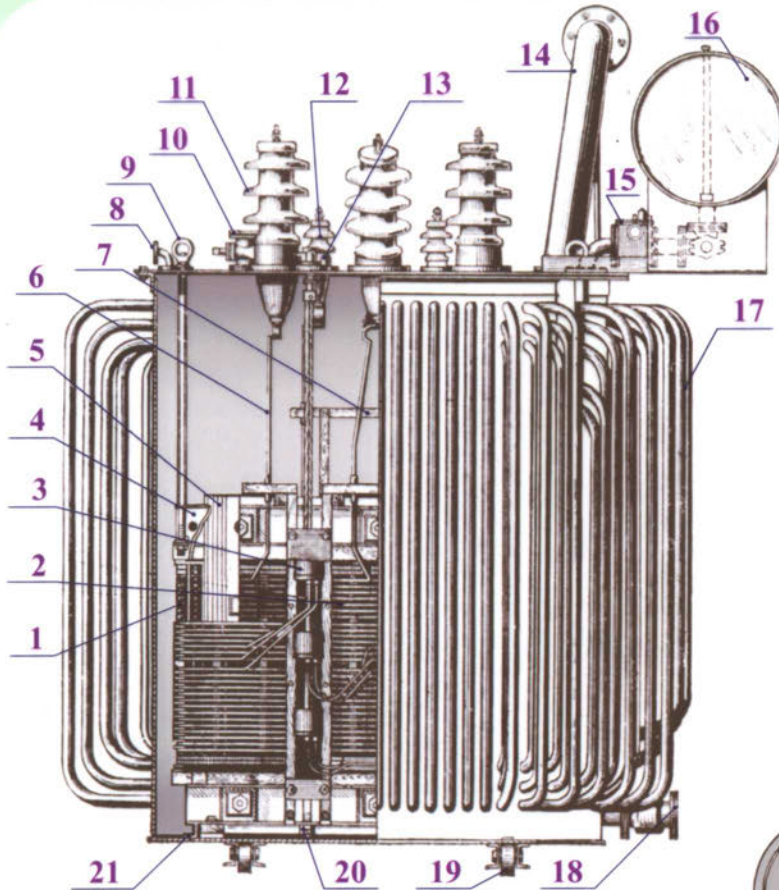
РНПО Росучприбор Южно-Уральский Государственный университет



ТРАНСФОРМАТОРЫ

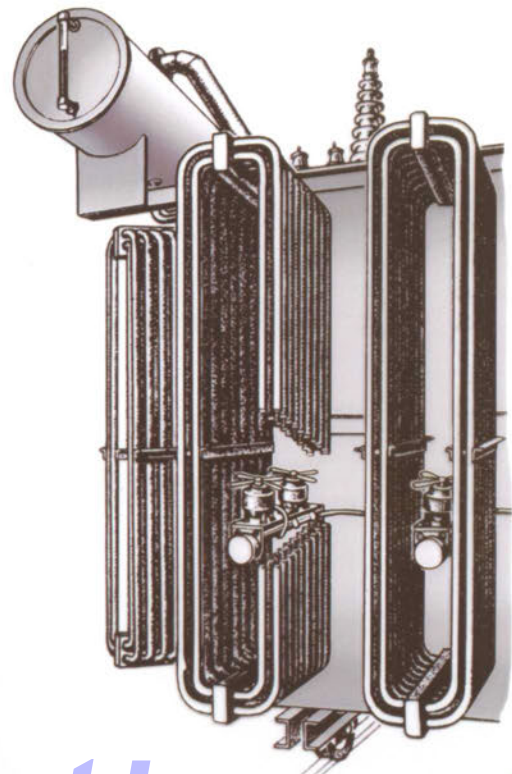
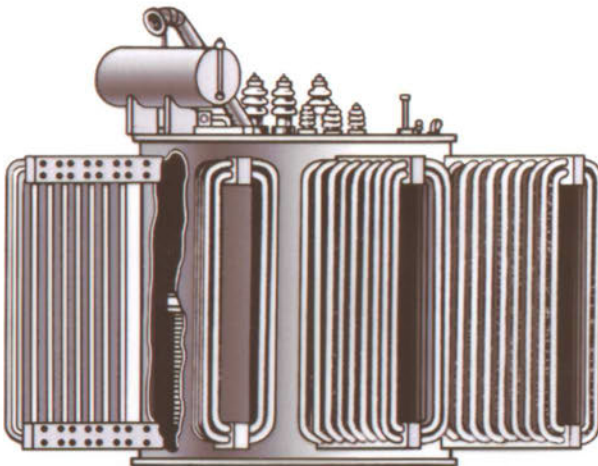
Трансформатор с
трубчатым баком

**ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ И СПОСОБЫ
ОХЛАЖДЕНИЯ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**



- 1- обмотка ВН;
- 2- обмотка НН;
- 3- переключатель регулировочных отводов обмотки ВН;
- 4- балка, прессующая ярмо;
- 5- шихтованный магнитопровод;
- 6- отводы ВН;
- 7- отводы НН;
- 8- патрубок для присоединения вакуумного насоса;
- 9- кольцо для подъема 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.

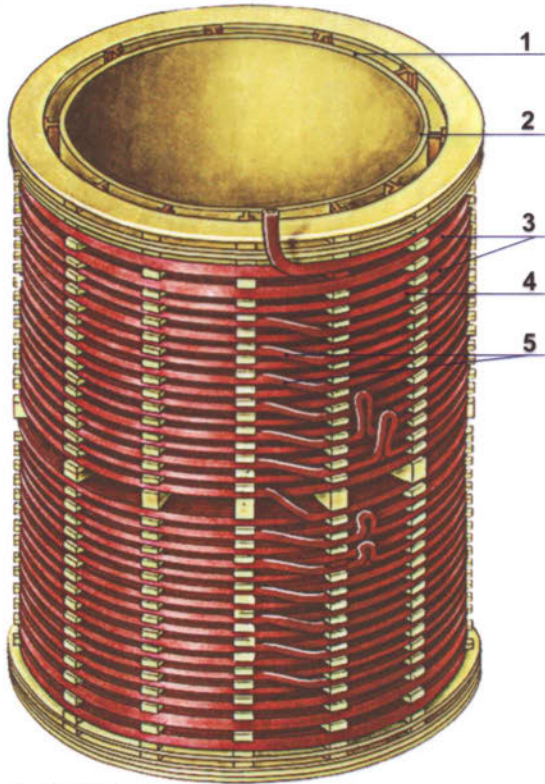
- 19- транспортный ролик;
- 20- вертикальная шпилька для стягивания прессующих балок ярма;
- 21- упорный угольник на дне бака.



ТРАНСФОРМАТОРЫ

НЕПРЕРЫВНЫЕ ОБМОТКИ

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

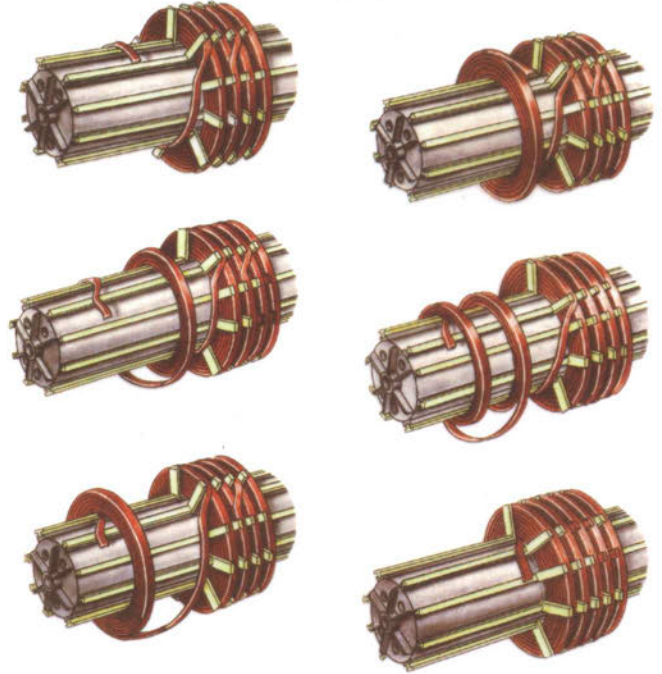
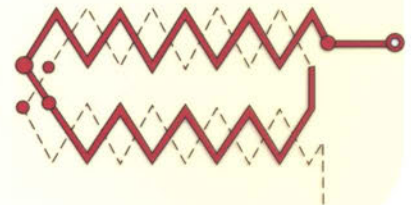
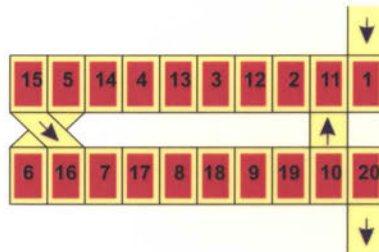
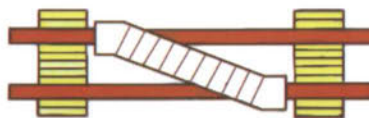


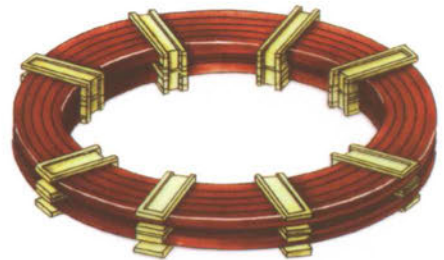
Схема намотки петлевой обмотки



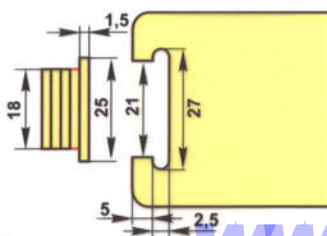
Изоляция перехода



Двойная дисковая катушка



Форма поперечного сечения реек



Форма межкатушечных прокладок

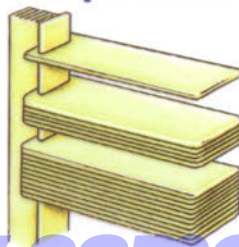


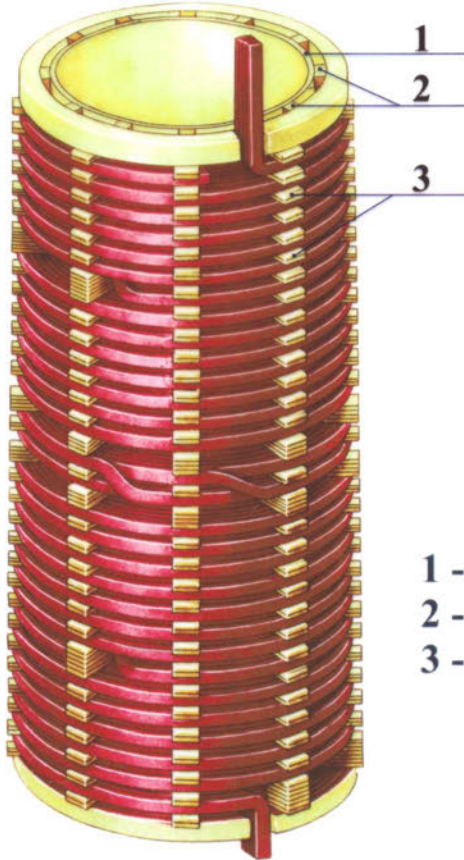
Схема транспозиции параллельных проводов



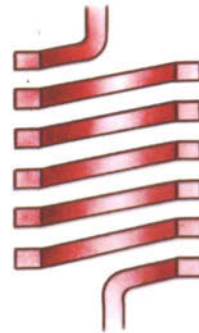
ТРАНСФОРМАТОРЫ

Одноходовая обмотка

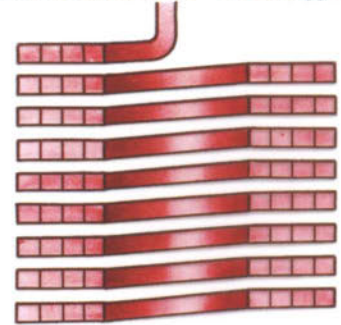
ВИНТОВЫЕ ОБМОТКИ



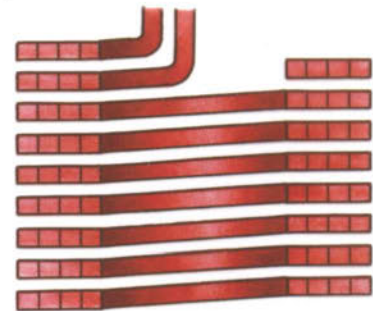
ОДНОХОДОВАЯ



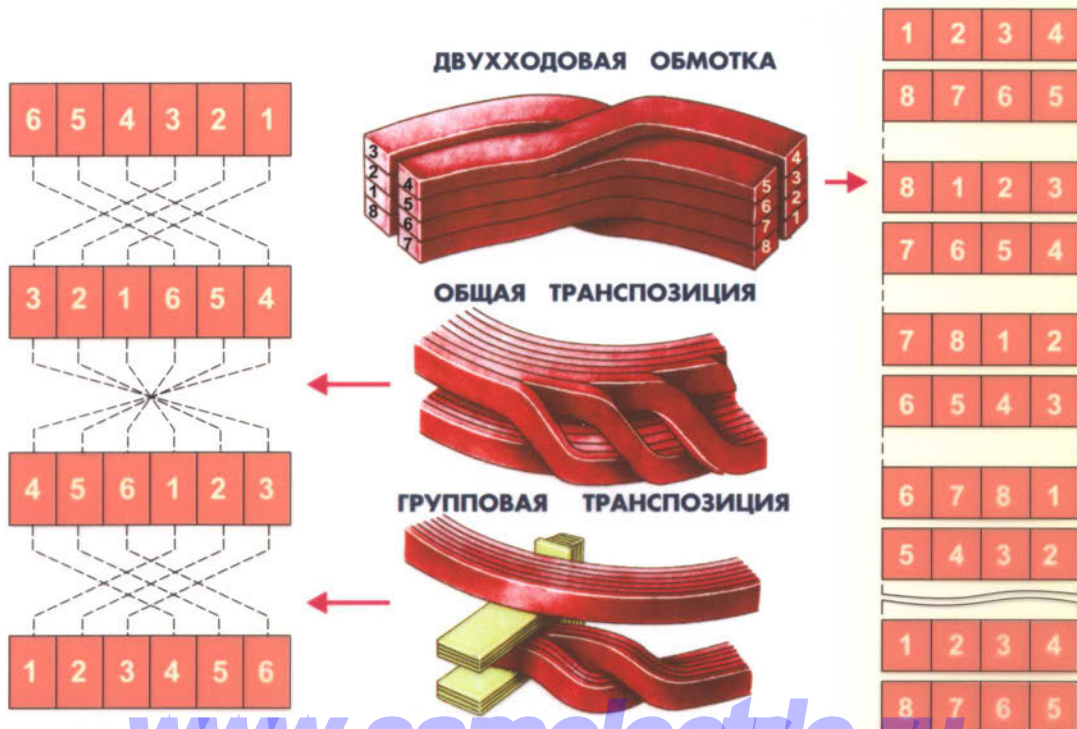
ОДНОХОДОВАЯ ИЗ ЧЕТЫРЕХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОВОДОВ



ДВУХХОДОВАЯ



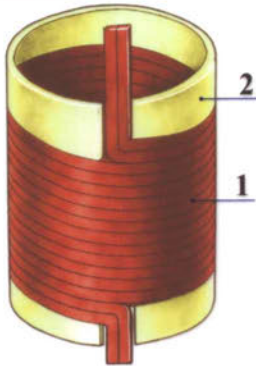
- 1 - цилиндр;
- 2 - рейки;
- 3 - прокладки.



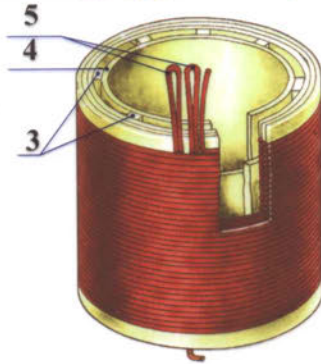
ТРАНСФОРМАТОРЫ

ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ОБМОТКИ

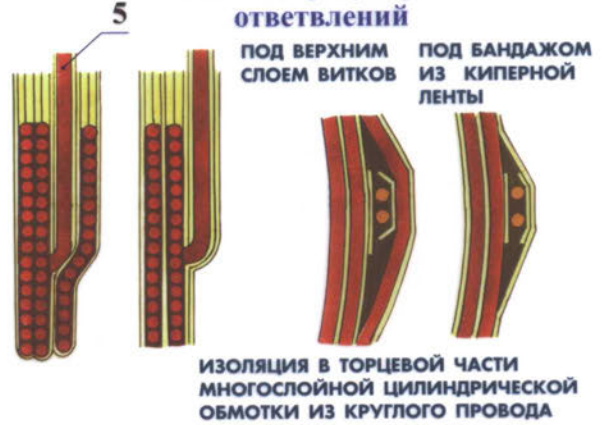
Цилиндрическая однослойная обмотка



Цилиндрическая многослойная обмотка из круглого провода

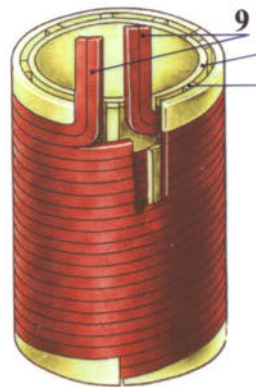


Расположение регулировочных ответвлений

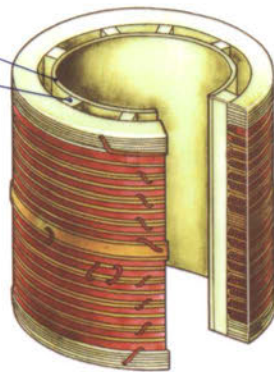


ИЗОЛЯЦИЯ В ТОРЦЕВОЙ ЧАСТИ МНОГОСЛОЙНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБМОТКИ ИЗ КРУГЛОГО ПРОВОДА

Цилиндрическая двухслойная обмотка



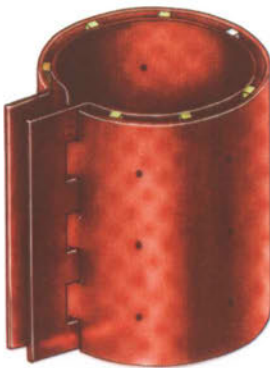
Катушечная многослойная обмотка



ВЫПОЛНЕНИЕ ОТВЕТВИЙ



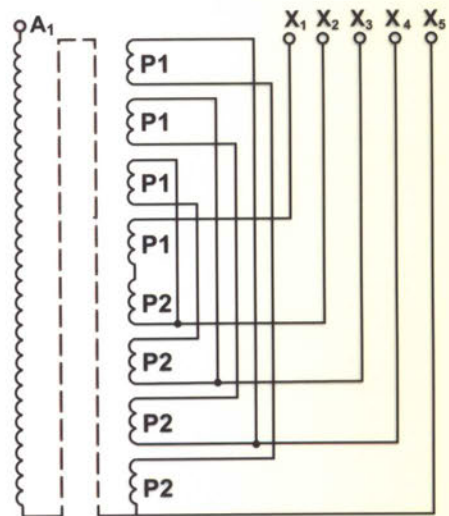
Листовая обмотка электродвигателя трансформатора



Цилиндрическая обмотка из фольги



Магнитно-симметричная схема многослойной обмотки с пятью регулировочными ответвлениями



1 - витки прямоугольного провода;
2 - разрезные выравнивающие кольца;
3 - вертикальные рейки;

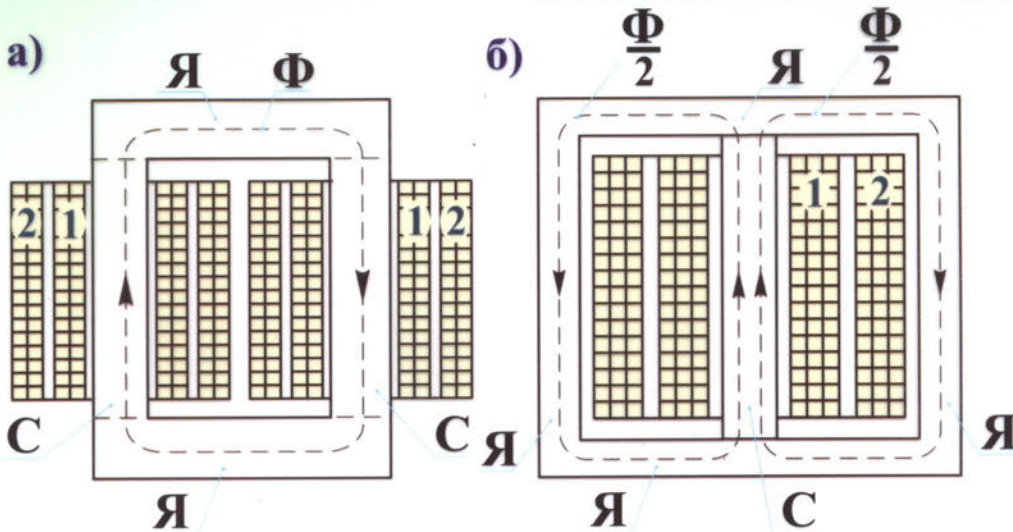
4 - бумажно-бакелитовый цилиндр;
5 - внутренние ответвления обмотки;
6 - экран;

7 - бортики из электрокартона;
8 - междуслойная изоляция;
9 - выводы обмотки.

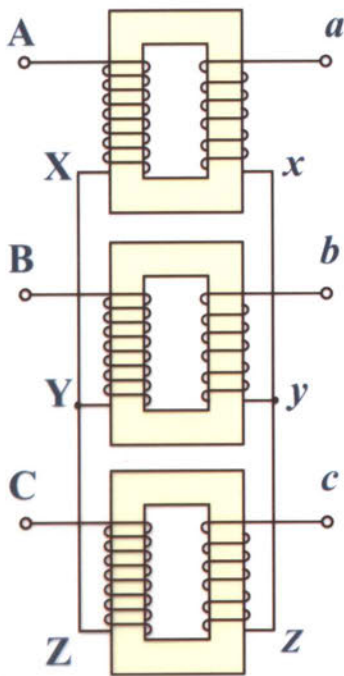
www.samelectric.ru

ТРАНСФОРМАТОРЫ

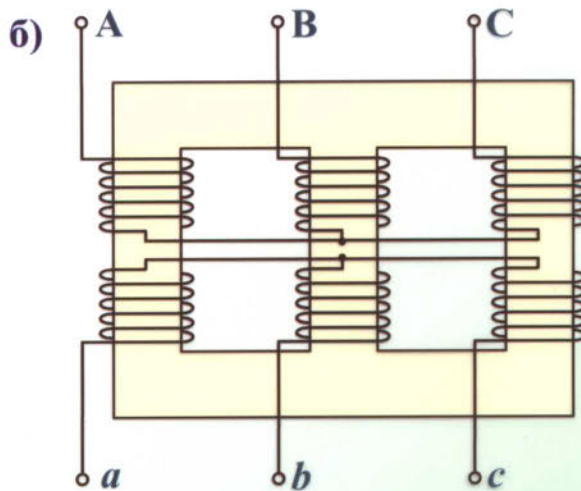
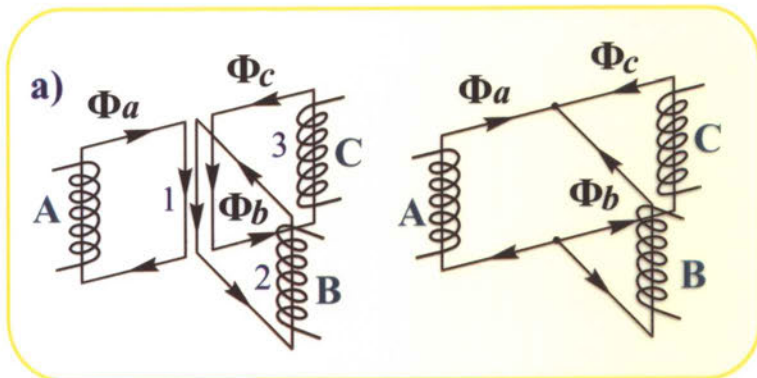
КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ ОДНОФАЗНЫХ И ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ



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



Трёхфазная трансформаторная группа

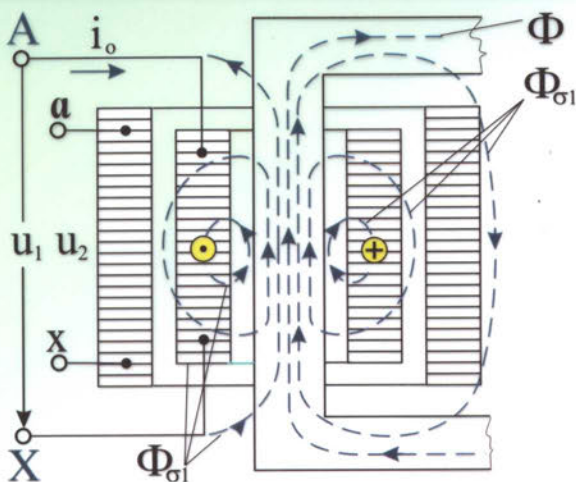


Принцип образования трёхфазного трёхстержневого трансформатора



ТРАНСФОРМАТОРЫ

ХОЛОСТОЙ ХОД
ТРАНСФОРМАТОРА



Картина потоков при холостом ходе

$$u_1 + e_1 + e_{\sigma 1} = i_o r_1$$

$$u_1 = -e_1 - e_{\sigma 1} + i_o r_1$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + i_o r_1$$

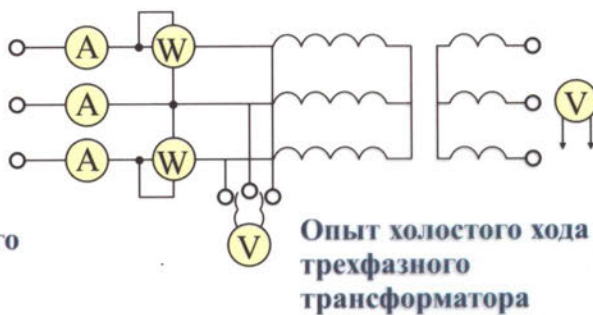
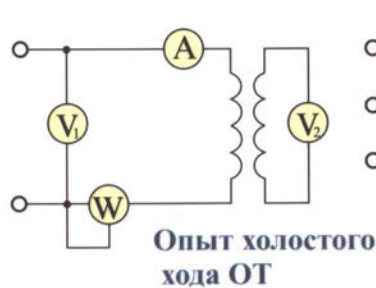
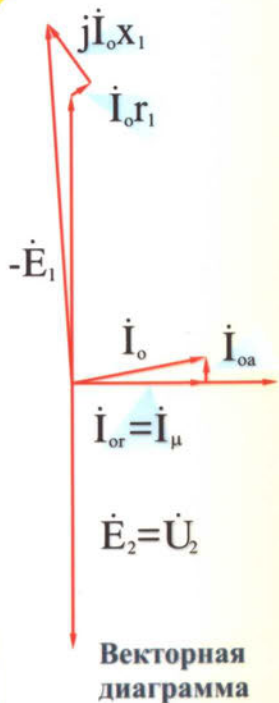
$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j \dot{I}_o x_1 + \dot{I}_o r_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_o \underline{Z}_1$$

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$$

$$I_o = \sqrt{I_{oa}^2 + I_{or}^2}$$

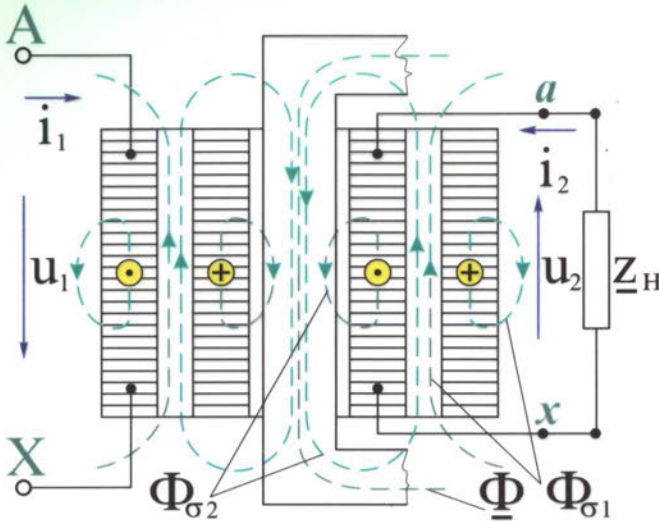
$$I_o = \frac{E_1}{Z_m} \approx \frac{U_1}{Z_m} \quad Z_m \approx \frac{U_1}{I_o} \quad r_m = \frac{P_{MF}}{I_o^2} \approx \frac{P_o}{I_o^2} \quad x_m = \sqrt{Z_m^2 + r_m^2}$$

$$E_1 = 4,44 W_1 f \Phi \quad E_2 = 4,44 W_2 f \Phi \quad k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} \approx \frac{U}{U_{20}}$$



ТРАНСФОРМАТОРЫ

НАГРУЗКА ТРАНСФОРМАТОРА



Приведенный трансформатор

$$u_1 = -e_1 - e_{\sigma 1} + i_1 r_1;$$

$$u_2 = e_2 + e_{\sigma 2} - i_2 r_2$$

$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt};$$

$$e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt}; \quad e_{\sigma 2} = -L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt}$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_1 r_1;$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} - \dot{I}_2 r_2$$

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\omega L_{\sigma 1} \dot{I}_1 = -jx_1 \dot{I}_1;$$

$$\dot{E}_{\sigma 2} = -j\omega L_{\sigma 2} \dot{I}_2 = -jx_2 \dot{I}_2$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1;$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 r_2 - j\dot{I}_2 x_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$$

$$i_1 W_1 = i_0 W_1 - i_2 W_2$$

$$U_2^1 = U_2 \frac{W_1}{W_2}; \quad E_2^1 = E_2 \cdot \frac{W_1}{W_2};$$

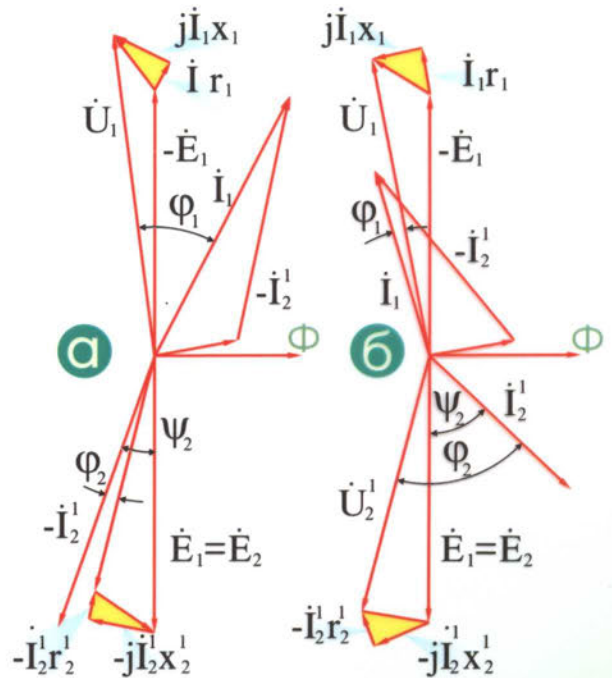
$$I_2^1 = I_2 \frac{W_2}{W_1}; \quad r_2^1 = \left(r_2 \frac{W_1}{W_2} \right)^2;$$

$$x_2^1 = \left(x_2 \frac{W_1}{W_2} \right)^2; \quad Z_H^1 = Z_H \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2;$$

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

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

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

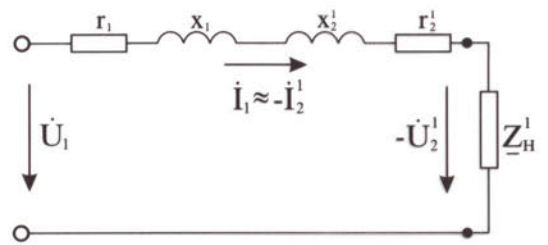
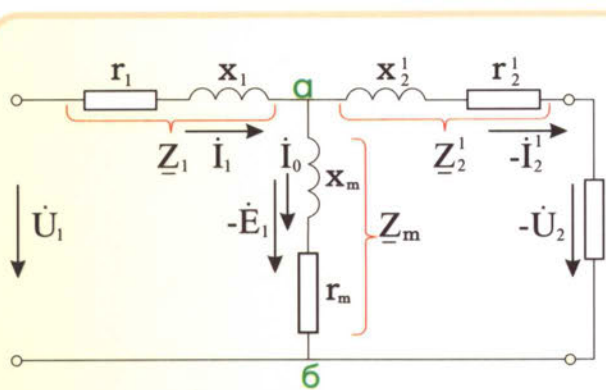
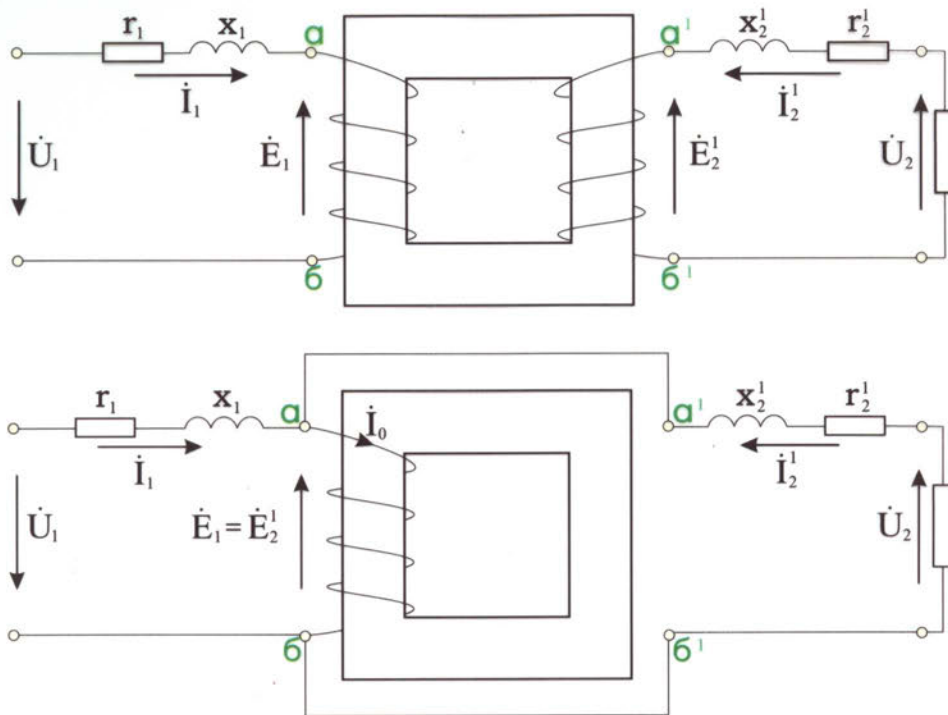


Векторные диаграммы при активно-индуктивной (а) и активно-емкостной (б) нагрузках



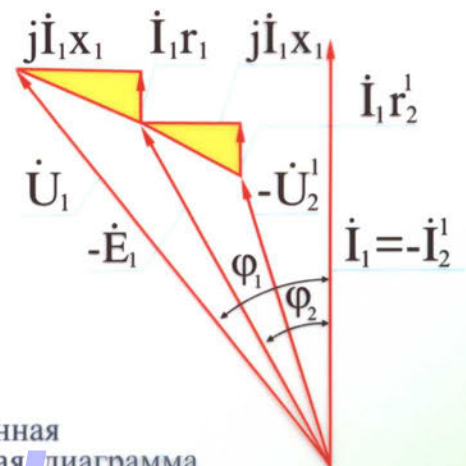
ТРАНСФОРМАТОРЫ

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА



Упрощенная схема замещения

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

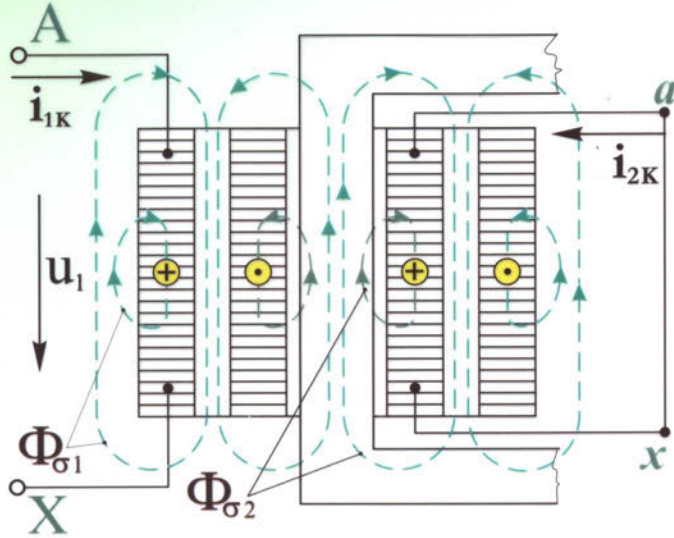


Упрощенная векторная диаграмма



ТРАНСФОРМАТОРЫ

РЕЖИМ УСТАНОВИВШЕГОСЯ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА



Картина потоков при коротком замыкании

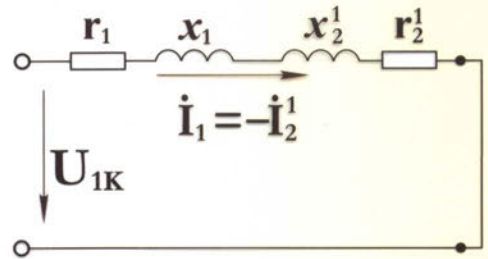


Схема замещения при коротком замыкании (КЗ)

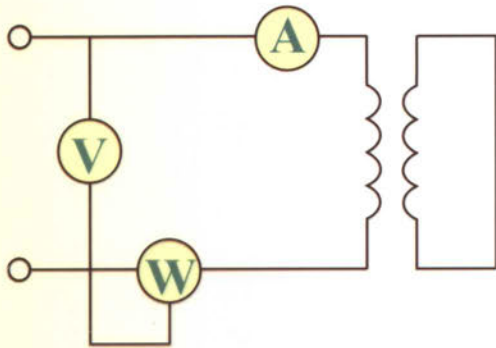
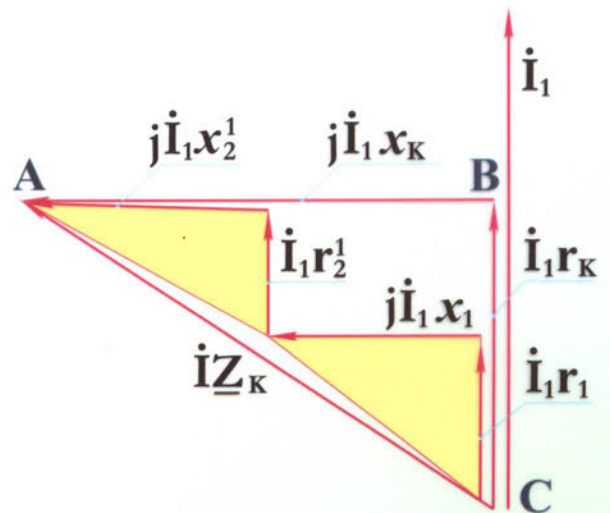


Схема опыта КЗ однофазного трансформатора



Треугольник КЗ

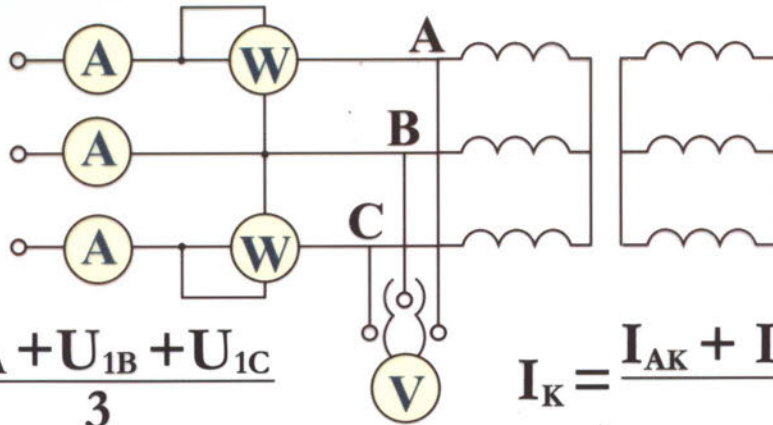
РНПО Росучприбор Южно-Уральский Государственный университет



ТРАНСФОРМАТОРЫ

РЕЖИМ УСТАНОВИВШЕГОСЯ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Потери и параметры кз



$$U_{1K} = \frac{U_{1A} + U_{1B} + U_{1C}}{3}$$

$$I_K = \frac{I_{AK} + I_{BK} + I_{CK}}{3}$$

Схема опыта К3 трёхфазного трансформатора

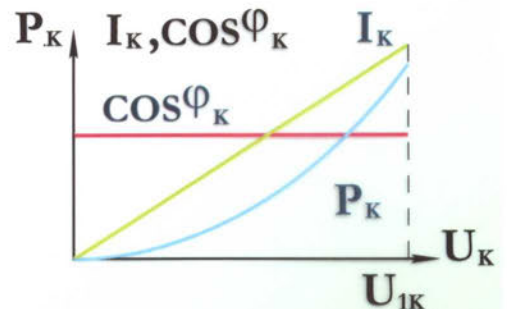
$$z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1K}} ; P_K \approx P_{эл} ; r_K = \frac{P_K}{I_{1K}^2} ; x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}$$

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

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

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

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



Характеристики К3

ТРАНСФОРМАТОРЫ

ИЗМЕНЕНИЕ ВТОРИЧНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

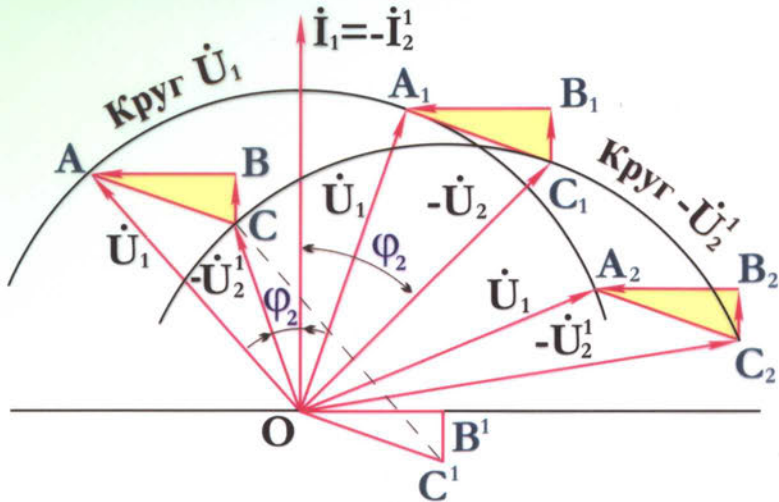
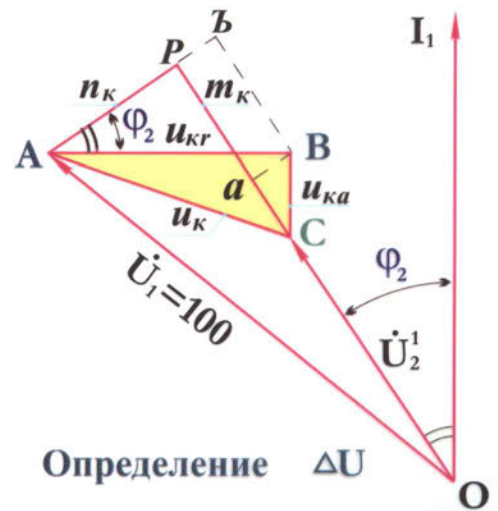


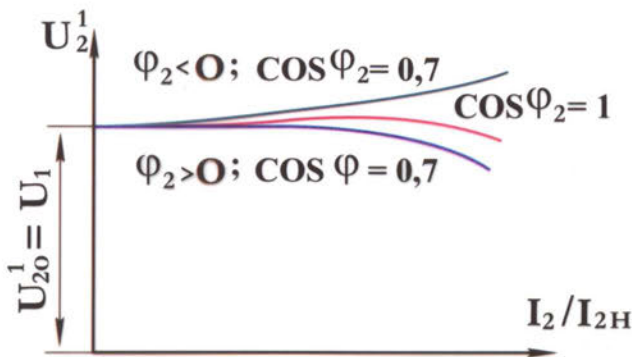
Диаграмма $U_2 = f(\cos \varphi_2)$

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{U_{2H} - U_2}{U_{2H}} 100 = \\ &= \frac{U_{2H}^1 - U_2^1}{U_{2H}^1} 100 = \\ &= \frac{U_1 - U_2^1}{U_1} 100 \end{aligned}$$

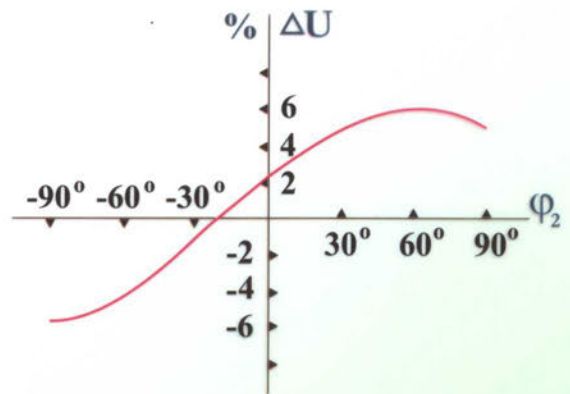
$$\begin{aligned} \Delta U &= (u_{ka} \cos \varphi_2 + u_{kr} \sin \varphi_2) + \\ &+ \frac{(u_{kr} \cos \varphi_2 - u_{ka} \sin \varphi_2)}{200} \approx \\ &\approx (u_{ka} \cos \varphi_2 + u_{kr} \sin \varphi_2) k_{H2} \end{aligned}$$



Определение ΔU



Внешние характеристики трансформатора

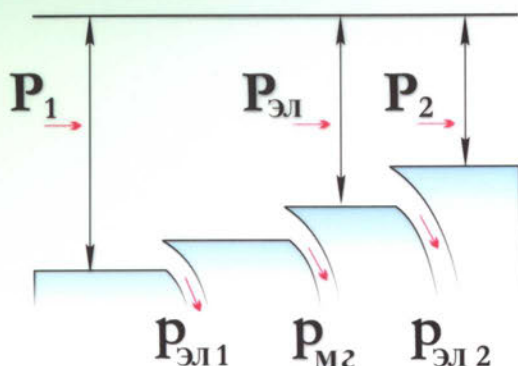


Зависимость изменения напряжения от характера нагрузки



ТРАНСФОРМАТОРЫ

ПОТЕРИ И КПД
ТРАНСФОРМАТОРА



Энергетическая диаграмма трансформатора

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

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

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

$$P_2 = P_1 - P_{эл} - P_{м2}$$

$$P_{м2} \approx P_o$$

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

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

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

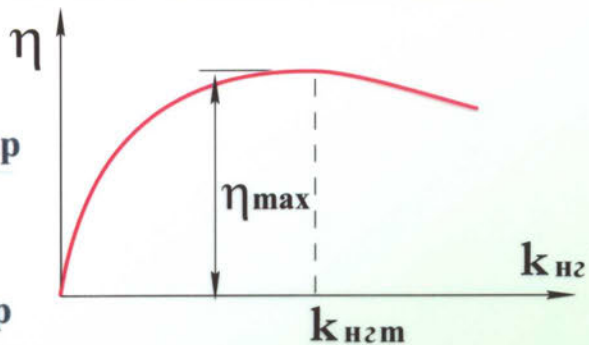
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{k_{H2} S_H \cos\varphi_2}{k_{H2} S_H \cos\varphi_2 + P_o + k_{H2}^2 P_{KH75}}$$

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

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

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

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

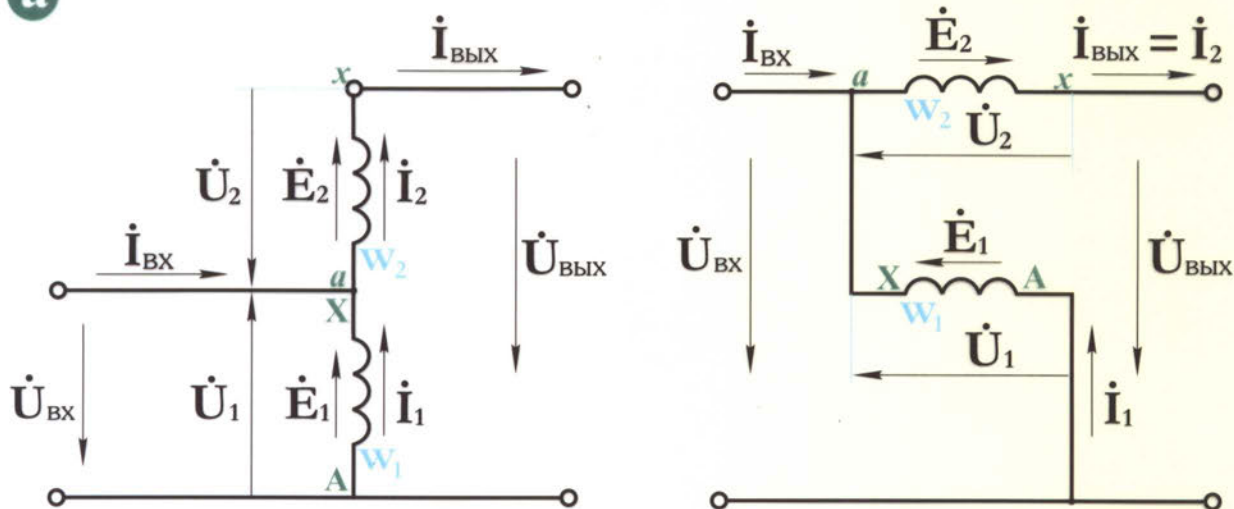


Зависимость КПД трансформатора от нагрузки

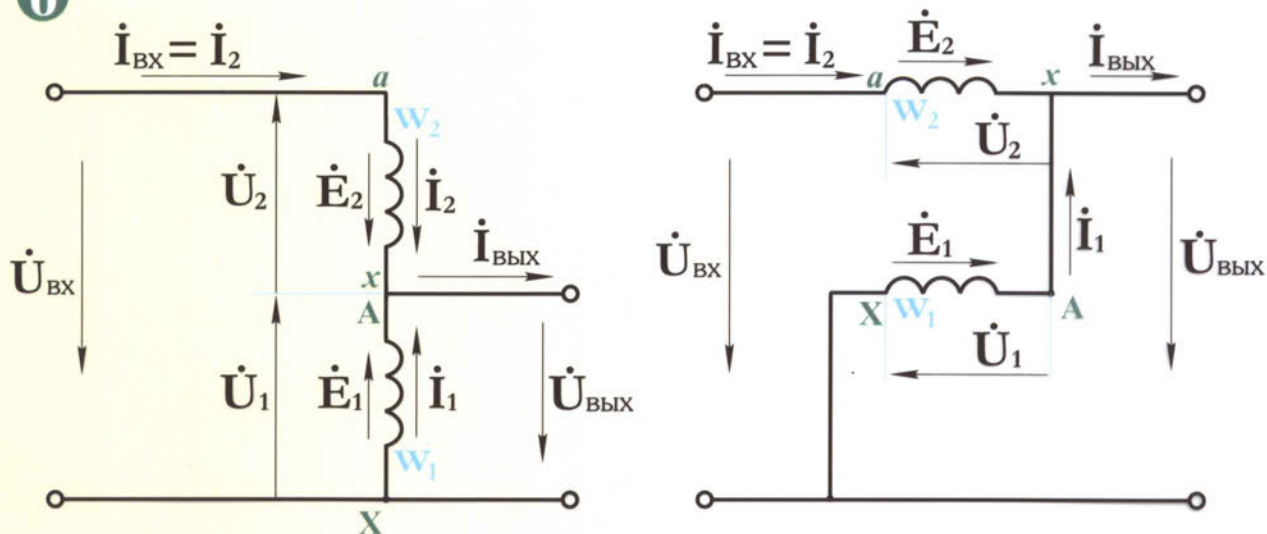
ТРАНСФОРМАТОРЫ

АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

а



б

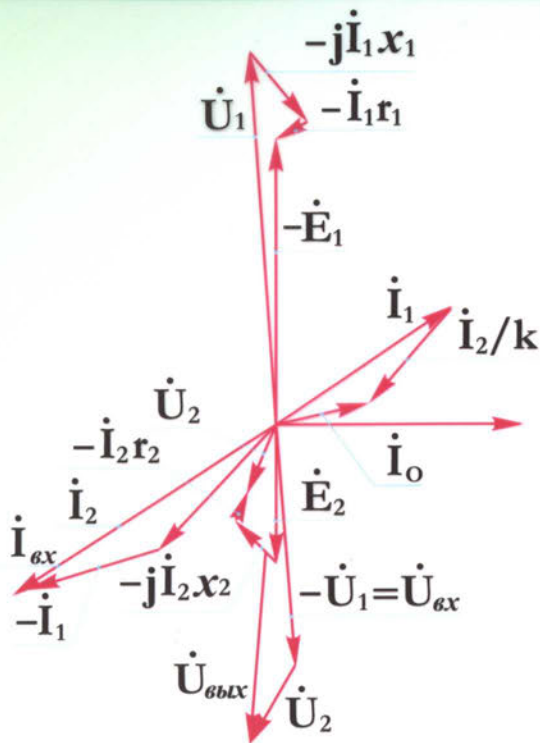


Схемы включения однофазных автотрансформаторов:
а -повышающего ; б - понижающего



ТРАНСФОРМАТОРЫ

АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ



Векторная диаграмма (а)

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

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

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

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

Уравнения напряжения и токов (схема а)

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

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

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

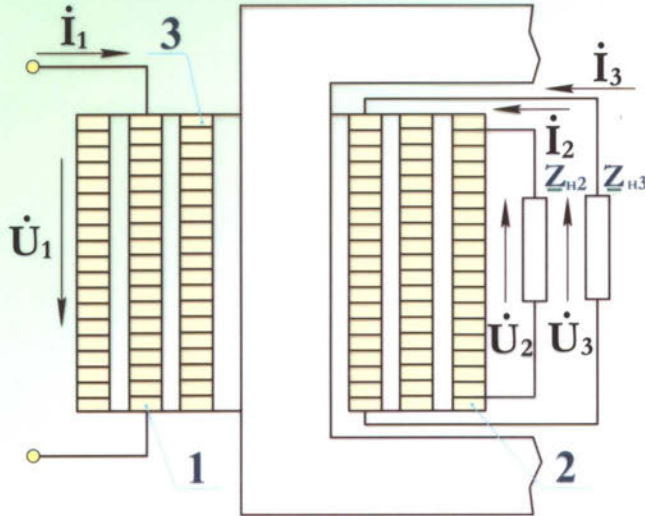
$$S_{расч} = S_{ат} \frac{k_{ат} - 1}{k_{ат}} = S_{ат} \left(1 - \frac{1}{1 + 1/k} \right)$$

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



ТРАНСФОРМАТОРЫ

ТРЕХОБОМОТОЧНЫЙ
ТРАНСФОРМАТОР



1- первичная обмотка;
2-3- вторичные обмотки.

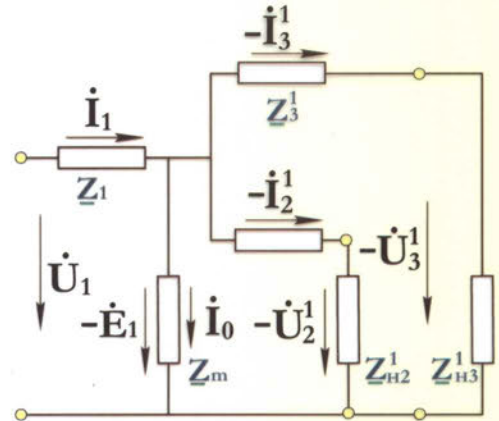
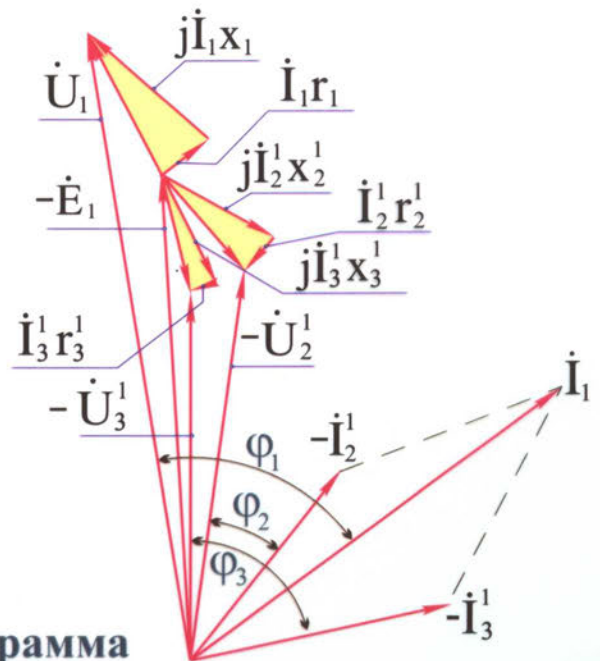


Схема замещения
трёхобмоточного
трансформатора

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1 \\ -\dot{U}_2^1 &= -\dot{E}_2^1 + \dot{I}_2^1 r_2^1 + j\dot{I}_2^1 x_2^1 \\ -\dot{U}_3^1 &= -\dot{E}_3^1 + \dot{I}_3^1 r_3^1 + j\dot{I}_3^1 x_3^1 \end{aligned}$$

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2^1 = \dot{E}_3^1$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2^1 - \dot{I}_3^1$$



Упрощенная векторная диаграмма
трёхобмоточного трансформатора

$$\dot{I}_0 \approx 0$$

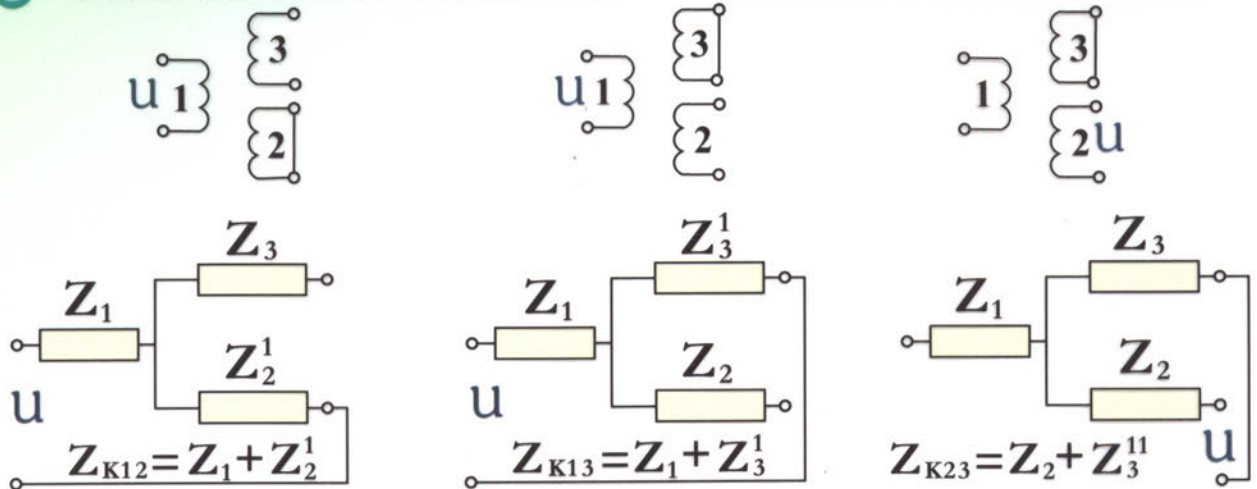
www.samelectric.ru



ТРАНСФОРМАТОРЫ

ПАРАМЕТРЫ ТРЕХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

1 ОПЫТЫ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ



Z_3^{11} - полное сопротивление обмотки (3), приведённое к числу витков обмотки (2)

$$Z_1 = \frac{Z_{K12} + Z_{K13} - Z_{K23}}{2}$$

$$r_1 = \frac{r_{K12} + r_{K13} - r_{K23}}{2}$$

$$x_1 = \frac{x_{K12} + x_{K13} - x_{K23}}{2}$$

$$Z_2^1 = \frac{Z_{K12} + Z_{K23} - Z_{K13}}{2}$$

$$r_2^1 = \frac{r_{K12} + r_{K23} - r_{K13}}{2}$$

$$x_2^1 = \frac{x_{K12} + x_{K23} - x_{K13}}{2}$$

$$Z_3^1 = \frac{Z_{K13} + Z_{K23} - Z_{K12}}{2}$$

$$r_3^1 = \frac{r_{K13} + r_{K23} - r_{K12}}{2}$$

$$x_3^1 = \frac{x_{K13} + x_{K23} - x_{K12}}{2}$$

Здесь Z_{K23} , r_{K23} , x_{K23} приведены к числу витков первичной обмотки путём умножения на $(W^1/W_2)^2$

2 ОПЫТЫ ХОЛОСТОГО ХОДА

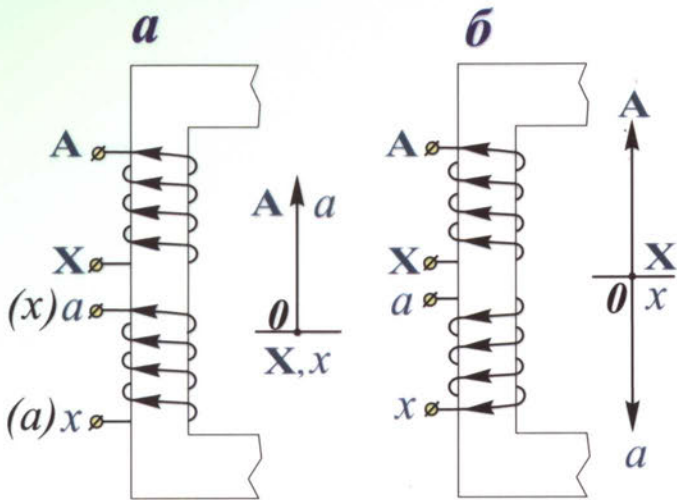
а) $k_{12} = \frac{U_1}{U_2}$ $k_{13} = \frac{U_1}{U_3}$ $k_{23} = \frac{U_2}{U_3} = \frac{k_{13}}{k_{12}}$;

б) при неодинаковых мощностях обмоток $I_{01} \neq I_{02} \neq I_{03}$;
при равенстве мощностей $I_{01} = I_{02} = I_{03} = I_0$;

в) $P_{01} = P_{02} = P_{03} = P_0$.

ТРАНСФОРМАТОРЫ

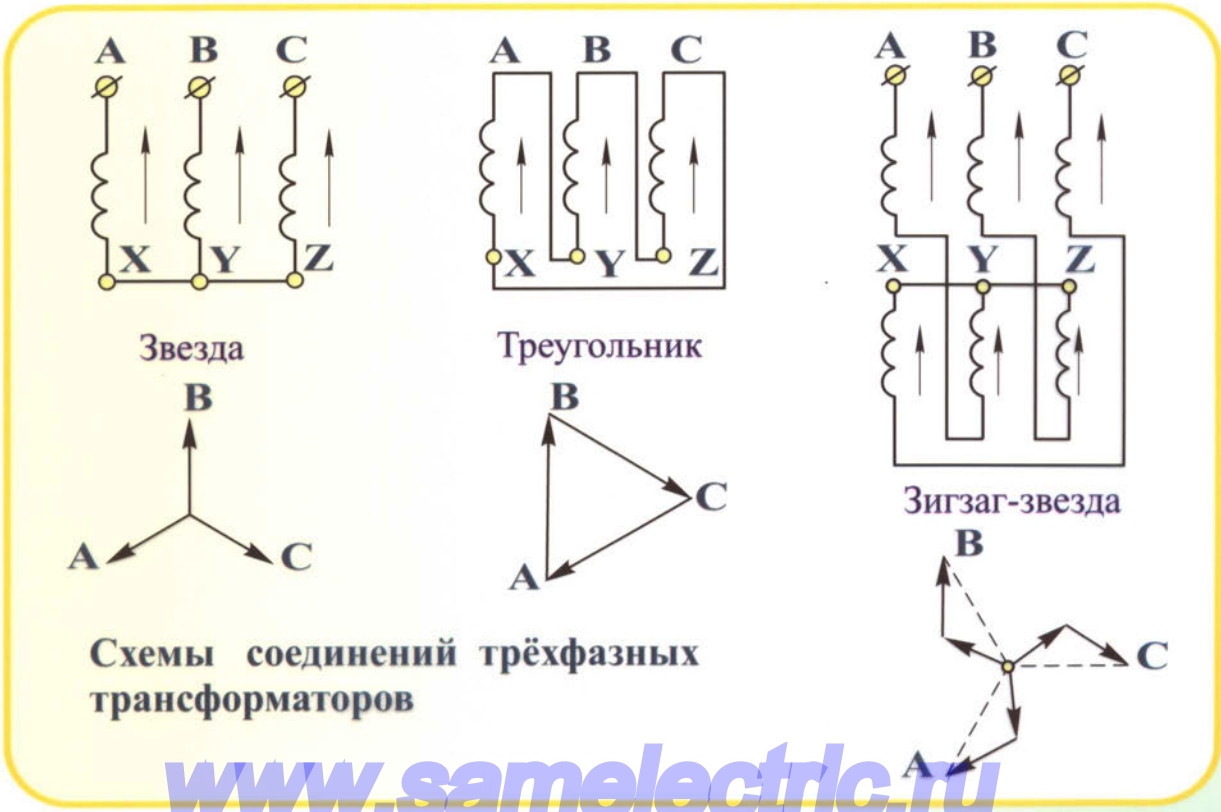
СХЕМЫ И ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ



Зависимость фазы ЭДС обмотки от направления намотки витков и маркировки зажимов



Группы 0 и 6 соединений обмоток однофазных трансформаторов

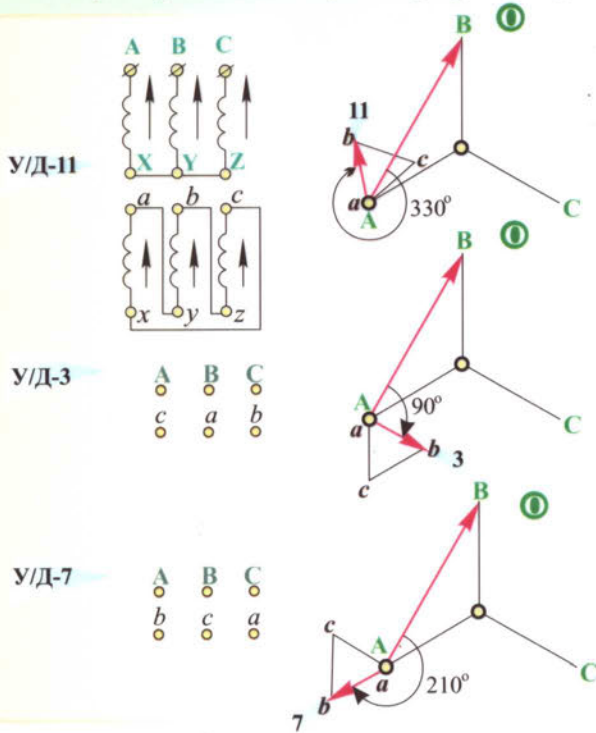


Схемы соединений трёхфазных трансформаторов

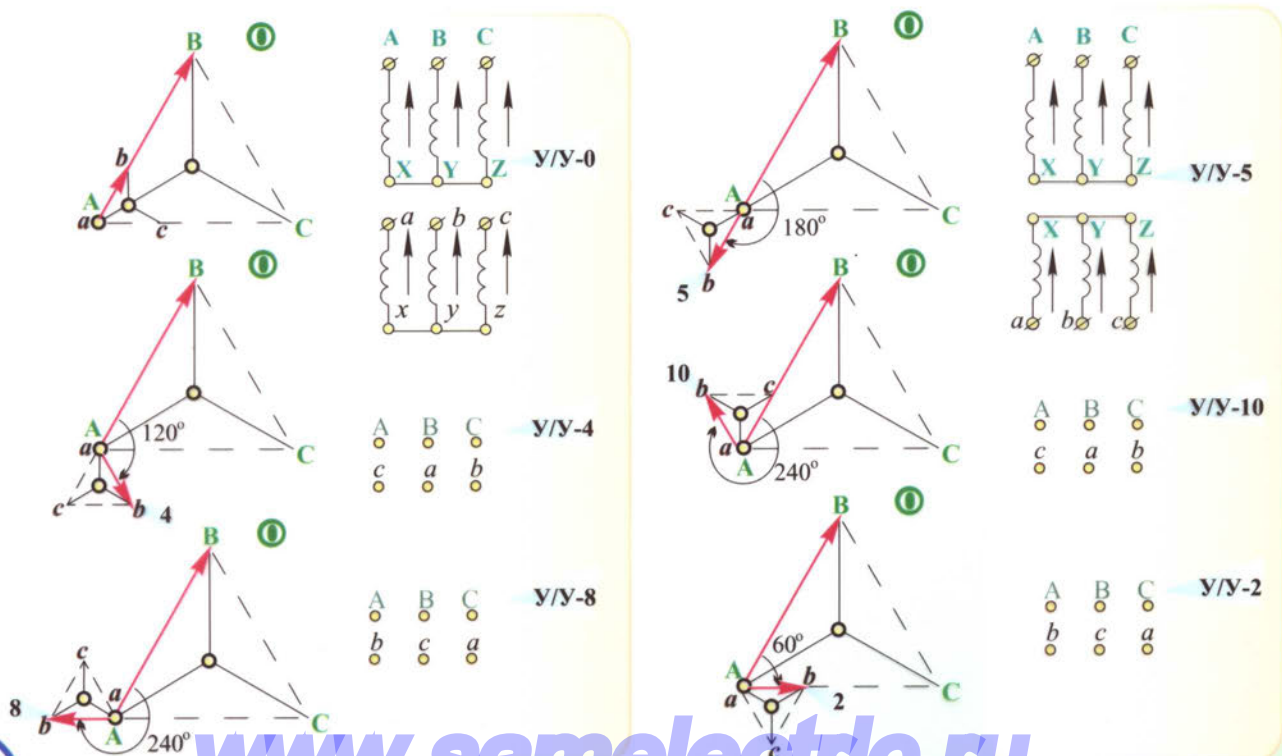
ТРАНСФОРМАТОРЫ

ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЙ ОБМОТК ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Нечётные группы соединений обмоток трёхфазных трансформаторов



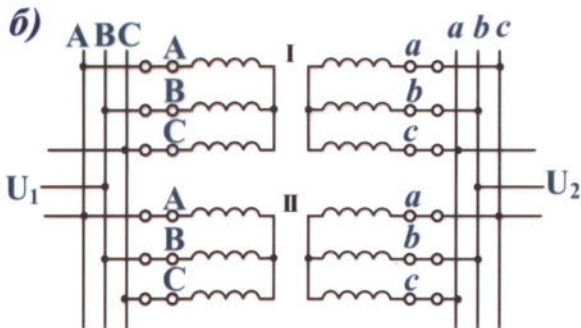
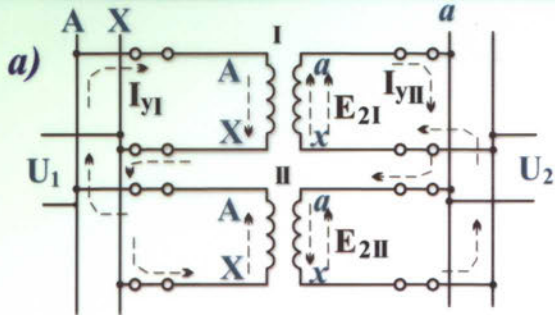
Чётные группы соединений обмоток трёхфазных трансформаторов



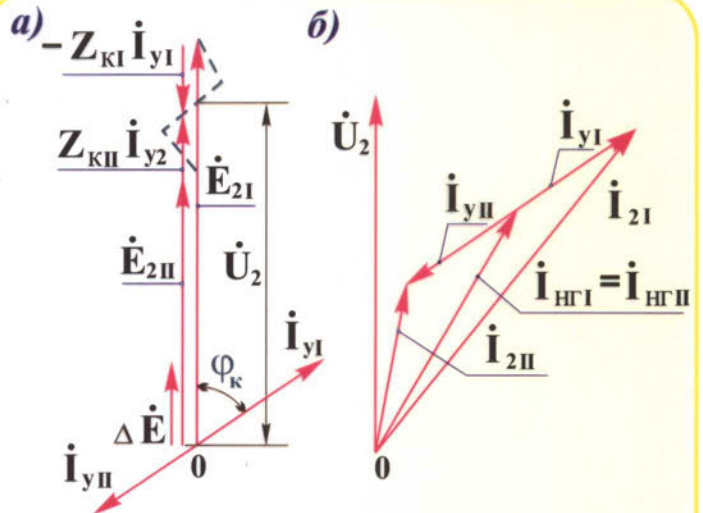
Южно-Уральский Государственный университет
РНПО Росучприбор

ТРАНСФОРМАТОРЫ

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА
ТРАНСФОРМАТОРОВ



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



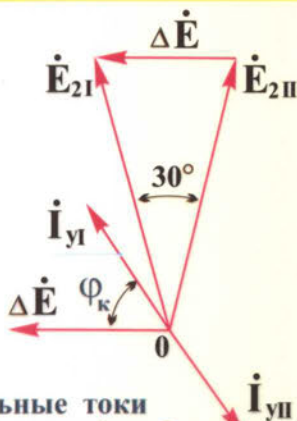
Уравнивающие токи при неравенстве коэффициентов трансформации

$$I_1 Z_{KI} = I_2 Z_{KII} = I_3 Z_{KIII} = \dots = I_n Z_{Kn} ; I_1 Z_{KI} = I_2 Z_{KII} = I_3 Z_{KIII} = \dots = I_n Z_{Kn}$$

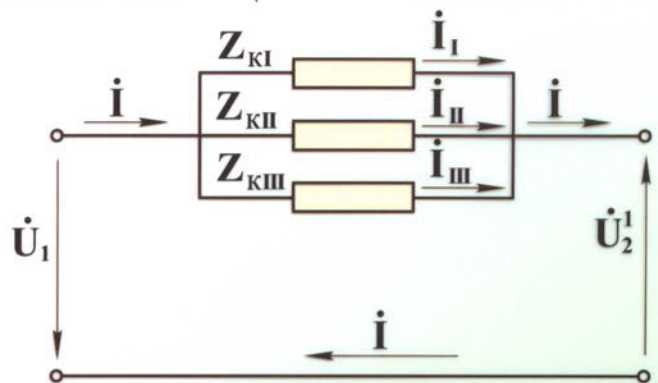
$$I_1 : I_2 : I_3 = \frac{1}{Z_{KI}} : \frac{1}{Z_{KII}} : \frac{1}{Z_{KIII}} \text{ или } I_1 : I_2 : I_3 = \frac{I_{НОМ I}}{I_{НОМ I} Z_{KI}} : \frac{I_{НОМ II}}{I_{НОМ II} Z_{KII}} : \frac{I_{НОМ III}}{I_{НОМ III} Z_{KIII}}$$

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

$$P_1 : P_2 : P_3 = \frac{S_{НОМ I}}{u_{KI}} : \frac{S_{НОМ II}}{u_{KII}} : \frac{S_{НОМ III}}{u_{KIII}}$$



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



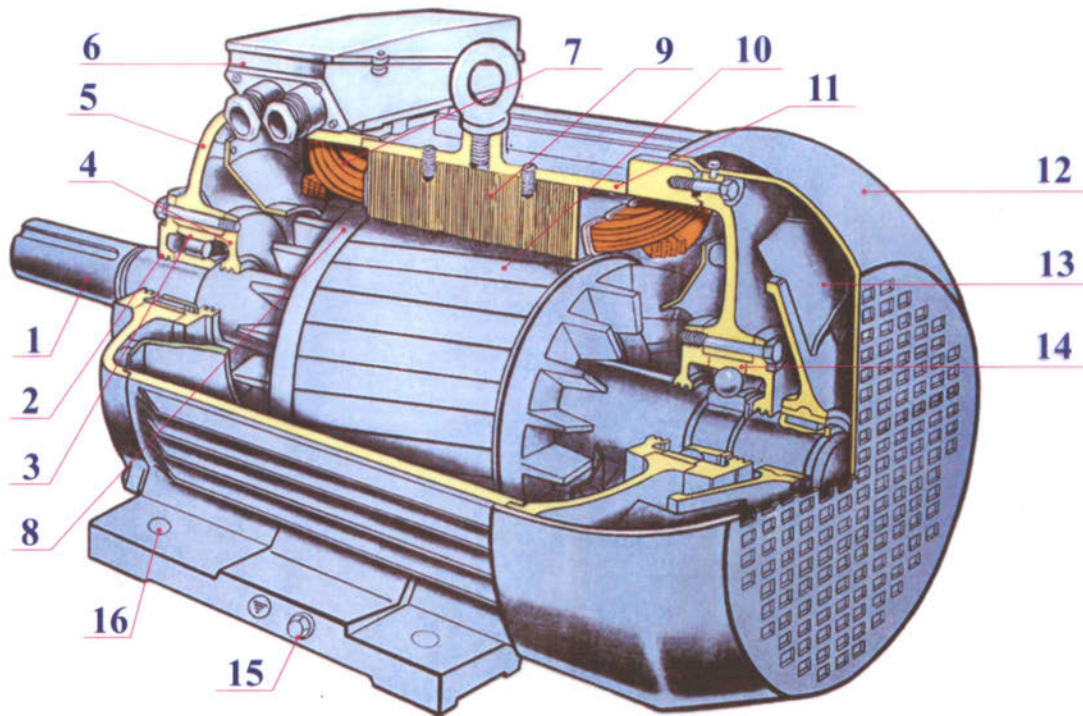
Упрощённая схема замещения трансформаторов при параллельной работе



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

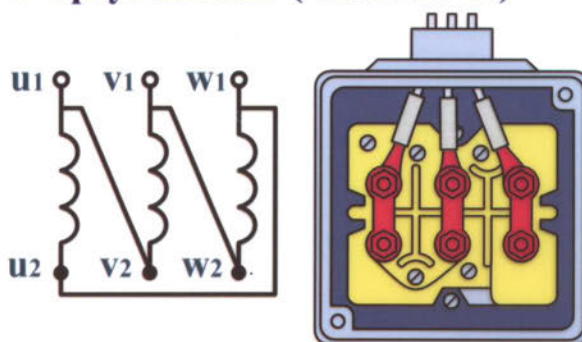
(ИСПОЛНЕНИЕ IP 44)

**АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ
С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ**

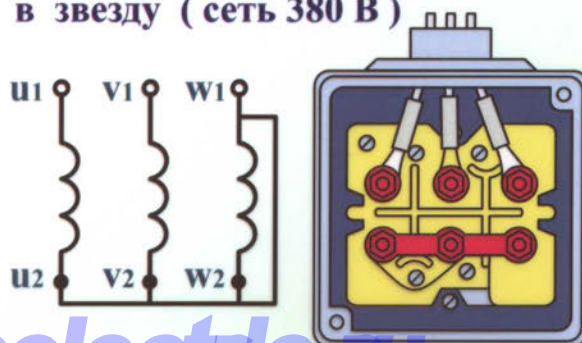


- 1 - вал;
- 2 - наружная крышка подшипника;
- 3 - роликовый подшипник;
- 4 - внутренняя крышка подшипника;
- 5 - подшипниковый щит;
- 6 - коробка выводов;
- 7 - обмотка статора;
- 8 - обмотка ротора;
- 9 - сердечник статора;
- 10 - сердечник ротора;
- 11 - корпус электродвигателя;
- 12 - кожух вентилятора;
- 13 - вентилятор;
- 14 - шариковый подшипник;
- 15 - болт заземления;
- 16 - отверстия для болта крепления двигателя.

**Схема соединения обмоток
в треугольник (сеть 220 В)**

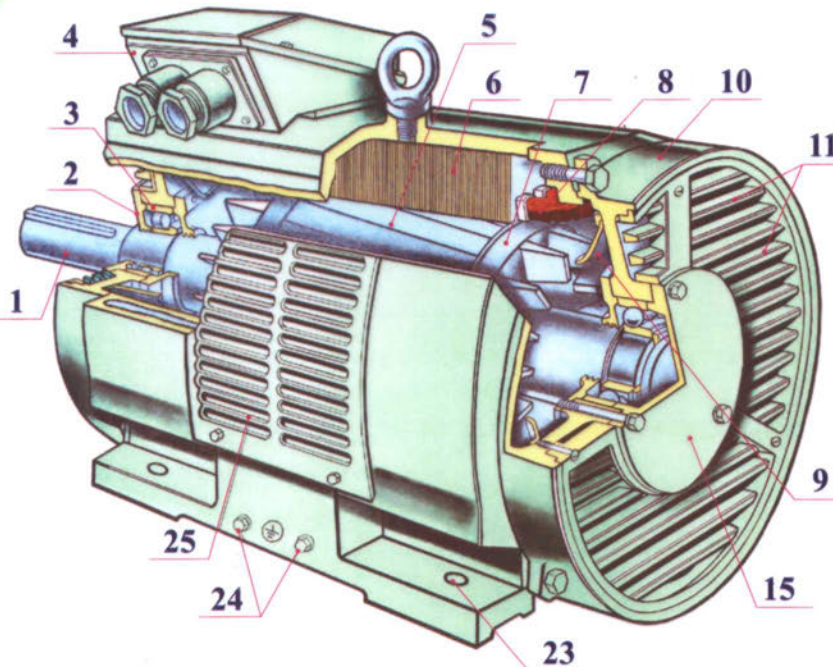


**Схема соединения обмоток
в звезду (сеть 380 В)**



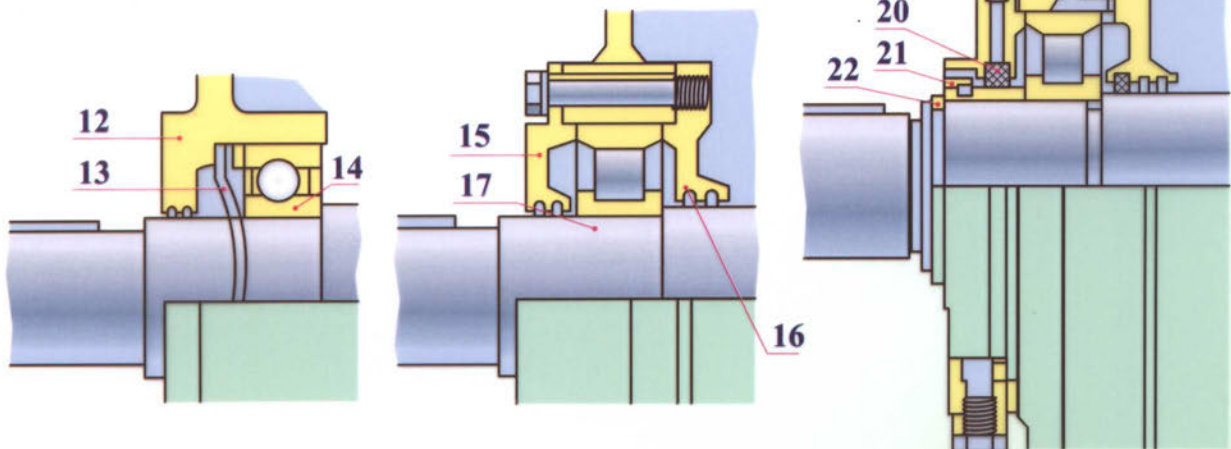
МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ
(ИСПОЛНЕНИЕ IP23) С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ



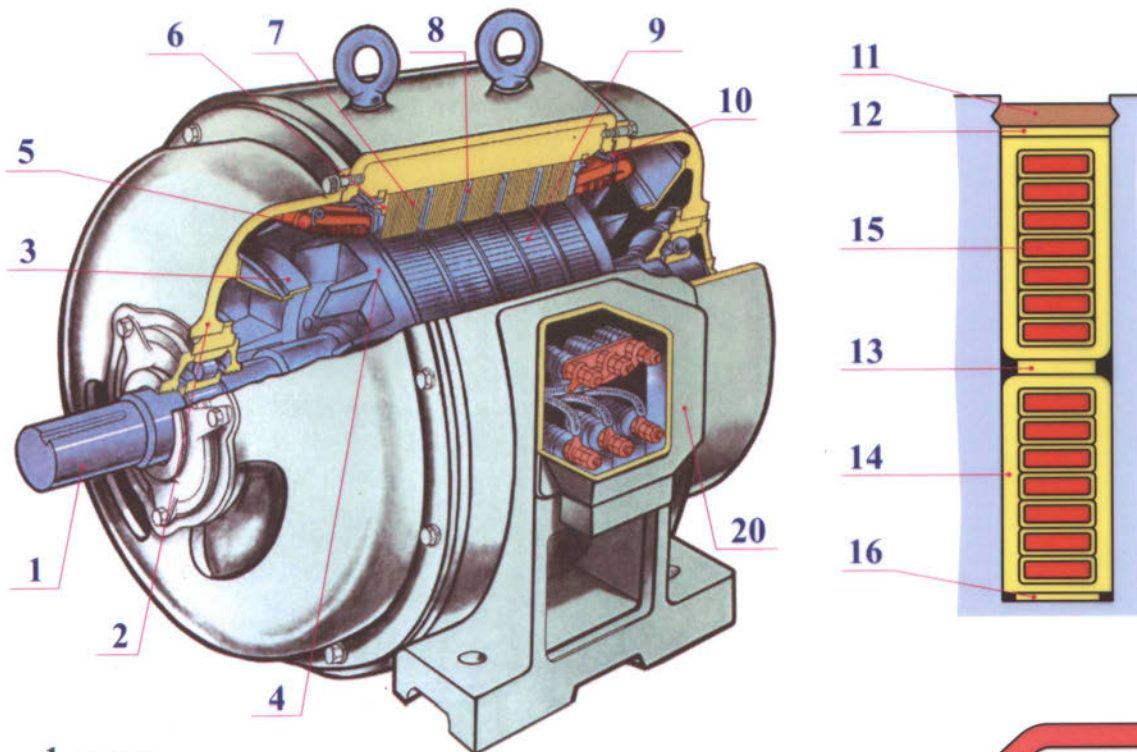
- 1 - вал;
- 2,15 - наружные крышки подшипника;
- 3 - роликовый подшипник;
- 4 - коробка выводов;
- 5 - сердечник ротора;
- 6 - сердечник статора;
- 7 - обмотка ротора;
- 8 - обмотка статора;
- 9 - воздухонаправляющий щиток;
- 10,12 - подшипниковые щиты;
- 11 - жалюзи для выхода воздуха;
- 13 - пружинное кольцо;
- 14 - закрытый подшипник;
- 16 - внутренняя крышка подшипника;

- 17 - подшипник;
- 18 - масленка;
- 19 - пробка;
- 20 - войлочное уплотнение наружной крышки подшипника;
- 21 - кольцо уплотнительное;
- 22 - стопорное кольцо;
- 23 - отверстие для болта крепления двигателя;
- 24 - болты заземления;
- 25 - жалюзи для выхода воздуха.



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

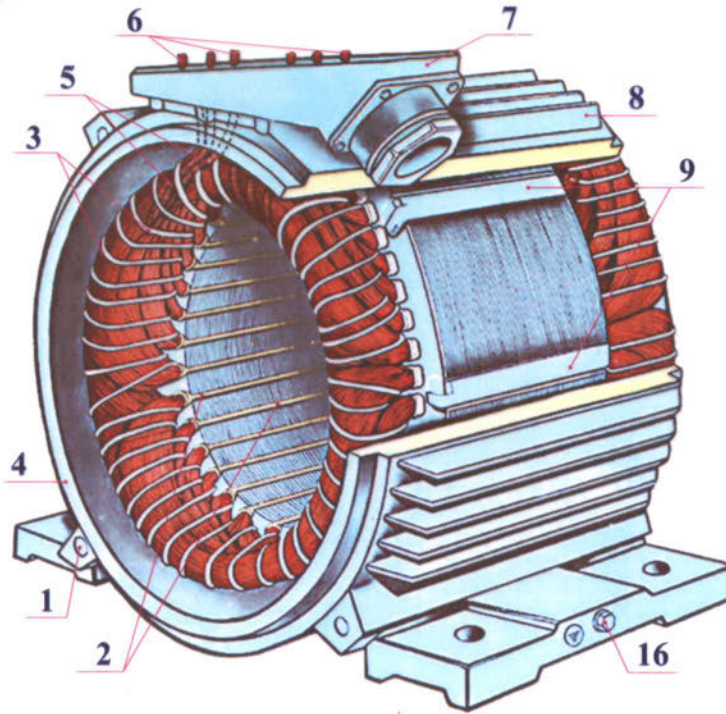
АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ
(НА НАПРЯЖЕНИЕ 6 кВ) С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ



- 1 - вал;
- 2 - подшипниковый щит;
- 3 - воздухонаправляющий щиток;
- 4 - обмотка ротора;
- 5 - обмотка статора;
- 6 - нажимная шайба;
- 7 - сердечник статора;
- 8 - дистанционная распорка;
- 9 - сердечник ротора;
- 10 - бандажные кольца;
- 11 - пазовый клин;
- 12 - прокладка под клин;
- 13 - прокладка между слоями в пазу;
- 14 - корпусная изоляция катушки;
- 15 - проводники катушки;
- 16 - прокладка на дно паза;
- 17 - катушка обмотки;
- 18 - бандаж крепления лобовых частей;
- 19 - дистанционная распорка ;
- 20 - коробка выводов.

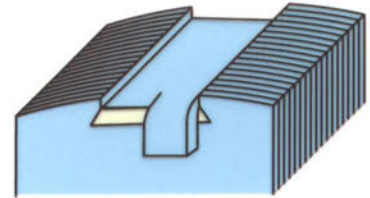
МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

СТАТОР АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

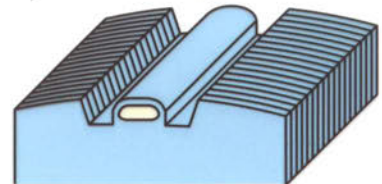


Крепление
стали сердечника

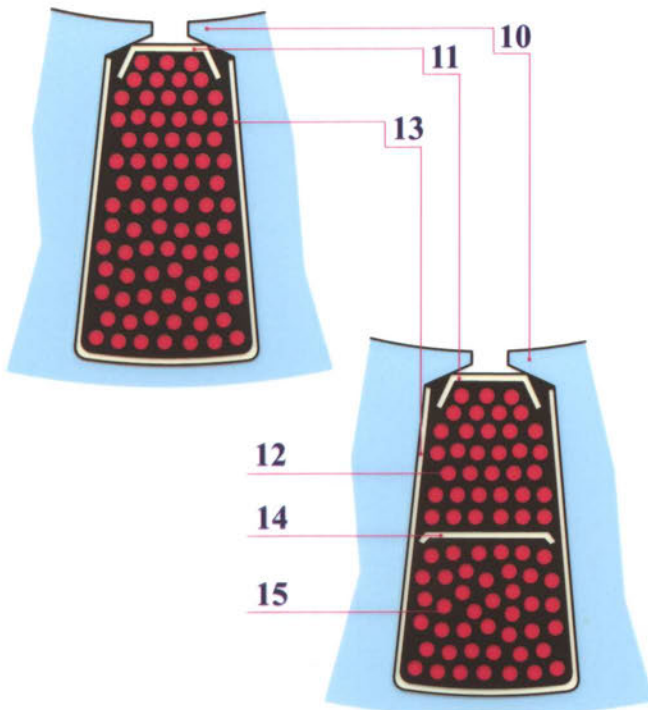
скобами



сваркой



Паз статора с однослойной
и двухслойной обмоткой



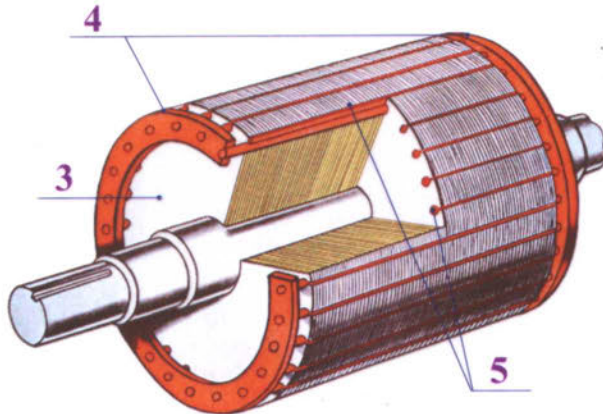
- 1 - отверстия для крепления подшипниковых щитов;
- 2 - клин-крышка для крепления обмотки в пазу;
- 3 - бандаж крепления лобовой части обмотки;
- 4 - корпус;
- 5 - выводные концы;
- 6 - контактные болты коробки выводов;
- 7 - корпус коробки выводов;
- 8 - ребра охлаждения;
- 9 - скобы крепления стали сердечника;
- 10 - зубец статора;
- 11 - клин-крышка;
- 12 - верхний слой обмотки;
- 13 - корпусная изоляция;
- 14 - прокладка между слоями обмотки;
- 15 - нижний слой обмотки;
- 16 - болт заземления.



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

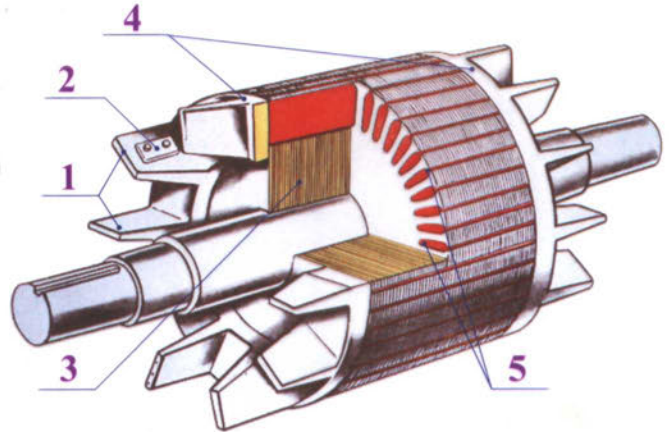
КОРТОКОЗАМКНУТЫЕ РОТОРЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ротор со сварной беличьей клеткой



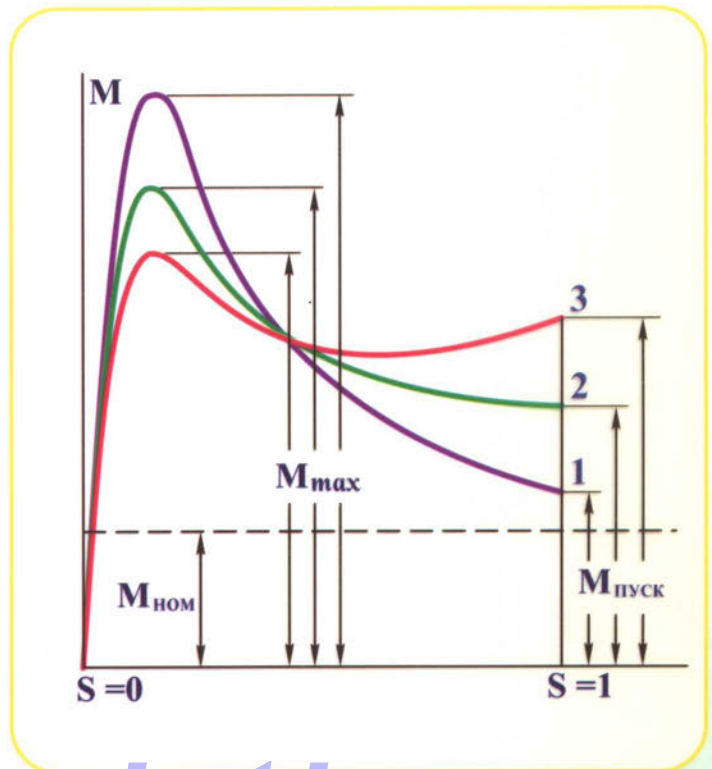
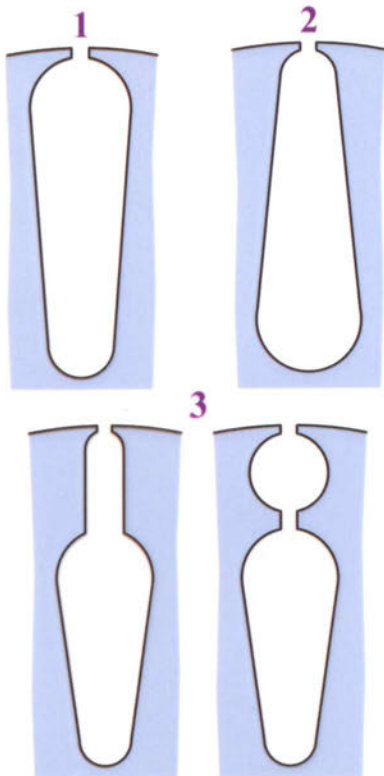
- 1 - вентиляционные лопатки;
- 2 - балансировочный груз;
- 3 - магнитопровод ротора;

Ротор с литой беличьей клеткой



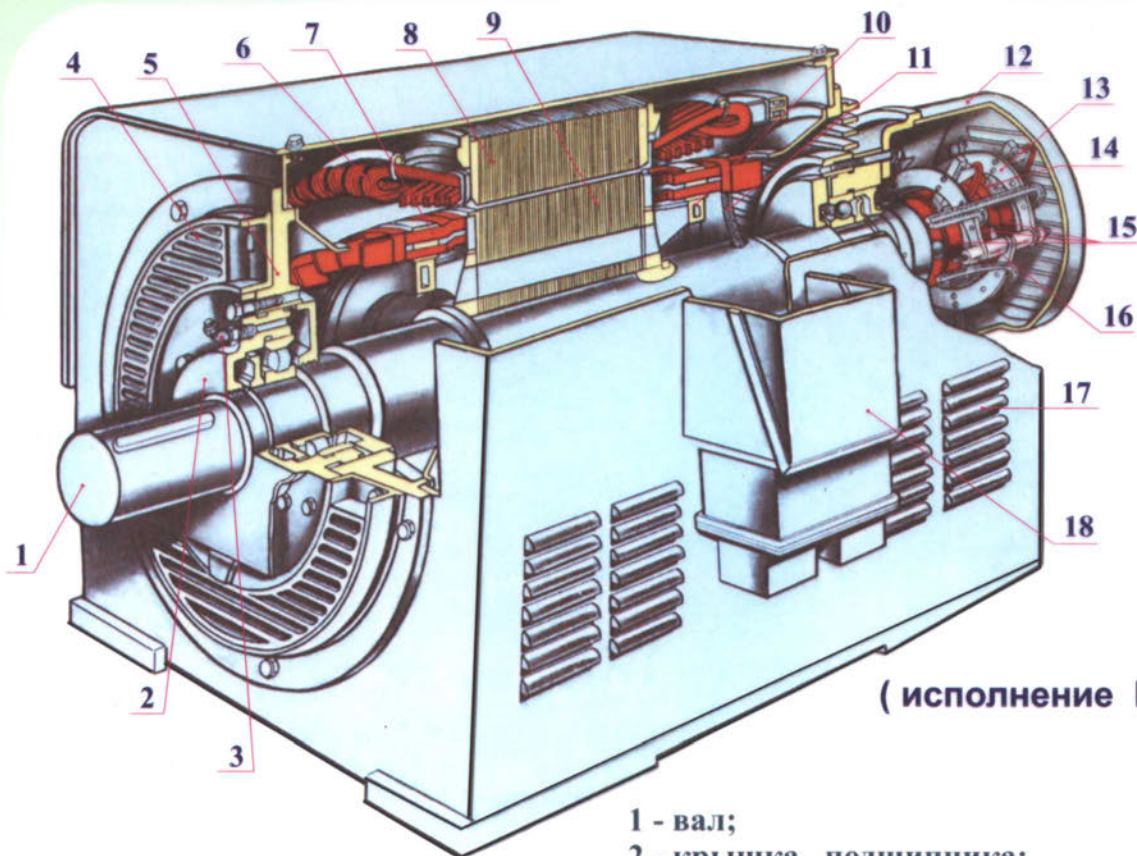
- 4 - короткозамыкающие кольца;
- 5 - стержни в пазах.

Пусковые характеристики двигателей с различными пазами ротора

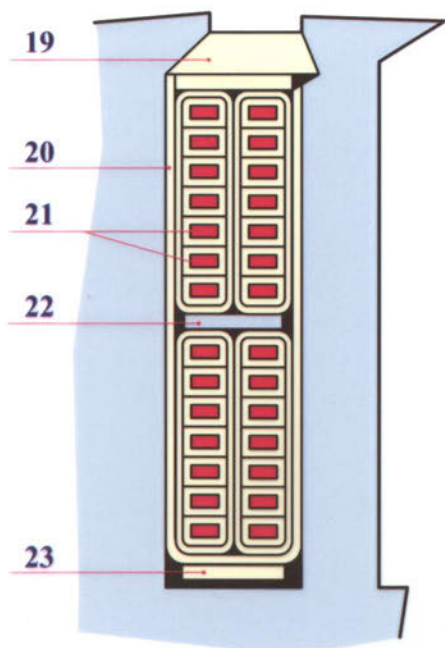


МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ



(исполнение IP23)

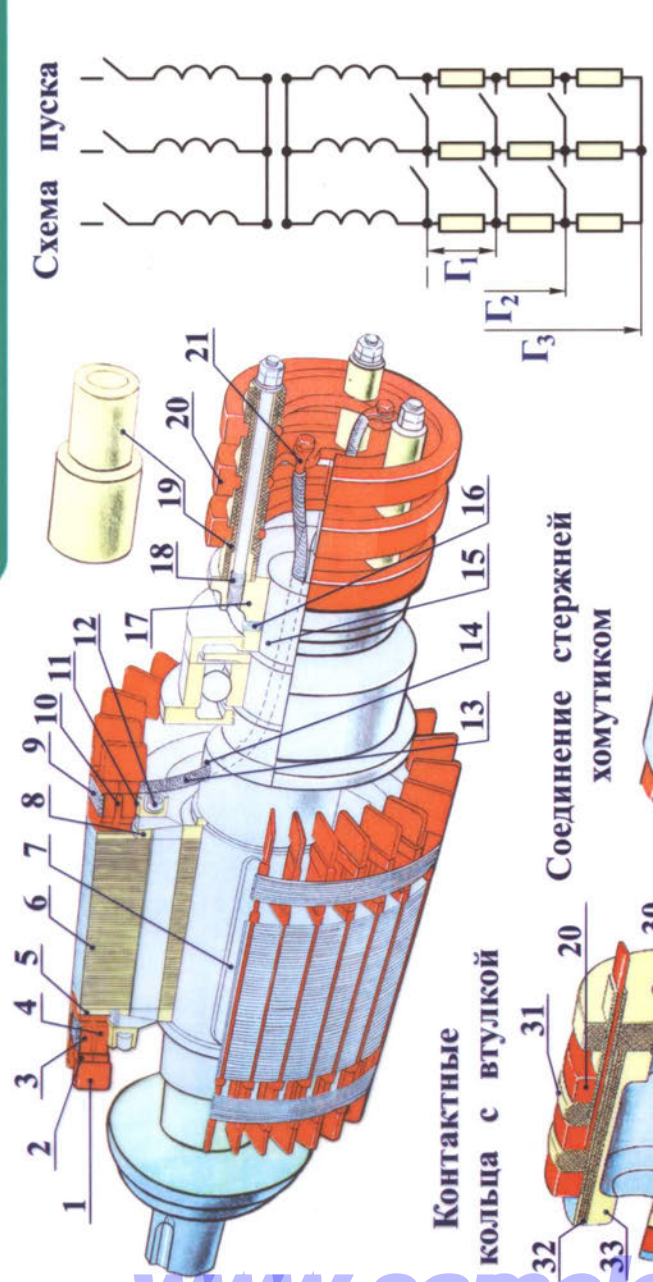


- 1 - вал;
- 2 - крышка подшипника;
- 3 - масленка для пополнения смазки;
- 4 - жалюзи для входа воздуха;
- 5 - подшипниковый щит;
- 6 - обмотка статора;
- 7 - обмотка ротора;
- 8 - магнитопровод статора;
- 9 - магнитопровод ротора;
- 10 - обмоткодержатель;
- 11 - токопровод к обмотке ротора;
- 12 - кожух контактных колец;
- 13 - траверса;
- 14 - щетка;
- 15 - контактные кольца;
- 16 - болт крепления щеткодержателя;
- 17 - жалюзи для выхода воздуха;
- 18 - крышка коробки выводов;
- 19 - клин;
- 20 - корпусная изоляция паза;
- 21 - проводники обмотки;
- 22 - прокладка между обмотками;
- 23 - прокладка на дно паза.



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ФАЗНЫЙ РОТОР АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ



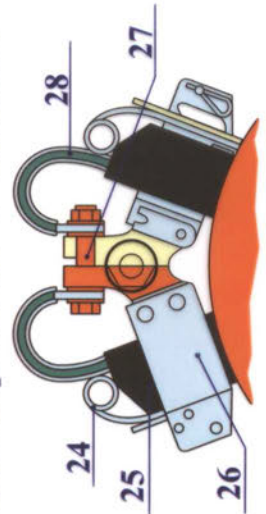
- 1- вентиляционная лопатка;
- 2- хомутик для соединения стержней;
- 3, 4- верхние и нижние стержни;
- 5- пазовая изоляция;
- 6- магнитопровод ротора;
- 7- шпонка;
- 8- нажимная шайба с обмоткодержателем;
- 9- бандаж;
- 10- изоляция между стержнями;
- 11- изоляция на обмоткодержателе;
- 12- балансировочный груз;
- 13- выводной конец обмотки;
- 14- отверстие в валу;
- 15- вал;
- 16- винт;
- 17- ступица контактных колец;
- 18- шпилька для крепления контактных колец;
- 19- изоляционная втулка;
- 20- контактное кольцо;
- 21- соединение вывода с контактным кольцом;

Контактные кольца с втулкой

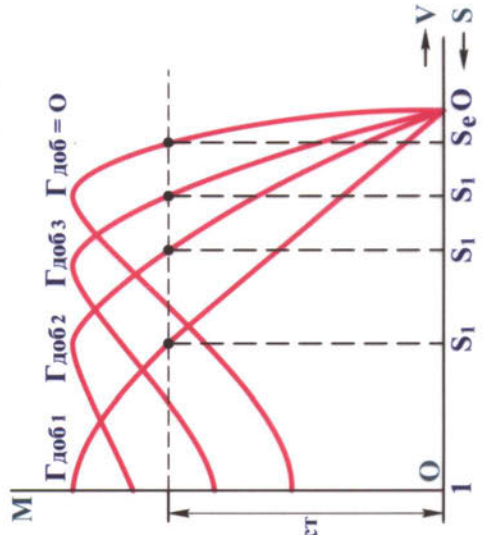
Соединение стержней хомутиком



Щеткодержатели с щетками



Пусковые характеристики

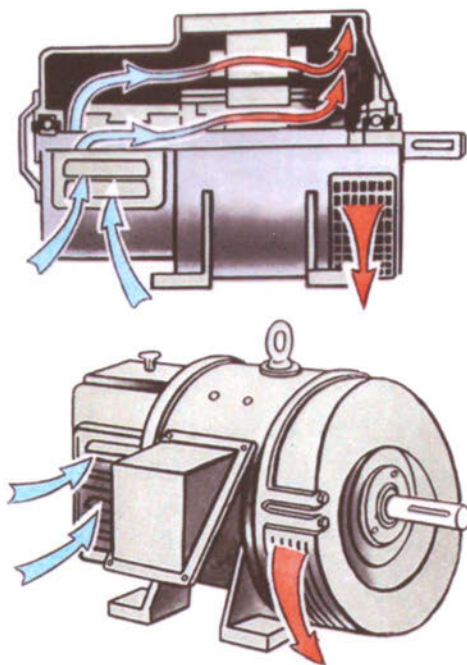


МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

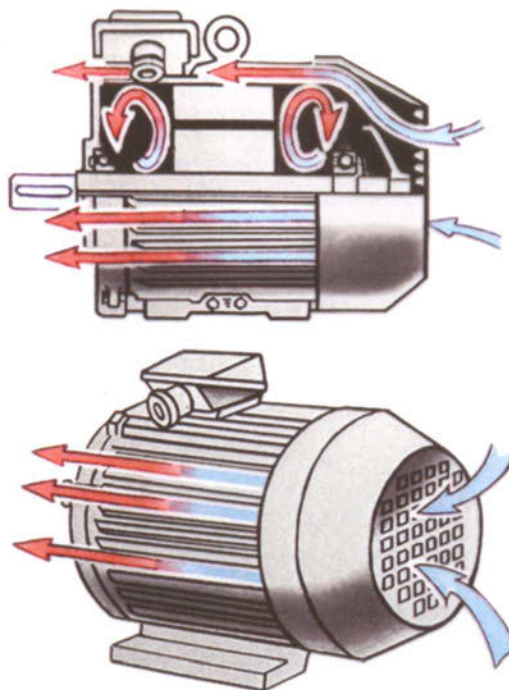
ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Типы вентиляции

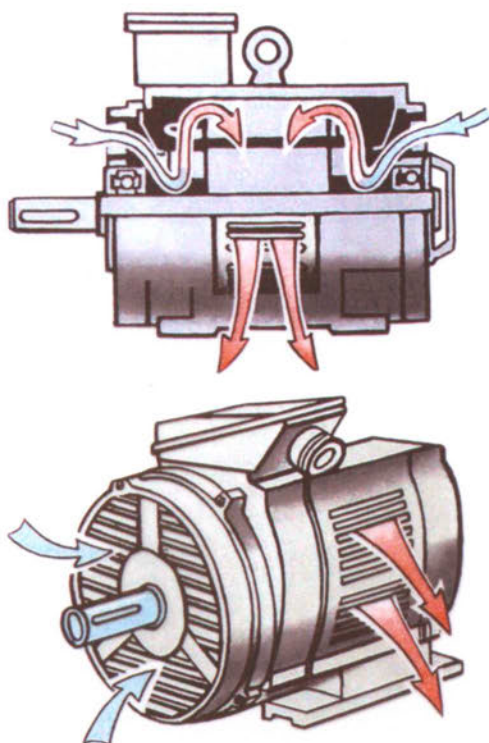
Аксильная



Наружный обдув



Радиальная



Виды охлаждения

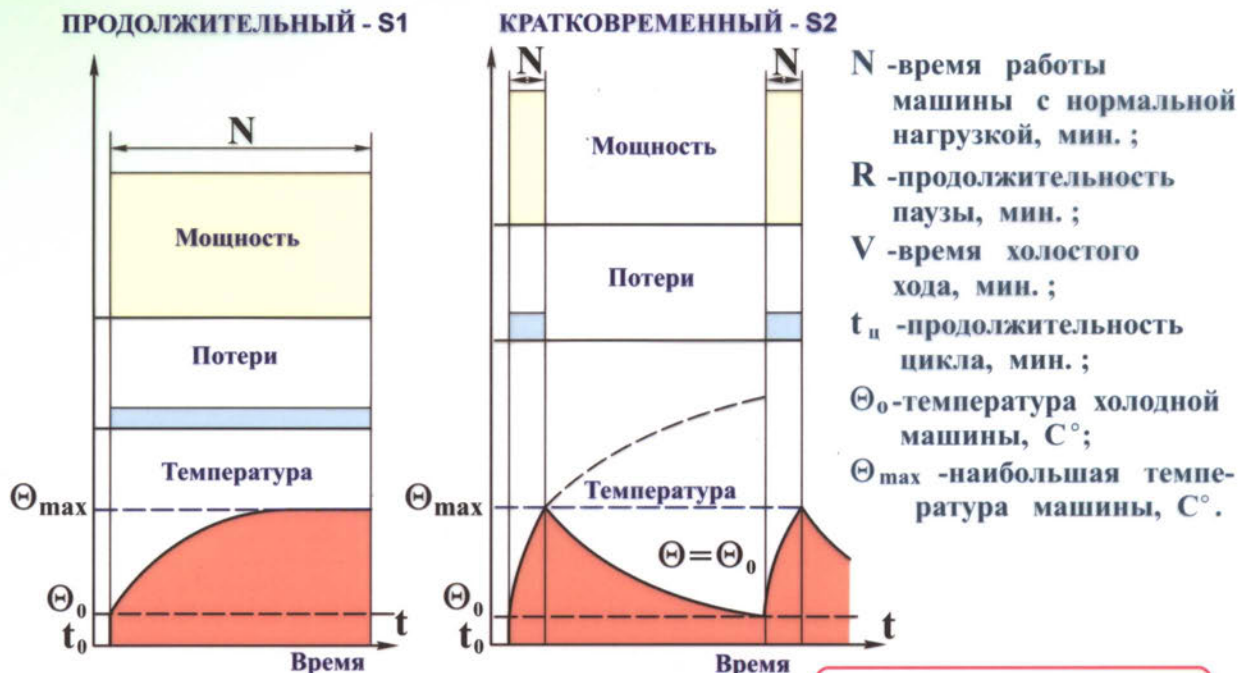
ВОЗДУШНОЕ	Большинство электрических машин
ВОДОРОДНОЕ	Турбогенераторы и синхронные компенсаторы
ВОДНОЕ	Наиболее мощные турбогенераторы и синхронные компенсаторы



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

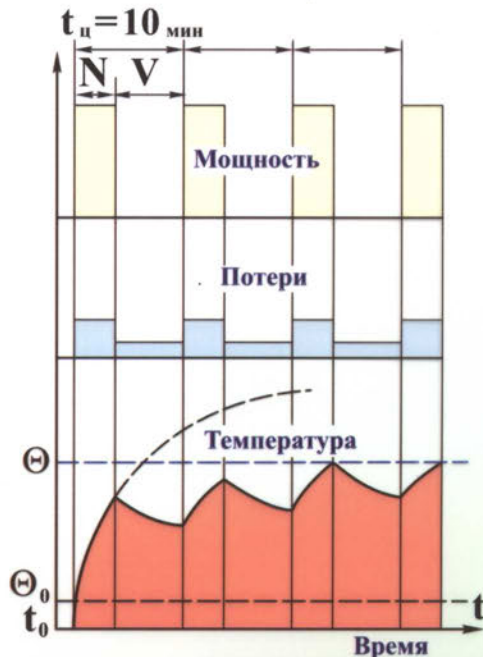
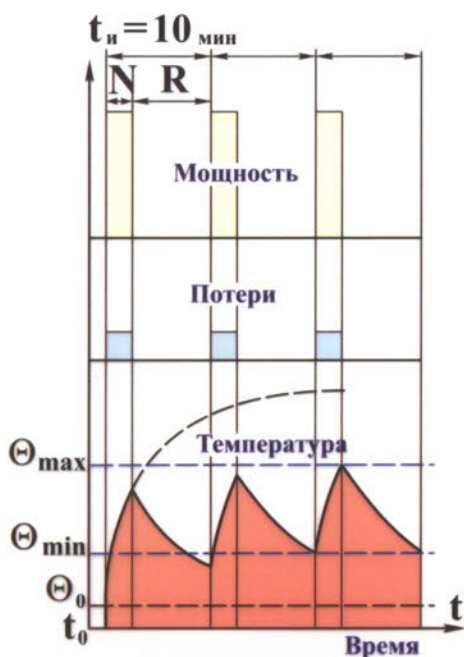
Режимы работы электрических машин



S2-15(...20...30..)%

ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННЫЙ - S3

ПЕРЕМЕЖАЮЩИЙСЯ - S6



$$\text{ПВ} = \frac{N}{N+R} 100\% \quad \text{S3-25(...40...60..)\%}$$

$$\text{ПН} = \frac{N}{N+V} 100\% \quad \text{S6-25(...-...)\%}$$

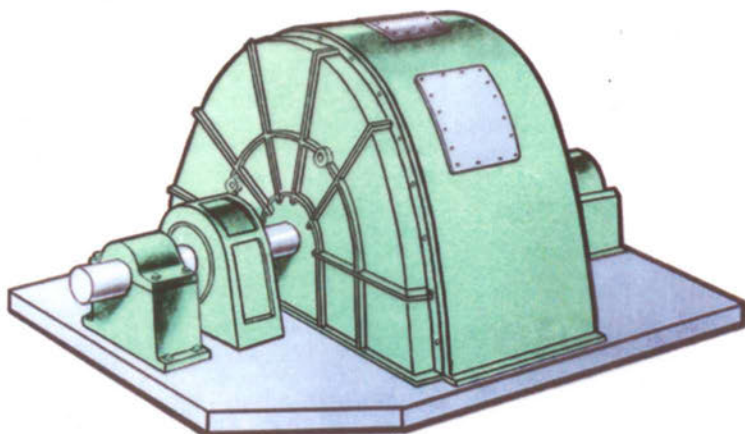


МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

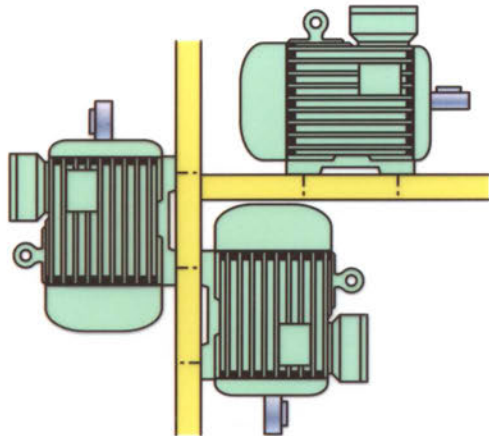
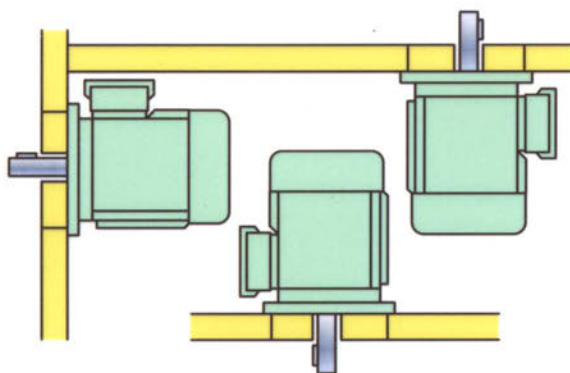
По способу монтажа

ГРУППА 1М7

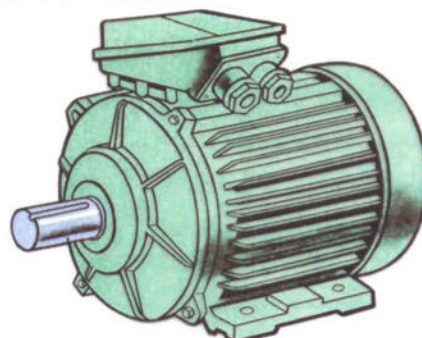


На выносных подшипниковых стойках

Обозначение способов монтажа

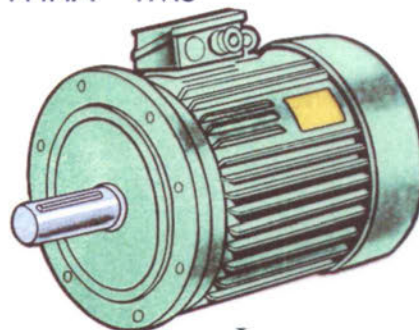


ГРУППА 1М1



На лапах

ГРУППА 1М3



Фланцевое

Обозначение концов вала

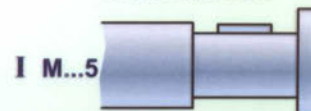
Цилиндрические



Конические

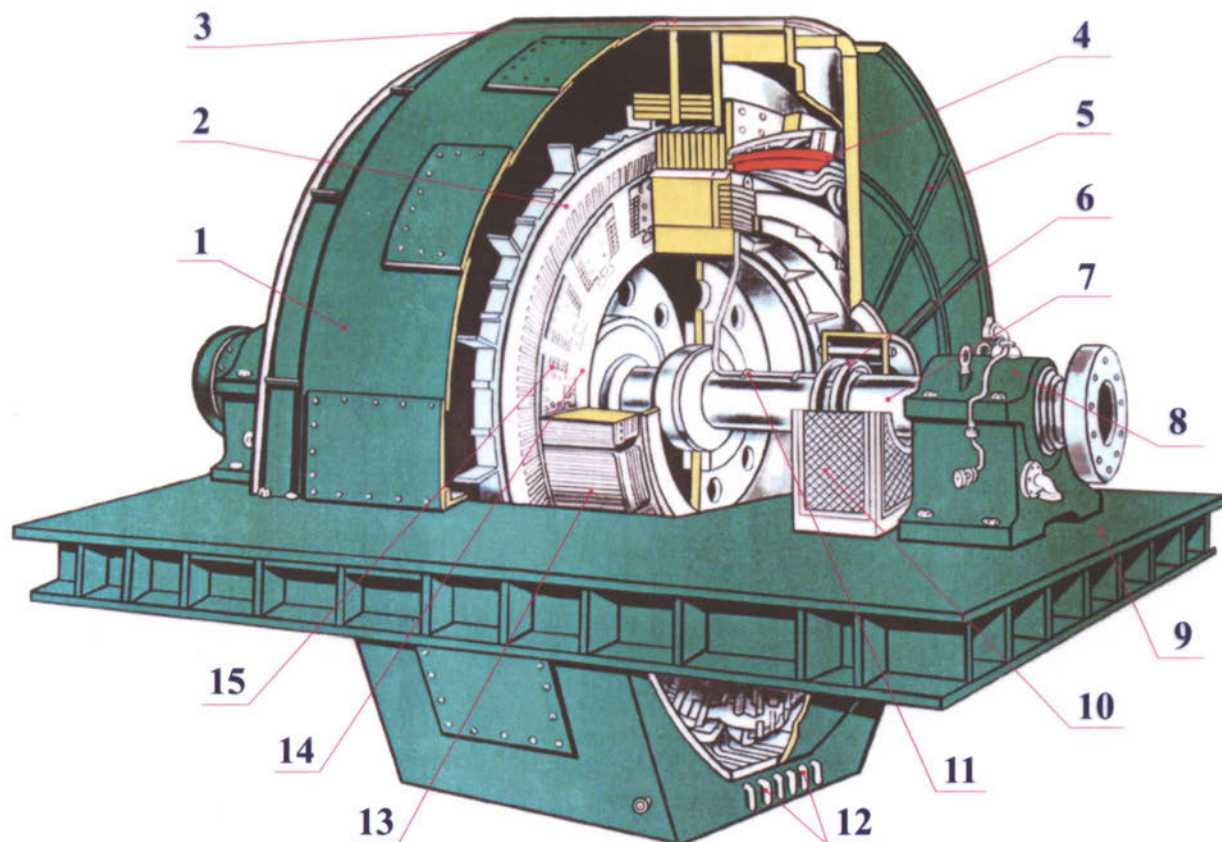


Фланцевые



СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

СИНХРОННЫЙ ЯВНОПОЛЮСНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ



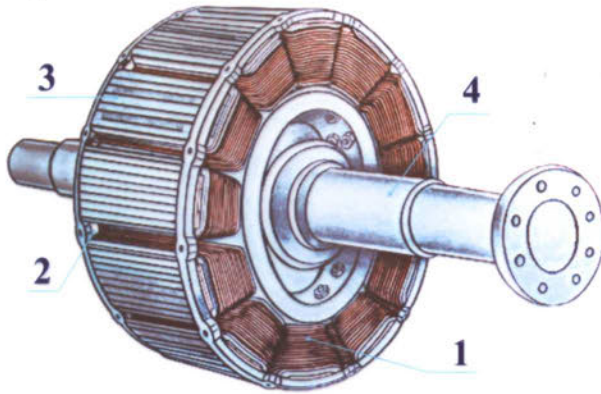
- | | |
|------------------------------------|--------------------------------|
| 1 - корпус; | 8 - подшипник; |
| 2 - сердечник статора; | 9 - фундаментная плита; |
| 3 - сердечник полюса; | 10 - кожух контактных колец; |
| 4 - лобовые части обмотки статора; | 11 - токоподвод к обмотке; |
| 5 - подшипниковый щит; | 12 - выводы обмотки статора; |
| 6 - контактные кольца; | 13 - стержни пусковой обмотки; |
| 7 - вал; | 14 - сердечник ротора; |
| | 15 - обмотка полюса. |



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

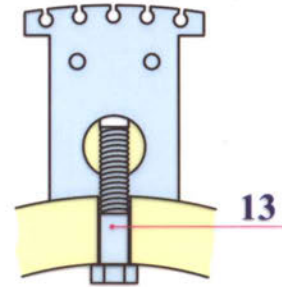
РОТОР ЯВНОПОЛЮСНОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Ротор многополюсной машины

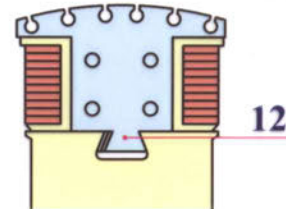


Способы крепления полюсов

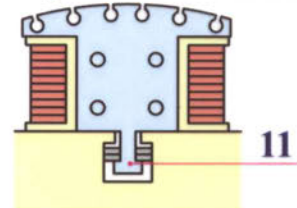
болтами к массивному ободу



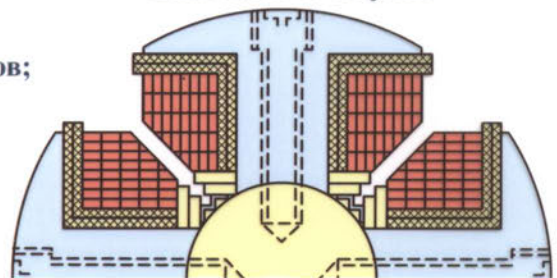
С помощью ласточкиных хвостов



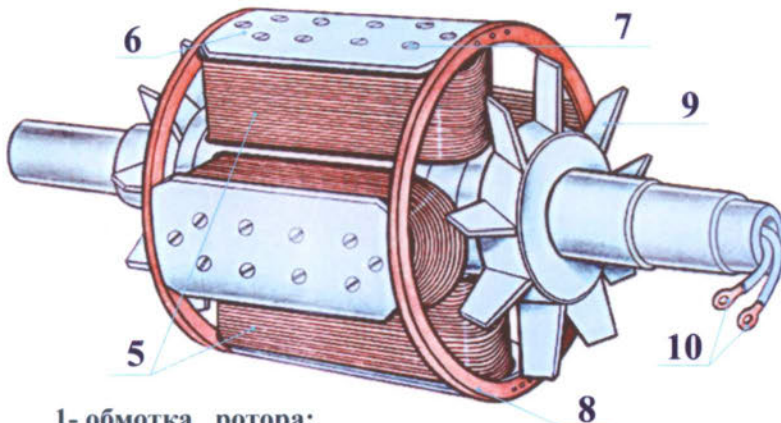
С помощью Т-образных хвостов



Винтами к втулке

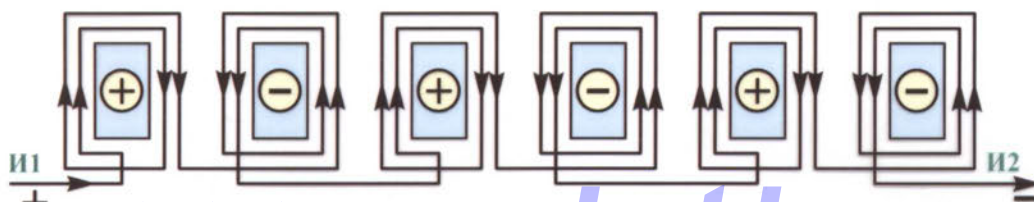


Ротор четырехполюсной машины



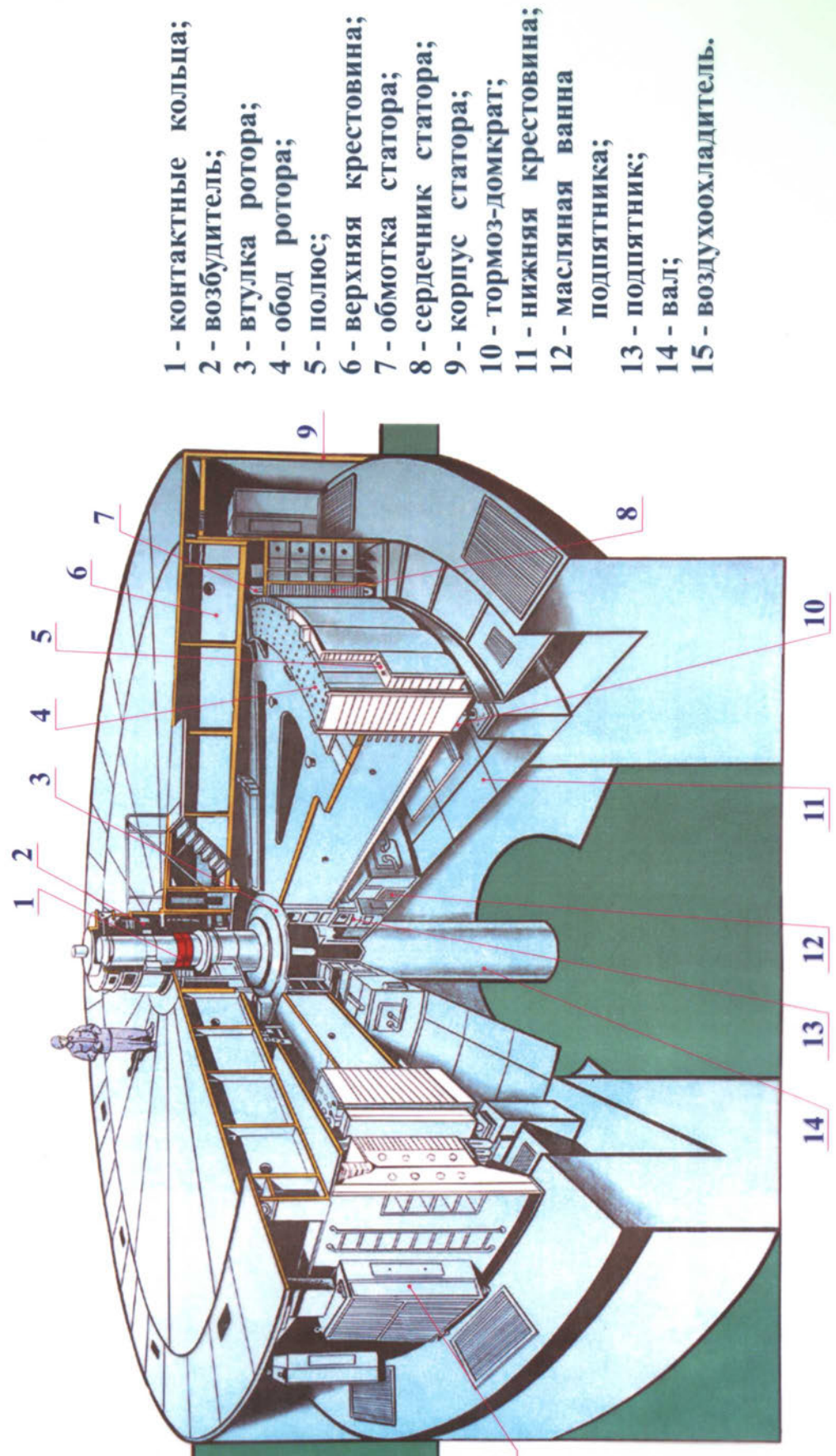
- 1- обмотка ротора;
- 2- демферная (пусковая) обмотка;
- 3- полюсы ротора;
- 4- вал ротора;
- 5- полюсная катушка;
- 6- массивный полюсный наконечник;
- 7- винты крепления полюсных наконечников;
- 8- короткозамыкающее кольцо;
- 9- осевой вентилятор;
- 10- выводные концы обмотки возбуждения;
- 11- Т-образный хвост;
- 12- ласточкин хвост;
- 13- болт крепления полюсов.

Схема соединения обмотки возбуждения синхронной машины



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ГИДРОГЕНЕРАТОР КРАСНОЯРСКОЙ ГЭС

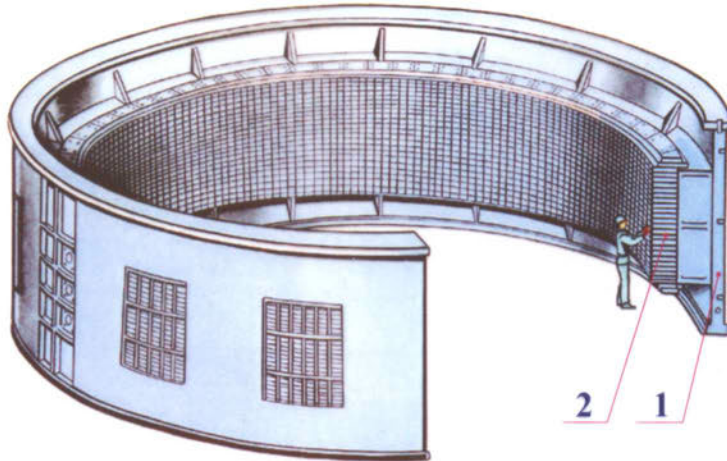


- 1 - контактные кольца;
- 2 - возбуждатель;
- 3 - втулка ротора;
- 4 - обод ротора;
- 5 - полюс;
- 6 - верхняя крестовина;
- 7 - обмотка статора;
- 8 - сердечник статора;
- 9 - корпус статора;
- 10 - тормоз-домкрат;
- 11 - нижняя крестовина;
- 12 - масляная ванна
подпятника;
- 13 - подпятник;
- 14 - вал;
- 15 - воздухоохладитель.

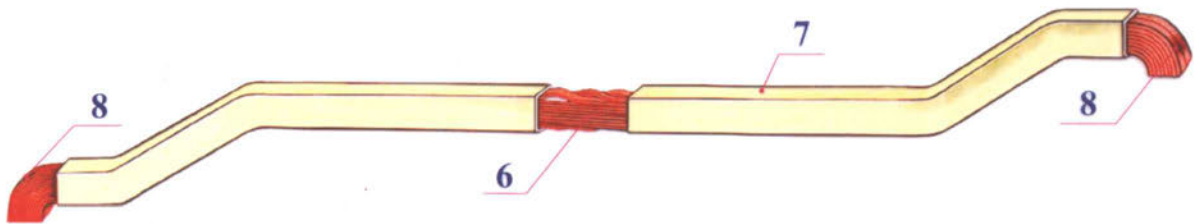


МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

СТАТОР ГИДРОГЕНЕРАТОРА

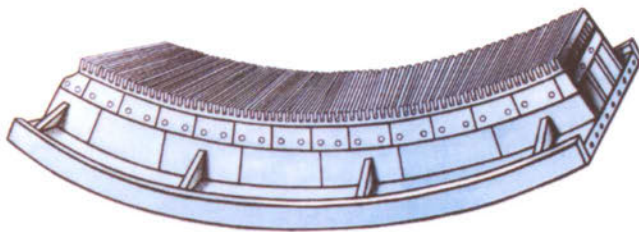


- 1 - корпус статора;
- 2 - сердечник статора;
- 3 - нажимной палец;
- 4 - нажимная плита;
- 5 - стяжная шпилька;
- 6 - элементарные проводники обмотки;
- 7 - стержень обмотки;
- 8 - выводные концы стержня.

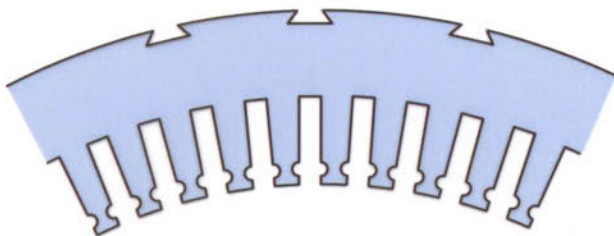
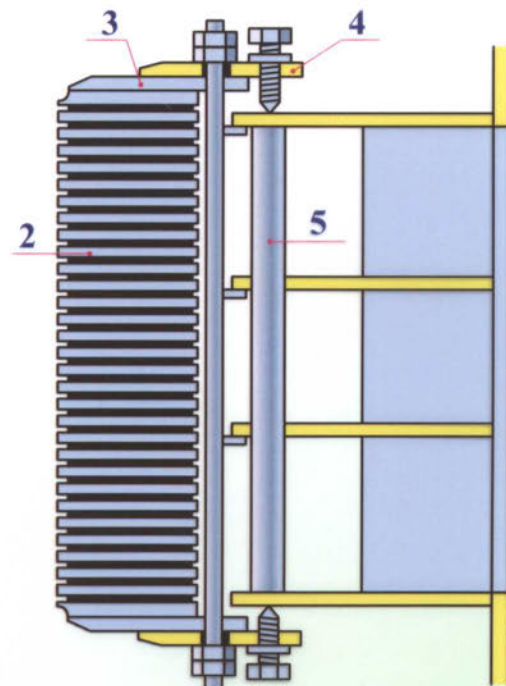


Сегмент статора

Крепление стали статора

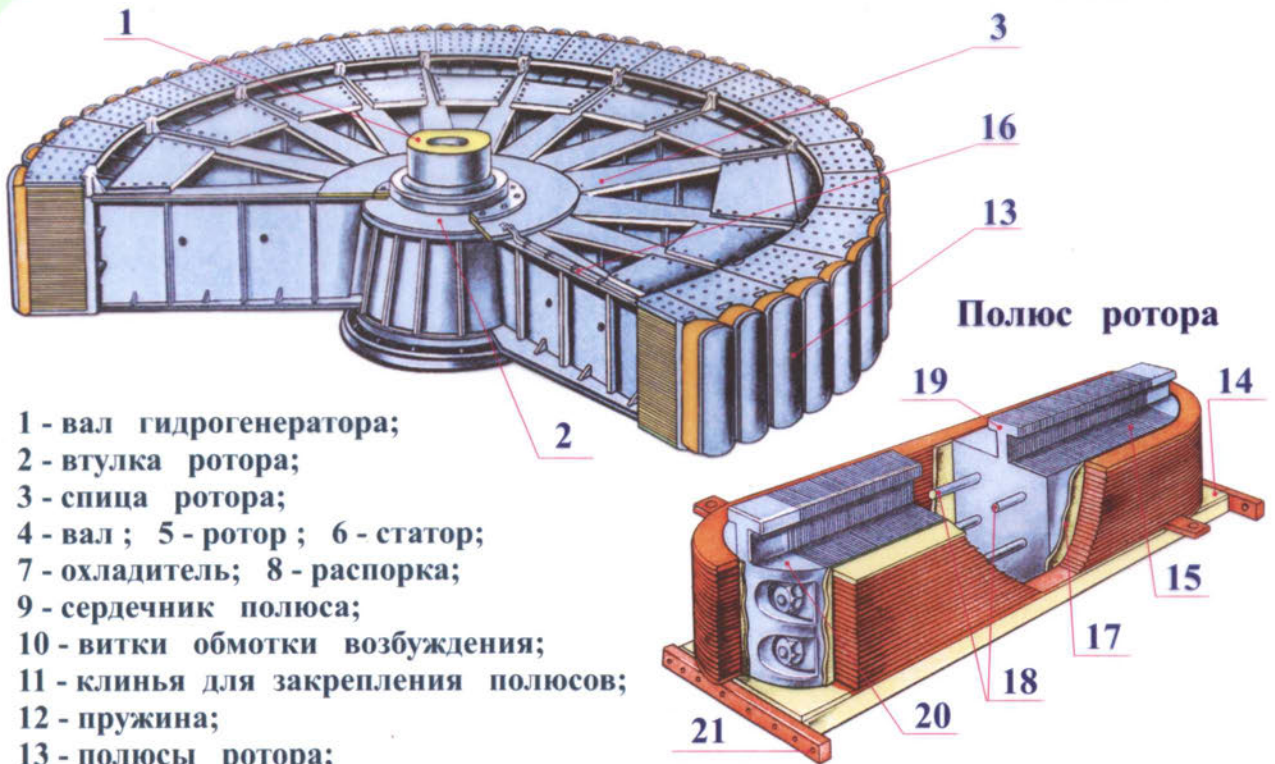


Лист статора



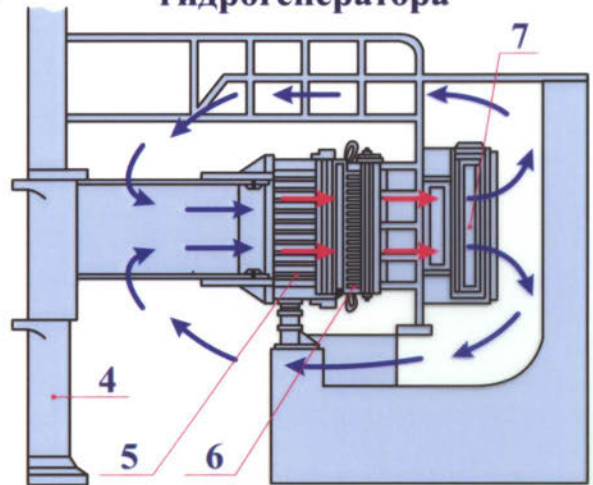
МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

РОТОР ГИДРОГЕНЕРАТОРА

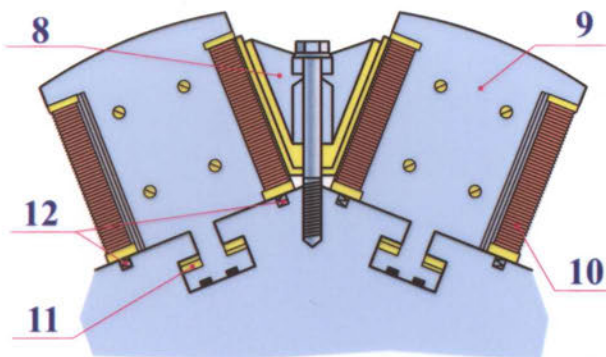


- 1 - вал гидрогенератора;
- 2 - втулка ротора;
- 3 - спица ротора;
- 4 - вал; 5 - ротор; 6 - статор;
- 7 - охладитель; 8 - распорка;
- 9 - сердечник полюса;
- 10 - витки обмотки возбуждения;
- 11 - клинья для закрепления полюсов;
- 12 - пружина;
- 13 - полюсы ротора;
- 14 - полюсный наконечник;
- 15 - сердечник полюса;
- 16 - токопровод к обмотке возбуждения;
- 17 - корпусная изоляция катушки возбуждения;
- 18 - стяжные шпильки;
- 19 - Т-образный хвост полюса;
- 20 - нажимная щека;
- 21 - сегмент демпферной обмотки.

Схема воздушного охлаждения гидрогенератора



Крепление полюсов гидрогенераторов



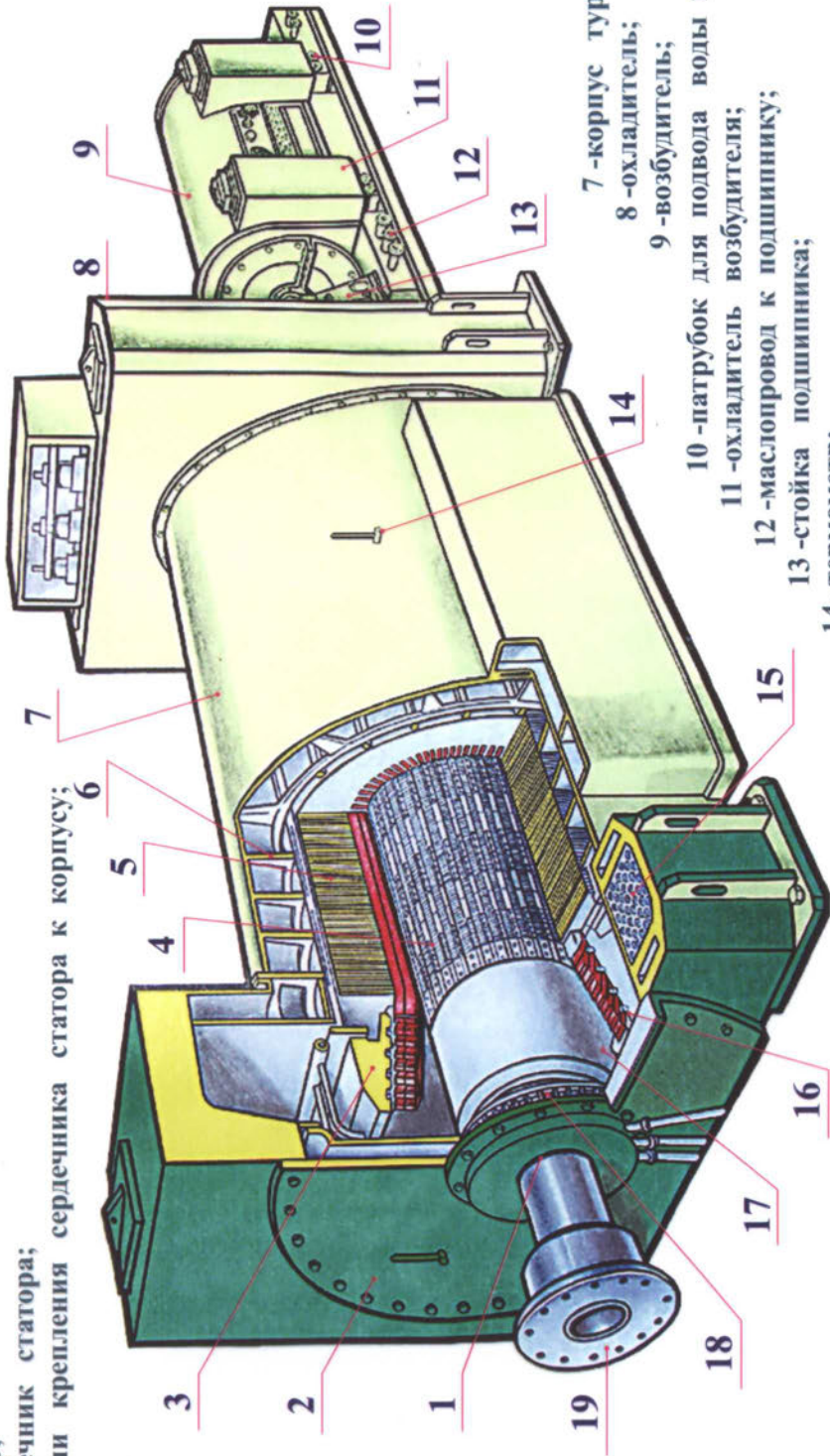
Специальный профиль медной шины для обмотки возбуждения



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ТУРБОГЕНЕРАТОР С ВОДЯНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

- 1 -уплотнение на валу ротора;
- 2 -торцевой щит;
- 3 -кронштейн крепления обмотки статора;
- 4 -ротор;
- 5 -сердечник статора;
- 6 -детали крепления статора к корпусу;



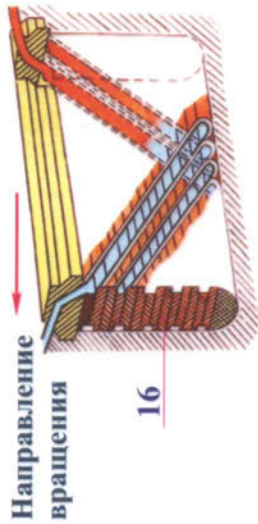
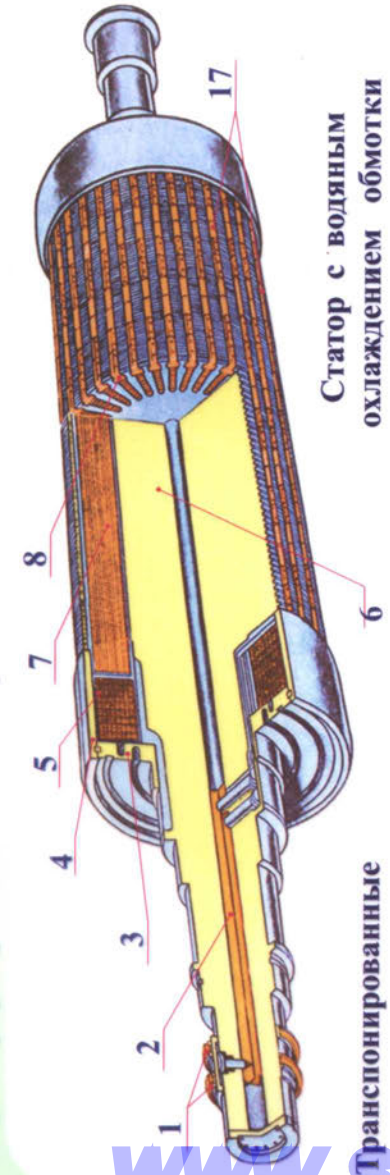
- 7 -корпус турбогенератора;
- 8 -охладитель;
- 9 -возбудитель;
- 10 -патрубок для подвода воды к охладителю;
- 11 -охладитель возбудителя;
- 12 -маслопровод к подшипнику;
- 13 -стойка подшипника;
- 14 -термометр;
- 15 -трубка для циркуляции воды в охладителе;
- 16 -бандажное кольцо обмотки статора;
- 17 -бандажное кольцо ротора;
- 18 -центробежный вентилятор;
- 19 -фланец для соединения вала ротора с турбиной.



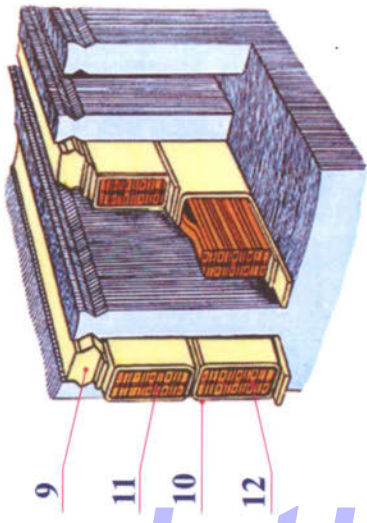
МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

РОТОР И СТАТОР ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Ротор с форсированным водородным охлаждением



Транспортируемые стержни в пазах статора



Статор с водяным охлаждением обмотки

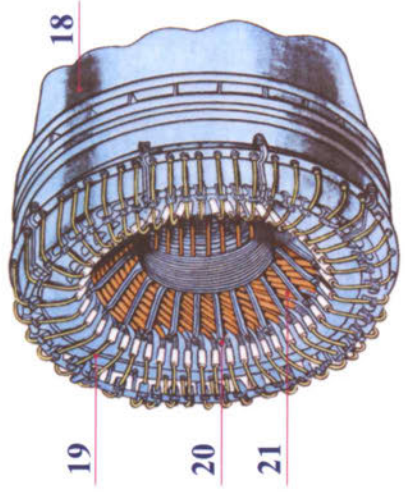


Схема непосредственного охлаждения обмотки ротора

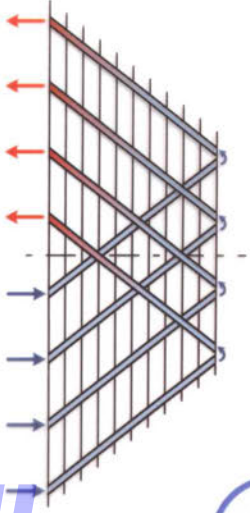
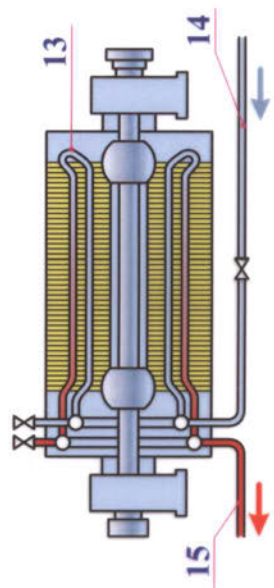


Схема циркуляции охлаждающей воды



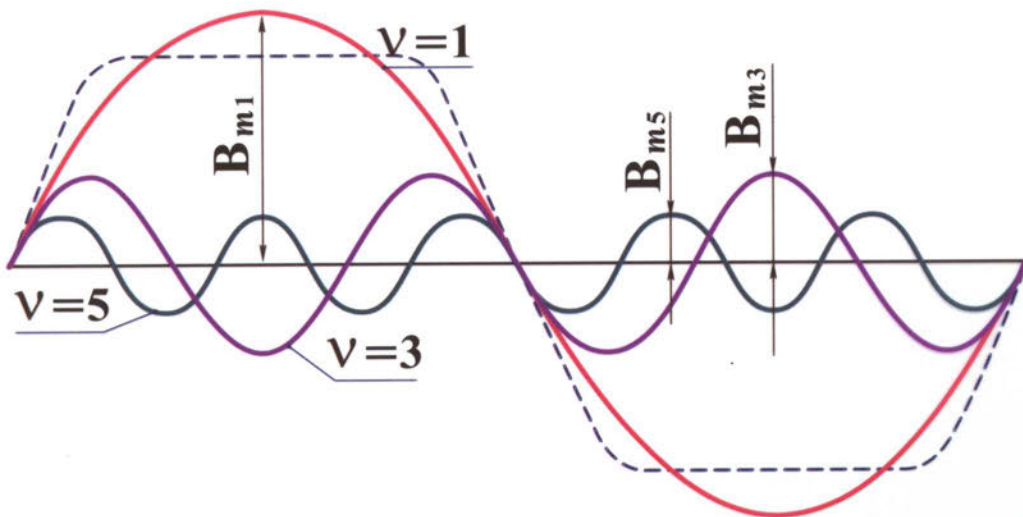
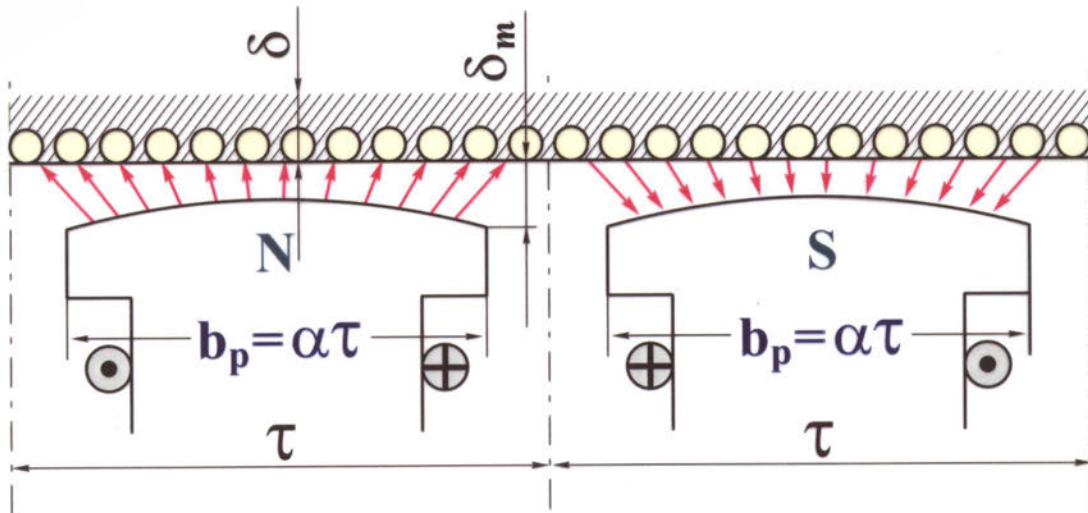
- 1 - контактные кольца;
- 2 - токопровод к обмотке возбуждения;
- 3 - центрирующее кольцо;
- 4 - бандажное кольцо;
- 5 - лобовая часть обмотки;
- 6 - бочка ротора;
- 7 - пазовая часть обмотки ротора;
- 8 - пазовые клинья ротора;
- 9 - пазовые клинья статора;
- 10 - корпусная изоляция стержня обмотки статора;
- 11 - сплошные проводники стержня;
- 12 - полые проводники стержня;
- 13 - циркуляция воды вдоль проводников;
- 14 - подвол охлаждающей воды;
- 15 - выход нагретой воды;
- 16 - проводники обмотки ротора;
- 17 - козырьки клина для захвата охлаждающего водорода;
- 18 - корпус статора;
- 19 - детали подвода охлаждающей воды к обмотке статора;
- 20 - детали крепления лобовых частей обмотки;
- 21 - лобовые части обмотки статора.



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИЕ СИЛЫ ОБМОТОК
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ЭДС от основной гармоники магнитного поля ($\nu=1$)



Распределение магнитной индукции поля
возбуждения явнополюсной синхронной
машины вдоль поверхности статора

МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИЕ СИЛЫ ОБМОТК ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ЭДС проводника

$$e_{пр} = E_{м пр} \cdot \sin \omega t;$$

$$E_{м пр} = B_{\delta} \cdot \ell_{\delta} \cdot \nu, \text{ где } \nu = \frac{\pi D n}{60} \cdot \frac{2p}{2p} = 2\tau \frac{pn}{60} = 2\tau f.$$

При синусоидальном распределении индукции

$$B_{m1} = B_{\delta} = \frac{\pi}{2} B_{ср},$$

где $B_{ср}$ - среднее значение индукции в воздушном зазоре.

Следовательно,

$$E_{м пр} = \frac{\pi}{2} \cdot 2f \ell_{\delta} \cdot \tau B_{ср} = \pi f_1 \Phi \text{ и}$$

действующее значение ЭДС проводника

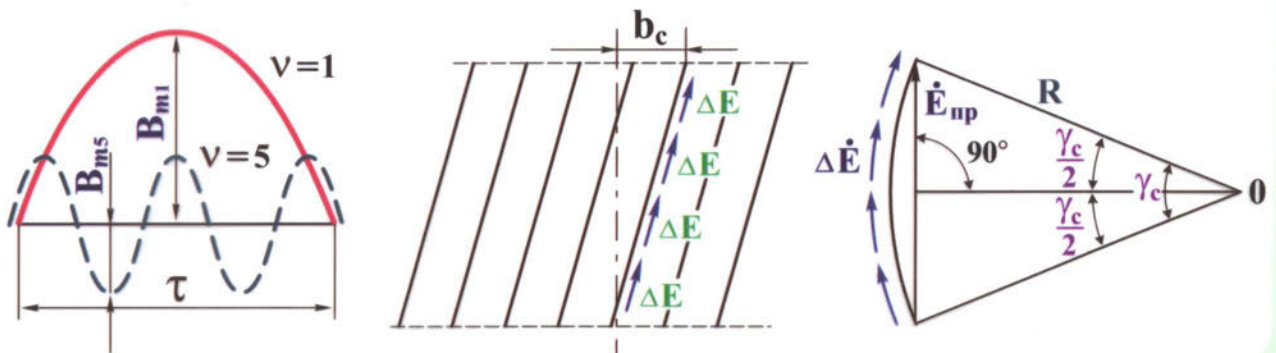
$$E_{пр} = \frac{E_{м пр}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \Phi = 2,22 f_1 \Phi.$$

При наличии скоса пазов

$$E_{пр} = 2,22 \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot k_c,$$

$$\text{где } k_c = \frac{2R \sin \frac{\gamma_c}{2}}{R\gamma} = \frac{\sin \frac{\gamma_c}{2}}{\gamma/2} = \frac{\sin \frac{b_c}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}}{\frac{b_c}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}} \text{ - коэффициент скоса.}$$

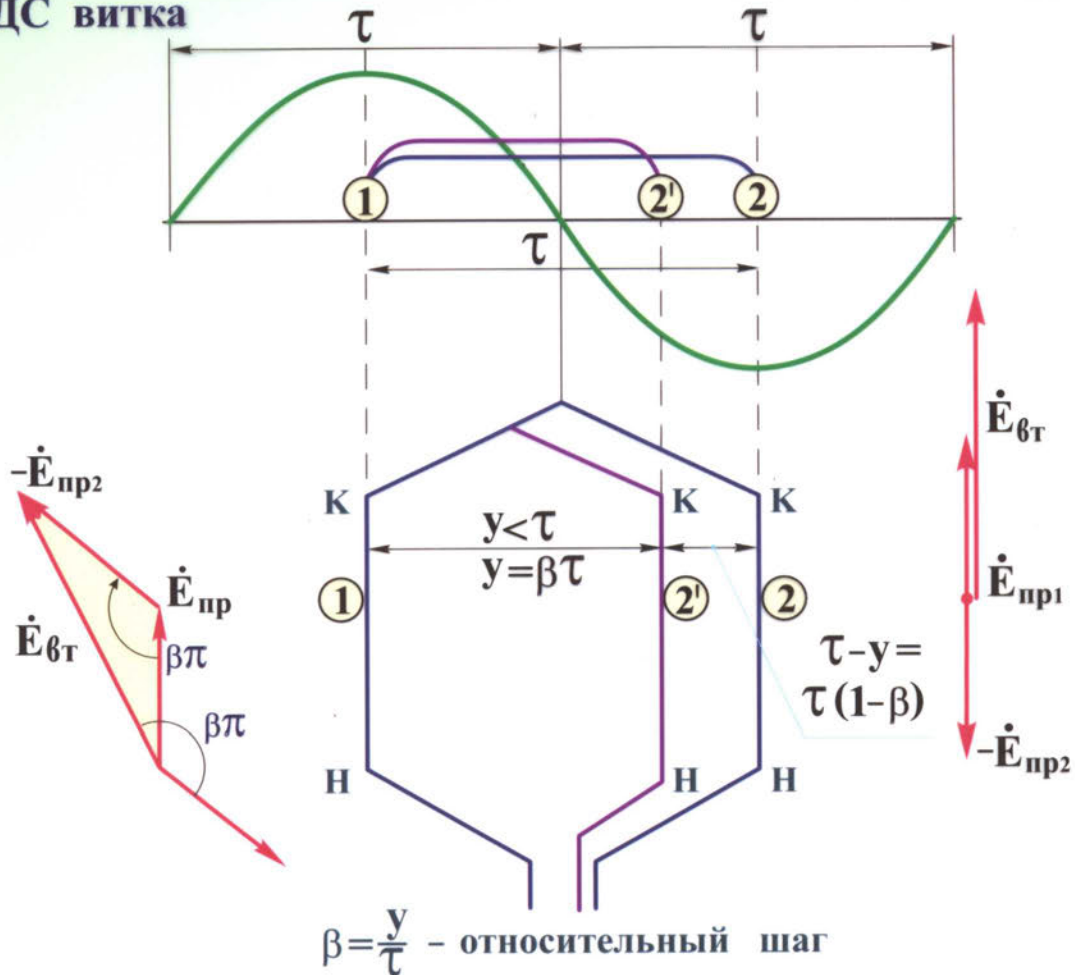
К определению коэффициента скоса



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ЭДС ОТ ОСНОВНОЙ ГАРМОНИКИ ПОЛЯ

ЭДС витка



$$\dot{E}_{\theta\tau} = \dot{E}_{пр1} - \dot{E}_{пр2}.$$

$$E_{\theta\tau}(y = \tau) = 2E_{пр} = \sqrt{2} \pi k_c f \Phi = 4,44 k_c f_1 \Phi;$$

$$E_{\theta\tau}(y < \tau) = 2E_{пр} \cdot \sin \frac{\beta\pi}{2} = 2E_{пр} \cos \frac{\pi}{2} (1 - \beta);$$

$$E_{\theta\tau}(y < \tau) = 2E_{пр} \cdot k_y = \sqrt{2} \pi k_c k_y \cdot f \Phi,$$

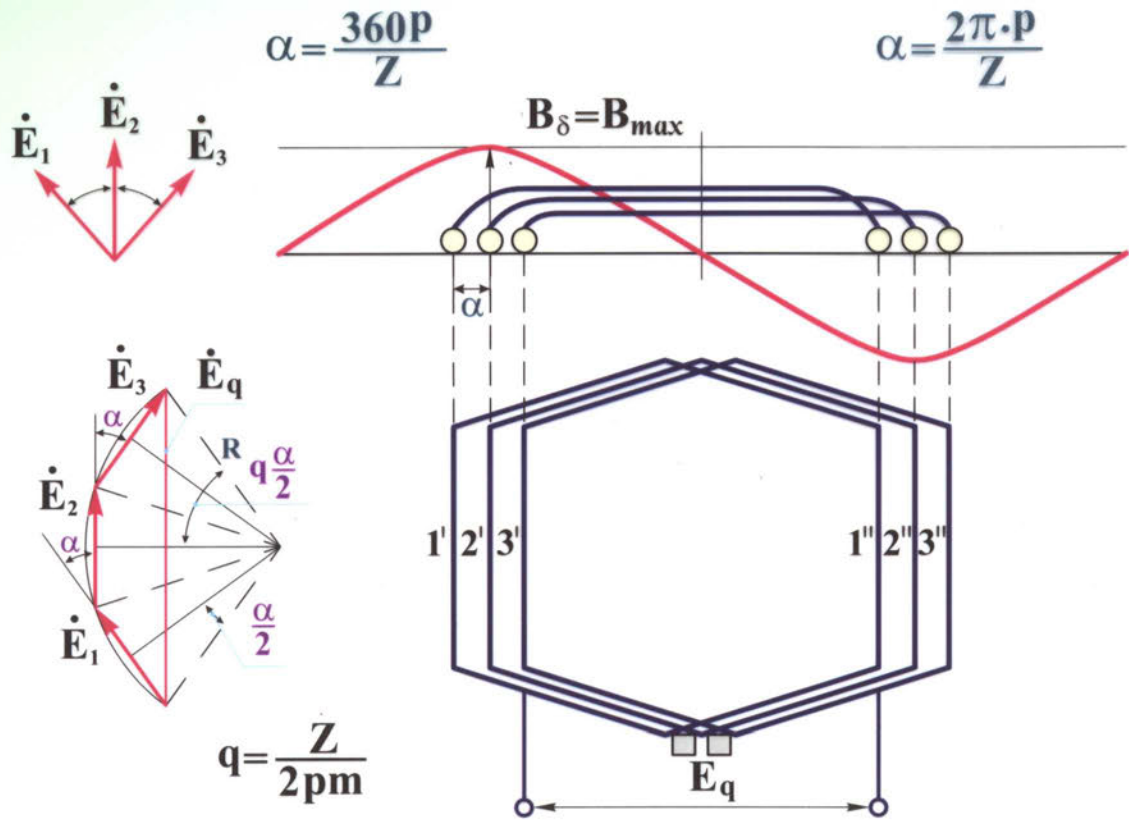
Где $k_y = \sin \frac{\pi\beta}{2} = \cos \frac{\pi}{2} (1 - \beta)$ - коэффициент укорочения.

$$E_K = \sqrt{2} \pi \cdot k_c \cdot k_y W_K \cdot f_1 \Phi. \text{ - ЭДС катушки.}$$



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ЭДС КАТУШЕЧНОЙ ГРУППЫ



$$k_{p1} = \frac{E_q}{E_1 + E_2 + E_3} = \frac{E_q}{3 E_K} = \frac{2R \sin \frac{q\alpha}{2}}{2Rq \sin \frac{\alpha}{2}};$$

$$k_{p1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}.$$

- коэффициент распределения.

$$E_q = k_{p1} q E_q = \sqrt{2} \pi k_{p1} \cdot k_{y1} \cdot k_c = \sqrt{2} \pi \cdot k_c \cdot k_{об1} \cdot q W_K f_1 \Phi, \text{ где}$$

$k_{об1} = k_{y1} \cdot k_{p1}$ - обмоточный коэффициент.

ЭДС фазы обмотки

$$E = \sqrt{2} \pi \cdot k_c \cdot k_{об1} \cdot nq W_K f \Phi = \sqrt{2} \pi \cdot k_c \cdot k_{об1} \cdot W f_1 \Phi, \text{ где}$$

$W = nq W_K$ - число последовательно соединенных витков фазы.

$$E_v = \pi \sqrt{2} k_{обv} \cdot k_{cv} \cdot f_v \Phi_v$$

$$k_{обv} = k_{yv} \cdot k_{pv};$$

$$k_{yv} = \sin \frac{v\beta\pi}{2} = \cos \frac{v\pi}{2} (1 - \beta);$$

$$k_{pv} = \frac{\sin \frac{vq\alpha}{2}}{q \sin \frac{v\alpha}{2}}; \quad k_{cv} = \frac{b_c/\tau \cdot v\pi/2}{\frac{b_c}{\tau} \cdot \frac{v\pi}{2}};$$

$$\Phi_v = \frac{2}{\pi} \cdot B_{\delta v} \cdot \tau_v \cdot l_{\delta}, \quad \text{где } \tau_v = \frac{\tau}{v};$$

$$f_v = v f_1.$$

Зубцовые гармоники поля

$$v_z = 2qmk \pm 1 = k \frac{Z}{p} \pm 1, \quad \text{где } k = 1, 2, 3, \dots$$

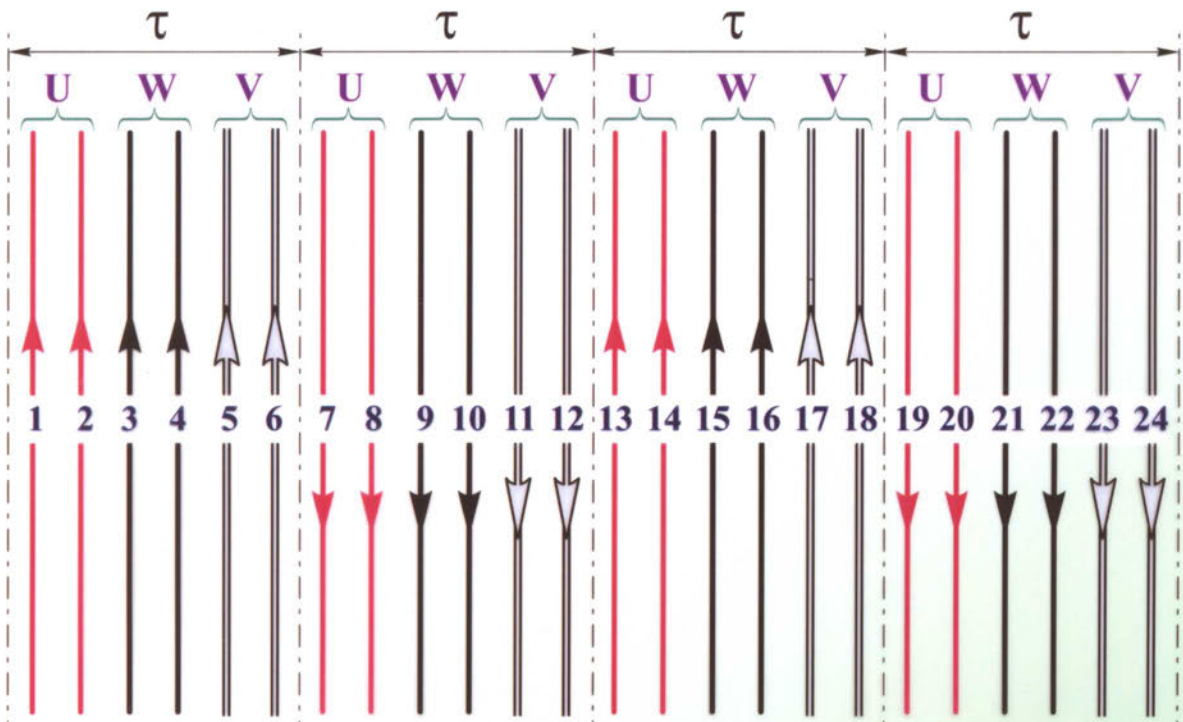
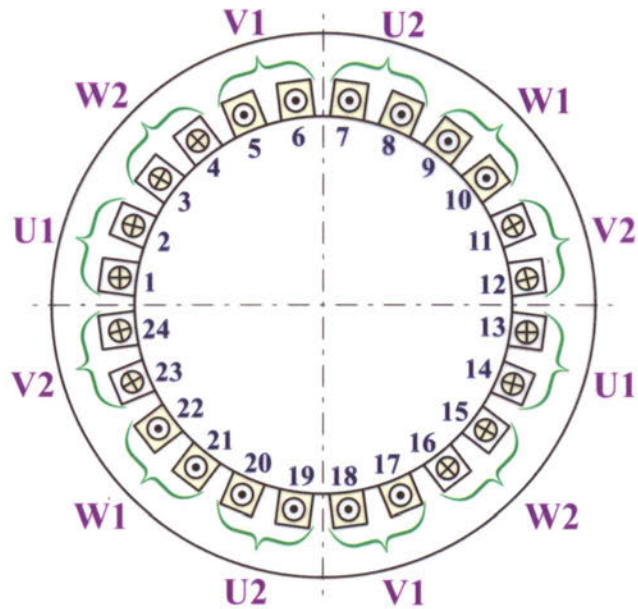


МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ОБМОТКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
ОДНОСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Варианты петлевой обмотки
при $m = 3, Z = 24, 2p = 4, a = 1$.

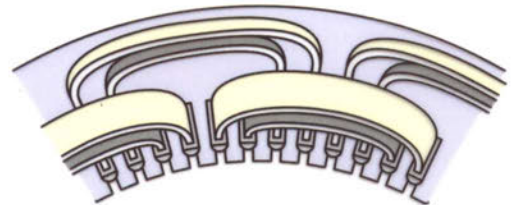
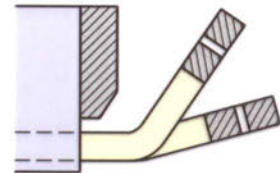
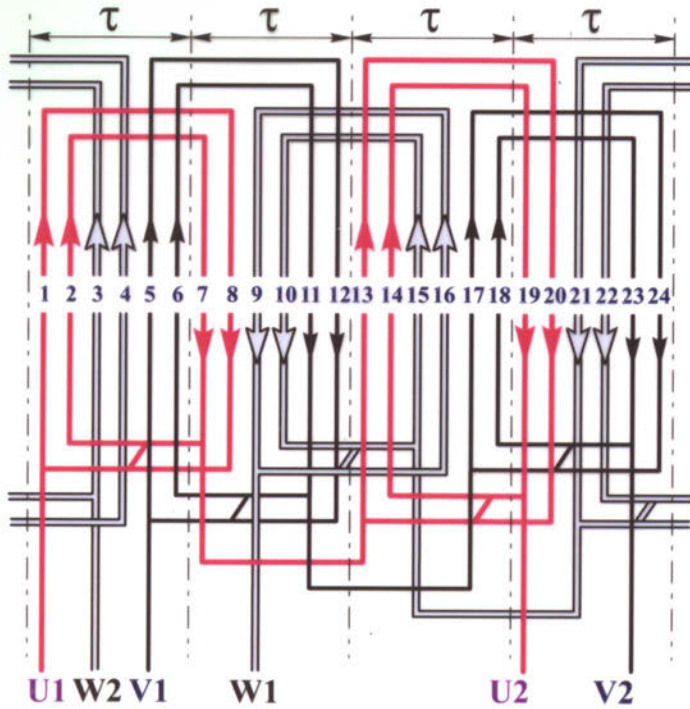
Распределение пазов между фазами



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

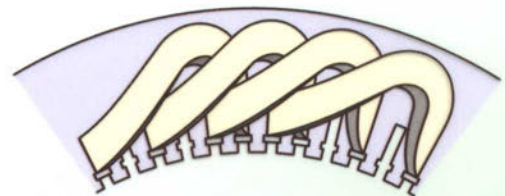
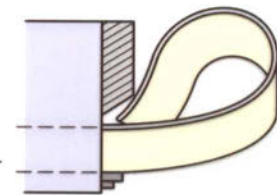
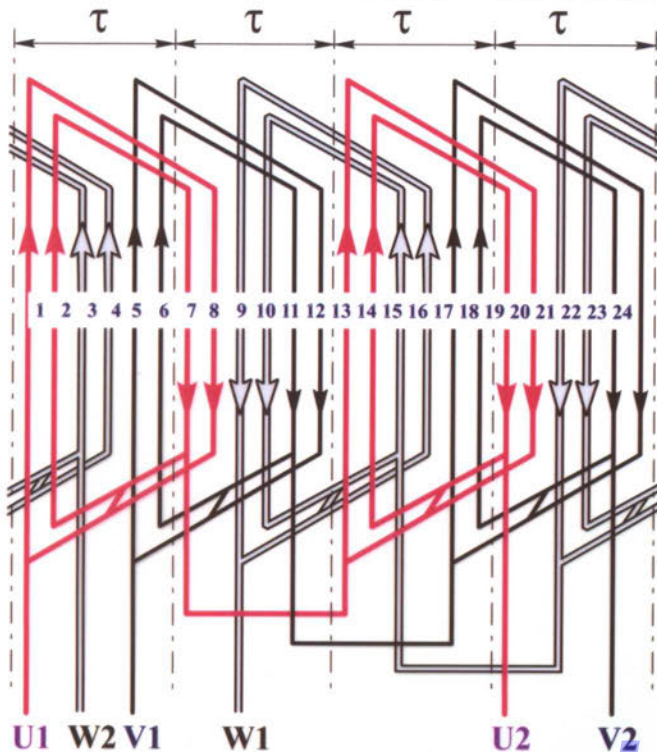
ОБМОТКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
ОДНОСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Схема концентрической обмотки



Расположение лобовых частей в двух плоскостях (двухплоскостная обмотка)

Схема шаблонной обмотки



Расположение лобовых частей шаблонной обмотки

РНПО Росучприбор Южно-Уральский Государственный университет



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ОБМОТКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
ОДНОСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Схема однослойной равнокатушечной обмотки

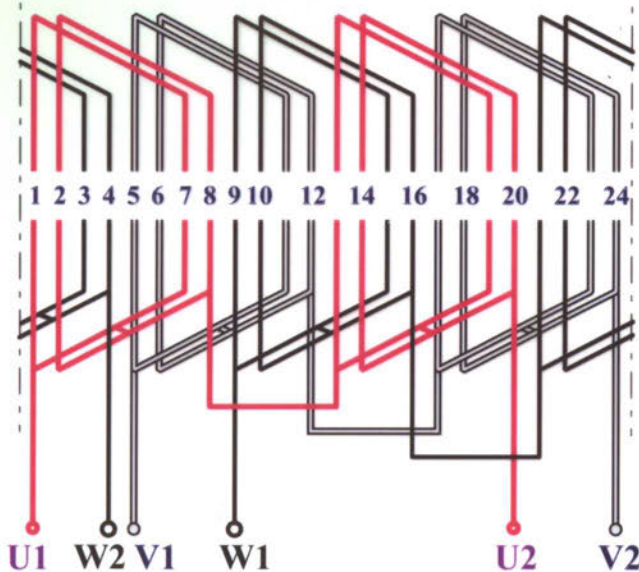
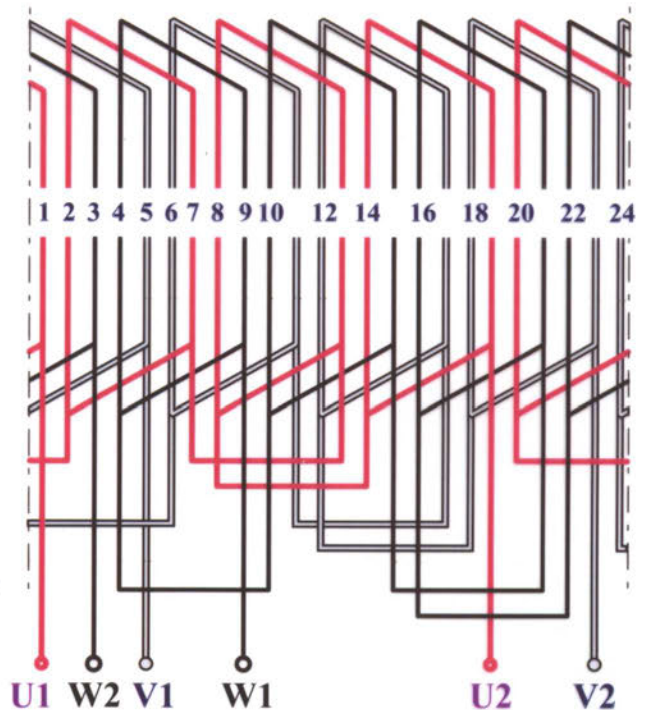
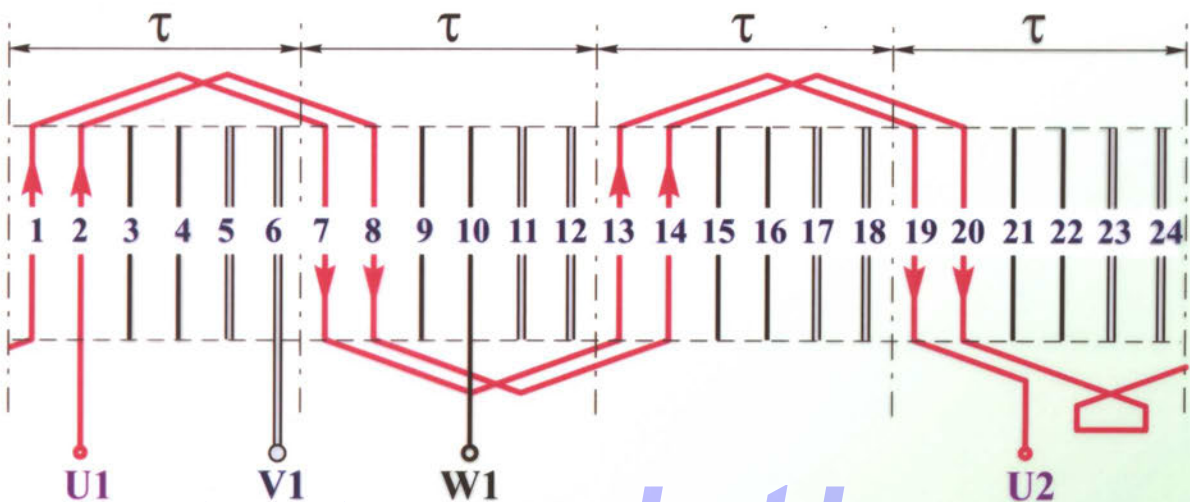


Схема однослойной равнокатушечной обмотки в развалку



Трехфазная однослойная волновая обмотка (фаза U1 - U2),
 $Z = 24, 2p = 4, q = 2.$

Фазы V1 - V2 и W1 - W2 выполняются аналогично.



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ДВУХСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

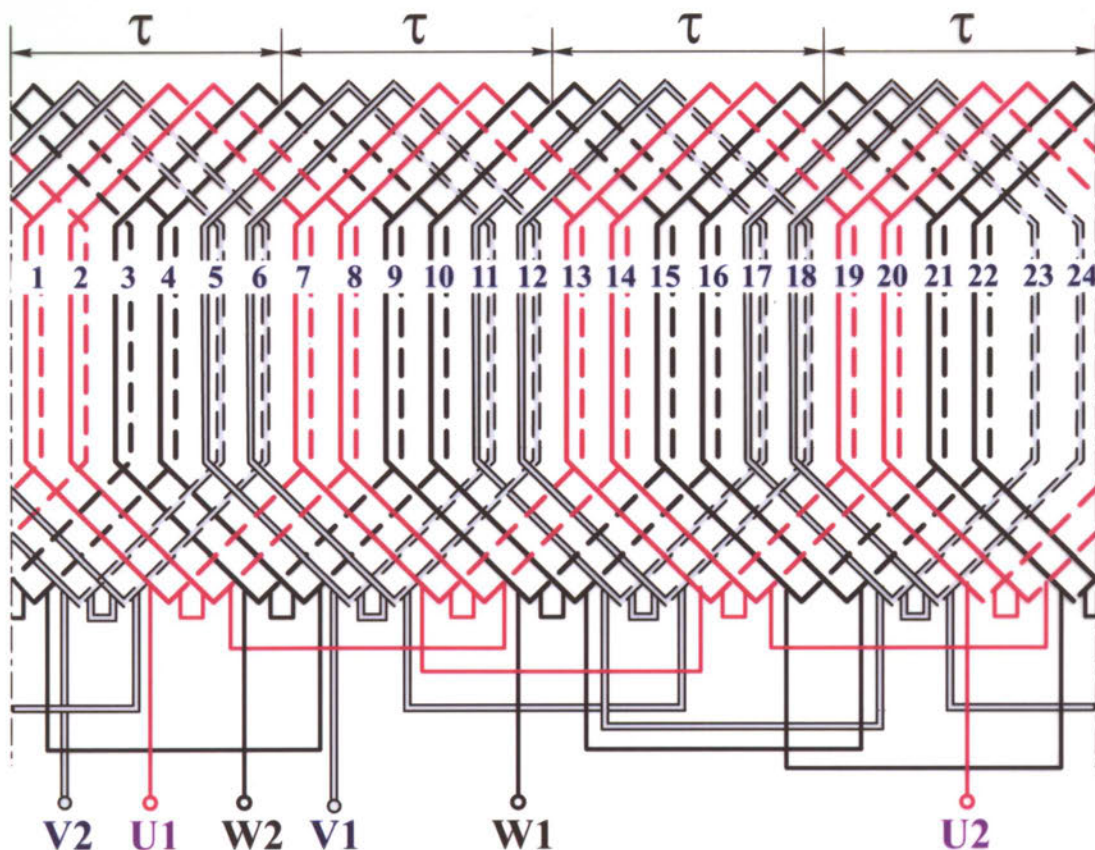
К построению схем
двухслойных обмоток



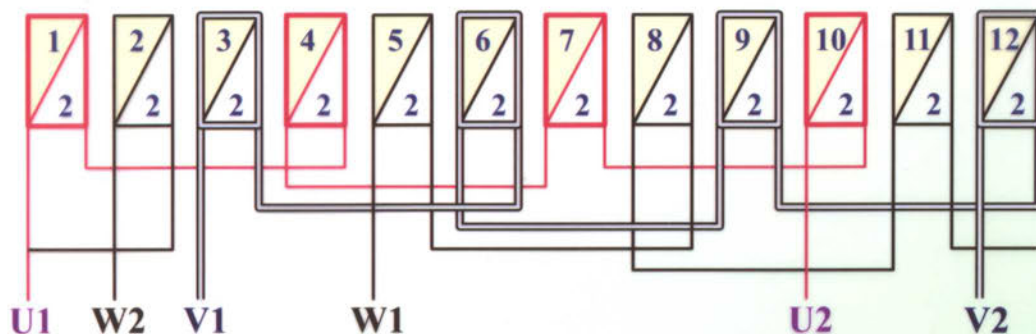
МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ДВУХСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ

Схема двухслойной петлевой обмотки с диаметральным шагом при $m=3$, $Z=24$, $2p=4$, $a=1$, $y=\tau=6$



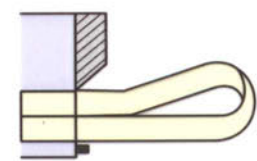
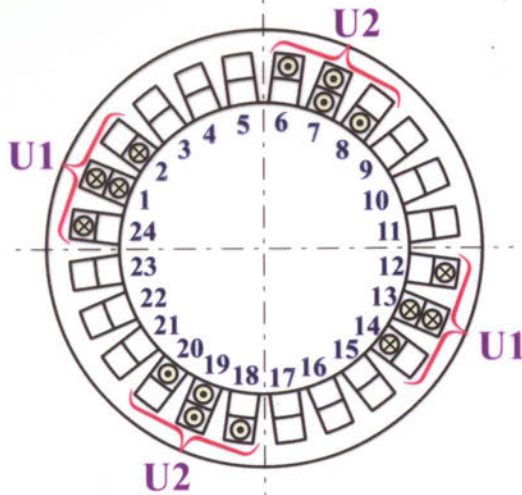
Условная схема двухслойной обмотки при $m=3$, $Z=24$, $2p=4$, $a=1$.



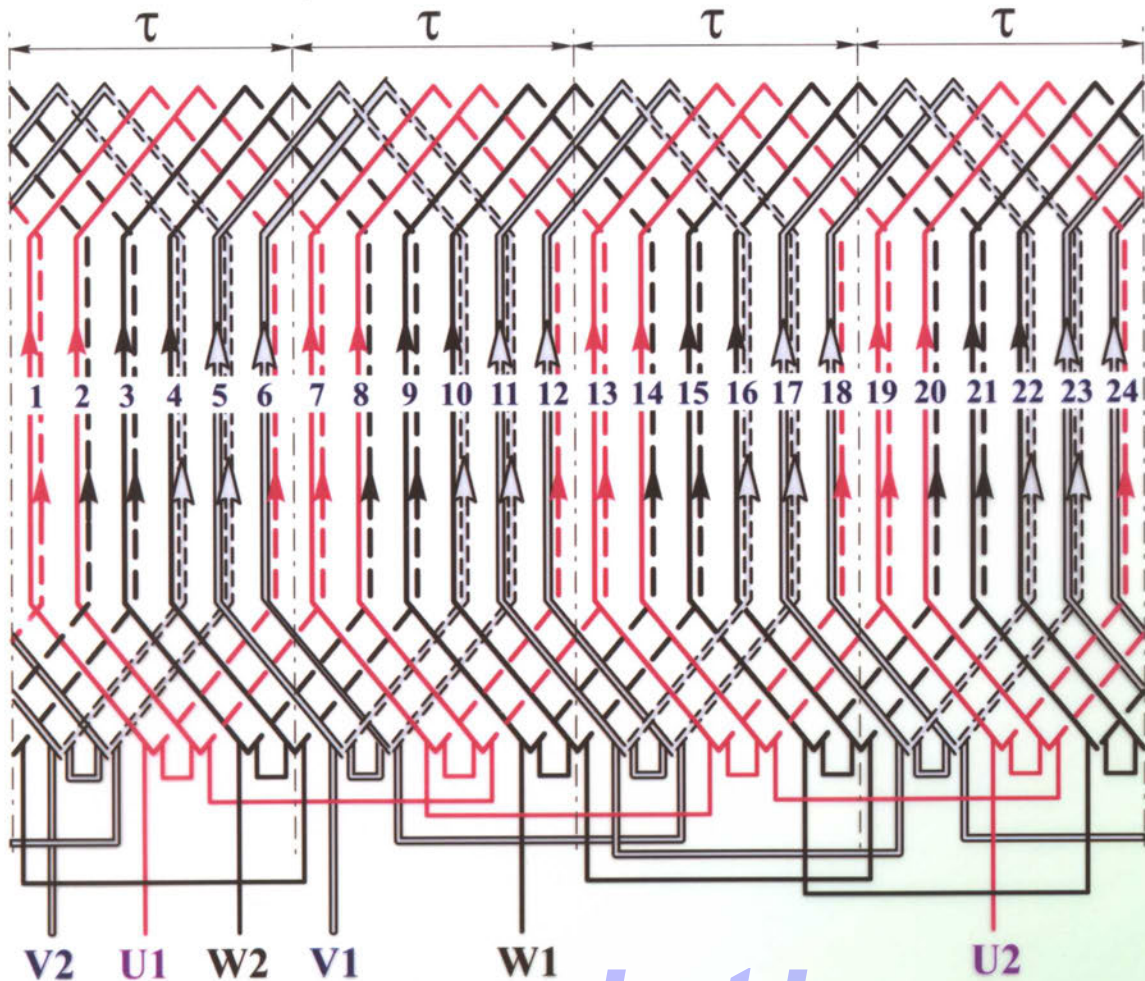
МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ДВУХСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ

Схема двухслойной петлевой обмотки с укороченным шагом при $m=3$, $Z=24$, $2p=4$, $a=1$, $Y=\frac{5}{6}\tau=5$.



Устройство лобовых частей



www.samelectric.ru



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ДВУХСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ

Принцип построения схемы стержневой волновой обмотки фазного ротора асинхронного двигателя при $m = 3, Z = 24, 2p = 4, q = 2$.

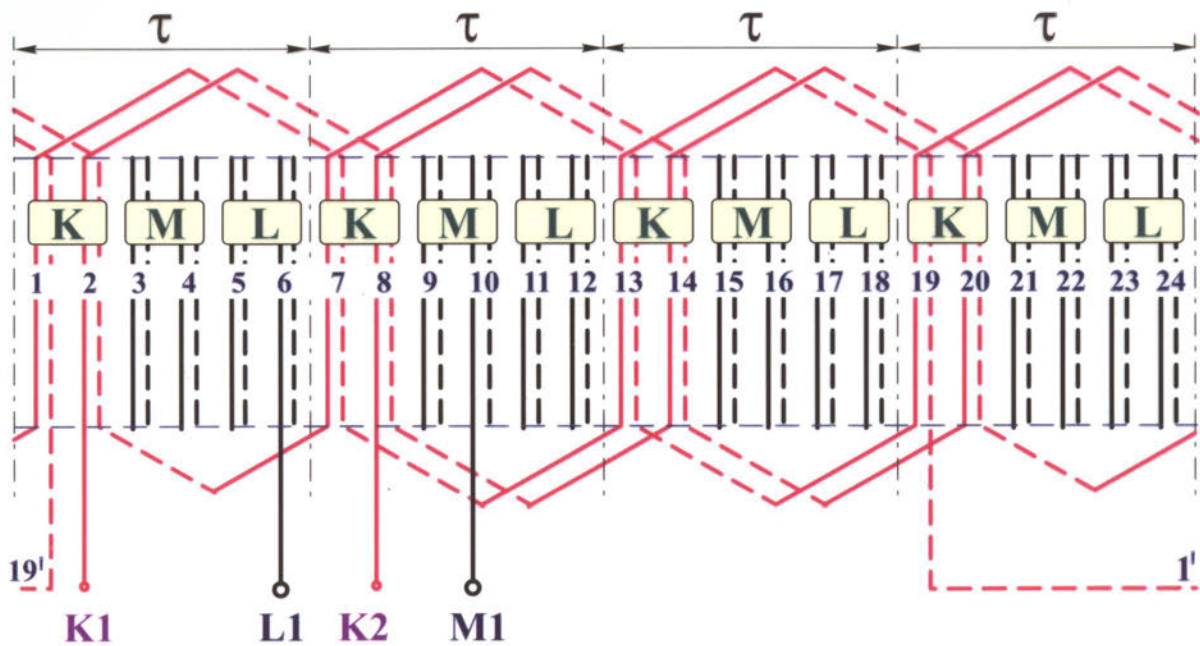


Схема фазной обмотки K1 - K2

Слой \ Обходы	Первый	Второй	Третий	Четвертый
ВЕРХНИЙ	K1 → 2 → 14 → 1	13 → 7 → 19 → 20 → 8 → K2		
НИЖНИЙ	8' → 20' → 7' → 19'	1' → 13' → 2' → 14'		

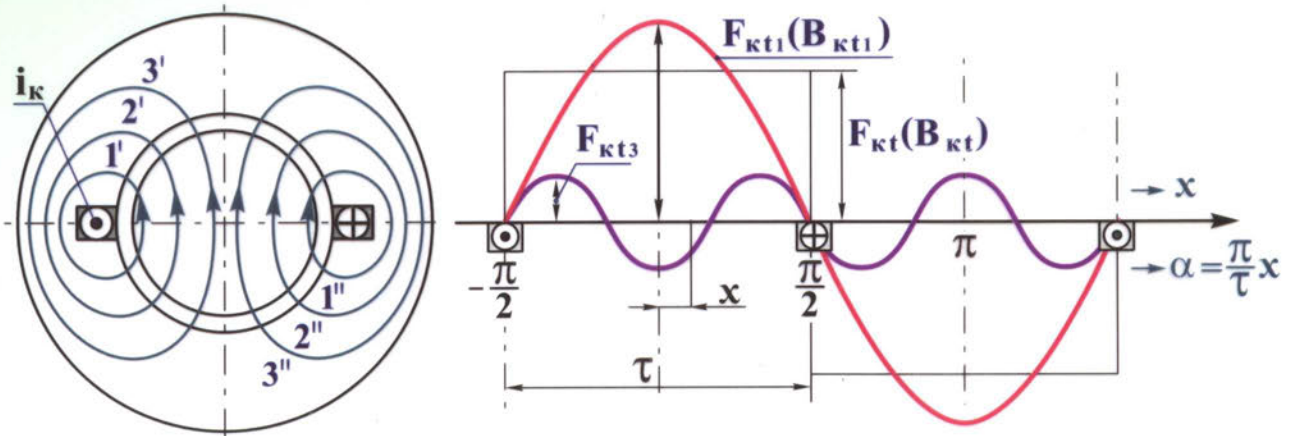
Фазы L1 - L2 и M1 - M2 выполняются аналогично.



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

МАГНИТОДВИЖУЩИЕ СИЛЫ ОБМОТК ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Магнитодвижущая сила сосредоточенной обмотки



МДС и магнитное поле сосредоточенной обмотки (катушки) с полным шагом двухполюсной машины

$$H_{\delta} \cdot 2\delta = i_k W_k; \quad H_{\delta} = \frac{1}{\delta} \cdot \frac{i_k W_k}{2}; \quad B_{\delta} = \mu_{\delta} H_{\delta} = \frac{\mu_0}{\delta} \cdot \frac{i_k W_k}{2} = \lambda_{\delta} \cdot F_{kt};$$

$$F_{kt} = \frac{i_k W_k}{2} = \frac{\sqrt{2} W_k I_k}{2} \sin \omega t = F_{km} \sin \omega t.$$

$$F_{kt\alpha} = F_{kt1} \cos \alpha + F_{kt3} \cos 3\alpha + \dots + F_{ktv} \cos v\alpha.$$

$$F_{ktv} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} F_{kt} \cos v\alpha \cdot d\alpha = \frac{1}{v} \cdot \sin \frac{v\pi}{2} \cdot \frac{4}{\pi} F_{kt} =$$

$$= \pm 1 \frac{4}{v\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} I_k W \sin \omega t = \pm \frac{1}{v} F_{k1} \sin \omega t, \quad \text{где } F_{k1} = 0,9 I_k W_k.$$

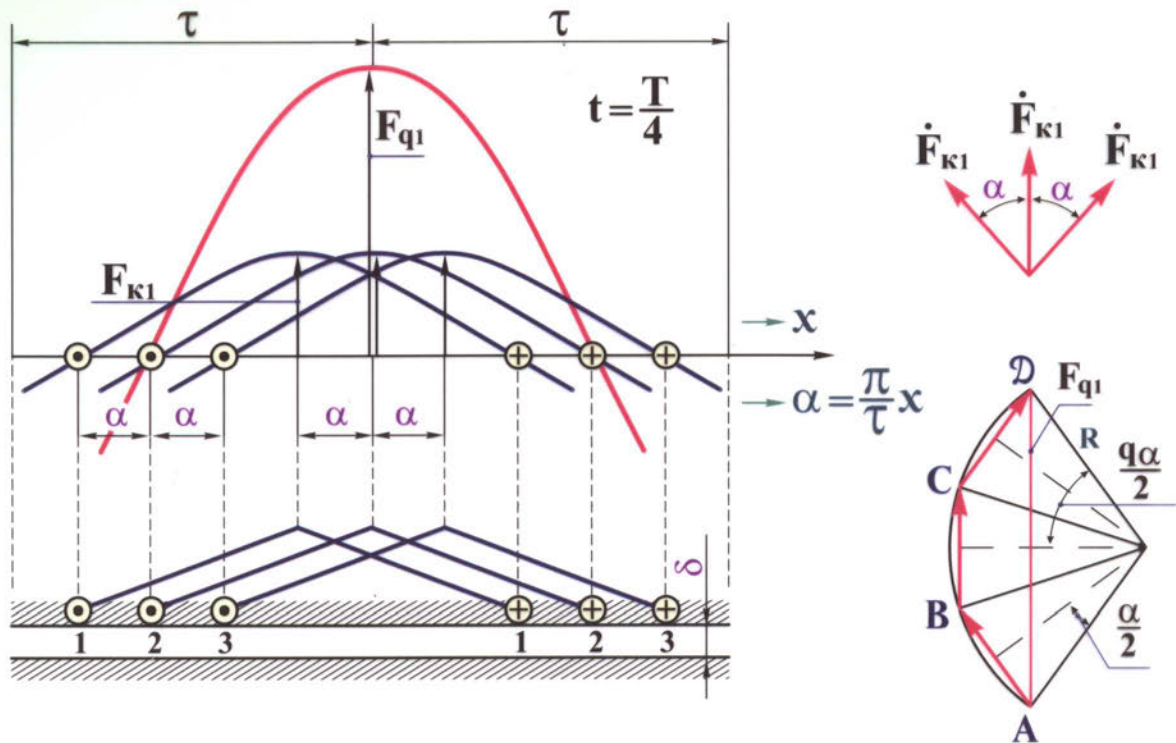
$$F_{ktx} = (F_{k1} \cos \frac{\pi}{\tau} x - F_{k3} \cos 3 \frac{\pi}{\tau} x \pm \dots \pm F_{kv} \cos v \frac{\pi}{\tau} x) \sin \omega t.$$



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

МАГНИТОДВИЖУЩИЕ СИЛЫ ОБМОТКОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

МДС и магнитное поле катушечной группы



МДС катушечной группы с полным шагом

Сложение МДС катушек группы

$$F_{q1} = k_{p1} \cdot q F_{k1} = 0,9 k_{p1} \cdot I_k W_k, \text{ где } k_{p1} = \frac{A\mathcal{D}}{AB+BC+C\mathcal{D}} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}} - \text{коэффициент распределения.}$$

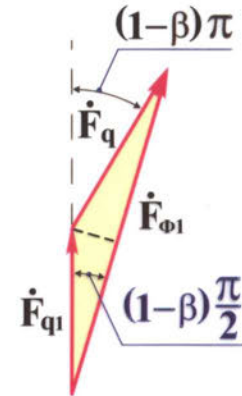
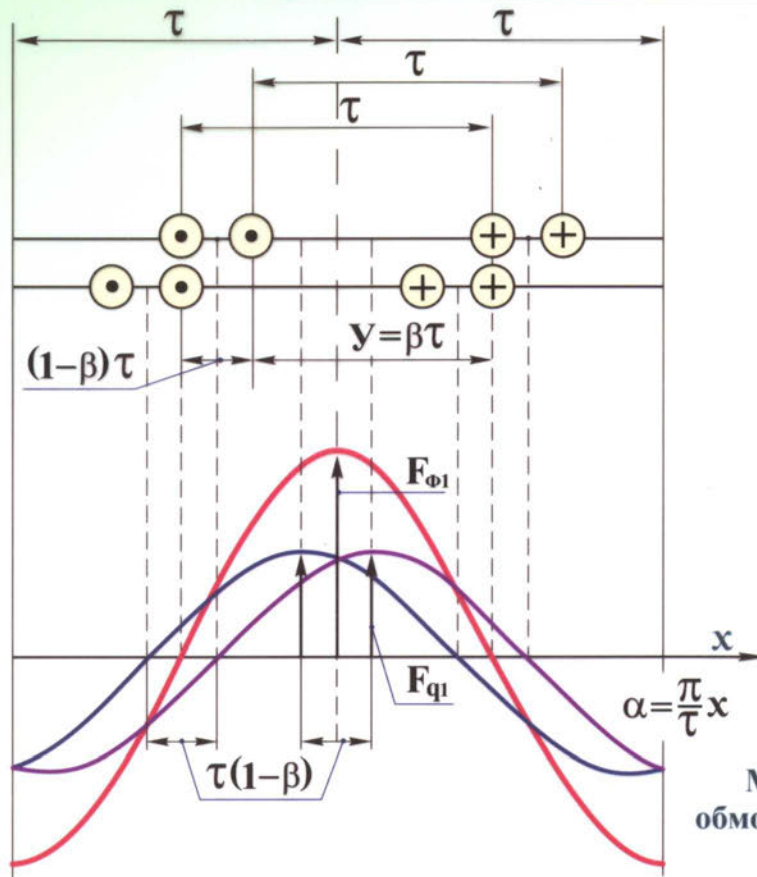
$$F_{qt} x = (F_{q1} \cos \frac{\pi}{\tau} x - F_{q3} \cos 3 \frac{\pi}{\tau} x \pm \dots \pm F_{qv} \cos v \frac{\pi}{\tau} x) \sin \omega t.$$

$$F_{qv} = k_{pv} q F_{kv}.$$



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

МДС ФАЗНОЙ ОБМОТКИ



Сложение МДС двух слоев фазы обмотки

Первая гармоника МДС фазы двухслойной обмотки с укороченным шагом

$$F_{\Phi t, x} = (F_{\Phi 1} \cos \frac{\pi}{\tau} x - F_{\Phi 3} \cos 3 \frac{\pi}{\tau} x \pm \dots \pm F_{\Phi v} \cos v \frac{\pi}{\tau} x) \sin \omega t$$

$$F_{\Phi v} = 2F_{q v} \cdot \cos \frac{\pi}{\tau} (1 - \beta) = 2F_{q v} \cdot k_{y v} =$$

$$2q F_{k v} \cdot k_{p v} \cdot k_{y v} = 2q \frac{F_{k 1}}{V} \cdot k_{o b v} = \frac{2 \cdot 0,9 \cdot I_k \cdot W_k k_{o b 1}}{V}$$

Так как число последовательно соединенных витков фазы двухслойной обмотки $W = \frac{2pqW_k}{a}$ и следовательно, $W_k = \frac{aW}{2pq}$, то

$$F_{\Phi v} = 0,9 \frac{W \cdot k_{o b v} I_k a}{vp} = 0,9 \frac{k_{o b v} \cdot W}{vp} I$$

$$F_{\Phi 1} = 0,9 \frac{k_{o b 1} W}{p} I$$



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ВРАЩАЮЩИЕСЯ ВОЛНЫ МДС

Первая гармоника МДС фазы

$$F_{\Phi t x 1} = F_{\Phi 1} \sin \omega t \cdot \cos \frac{\pi}{\tau} x = \frac{1}{2} F_{\Phi 1} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right) + \frac{1}{2} F_{\Phi 1} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x \right) = F'_{\Phi t x 1} + F''_{\Phi t x 1}.$$

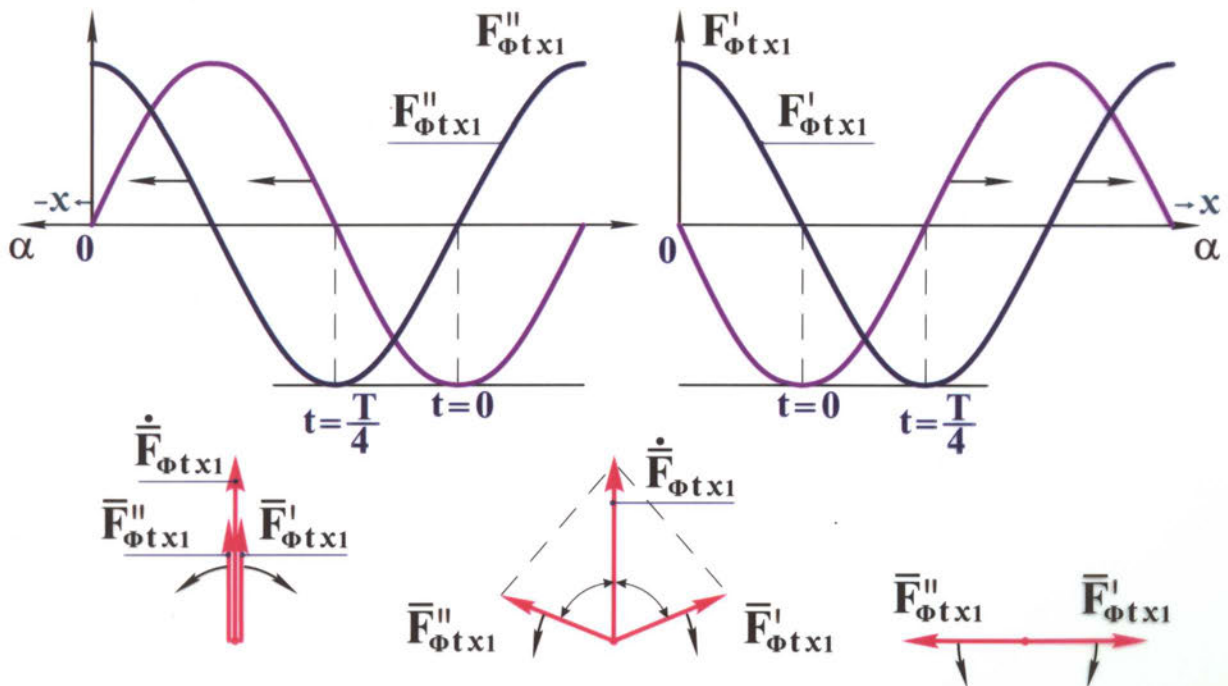
$$F'_{\Phi t x 1} = \frac{1}{2} F_{\Phi 1} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right) \text{ - прямовращающаяся волна МДС;}$$

$$F''_{\Phi t x 1} = \frac{1}{2} F_{\Phi 1} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x \right) \text{ - обратновращающаяся волна МДС.}$$

Так как изменение t компенсируется изменением x , то

$$\left(\omega t \pm \frac{\pi}{\tau} x \right) = \text{const} \text{ и } v', v'' = \pm \frac{dx}{dt} = \pm \frac{\omega \tau}{\pi} = \pm 2\tau f_1$$

$$\text{или } n'_1 = \frac{60 f_1}{p} \text{ и } n''_1 = -\frac{60 f_1}{p}.$$



$$F_{\Phi t x v} = F_{\Phi v} \sin \omega t \cdot \cos v \frac{\pi}{\tau} x = \frac{1}{2} F'_{\Phi t x v} + F''_{\Phi t x v} = F_{\Phi v} \cdot \sin \left(\omega t - v \frac{\pi}{\tau} x \right) - \frac{1}{2} F_{\Phi v} \cdot \sin \left(\omega t + v \frac{\pi}{\tau} x \right).$$

$$n'_1 = \frac{60 f_1}{v p} ; n''_1 = -\frac{60 f_1}{v p}.$$



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ПЕРВАЯ ГАРМОНИКА МДС ТРЕХФАЗНОЙ
ОБОТКИ (АНАЛИТИЧЕСКИЙ ВЫВОД)

$$F_{U_{tx1}} = F_{\Phi 1} \cdot \sin \omega t \cos \frac{\pi}{\tau} x = \frac{1}{2} F_{\Phi 1} \sin(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x) + \frac{1}{2} F_{\Phi 1} \sin(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x);$$

$$\begin{aligned} F_{V_{tx1}} &= F_{\Phi 1} \cdot \sin(\omega t - \frac{2}{3} \pi) \cos(\frac{\pi}{\tau} x - \frac{2}{3} \pi) = \\ &= \frac{1}{2} F_{\Phi 1} \sin(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x) + \frac{1}{2} F_{\Phi 1} \sin(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x - \frac{4}{3} \pi); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{W_{tx1}} &= F_{\Phi 1} \sin(\omega t - \frac{4}{3} \pi) \cos(\frac{\pi}{\tau} x - \frac{4}{3} \pi) = \\ &= \frac{1}{2} F_{\Phi 1} \sin(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x) + \frac{1}{2} F_{\Phi 1} \sin(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x - \frac{8}{3} \pi). \end{aligned}$$

$$F_{tx1} = F_{U_{tx1}} + F_{V_{tx1}} + F_{W_{tx1}} = \frac{3}{2} F_{\Phi 1} \sin(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x) = F_1 \sin(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x).$$

$$F_1 = \frac{3}{2} F_{\Phi 1} = \frac{3}{2} \cdot 0,9 \frac{k_{об1} W_1}{p} I = 1,35 \frac{k_{об1} \cdot W_1}{p} I.$$

Если число фаз m , то

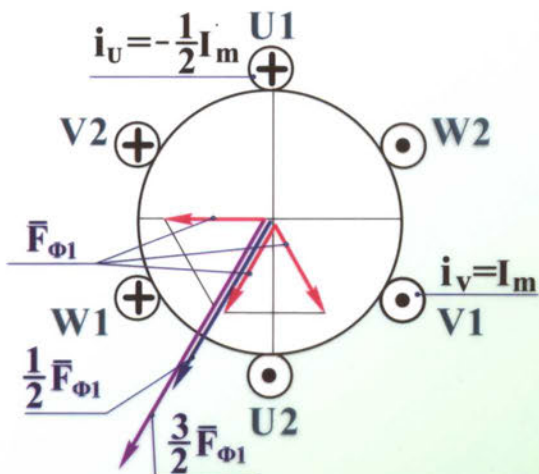
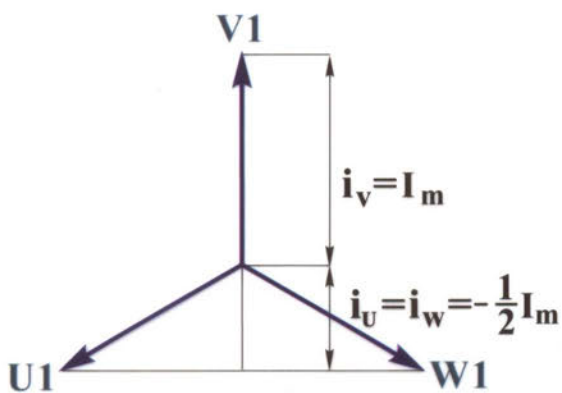
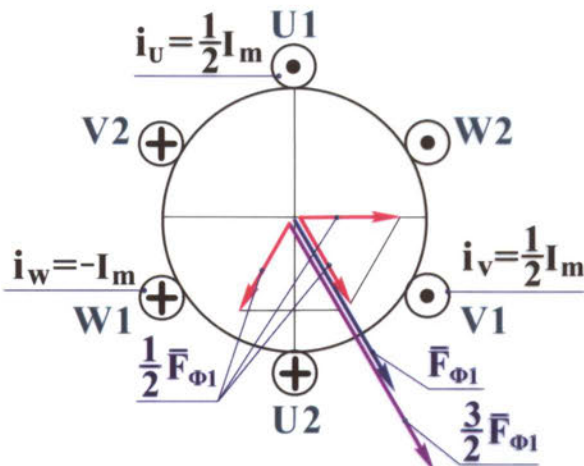
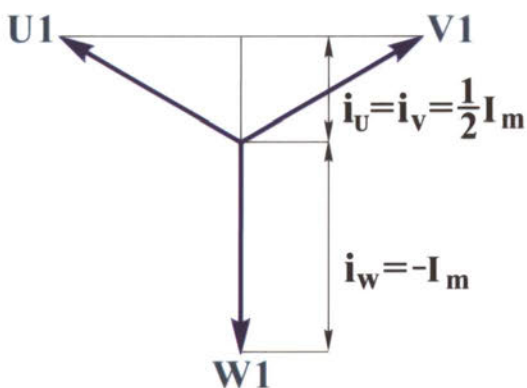
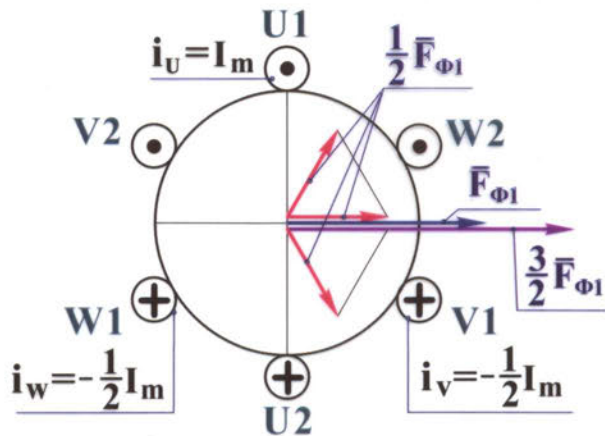
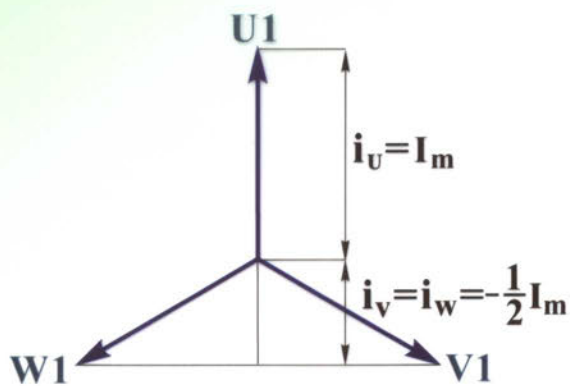
$$F_1 = \frac{m}{2} \cdot 0,9 \frac{k_{об1} \cdot W}{p} = 0,45 \frac{k_{об1} \cdot W}{p} I = \frac{m \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{k_{об1} \cdot W}{p} I.$$

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} - \text{синхронная частота вращения}$$



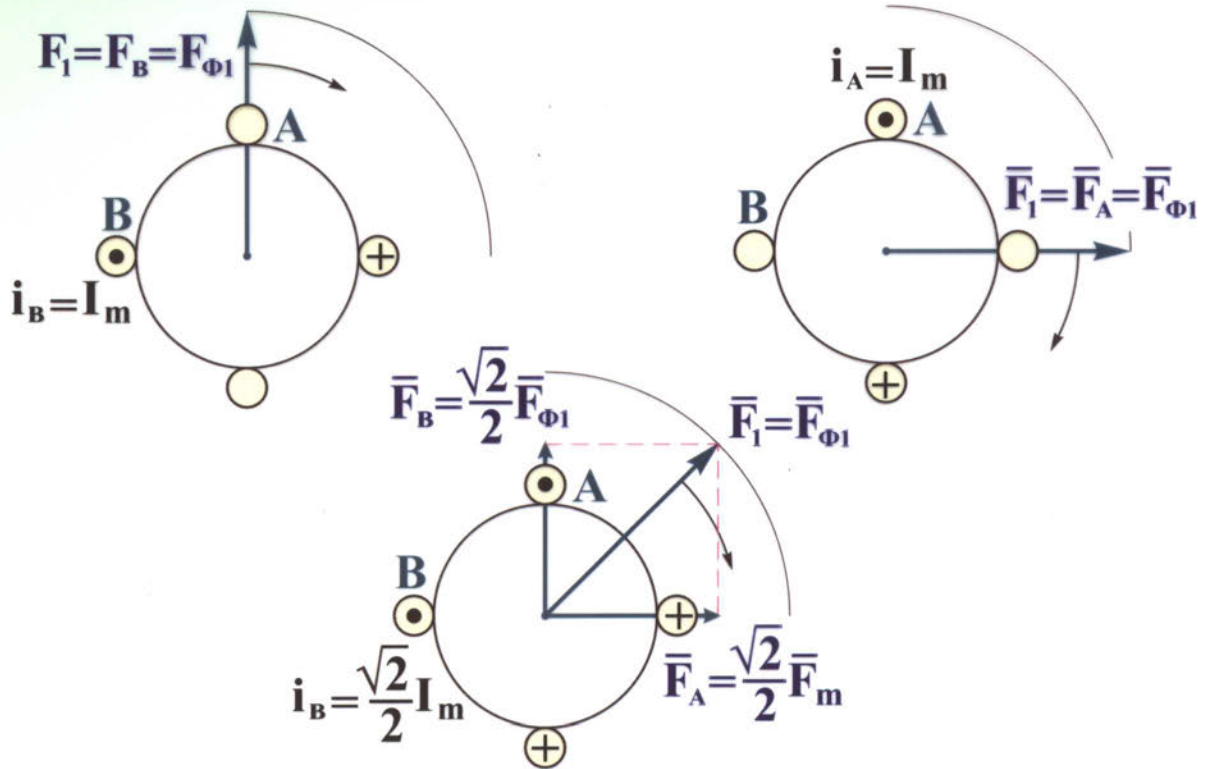
МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ПЕРВАЯ ГАРМОНИКА МДС ТРЕХФАЗНОЙ ОБМОТКИ (ГРАФИЧЕСКОЕ ПОСТРОЕНИЕ)



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ПЕРВАЯ ГАРМОНИКА МДС ДВУХФАЗНОЙ ОБМОТКИ



$$i_A = \sqrt{2} I \sin \omega t = I_m \sin \omega t ;$$

$$i_B = \sqrt{2} I \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

$$F_{Atx1} = F_{\Phi 1} \sin \omega t \cdot \cos \frac{\pi}{\tau} x = \frac{1}{2} F_{\Phi 1} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right) + \frac{1}{2} F_{\Phi 1} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x \right);$$

$$\begin{aligned} F_{Btx1} &= F_{\Phi 1} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x + \frac{\pi}{2} \right) = \\ &= \frac{1}{2} F_{\Phi 1} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right) - \frac{1}{2} F_{\Phi 1} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x \right). \end{aligned}$$

$$F_{tx1} = F_{Atx1} + F_{Btx1} = F_{\Phi 1} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right).$$

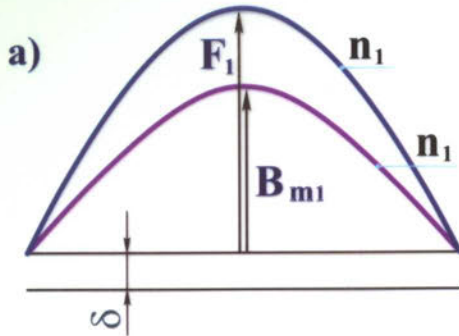
$$F_1 = F_{\Phi 1} = 0,9 \frac{k_{об1} \cdot W}{p} I; \quad n_1 = \frac{60 f_1}{p}.$$



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ОБМОТКОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

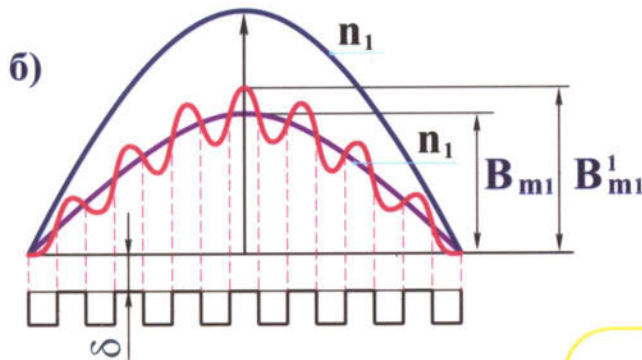
Магнитные поля и потоки воздушного зазора



$$F_1 = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{k_{о61} W}{p} I$$

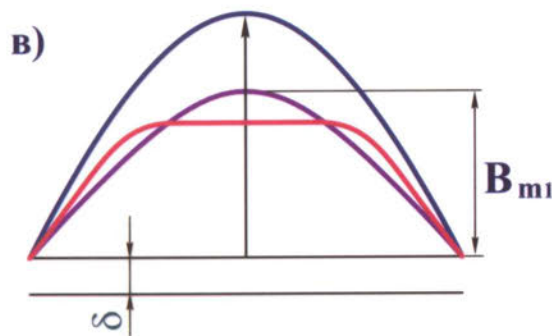
$$B_{m1} = \lambda_{\delta} \cdot F_1 = \frac{\mu_0}{\delta} \cdot F_1$$

$$\lambda_{\delta} = \frac{\mu_0}{\delta}$$



$$B_{m1} = \lambda_{\delta} \cdot F_1 = \frac{\mu_0}{k_{\delta} \cdot \delta} \cdot F_1$$

$$\lambda_{\delta} = \frac{\mu_0}{k_{\delta} \cdot \delta}; \quad k_{\delta} = \frac{B_{m1}'}{B_{m1}}$$



$$B_{m1} = \lambda_{\delta} F_1 = \frac{\mu_0}{k_{\delta} k_{\mu} \delta} \cdot \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{k_{о61} \cdot W}{p} I$$

$$\lambda_{\delta} = \frac{\mu_0}{\delta^1} = \frac{\mu_0}{k_{\delta} k_{\mu} \delta}$$

$$B_{mv} = \lambda_{\delta} F_v = \frac{\mu_0}{k_{\delta} k_{\mu} \delta} \cdot \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{k_{о6v} \cdot W}{p} I$$

Распределение магнитной индукции, создаваемой первой гармоникой МДС при равномерном зазоре (а), при наличии пазов (б) и насыщении (в).

$$\Phi_1 = B_{cp1} \tau \ell_{\delta} = \frac{2}{\pi} B_{m1} \tau \ell_{\delta} =$$

$$= \frac{\mu_0 \tau \cdot \ell_{\delta}}{k_{\delta} k_{\mu} \cdot \delta} \cdot \frac{2m\sqrt{2}}{\pi^2} \cdot \frac{k_{о61} \cdot W}{p} I$$

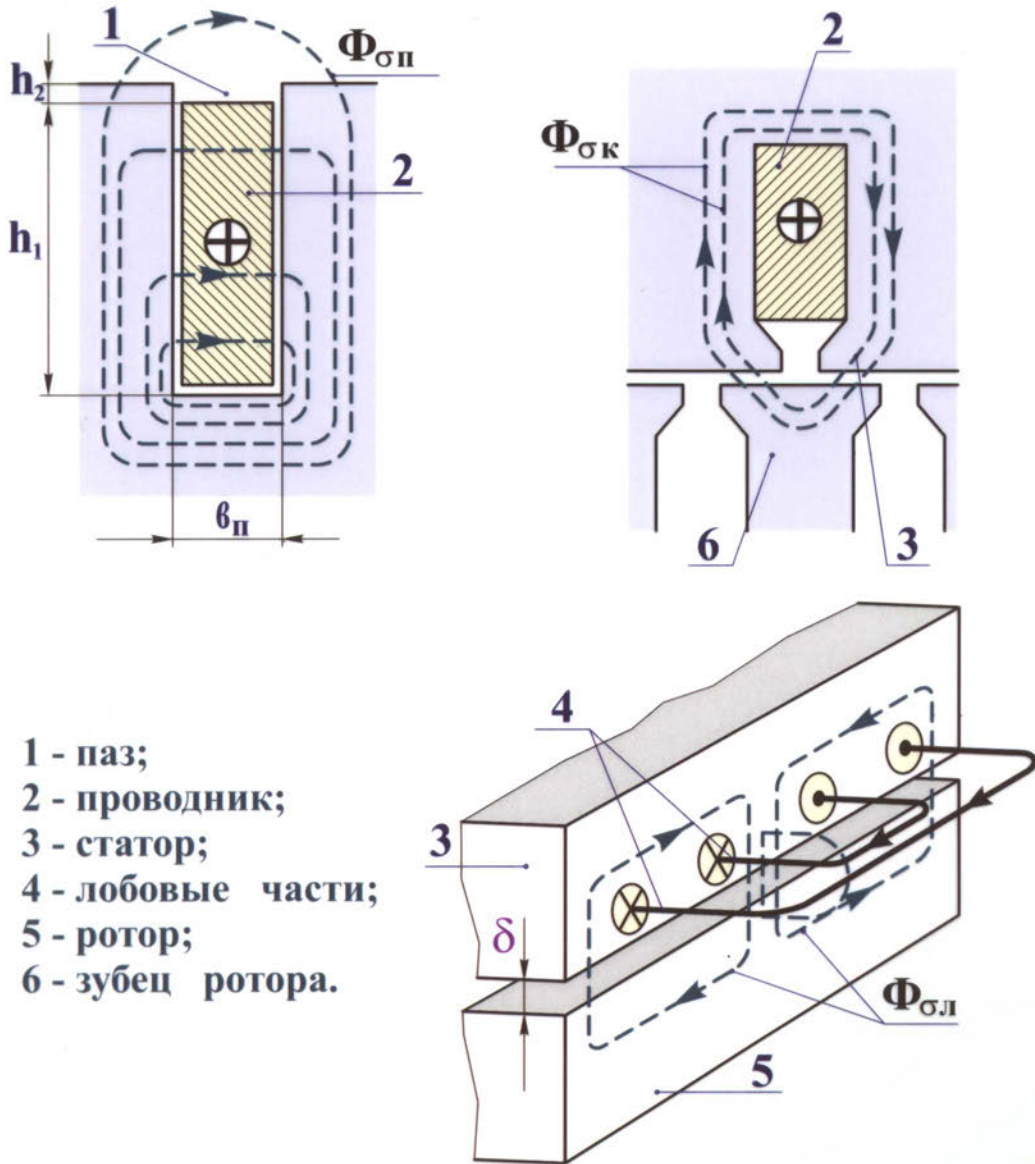
$$\Phi_v \approx \frac{\mu_0 \tau \ell_{\delta}}{k_{\delta} \cdot k_{\mu} \delta} \cdot \frac{2m\sqrt{2}}{\pi^2} \cdot \frac{k_{о6v} \cdot W}{v^2 p} I$$



МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ПОТОКИ РАССЕЙНИЯ ОБМОТОК ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Силовые линии потоков рассеяния в электрических машинах переменного тока



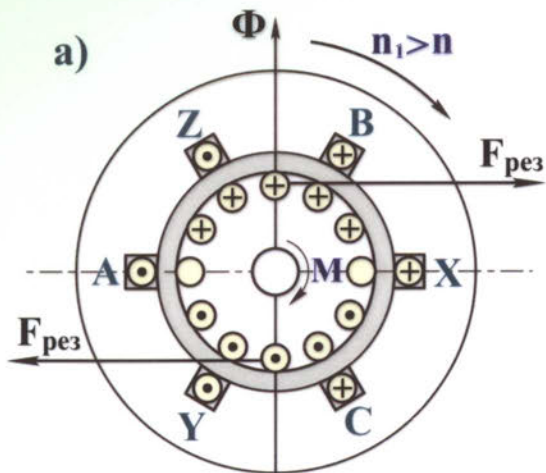
- 1 - паз;
- 2 - проводник;
- 3 - статор;
- 4 - лобовые части;
- 5 - ротор;
- 6 - зубец ротора.

$$\Lambda = \Lambda_{\text{П}} + \Lambda_{\text{Л}} + \Lambda_{\text{К}} + \Lambda_{\text{Д}}$$



АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ



$n_1 = \frac{60f_1}{p}$ - синхронная частота вращения;

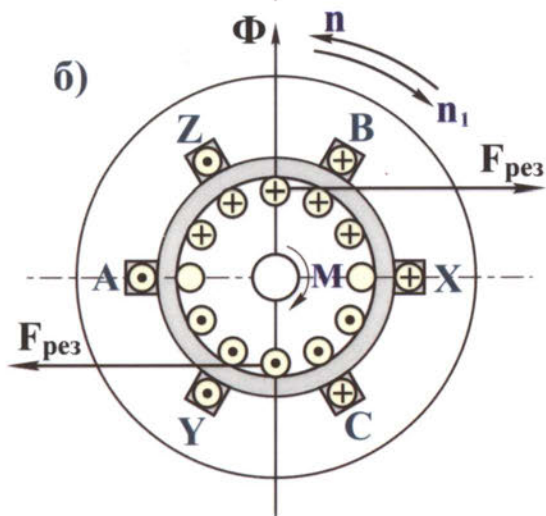
n - частота вращения ротора;

$\Omega_1 = \frac{\pi n_1}{30} = \frac{2\pi f_1}{p}$ - синхронная угловая частота вращения;

$\Omega = \frac{\pi n}{30}$ - угловая частота вращения ротора;

$n_1 - n$ - частота скольжения;

$S = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1}$ - скольжение.



Режим двигателя (а)

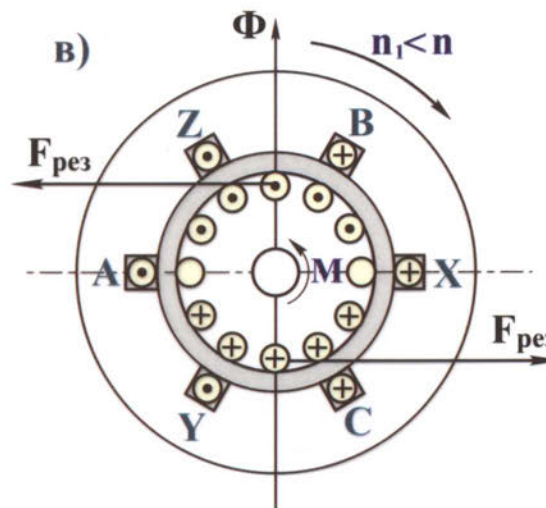
$n_1 > n > 0$

$0 < S < 1$

Режим электромагнитного тормоза (б)

$0 < n < -\infty$

$1 < S < +\infty$



Режим генератора (в)

$+\infty > n > n_1$

$-\infty < S < 0$

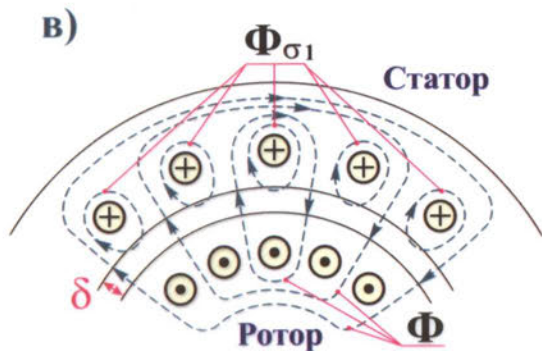
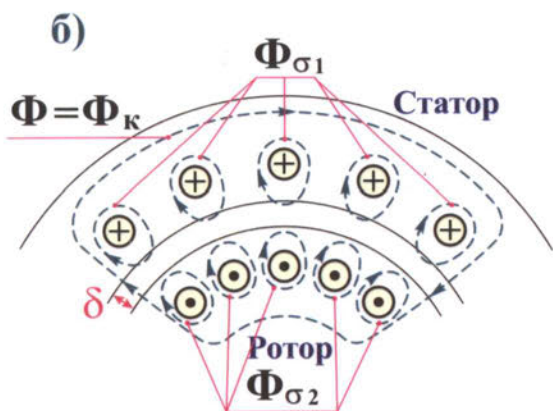
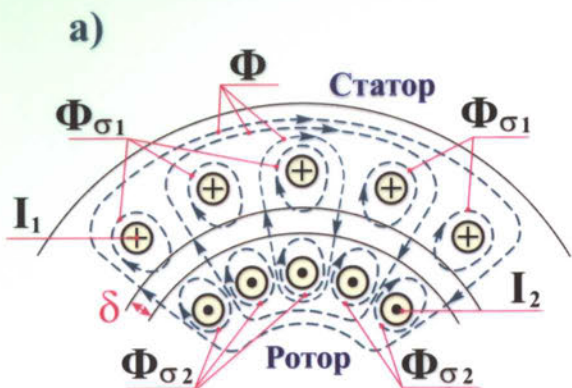
Мгновенные значения токов в фазах обмотки статора на рисунках а), б), в);

$i_A = I_m; i_B = i_C = -\frac{1}{2} I_m.$



АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ



Φ - основной поток, создаваемый совместным действием синхронне-вращающихся МДС статора F и ротора F_2

$$\dot{F}_0 = \dot{F}_1 + \dot{F}_2 \sim \dot{\Phi};$$

$\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ - потоки рассеяния обмоток статора и вращающегося ротора, индуктирующие в этих обмотках ЭДС рассеяния (а):

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j \dot{I} x_1; \quad \dot{E}_{\sigma 2s} = -j \dot{I}_2 x_{2s}, \text{ где}$$

$$x_1 = 2\pi f_1 L_{\sigma 1} = \omega_1 L_{\sigma 1};$$

$$x_{2s} = 2\pi f_1 S L_{\sigma 2} = \omega_1 L_{\sigma 2} \cdot S = x_{2s} S.$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I} r_1 + j \dot{I} x_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I} Z_1;$$

$$0 = \dot{E}_{2s} - \dot{I}_2 r_2 - j \dot{I}_2 x_{2s} = \dot{E}_2 S - \dot{I}_2 r_2 - j x_{2s} S, \text{ где}$$

E_1 и E_2 - ЭДС статора и неподвижного ротора,

$$E_1 = \pi \sqrt{2} k_{o\sigma 1} \cdot W_1 f_1 \Phi;$$

$$E_2 = \pi \sqrt{2} k_{o\sigma 2} \cdot W_2 f_1 \Phi.$$

При неподвижном роторе $S=1$ и $U_1 \approx (0,15 \dots 0,25) U_{1н}$ - режим короткого замыкания (б).

$$0 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (r_2 + j x_2) = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$$

Если обмотку неподвижного ротора разомкнуть, что практически осуществимо в двигателе с фазным ротором, то при $U_1 = U_{1н}$ получим режим холостого хода (в).

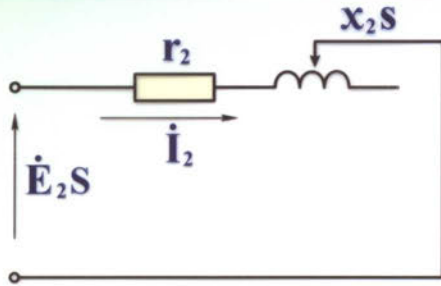
$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_{10} Z_1, \text{ где}$$

$$I_{10} \approx (0,2 \dots 0,5) I_{1н}$$



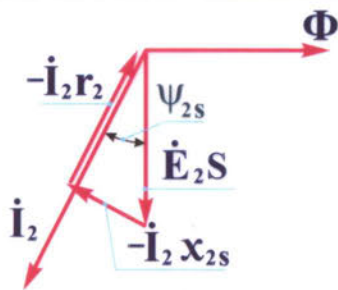
АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

ПРИВЕДЕНИЕ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ МАШИНЫ К НЕПОДВИЖНОЙ, РАБОТАЮЩЕЙ КАК ТРАНСФОРМАТОР

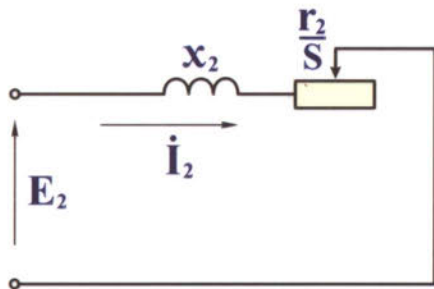


$$0 = \dot{E}_2 s - \dot{I}_2 r_2 - j \dot{I}_2 x_{2s}$$

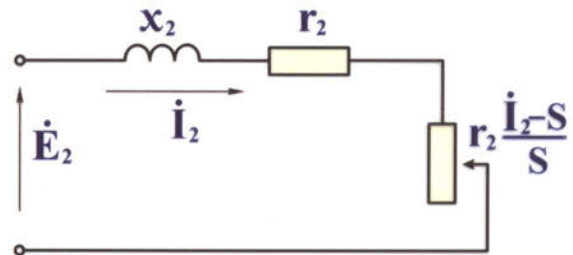
$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2 s}{r_2 + j x_{2s}}; \quad I_2 = \frac{E_2 s}{\sqrt{r_2^2 + (x_{2s})^2}}$$



$$\psi_{2s} = \arctg \frac{x_{2s}}{r_2}$$



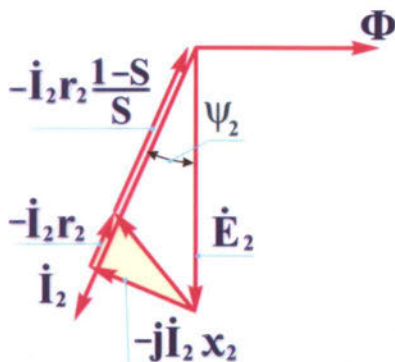
=



$$0 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 \frac{r_2}{s} - j \dot{I}_2 x_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 r_2 - j x_2 - \dot{I}_2 r_2 \frac{1-s}{s};$$

$$0 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 \underline{Z}_{2\text{экв}}$$

$$\text{где } \underline{Z}_{2\text{экв}} = \frac{r_2}{s} + j x_2 = r_2 + j x_2 + r_2 \frac{1-s}{s}$$



$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{\frac{r_2}{s} + j x_2}; \quad I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(r_2/s)^2 + x_2^2}}$$

$$\psi_2 = \arctg \frac{x_2}{r_2/s} = \arctg \frac{x_2 s}{r_2}$$



АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

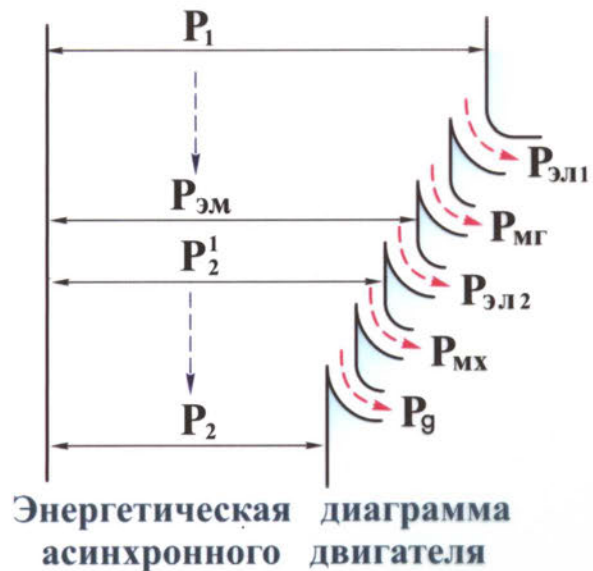
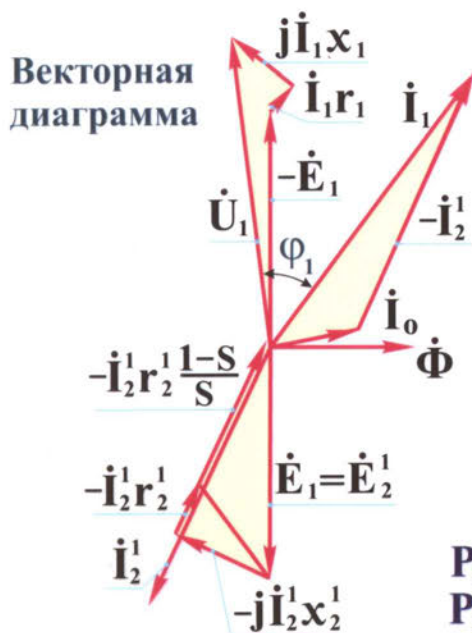
ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ И
ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1; \\ 0 &= \dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_{2\sigma}' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' (r_2' + jx_2' + r_2' \frac{1-s}{s}); \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 - \dot{I}_2', \end{aligned}$$

где $E_2' = \frac{k_0 \delta_1 W_1}{k_0 \delta_2 W_2} E_2 = k_e \cdot E_2 = E_1$; $I_2' = \frac{I_2}{\frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{k_0 \delta_1 W_1}{k_0 \delta_2 W_2}} = \frac{I_2}{k_j}$;

$$r_2' = k_e k_j r_2; \quad x_2' = k_e k_j x_2;$$

$$Z_{2\sigma}' = r_2' + jx_2' + r_2' \frac{1-s}{s} = Z_2' + r_2' \frac{1-s}{s}.$$



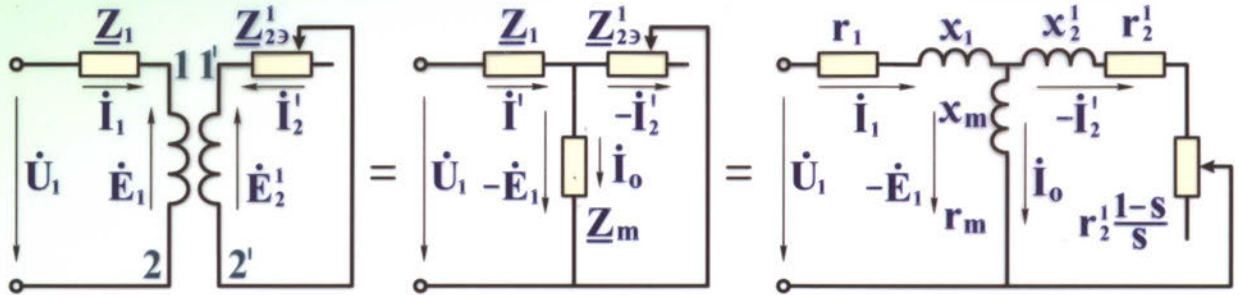
P_1 - потребляемая мощность;
 $P_{эм}$ - электромагнитная мощность;
 P_2^1 - полная механическая мощность;
 P_2 - мощность на валу;

$P_{эл1}$ - электрические потери в обмотке статора;
 $P_{мг}$ - магнитные потери в пакете статора;
 $P_{эл2}$ - электрические потери в обмотке ротора;
 $P_{мх}$ - механические потери;
 $P_г$ - добавочные потери.

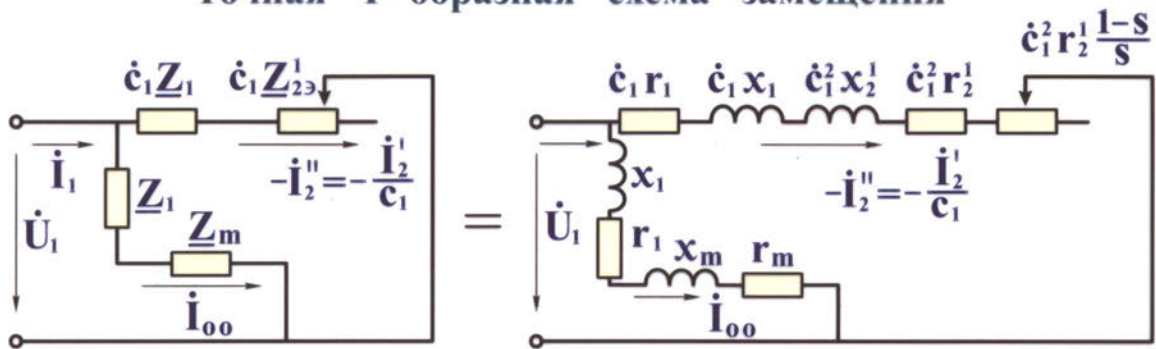


АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ. Схемы замещения

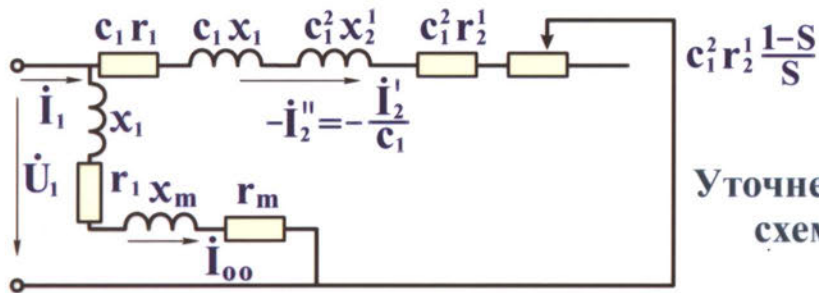


Точная Т-образная схема замещения



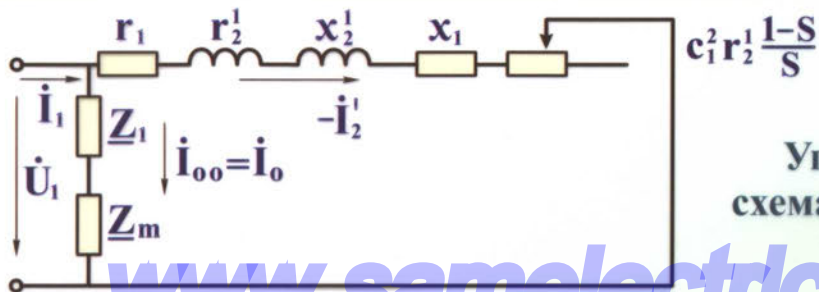
$$c_1 = 1 + \frac{Z_1}{Z_m} = \frac{r_1 + jx_1}{r_m + jx_m} = \frac{\dot{U}_1}{-\dot{E}_1(s=0)} = c_1 e^{-j\gamma}$$

Точная Г-образная схема замещения



Уточненная Г-образная схема замещения

$$I_2' = c_1 I_2'' = \frac{c_1 U_1}{\sqrt{(c_1 r_1 + c_1^2 \frac{r_2'}{s})^2 + (c_1 x_1 + c_1^2 x_2')^2}} = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s})^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}}$$



Упрощенная схема замещения



АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Согласно энергетической диаграмме

$$P_{ЭМ} - P_2^1 = P_{ЭЛ2} = m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_2^{\prime 2} r_2^1.$$

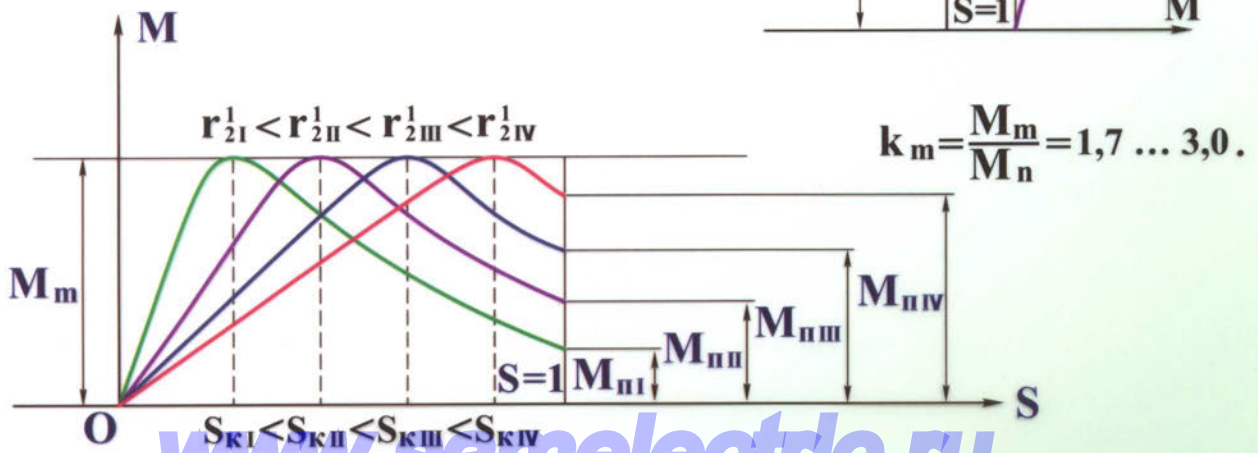
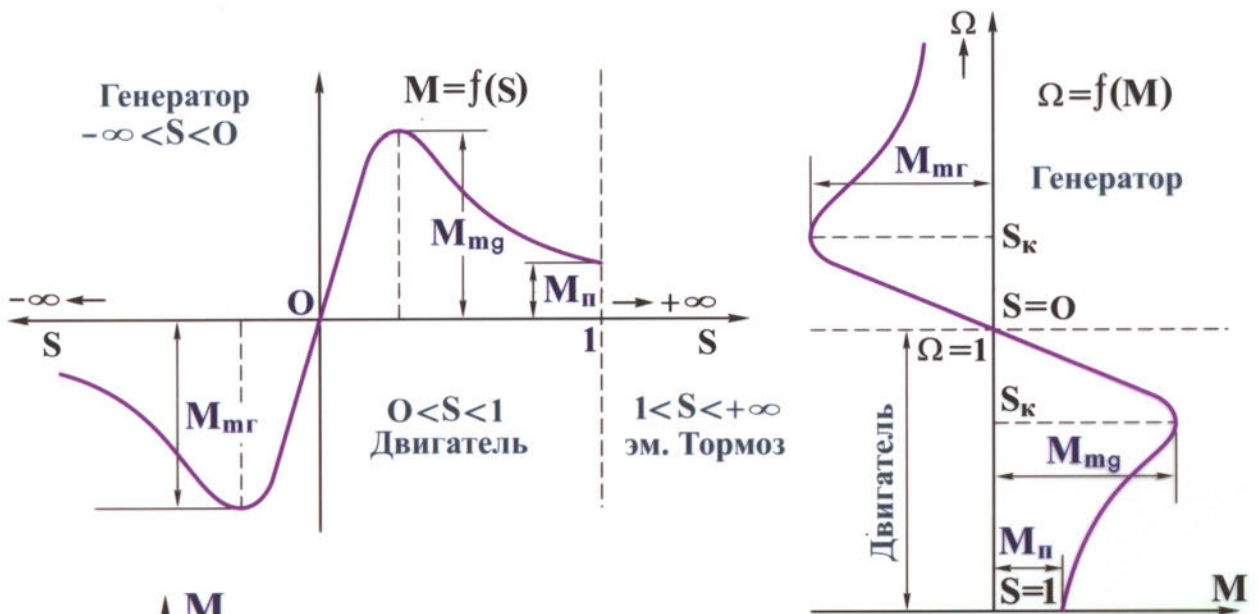
$$\text{или } P_{ЭЛ2} = M \Omega_1 - M \Omega = M(\Omega_1 - \Omega) \frac{\Omega_1}{s} = M \Omega_1 s = P_{ЭМ} s.$$

Следовательно,

$$M = \frac{P_{ЭЛ2}}{\Omega_1 s} = \frac{m_1 I_2^{\prime 2} r_2^1}{\Omega_1 s}.$$

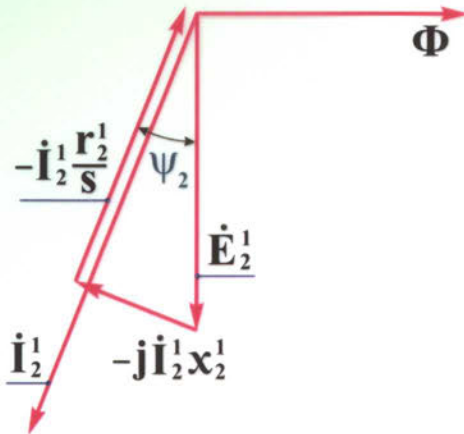
и после подстановки I_2^1

$$M = \frac{m_1 U_1^2 r_2^1}{\Omega_1 s [(r_1 + c_1 \frac{r_2^1}{s})^2 + (x_1 + c_1 x_2^1)^2]}.$$



АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ (ПРОДОЛЖЕНИЕ)



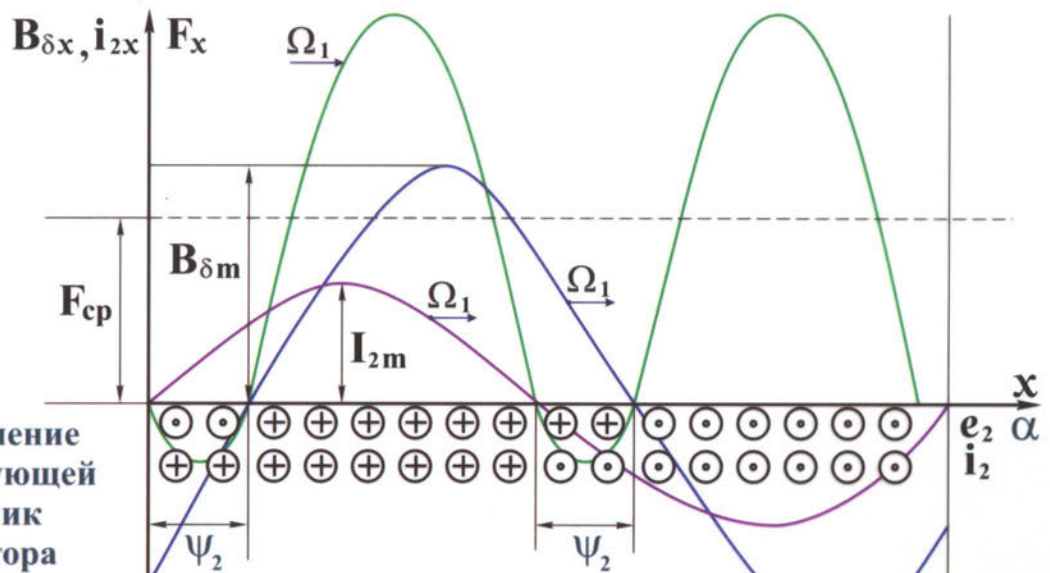
$$M = \frac{m_1 I_2^1 r_2^1}{\Omega_1 s} = \frac{m_1 I_2^1}{\Omega_1 s} \cdot I_2^1 r_2^1$$

$$I_2^1 r_2^1 / s = E_2^1 \cos \psi_2;$$

$$E_2^1 = E_1 = \pi \sqrt{2} k_{o\delta 1} W_1 f_1 \Phi; \quad \Omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}$$

$$M = \frac{m_1 p}{\sqrt{2}} \cdot k_{o\delta 1} \cdot W_1 \Phi I_2^1 \cos \psi_2 = C_M^1 \Phi I_2^1 \cos \psi_2.$$

$$M = \frac{m_2 p}{\sqrt{2}} \cdot k_{o\delta 2} \cdot W_2 \Phi I_2 \cos \psi_2 = C_M \Phi I_2 \cos \psi_2.$$



Среднее значение силы, действующей на проводник обмотки ротора

$$F_{cp} = \frac{1}{2} B_{\delta m} I_{2m} \cdot l \cos \psi_2$$

$$M = \frac{1}{2} B_{\delta m} I_{2m} l N_2 \frac{D}{2} \cos \psi_2.$$

$$N_2 = 2m_2 W_2; \quad B_{\delta m} = \frac{\pi}{2} B_{\delta cp}; \quad \frac{\pi D}{2p} = \tau; \quad B_{\delta cp} \cdot \tau \cdot l = \Phi; \quad I_{2m} = \sqrt{2} I_2.$$

$$M = \frac{N_2 p}{2\sqrt{2}} \Phi I_2 \cos \psi_2.$$

$$M = \frac{m_2 p}{\sqrt{2}} k_{o\delta 2} W_2 \Phi I_2 \cos \psi_2 = C_M \Phi I_2 \cos \psi_2.$$



АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

КРИТИЧЕСКОЕ СКОЛЬЖЕНИЕ И МАКСИМАЛЬНЫЙ МОМЕНТ

$$S_k = \pm \frac{c_1 r_2^1}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2^1)^2}}$$

$$M_m = \pm \frac{m_1 U^2}{2\Omega_1 c_1 (\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2^1)^2})}$$

$$\left. \begin{aligned} S_k &\approx \pm \frac{c_1 r_2^1}{x_1 + c_1 x_2^1} \\ M_m &\approx \pm \frac{m_1 U^2}{2\Omega_1 c_1 (x_1 + c_1 x_2^1)} \end{aligned} \right\} r_1 = 0$$

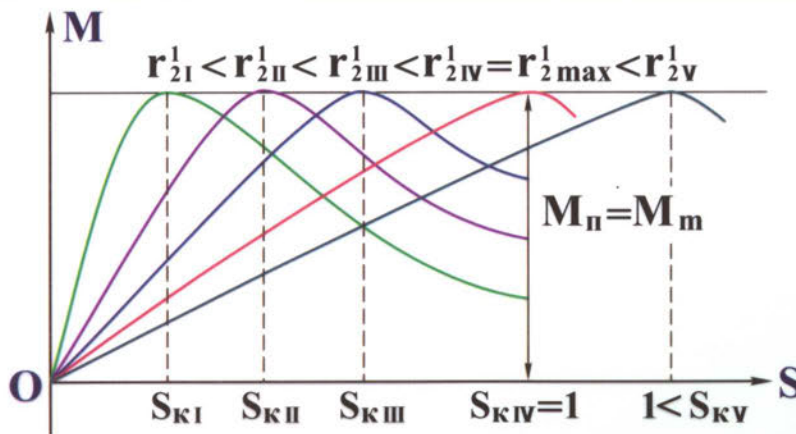
При $c_1=1$ и $r_1=0$ $S_k = \pm \frac{r_2^1}{x_1^2 + x_2^1} = \pm \frac{r_2}{x_k}$; $M_m = \pm \frac{m_1 U^2}{2\Omega_1 x_k}$.

Начальный пусковой момент

$$M_{пн} = \frac{m_1 U_1^2}{\Omega_1 [(r_1 + c_1 r_2^1)^2 + (x_1 + c_1 x_2^1)^2]}$$

$$k_{пн} = \frac{M_{пн}}{M_m} = 0,7 \dots 1,8 ;$$

$$k_{пнi} = \frac{I_{пн}}{I_m} = 5 \dots 7.$$



$$r_{2\max}^1 = \frac{1}{c_1} \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2^1)^2}$$

При $r_1=0$ $r_{2\max}^1 = \frac{1}{c_1} (x_1 + c_1 x_2^1)$.

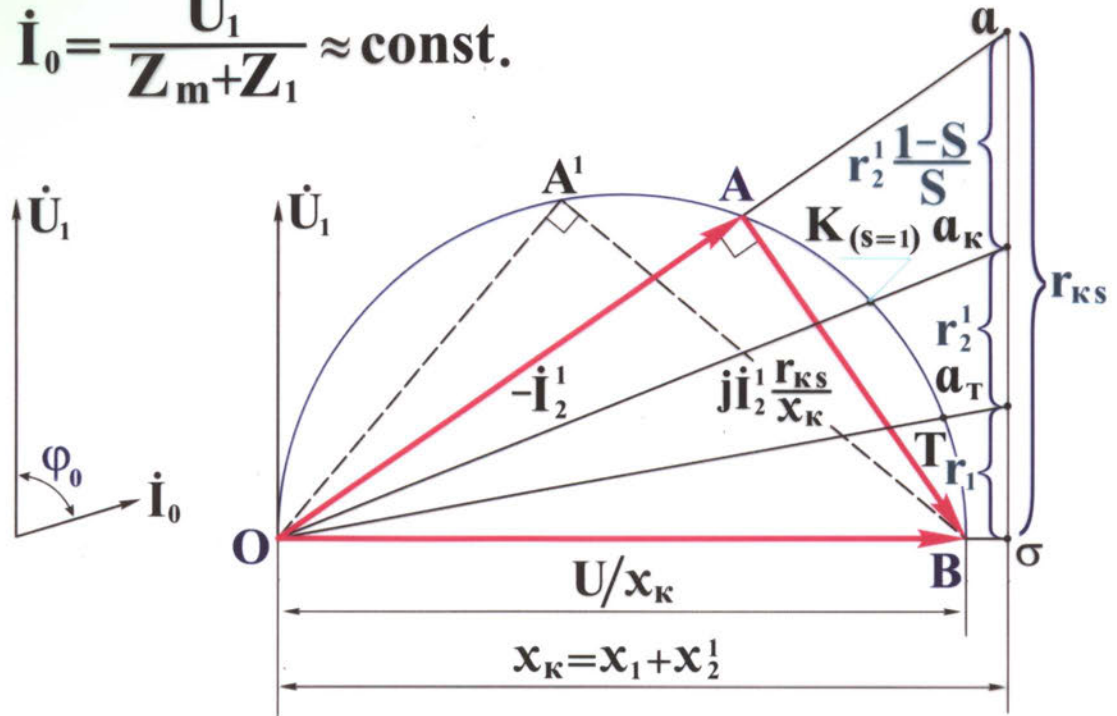
Если $c_1=1$, то $r_{2\max}^1 = x_1 + x_2^1 = x_k$.



АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

КРУГОВАЯ ДИАГРАММА АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{U}_1}{Z_m + Z_1} \approx \text{const.}$$



$$\Delta ABO \sim \Delta abo; \frac{AB}{AO} = \frac{ab}{ob} = \frac{r_{ks}}{x_k}.$$

Полное сопротивление рабочего контура схемы замещения

$$Z_{2\text{Э}} = r_1 + r_2^1 + r_2^1 \frac{1-s}{s} + j(x_1 + x_2^1) = r_{ks} + jx_k.$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{I}_2^1 r_{ks} - j\dot{I}_2^1 x_k.$$

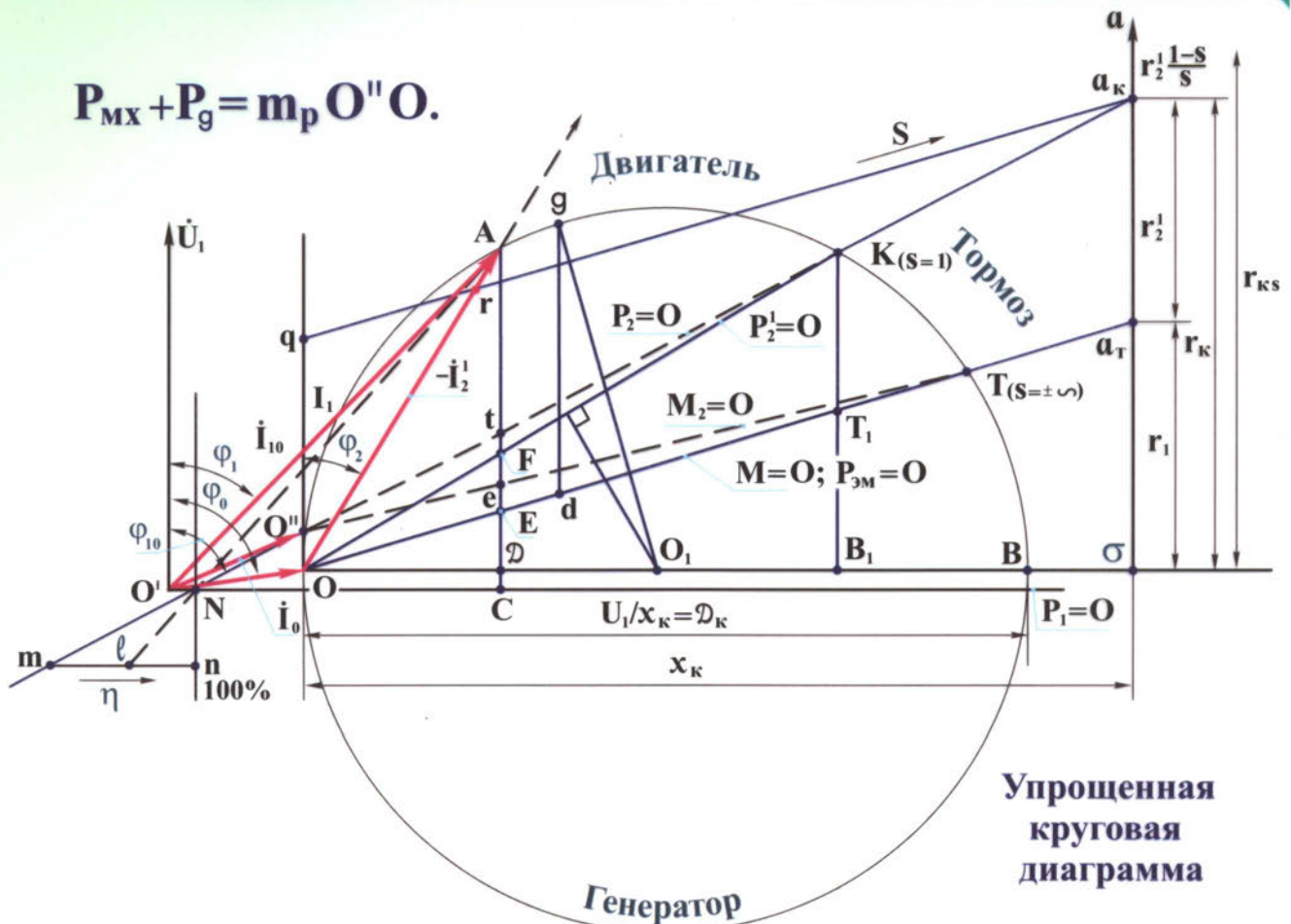
$$-j \frac{\dot{U}_1}{x_k} = -\dot{I}_2^1 + \dot{I}_2^1 \frac{r_{ks}}{x_k}.$$

РНПО Росучприбор Южно-Уральский Государственный университет



АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

КРУГОВАЯ ДИАГРАММА АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ



$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 = m_p AC; \quad P_{MГ1} \approx m U_1 I_0 \cos \varphi_0 = m_p CD;$$

$$P_{PK} = m_1 U_1 I_2^1 \cos \varphi_2 = m_p AD;$$

$$\sigma a_T : a_T a_K : a_K a = r_1 : r_2^1 : r_2^1 \frac{1-s}{s} = DE : EF : FA.$$

$$P_{ЭЛ1} = m_1 I_2^1 r_1 = m_p DE; \quad P_{ЭЛ2} = m_1 I_2^1 r_2^1 = m_p EF;$$

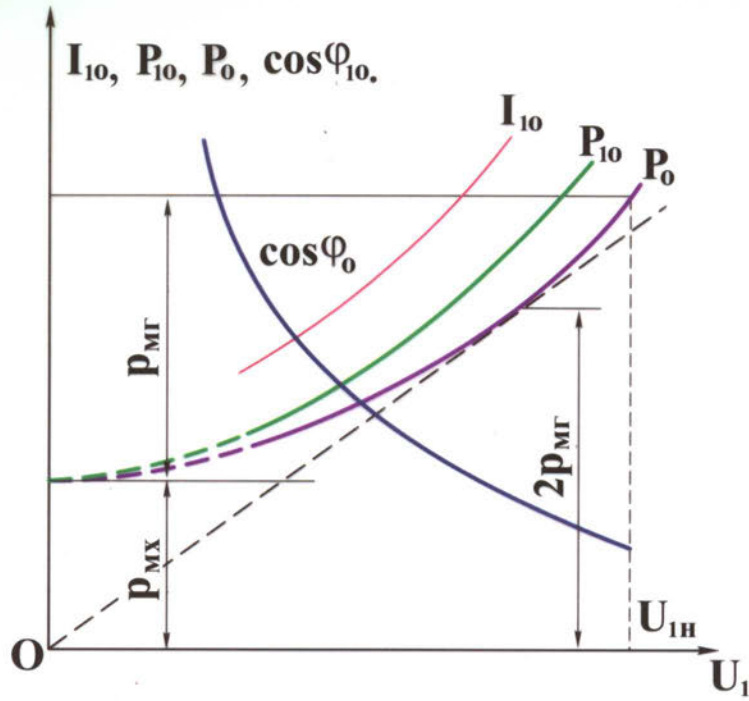
$$P_2^1 = m_1 I_2^1 \cdot r_2^1 \frac{1-s}{s} = m_p FA; \quad P_{ЭМ} = (P_2^1 + P_{ЭЛ2}) = m_p (FA + EF) = m_p AE.$$

$$M = \frac{P_{ЭМ}}{\Omega_1} = \frac{m_p AE}{\Omega_1} = m_M AE; \quad s = \frac{P_{ЭЛ2}}{P_{ЭМ}} = \frac{EF}{AE} = \frac{qr}{qa_K}; \quad \eta = \frac{m\ell}{mn}; \quad M_m = m_M g d.$$

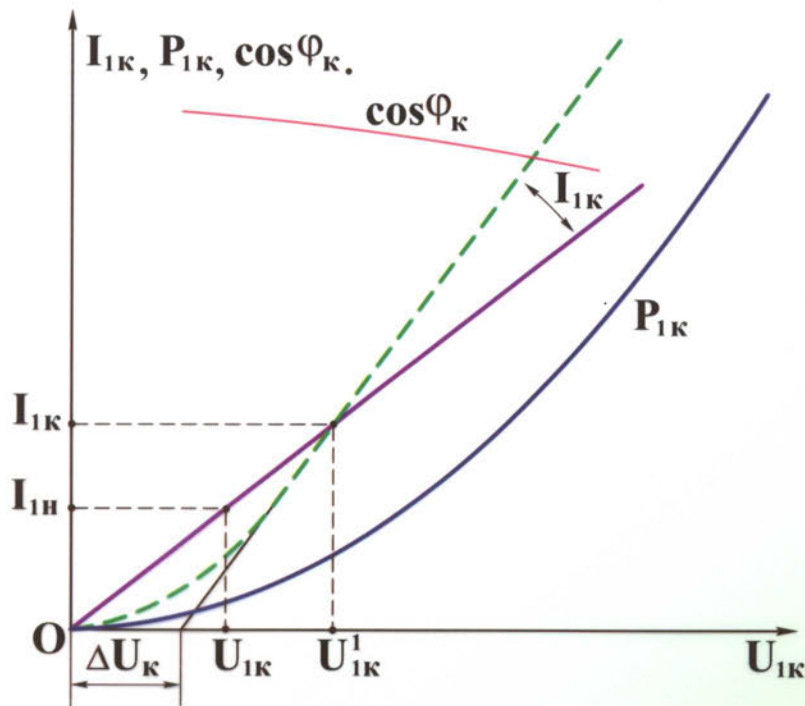


АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

ПОСТРОЕНИЕ КРУГОВОЙ ДИАГРАММЫ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ



Характеристики холостого хода



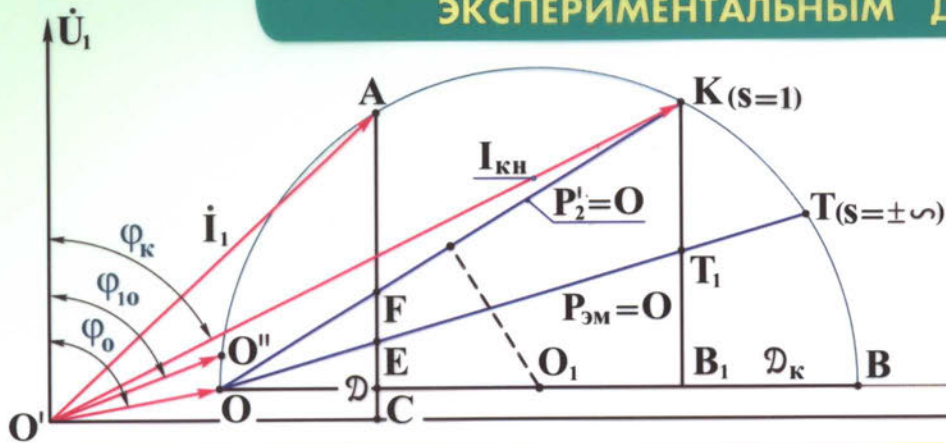
Характеристики короткого замыкания

www.samelectric.ru



АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

ПОСТРОЕНИЕ КРУГОВОЙ ДИАГРАММЫ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ



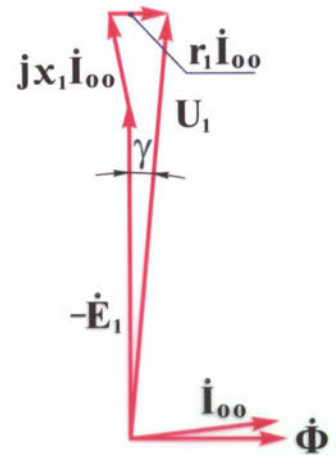
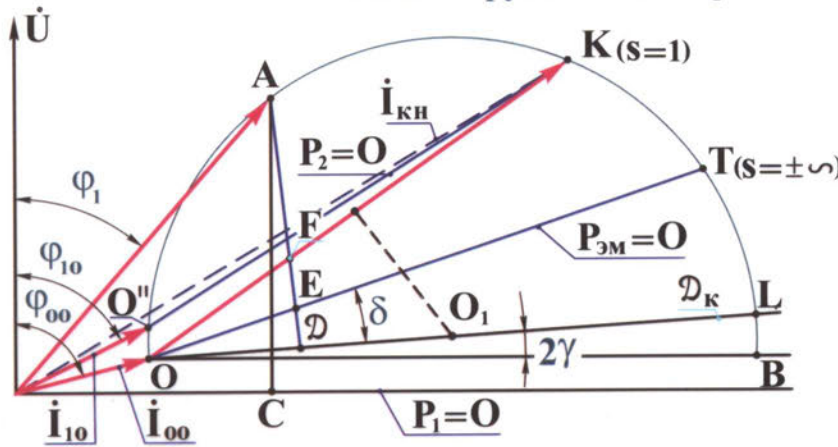
Упрощенная круговая диаграмма

$$m_p O'' O = P_{мх} + P_g \approx P_{мх};$$

$$I_{кн} = I_{1н} \cdot \frac{U_{1н}}{U_{1к}}; \quad P_{кн} = P_{1н} \left(\frac{U_{1н}}{U_{1к}} \right)^2$$

$$I_{кн} = I_{1н} \left(\frac{U_{1н} - \Delta U_k}{U_{1к}^1 - \Delta U_k} \right); \quad P_{кн} = P_{1н} \left(\frac{U_{1н} - \Delta U_k}{U_{1к}^1 - \Delta U_k} \right)^2 \quad \frac{K T_1}{T_1 B_1} = \frac{r_2^1}{r_1}$$

Точная круговая диаграмма



$$\dot{c}_1 = \frac{\dot{U}_1}{-\dot{E}(s=0)} = c_1 e^{-j\gamma} = 1 + \frac{Z_1}{Z_m}$$

$$c_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_m}$$

$$\operatorname{tg} \delta = \mathcal{D}_k r_1 / U_1 = m_i O L \cdot r_1 / U_1,$$

где m_1 - масштаб тока.

$$\mathcal{D}_k = \frac{U_1}{c_1^2 x_{к2}^1} = \frac{U_1}{c_1 (x_1 \cos \gamma + r_1 \sin \gamma + c_1 x_2^1)}$$

$$\sin 2\gamma = \frac{2 I_0 r_1}{U_1}$$

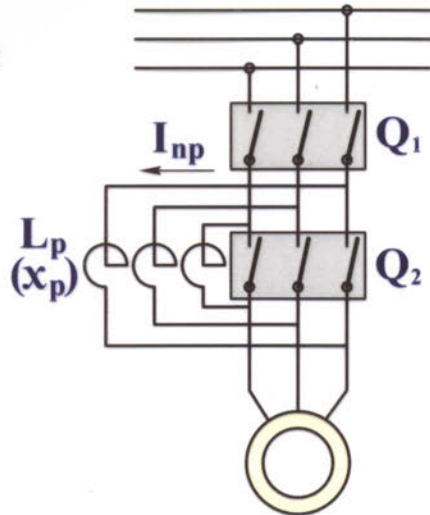
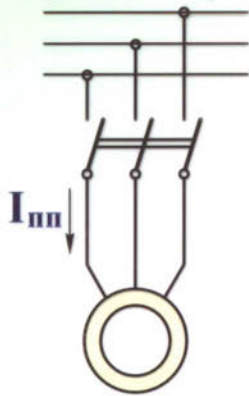


АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

ПУСК ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Реакторный пуск

Прямой пуск

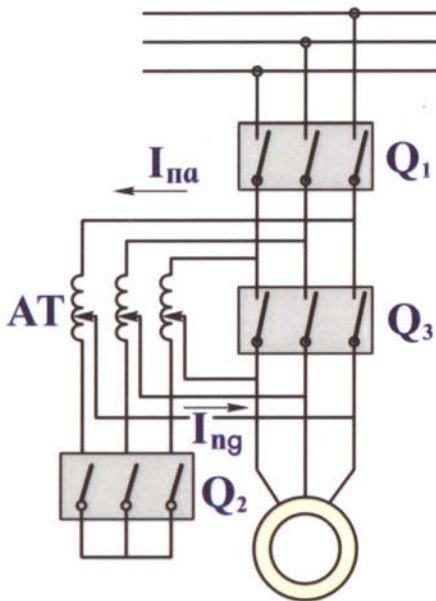


$$I_{np} = I_{nc} \frac{U_1}{\sqrt{r_k^2 + (x_k + x_p)^2}}$$

$$\frac{I_{np}}{I_{nc}} = \frac{\sqrt{r_k^2 + (x_k + x_p)^2}}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}}$$

$$\frac{M_{np}}{M_{nc}} = \frac{r_k^2 + (x_k + x_p)^2}{r_k^2 + x_k^2}$$

Автотрансформаторный пуск

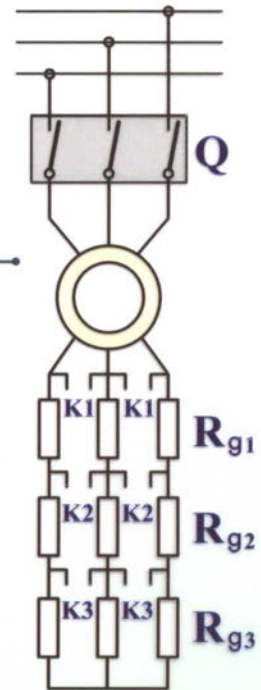


$$U_{ng} = U/k_a, \quad k_a > 1.$$

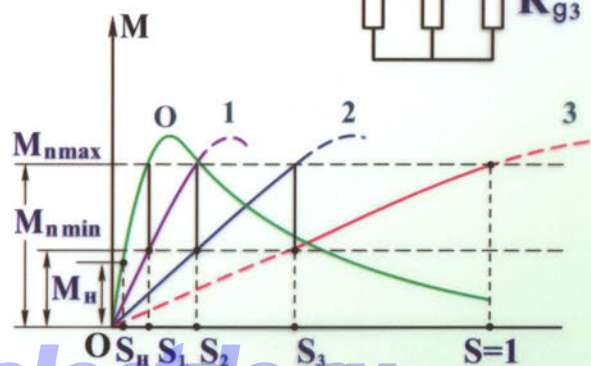
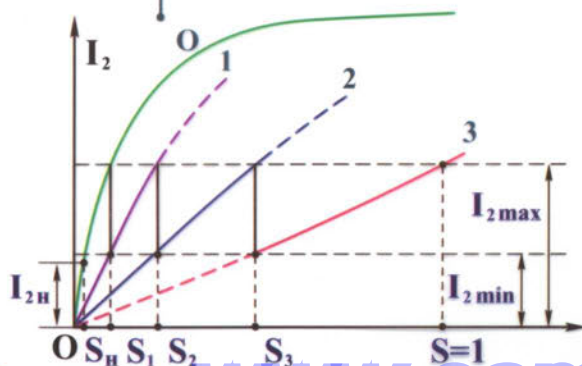
$$I_{ng} = \frac{U_{ng}}{Z_k} = \frac{U_1}{k_a Z_k}$$

$$I_{na} = I_{nc} = \frac{I_{ng}}{k_a} = \frac{I_{np}}{k_a^2}$$

$$I_{na} < I_{np}.$$

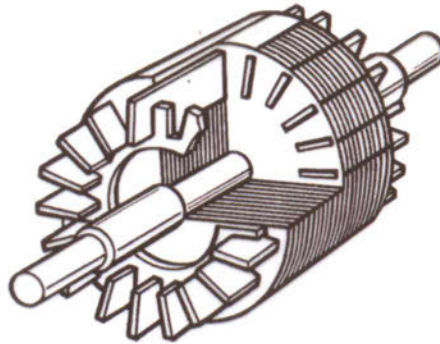


Реостатный пуск

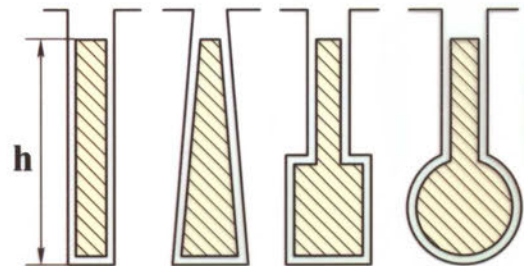
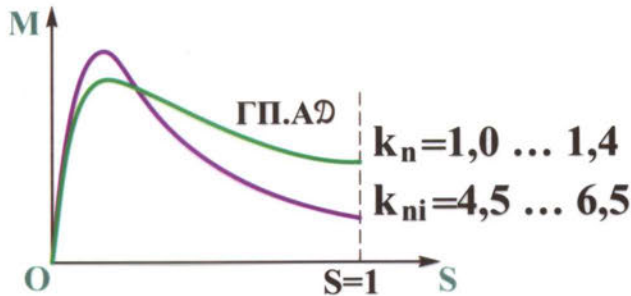
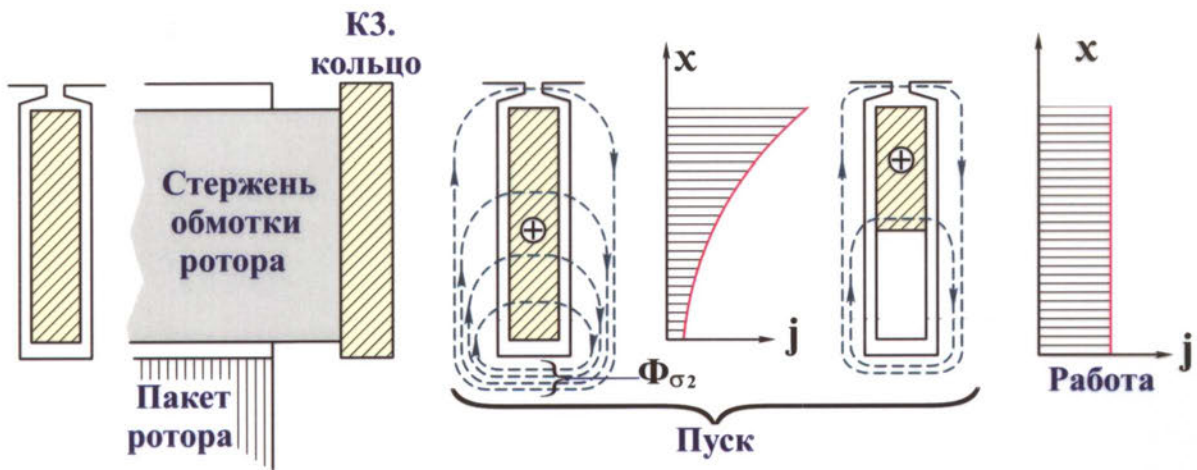


АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ С ВЫТЕСНЕНИЕМ ТОКА В ОБМОТКЕ РОТОРА



Общий вид вид
глубокопазного АД

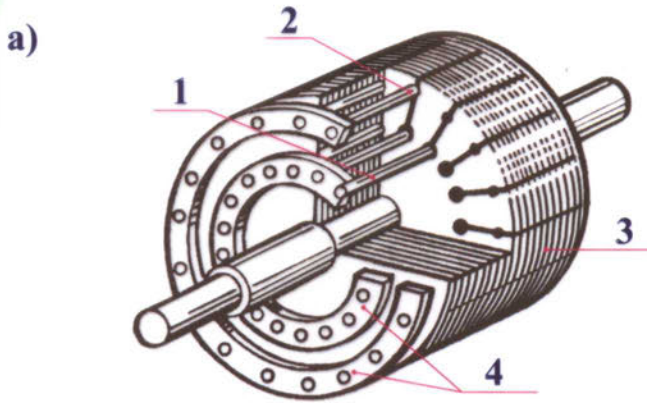


Разновидности пазов
глубокопазного АД

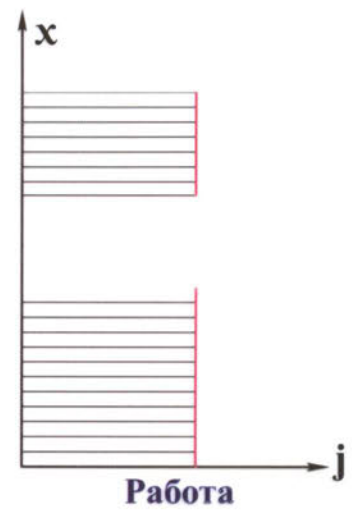
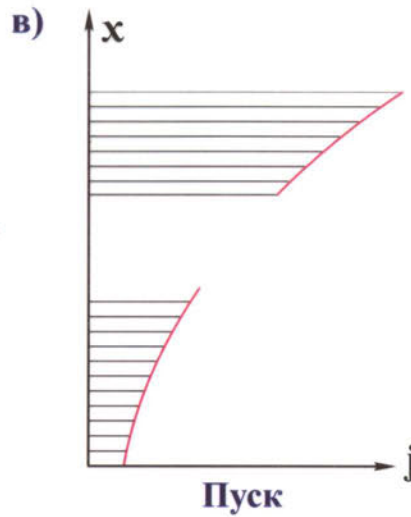
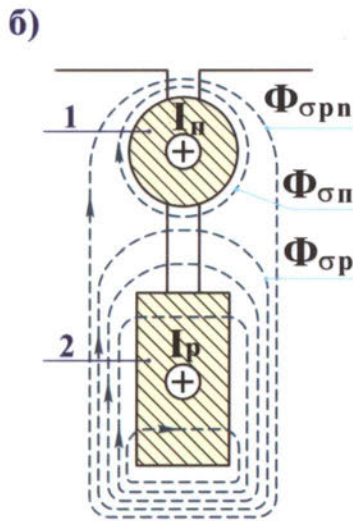


АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

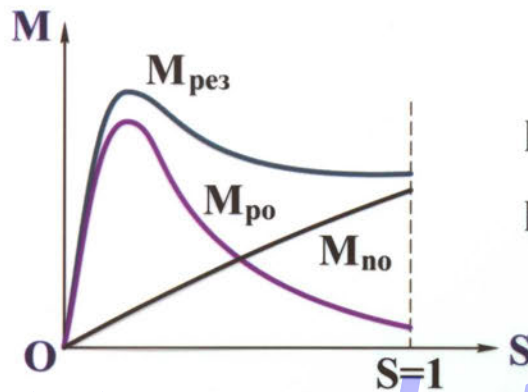
АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ С ВЫТЕСНЕНИЕМ ТОКА В ОБМОТКЕ РОТОРА



- 1 - рабочая клетка;
- 2 - пусковая клетка;
- 3 - сердечник ротора;
- 4 - короткозамыкающие кольца



Общий вид (а), разрез паза ротора двигателя с двойной беличьей клеткой (б) и распределение плотности тока по высоте x в клетках при пуске и работе двигателя (в)



$$k_n = 1,0 \dots 1,4$$

$$k_{ni} = 4,5 \dots 6,5$$



АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

$$n = n_1(1-S) = \frac{60f_1}{p}(1-S); \quad \Omega = \Omega_1(1-S) = \frac{2\pi f_1}{p}(1-S).$$

1. Частотное регулирование. Закон Костенко.

Если принять $c_1 = 1$ и $r_1 = 0$, то $M_m \approx \frac{m_1 U_1^2}{2\Omega_1 x_{\kappa}} = \frac{m_1 U_1^2 p}{4\pi f_1 x_{\kappa}}$
или $M_m = \frac{m_1 U_1^2 p}{8\pi^2 f_1^2 (L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2}')} = c \frac{U_1^2}{f_1^2}$.

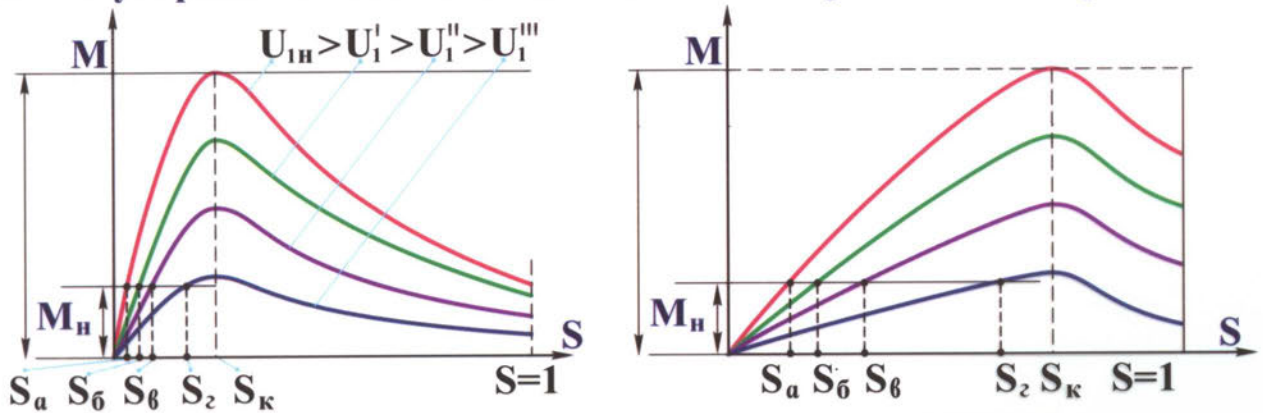
Из условия $M_{m1}/M_{H1} = M_{m2}/M_{H2} = \text{const}$

$$M_{m1}/M_{m2} = (U_{11}^2/U_{12}^2) \cdot (f_{12}^2/f_{11}^2) \quad \text{и} \quad U_{12}/U_{H1} = (f_{12}/f_{11}) \sqrt{M_{H2}/M_{H1}}$$

При $M = \text{const}$: $U_{12}/U_{11} = f_{12}/f_{11}$ или $U_{12}/f_{12} = U_{11}/f_{11}$.

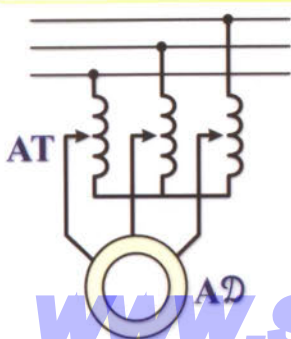
При $P = \text{const}$: $U_{12}/U_{11} = \sqrt{f_{12}/f_{11}}$.

2. Регулирование изменением величины первичного напряжения.

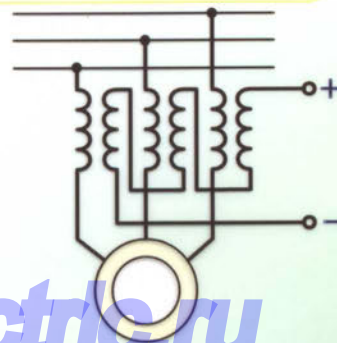


$$n_a = n_1(1-S_a) > n_б(1-S_б) > n_в(1-S_в) > n_г(1-S_г).$$

Зависимости $M = f(S)$ при $U_1 = \text{var}$.

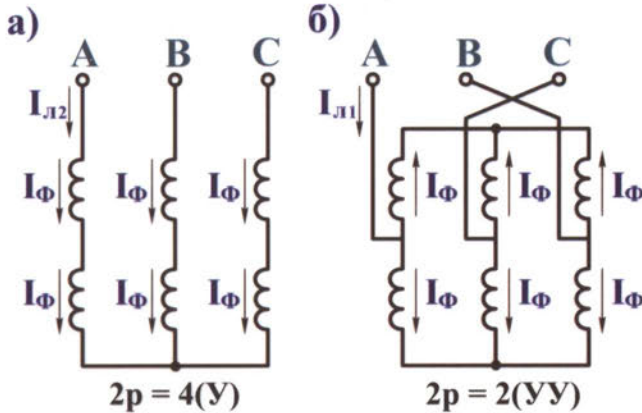
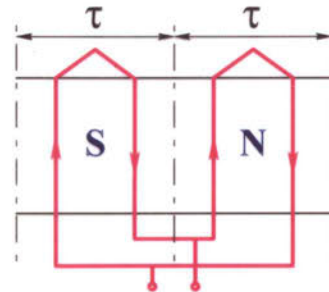
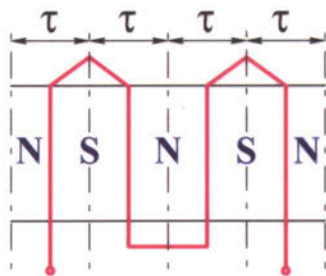
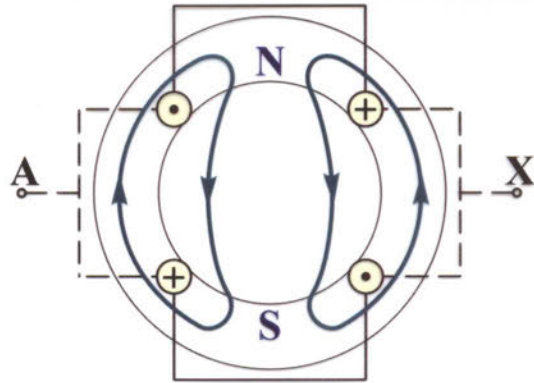
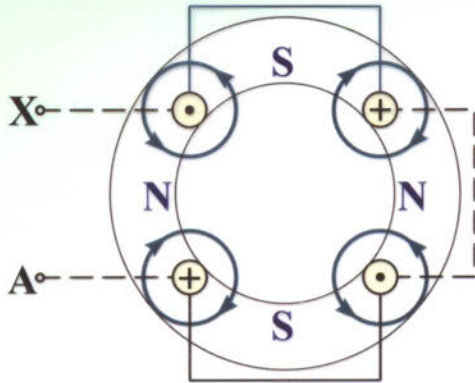


Схемы для изменения подводимого напряжения



АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

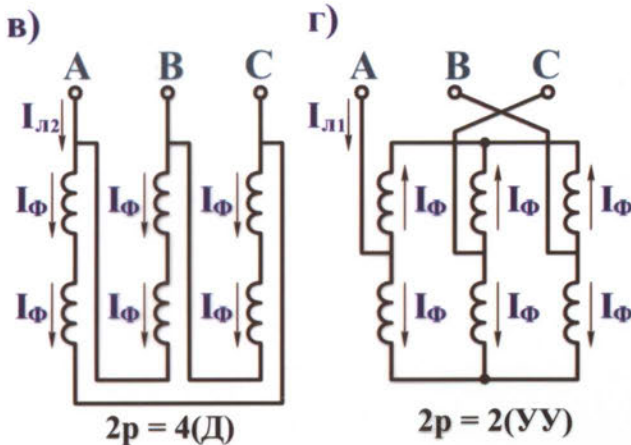
РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧИСЛА ПОЛЮСОВ



(Схемы а, б)

$$P_2 = \sqrt{3} U_L I_\Phi \eta \cdot \cos \Phi_1;$$

$$P_1 = \sqrt{3} U_L 2 I_\Phi \eta \cdot \cos \Phi_1; \quad \frac{P_2}{P_1} = 2.$$

$$M_1 = M_2 = \text{const.}$$


(Схемы в, г)

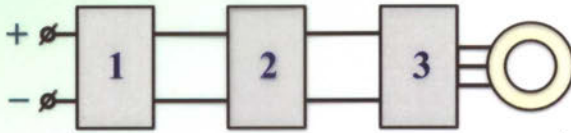
$$P_2 = \sqrt{3} U_L I_\Phi \eta \cos \Phi_1 = 3 U_L \cdot I_\Phi \eta \cos \Phi_1;$$

$$P_1 = \sqrt{3} U_L 2 I_\Phi \eta \cdot \cos \Phi_1;$$

$$P_1 / P_2 = \frac{\sqrt{3} \cdot 2}{3} = 1,15; \quad P \approx \text{const.}$$

АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

СХЕМЫ СИСТЕМ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ



Структурная схема преобразователя частоты, питающегося от сети постоянного тока

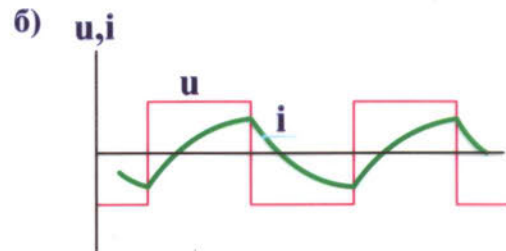
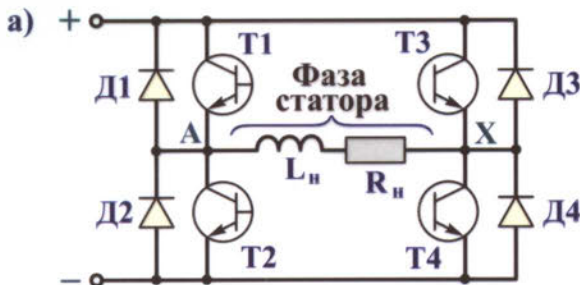


Схема питания одной фазы асинхронного двигателя от транзисторного мостового инвертора (а) и графики изменения напряжения и тока фазы (б)

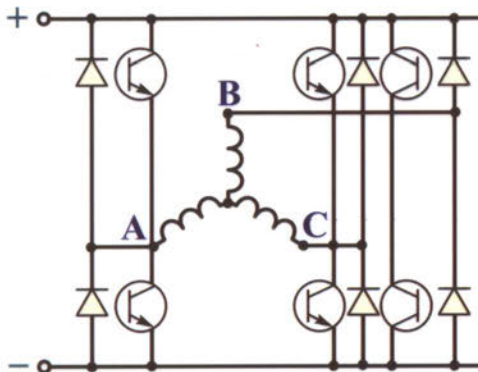
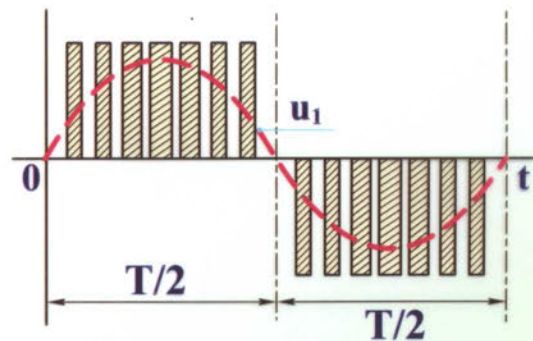
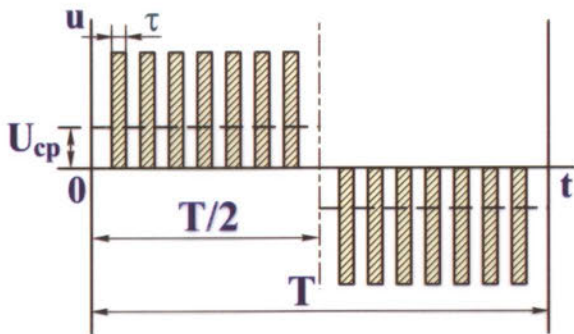


Схема питания трехфазного асинхронного двигателя от мостового транзисторного инвертора

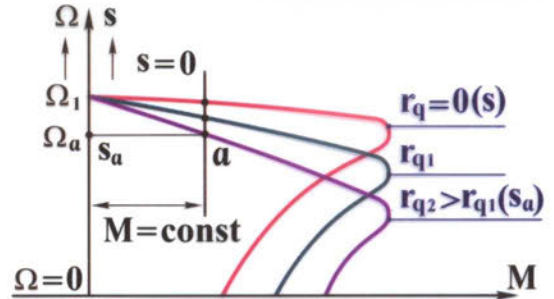
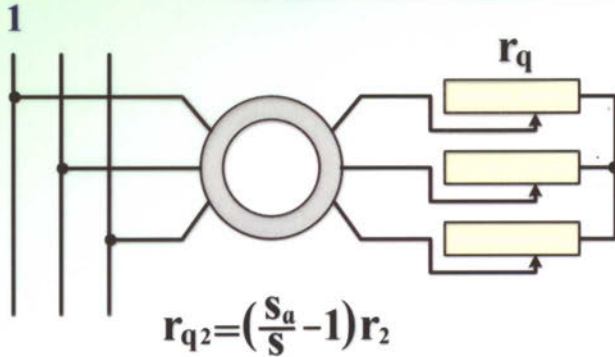


Графики изменения напряжения, подаваемого на обмотку статора двигателя при широтно-импульсном регулировании (а) и при широтно-импульсной модуляции по синусоидальному закону (б)



АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

**РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ
ФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

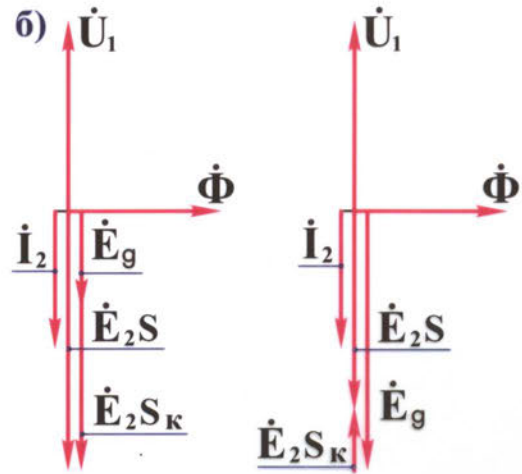
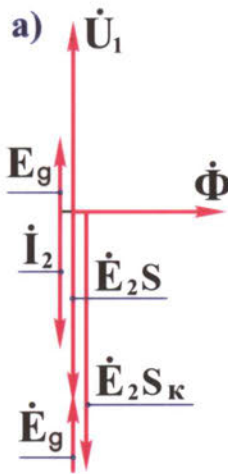
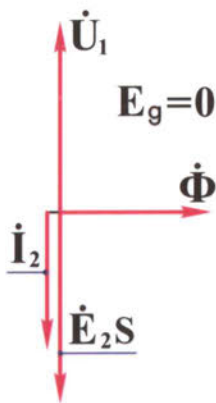


Регулирование путем включения реостата в цепь ротора

2

$U_1 = \text{const}; f_1 = \text{const}; M = M_H = \text{const}.$

$I_2 = E_2 S / \sqrt{r_2^2 + x_2^2 s^2} \approx E_2 S / r_2 \quad (M = C_M \Phi I_2 \cos \psi_2 \approx C_M \Phi I_2)$



а) $I_2 = \frac{E_2 S}{r_2} = \frac{E_2 S_K - E_g}{r_2}.$
 $E_2 S = E_2 S_K - E_g.$
 $S_K = S + \frac{E_g}{E_2}.$

б) $I_2 = \frac{E_2 S}{r_2} = \frac{E_2 S_K + E_g}{r_2}.$
 $E_2 S = E_2 S_K + E_g.$
 $S_K = S - \frac{E_g}{E_2}.$

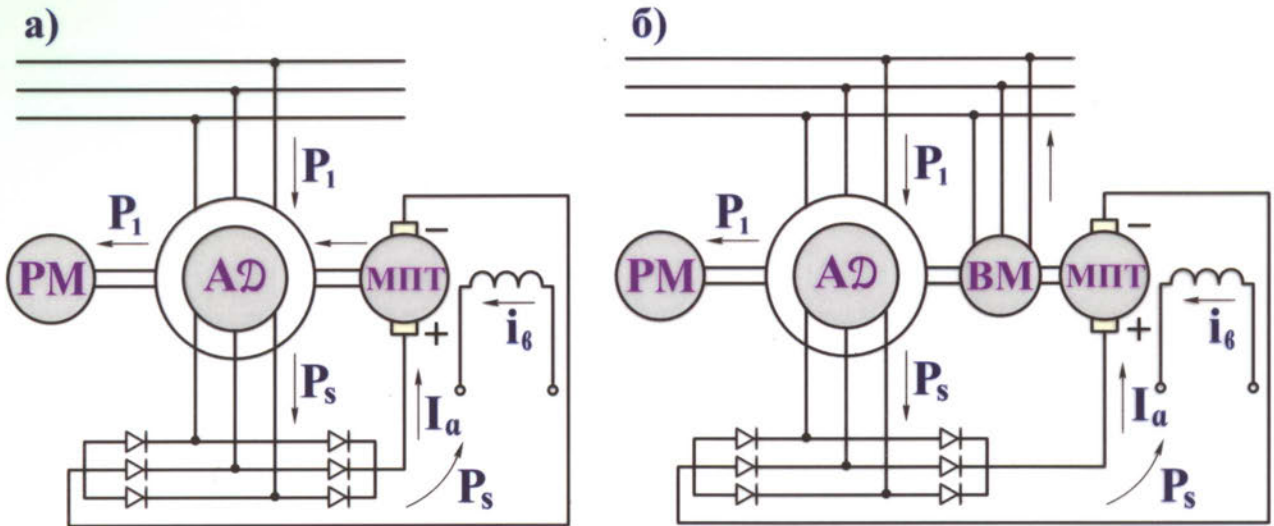
Введение в цепь ротора добавочной ЭДС частоты скольжения:

а) встречно; б) согласно



АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ
ФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ



Схемы электромеханического каскада (а)
и электрического каскада (б) АД
с машиной постоянного тока (МПТ)

$$P_s = P_{эм} s; \quad P_{мх} = P_2^1 = (1-s) P_{эм}$$

а) $P_{рм} = P_{мх} + P_s \approx (1-s) P_H + P_H s = P_H = \text{const.} \quad (P_1 = P_H = \text{const})$

б) $P_{мх} = (1-s) P_{эм} \approx (1-s) P_1. \quad (M = \text{const}).$



АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

АСИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР (АГ)

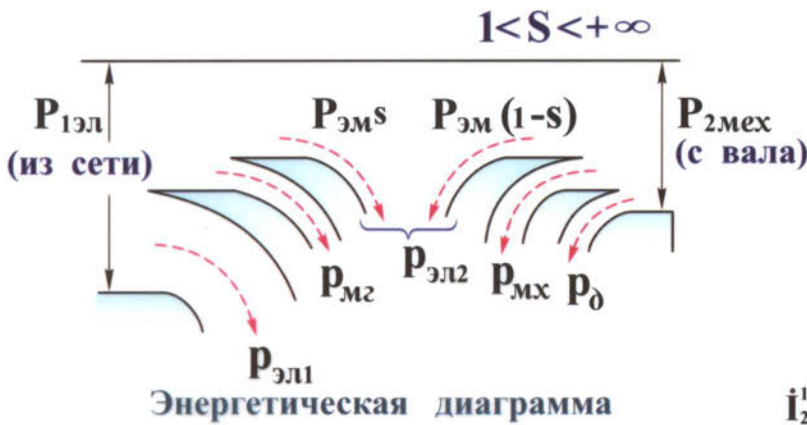


$$I_{2a} = I_2 \cos \psi_2 = \frac{E_2 s}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 s)^2}} \cdot \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 s)^2}} < 0; \quad M = C_M \Phi I_2 \cos \psi_2 < 0.$$

$$I_{2r} = I_2 \sin \psi_2 = \frac{E_2 s}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 s)^2}} \cdot \frac{x_2 s}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 s)^2}} > 0; \quad P_2' = m_2 I_2^2 r_2 \frac{1-s}{s} < 0.$$

$$\Phi_1 > 90^\circ; \quad P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \Phi_1 < 0; \quad Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sin \Phi_1 > 0.$$

Режим противовключения (режим электромагнитного тормоза)



$$P_{эм2} = P_{эм} s + P_{эм} (1-s) = P_{эм}.$$

$$P_{эм} (1-s) = m_2 I_2^2 r_2 \frac{1-s}{s}.$$

РНПО Росучприбор Южно-Уральский Государственный университет



АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

ИНДУКЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР

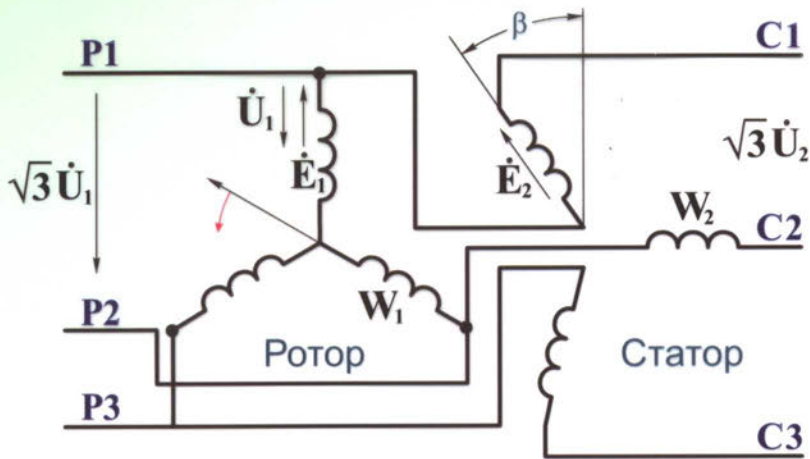
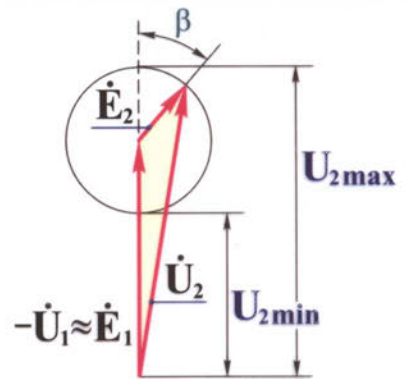
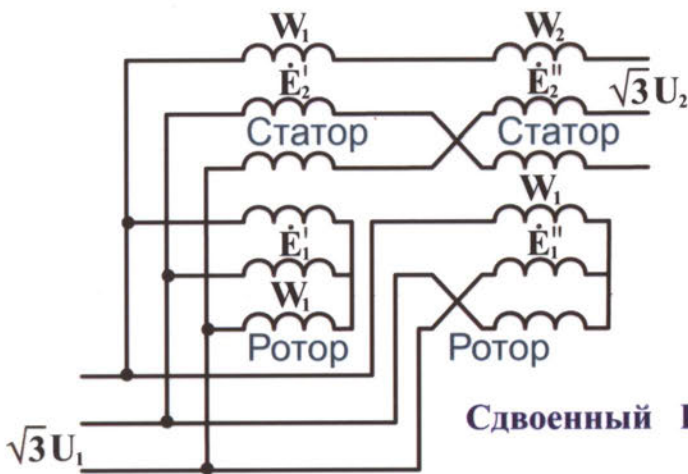


Схема индукционного регулятора (ИР)



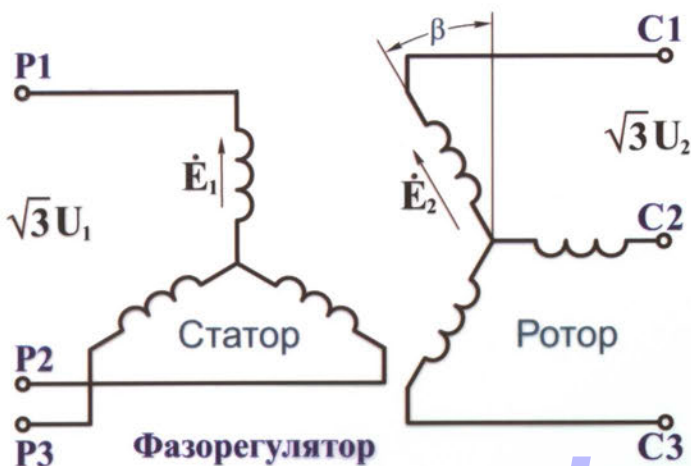
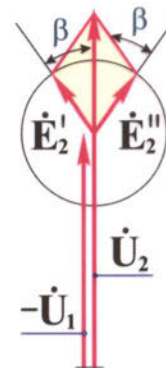
$$U_2 = E_1 + E_2 = -U_1 + E_2$$

Векторная диаграмма (ИР)

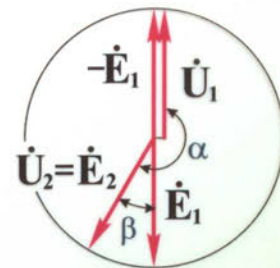


Сдвоенный ИП и его

векторная диаграмма



www.samelectric.ru



$$r_1 = r_2 = x_1 = x_2 = 0 ;$$

$$U_1 \approx E_1 \quad U_2 = E_2$$

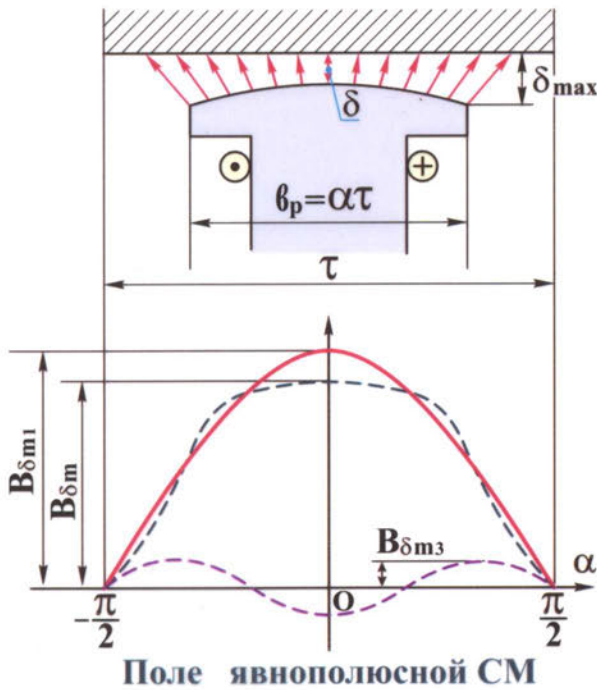
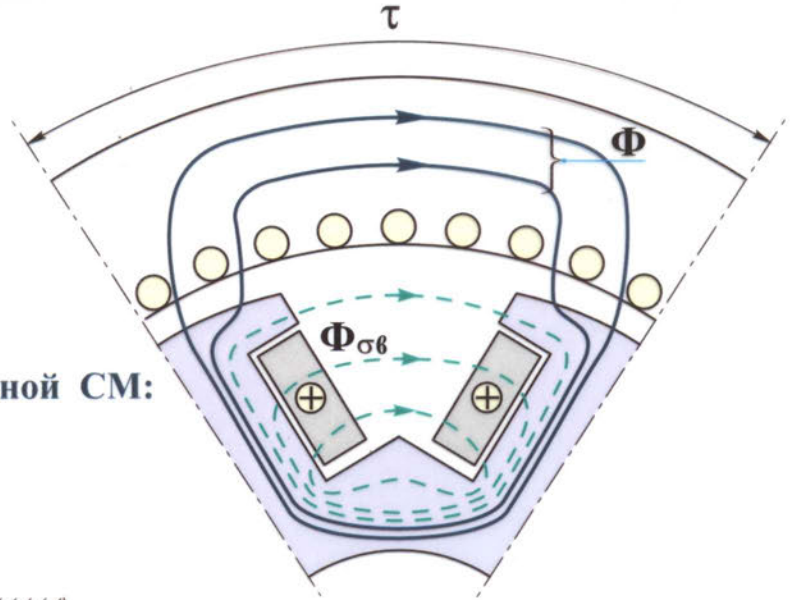
СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СМ ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ И ПАРАМЕТРЫ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Явнополюсная СМ

Поток обмотки возбуждения явнополюсной СМ:

- Φ - основной поток;
- Φ_{св} - поток рассеяния



$k_f = B_{\delta m1} / B_{\delta m}$ - коэффициент формы поля возбуждения

Обычно $\delta_{max} / \delta = 1,0 \dots 2,5$;
 $\alpha = 0,65 \dots 0,75$; $k_f = 0,95 \dots 1,15$.

$$\delta_p = \delta + 1/3 \delta_{max}$$

$$F_\delta = i_\delta W_\delta / 2p$$

$$B_{\delta m} = \lambda_\delta F_\delta = \frac{\mu_0}{k_\delta k_{\mu d} \delta} \cdot \frac{i_\delta W_\delta}{2p}$$

$$B_{\delta m1} = k_f \cdot B_{\delta m} = \frac{\mu_0}{k_\delta k_{\mu d} \delta} \cdot k_f \frac{i_\delta W_\delta}{2p}$$

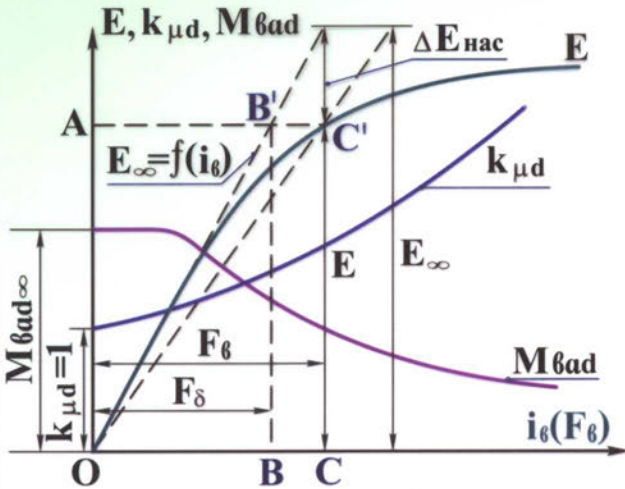
$$\Phi = \frac{2}{\pi} B_{\delta m1} \cdot \tau l_\delta = \frac{\mu_0 \cdot \tau l_\delta}{\pi k_\delta k_{\mu d} \delta} \cdot \frac{k_f \cdot W_\delta}{P} i_\delta; \quad k_\Phi = \frac{\Phi_\delta}{\Phi}$$

$$\Psi_{\delta ad} = k_{o\delta 1} W_1 \Phi = \frac{\mu_0 \tau l_\delta}{\pi k_\delta \cdot k_{\mu d} \cdot \delta} \cdot k_f \frac{i_\delta W_\delta}{P} \cdot k_{o\delta 1} \cdot W_1$$



СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СМ ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ И ПАРАМЕТРЫ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ (ПРОДОЛЖЕНИЕ)



Магнитные характеристики и зависимости $M_{\delta ad} = f(i_{\delta})$ от насыщения

$$\Psi_{\delta ad t} = \Psi_{\delta ad} \cos \omega t;$$

$$M_{\delta ad} = \frac{\Psi_{\delta ad}}{i_{\delta}} = \frac{\mu_0 \tau \ell_{\delta}}{\pi k_{\delta} k_{\mu d} \delta} k_f \frac{i_{\delta} W_{\delta}}{p} k_{\delta \delta 1} W_1;$$

$$e = -\frac{d\Psi_{\delta ad t}}{dt} = \omega_1 \Psi_{\delta ad} \sin \omega t = E_{m1} \sin \omega t;$$

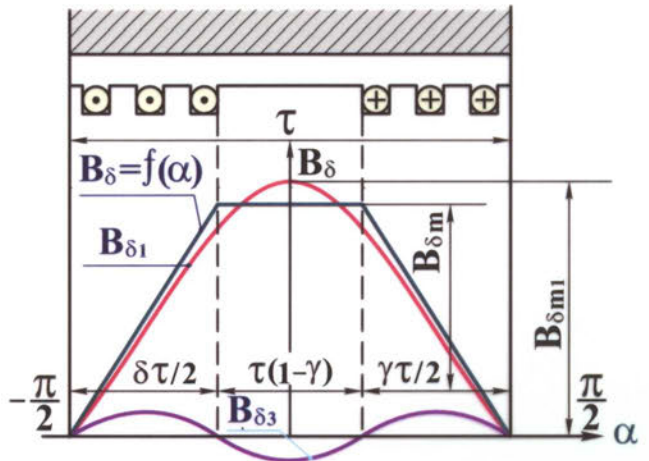
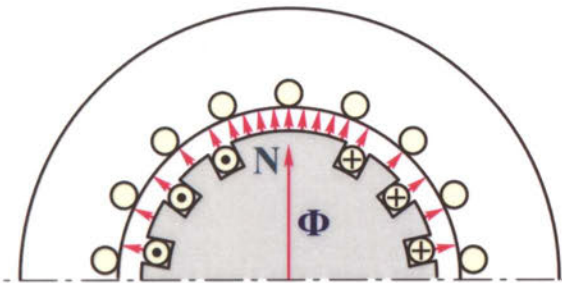
$$E_{m1} = \omega_1 \Psi_{\delta ad} = \omega_1 M_{\delta ad} \cdot i_{\delta} = x_{\delta ad} i_{\delta};$$

$$E = \frac{E_{m1}}{\sqrt{2}} = \frac{x_{\delta ad} i_{\delta}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega_1 M_{\delta ad} i_{\delta}}{\sqrt{2}};$$

$$M_{\delta ad} = \frac{\sqrt{2} E}{\omega_1 i_{\delta}}; \quad E \sim \Phi.$$

$$k_{\mu d} = \frac{OC}{OB} = \frac{F_{\delta}}{F_{\delta}} = \frac{\dot{E}_{\infty}}{E}.$$

Неявнополюсная СМ



Магнитное поле неявнополюсной СМ

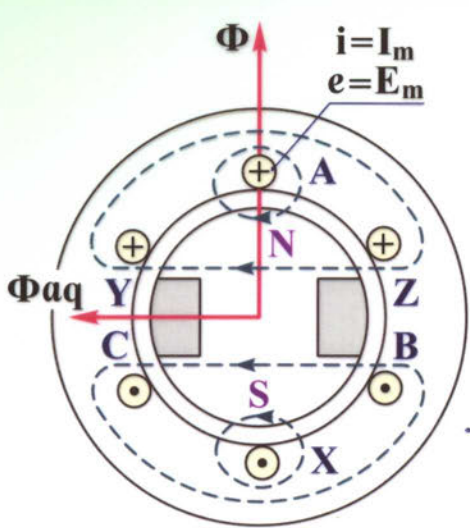
$$\begin{cases} B_{\delta m} = \lambda_{\delta} \cdot F_{\delta} = \frac{\mu_0}{k_{\delta} k_{\mu d} \delta} \cdot \frac{i_{\delta} W_{\delta}}{2p}; \\ F_{\delta m1} = \frac{4}{\pi} k_{p\delta} \frac{i_{\delta} W_{\delta}}{2p}; \quad B_{\delta m1} = \lambda_{\delta} F_{\delta m1} = \frac{\mu_0}{k_{\delta} k_{\mu d} \delta} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot k_{p\delta} \frac{i_{\delta} W_{\delta}}{2p}. \\ k_f = \frac{B_{\delta m1}}{B_{\delta m}} = \frac{4}{\pi} k_{p\delta}; \quad k_{p\delta} = \frac{\sin \frac{\gamma\pi}{2}}{\frac{\gamma\pi}{2}}. \end{cases}$$

При $\gamma = 0,65 \dots 0,80$ $k_f = 1,065 \dots 0,965$. $k_{\phi} = \frac{\pi^2}{8} \frac{1 - \frac{2}{3}\gamma}{k_{p\delta}}$

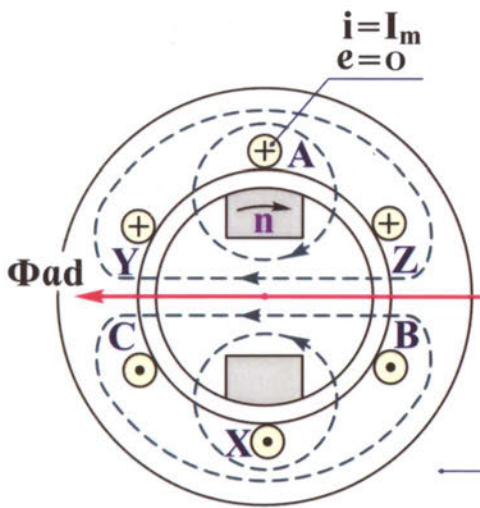


СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

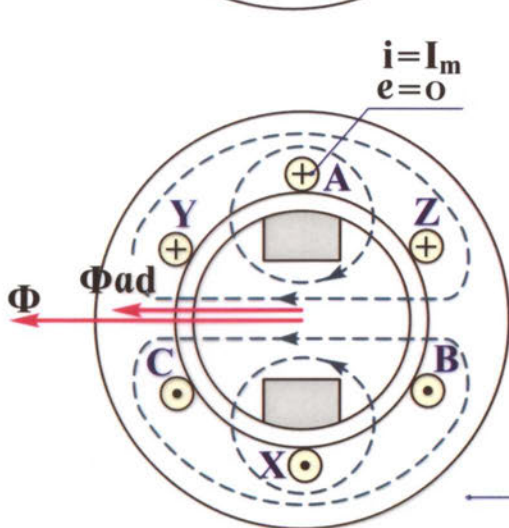
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ПАРАМЕТРЫ ОБМОТКИ ЯКОРЯ



Поперечная реакция якоря (активная нагрузка)



Продольная размагничивающая реакция якоря (индуктивная нагрузка)

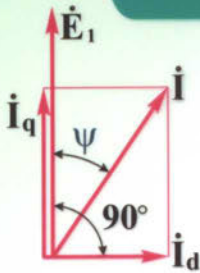


Продольная намагничивающая реакция якоря (емкостная нагрузка)



СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

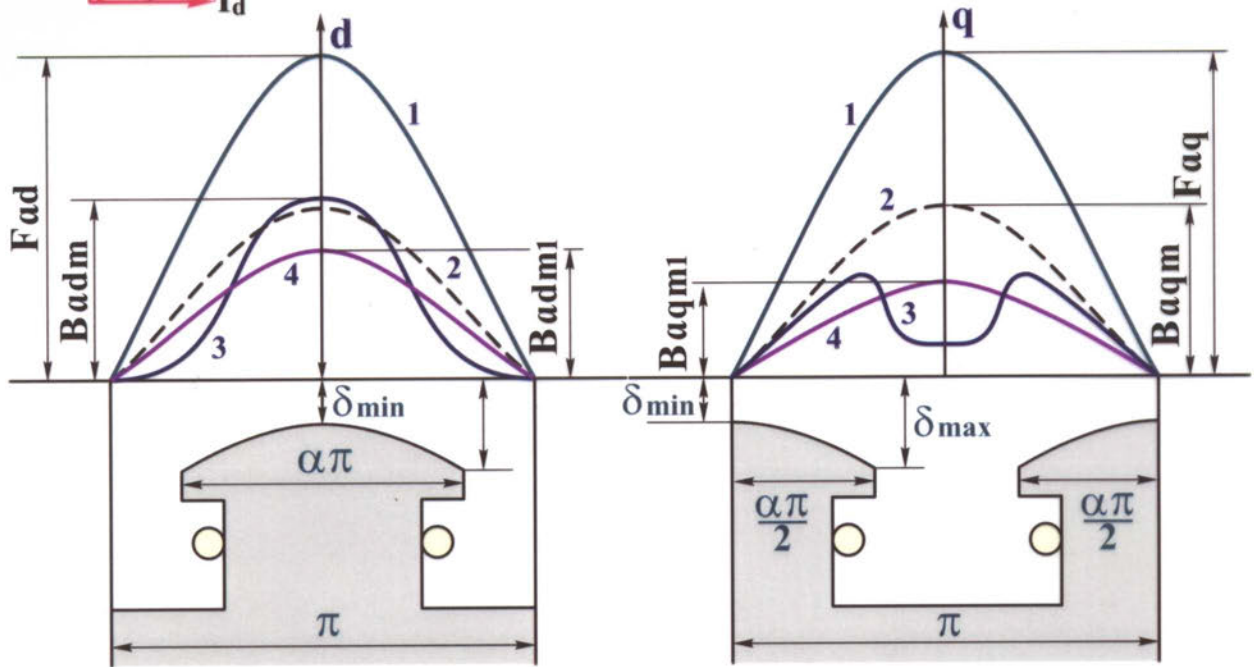
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ПАРАМЕТРЫ ОБМОТКИ ЯКОРЯ (ПРОДОЛЖЕНИЕ)



Векторная диаграмма токов якоря при смешанной активно-индуктивной нагрузке

$$I_d = I \sin \psi - \text{продольный ток якоря};$$

$$I_q = I \cos \psi - \text{поперечный ток якоря}$$



F_{ad} и F_{aq} - амплитуды продольной и поперечной МДС якоря, создаваемые токами I_d и I_q (смотрите кривые 1):

$$F_{ad} = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{k_{o\delta 1} W_1}{p} I_d = 0,45 m \frac{k_{o\delta 1} W_1}{p} I \sin \psi;$$

$$F_{aq} = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{k_{o\delta 1} W_1}{p} I_q = 0,45 m \frac{k_{o\delta 1} W_1}{p} I \cos \psi.$$

B_{adm} и B_{aqm} - амплитуды кривых индукции по продольной (а) и поперечной (б) осям при равномерном воздушном зазоре:

$$B_{adm} = \lambda_{\delta d} \cdot F_{ad}; \quad B_{aqm} = \lambda_{\delta q} \cdot F_{aq}. \quad (\text{смотрите кривые 2}).$$

Действительное распределение индукции изображено на рис. (а) и (б) кривыми 3.

B_{adm1} и B_{aqm1} - амплитуды первых гармоник индукции (смотрите кривые 4).

$k_{ad} = B_{adm1} / B_{adm};$
 $k_{aq} = B_{aqm1} / B_{aqm}.$ } Коэффициенты формы поля продольной и поперечной реакции якоря.



СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ПАРАМЕТРЫ ОБМОТКИ ЯКОРЯ
(ПРОДОЛЖЕНИЕ)

$$B_{adm1} = k_{ad} B_{adm} = \frac{\mu_0}{k_\delta k_{\mu d} \delta} \cdot \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{k_{o\delta 1} \cdot W_1}{P} I_d k_{ad};$$

$$B_{aqm1} = k_{aq} B_{aqm} = \frac{\mu_0}{k_\delta k_{\mu d} \delta} \cdot \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{k_{o\delta 1} \cdot W_1}{P} I_q k_{aq}.$$

$$\Phi_{ad} = \frac{2}{\pi} B_{adm1} \tau l_\delta; \quad \Phi_{aq} = \frac{2}{\pi} B_{aqm1} \tau l_\delta.$$

$$E_{ad} = \sqrt{2} \pi k_{o\delta 1} W_1 \Phi_{ad} = \underbrace{4mf_1 \frac{\mu_0 \tau l_\delta}{\pi k_\delta k_{\mu d} \delta} \cdot \frac{k_{o\delta 1}^2 W_1^2}{\pi}}_{x_{ad}} k_{ad} I_d = x_{ad} I_d;$$

$$E_{aq} = \sqrt{2} \pi k_{o\delta 1} W_1 \Phi_{aq} = \underbrace{4mf_1 \frac{\mu_0 \tau l_\delta}{\pi k_\delta k_{\mu d} \delta} \cdot \frac{k_{o\delta 1}^2 W_1^2}{\pi}}_{x_{aq}} k_{aq} I_q = x_{aq} I_q;$$

$$\dot{E}_{ad} = -j \dot{I}_d x_{ad}; \quad \dot{E}_{aq} = -j \dot{I}_q x_{aq}.$$

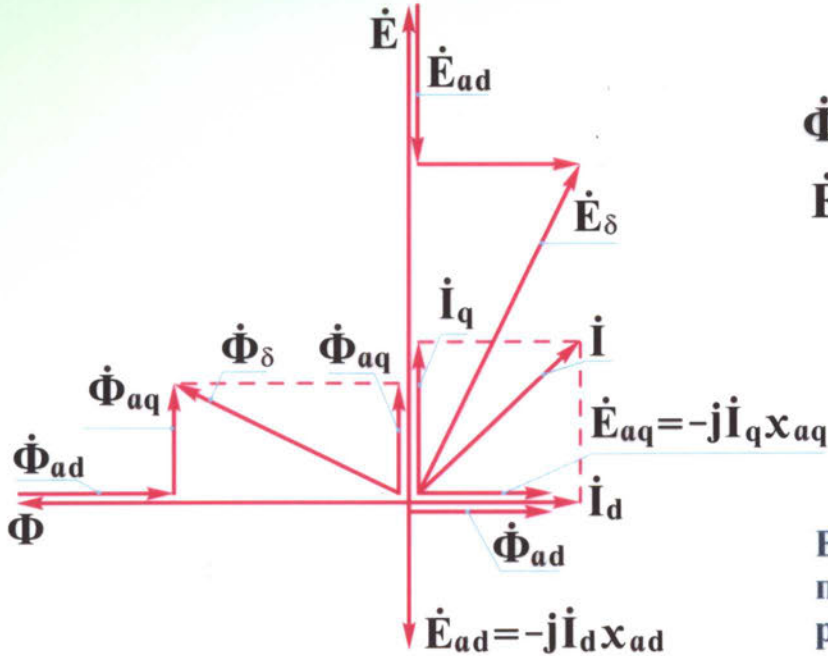
$x_{ad} = \frac{x_{ad\infty}}{k_{\mu d}}; \quad x_{aq} = \frac{x_{aq\infty}}{k_{\mu q}},$ где $x_{ad\infty}$ и $x_{aq\infty}$ – ненасыщенное значение индуктивных сопротивлений реакции якоря по продольной и поперечной осям ($\mu_c = \infty$).

В неявнополюсной СМ $k_{ad} = k_{aq}$ и $k_{\mu d} = k_{\mu q}, \quad x_{ad} = x_{aq}.$



СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ПАРАМЕТРЫ ОБМОТКИ ЯКОРЯ
(ПРОДОЛЖЕНИЕ)



$$\Phi_{\delta} = \Phi + \Phi_{ad} + \Phi_{aq};$$

$$\dot{E}_{\delta} = \dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq}.$$

Векторная диаграмма потоков и ЭДС реакции якоря СМ

$\dot{E}_{\sigma a} = -j\dot{I}X_{\sigma a}$, $X_{\sigma a}$ – индуктивное сопротивление рассеяния:

$$E_{\sigma ad} = E_{\sigma d} \sin \psi = I_d X_{\sigma a};$$

$$E_{\sigma aq} = E_{\sigma a} \cos \psi = I_q X_{\sigma a}.$$

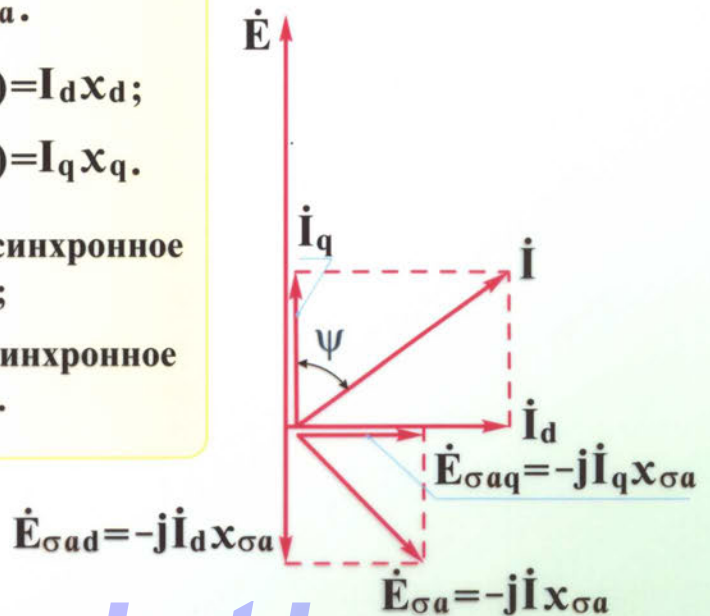
$$E_d = E_{ad} + E_{\sigma ad} = I_d (X_{ad} + X_{\sigma a}) = I_d X_d;$$

$$E_q = E_{aq} + E_{\sigma aq} = I_q (X_{aq} + X_{\sigma a}) = I_q X_q.$$

$X_d = X_{ad} + X_{\sigma a}$ – продольное синхронное индуктивное сопротивление;

$X_q = X_{aq} + X_{\sigma a}$ – поперечное синхронное индуктивное сопротивление.

Векторная диаграмма ЭДС рассеяния СМ

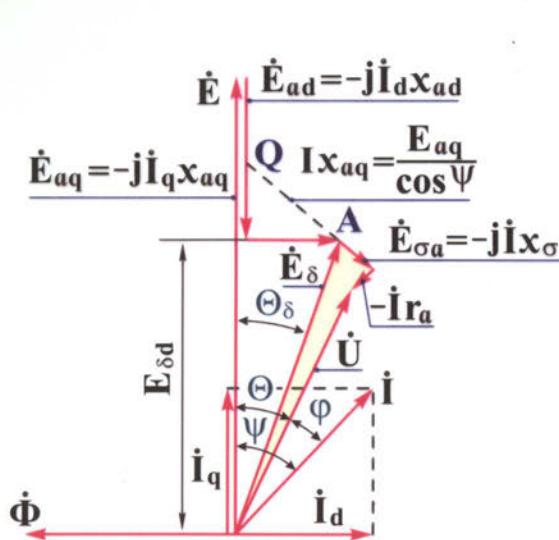


СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ НАПРЯЖЕНИЙ ГЕНЕРАТОРОВ

А. Явнополюсный синхронный генератор.

$$\dot{U} = \dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a} - \dot{I}r_a = \dot{E}_{\delta} + \dot{E}_{\sigma a} - \dot{I}r_a.$$



Активно-индуктивная нагрузка



Активно-емкостная нагрузка

$$\dot{U} = \dot{E} - j\dot{I}_d x_d - j\dot{I}_q x_q - \dot{I}r_a;$$

$$\dot{E} = \dot{U} + j\dot{I}_d x_d + j\dot{I}_q x_q + \dot{I}r_a.$$

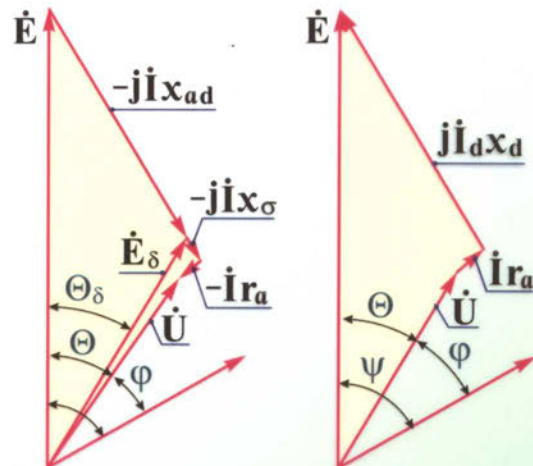
Б. Неявнополюсный СГ.

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a} - \dot{I}r_a = \dot{E} + \dot{E}_a + \dot{E}_{\sigma a} - \dot{I}r_a = \\ &= \dot{E} - j\dot{I}x_{ad} - j\dot{I}x_{\sigma a} - \dot{I}r_a. \end{aligned}$$

$$\dot{E} = \dot{U} + j\dot{I}x_{ad} + j\dot{I}x_{\sigma a} + \dot{I}r_a = \dot{U} + j\dot{I}x_d + \dot{I}r_a.$$



Видоизмененная векторная диаграмма явнополюсного СГ при активно-индуктивной нагрузке



Векторные диаграммы напряжений неявнополюсного СГ при активно-индуктивной нагрузке



СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА (СГ)

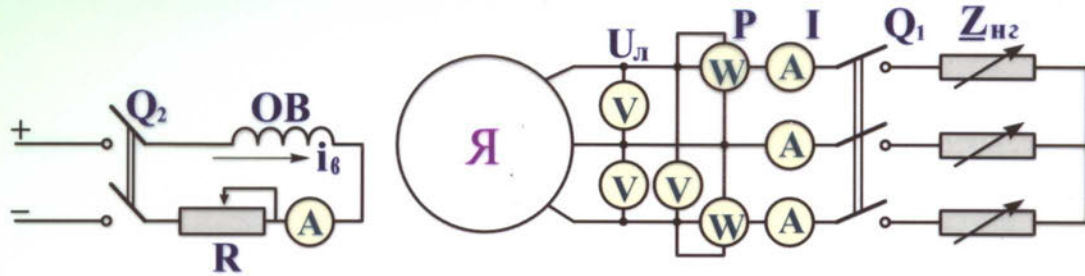
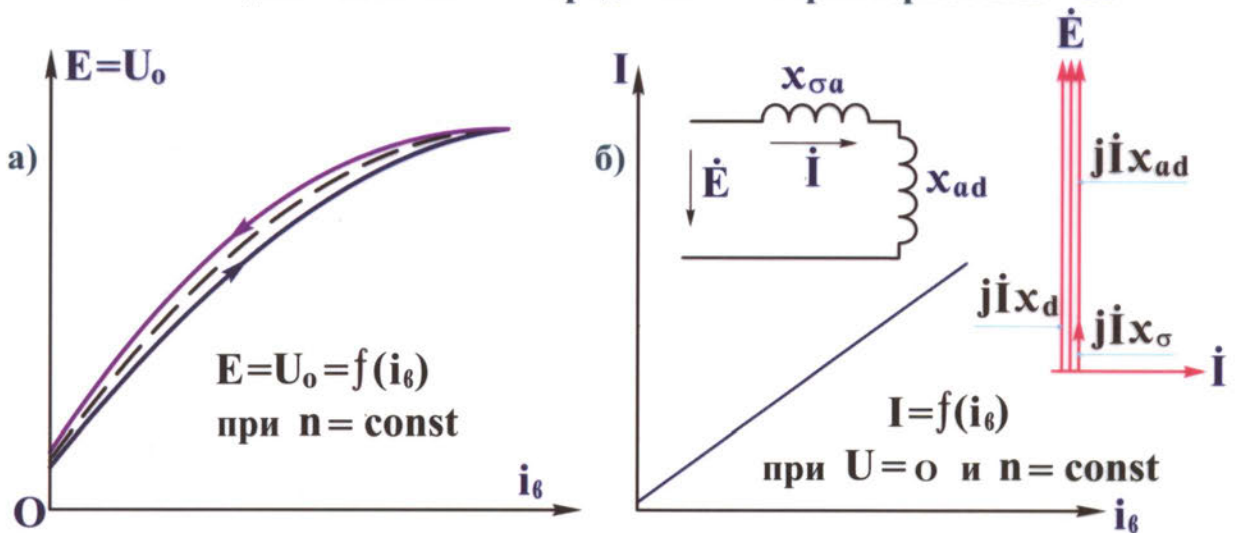
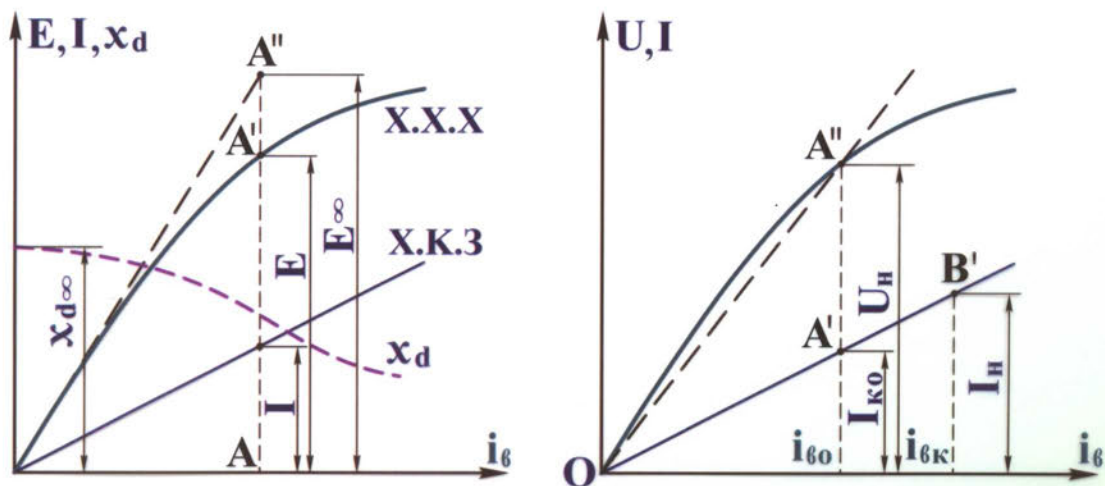


Схема для опытного определения характеристики СГ



Характеристики холостого хода (а) и установившегося короткого замыкания (б)



$$x_d = \frac{E}{I} = \frac{E_\infty}{k_{\mu d} I} = \frac{x_{d\infty}}{k_{\mu d}}$$

$$k_{\mu d} = \frac{AA''}{AA'}$$

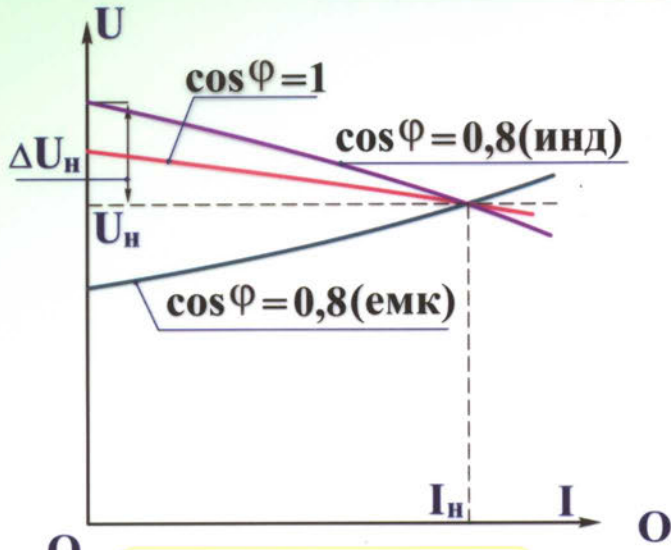
Определение отношения короткого замыкания

$$k_{0,к.з} = I_{к0} / I_{кн} = i_{60} / i_{6к}$$

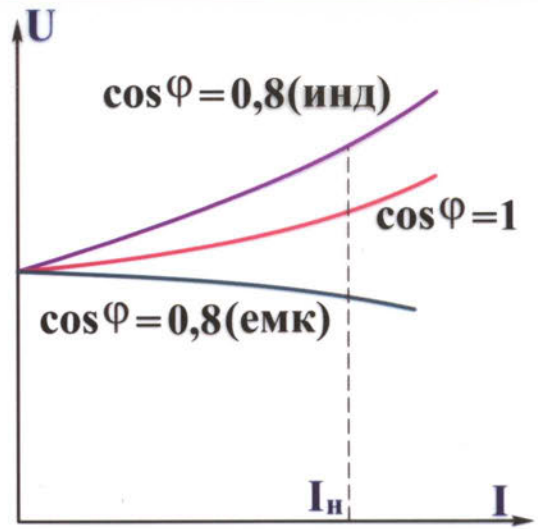


СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

ХАРАКТЕРИСТИКИ СГ (ПРОДОЛЖЕНИЕ)

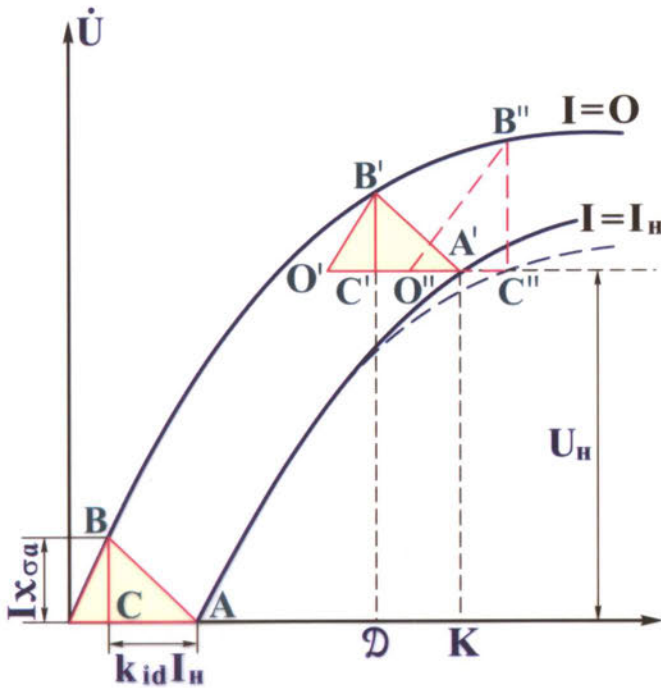


$U=f(I)$ при $i_6 = \text{const}$
и $n = \text{const}$

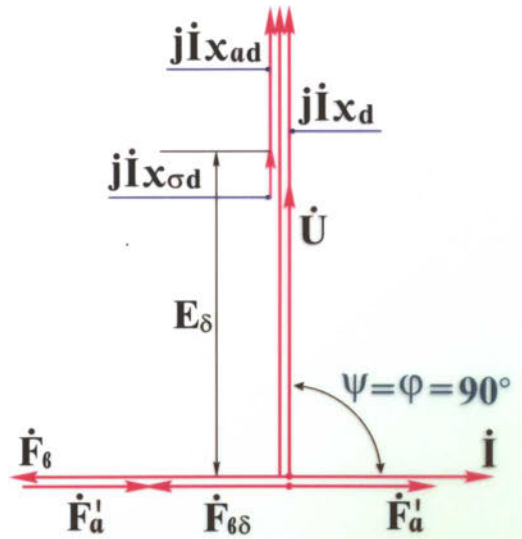


$i_6=f(I)$ при $U = \text{const}$
и $n = \text{const}$

Внешние (а) и регулировочные (б) характеристики СГ



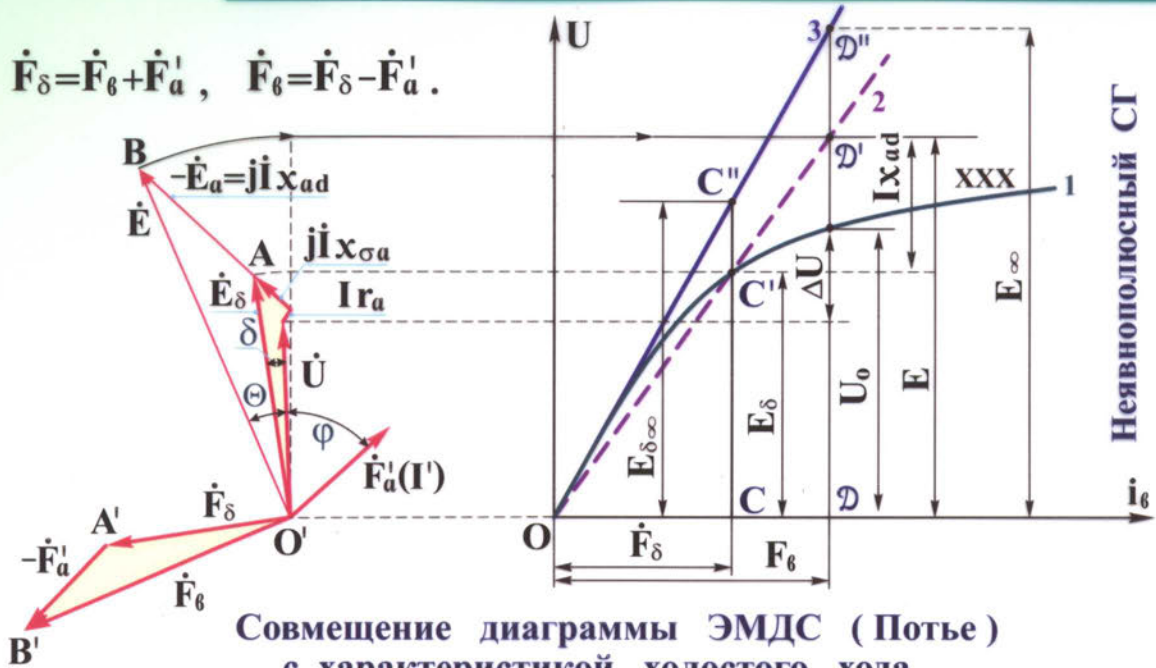
Индукционная
нагрузочная характеристика
 $U=f(i_6)$ при $I = \text{const}$, $\cos \varphi = 0$,
 $n = \text{const}$.



Векторная диаграмма СГ
при индуктивной нагрузке

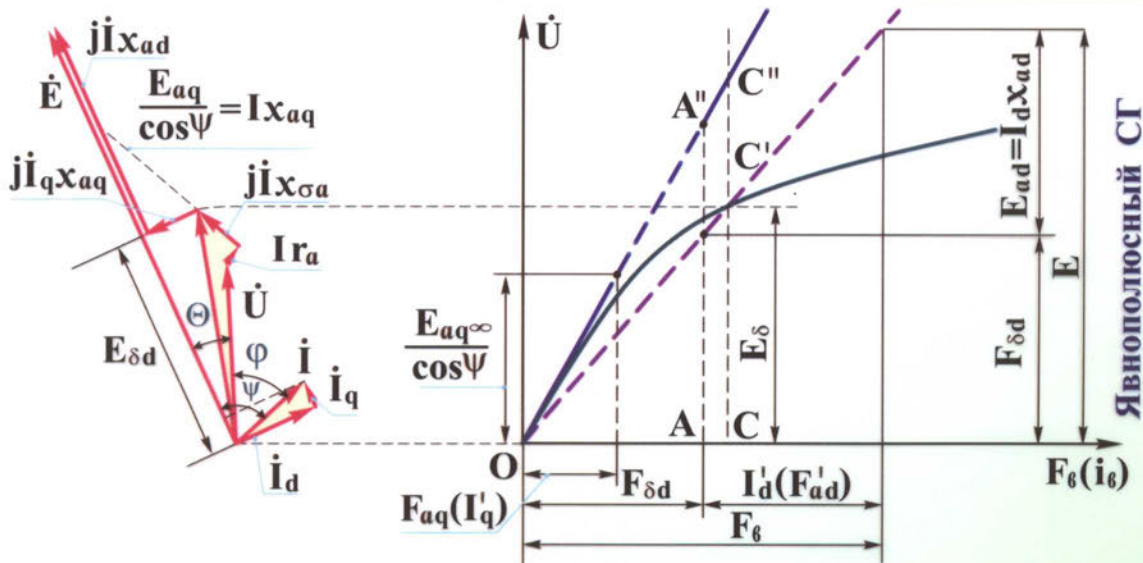
СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

УЧЕТ НАСЫЩЕНИЯ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ВЕКТОРНЫХ ДИАГРАММ НАПРЯЖЕНИЙ СГ



$$\frac{O'B}{O'A} = \frac{O'B'}{O'A'}, \quad \frac{E}{E_\delta} = \frac{F_\theta}{F_\delta}; \quad \frac{DD'}{CC'} = \frac{OD}{OC}, \quad \frac{DD'}{E_\delta} = \frac{F_\theta}{F_\delta}; \quad DD' = E.$$

$$E_\delta = \frac{E_{\delta\infty}}{k_{\mu d}}; \quad E = \frac{E_\delta}{k_{\mu d}}; \quad k_{\mu d} = \frac{CC''}{CC'} = \frac{DD''}{DD'}; \quad AB = I x_{ad}; \quad x_{ad} = \frac{x_{ad\infty}}{k_{\mu d}}.$$



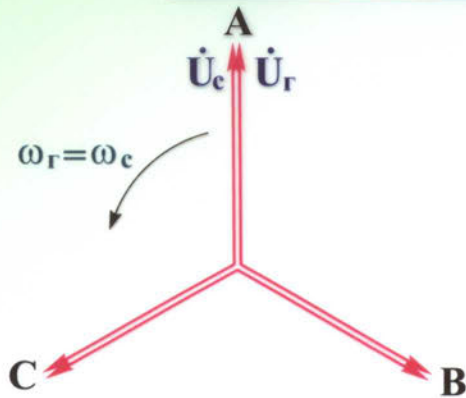
$$x_{aq} I_{aq} = \frac{x_{aq\infty} I}{k_{\mu q}} = \frac{E_{aq\infty}}{k_{\mu q} \cos \psi} = \frac{E_{aq}}{\cos \psi}; \quad k_{\mu d} = \frac{CC''}{CC'}, \quad x_{ad} = \frac{x_{ad\infty}}{k_{\mu d}}.$$

РНПО Росучприбор Южно-Уральский Государственный университет



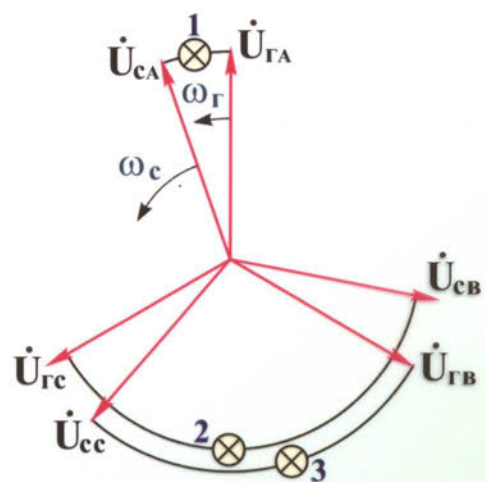
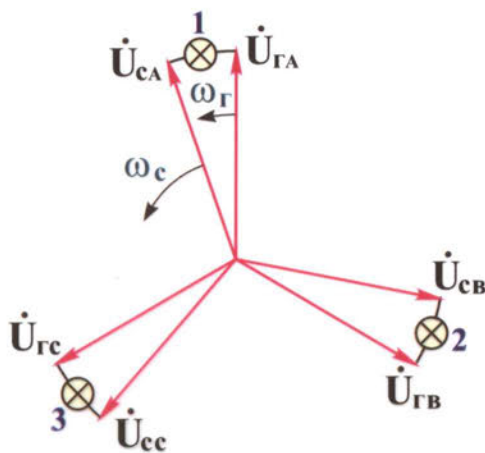
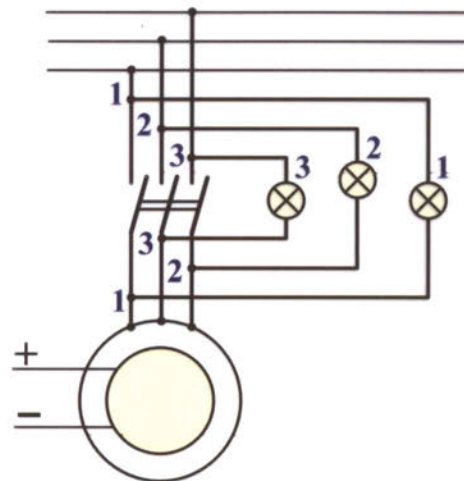
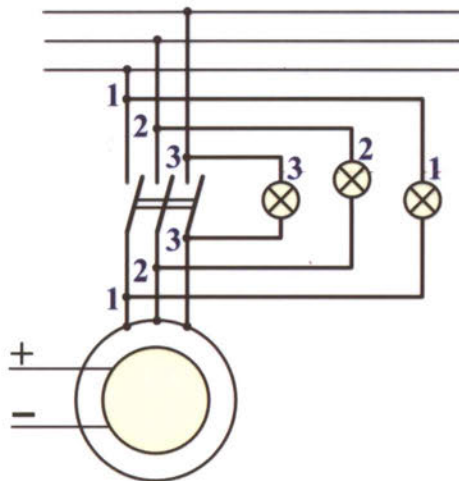
СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИНХРОННЫХ МАШИН.
СИНХРОНИЗАЦИЯ СГ



Векторные диаграммы напряжений сети U_c и генератора U_g при идеальных условиях включения на параллельную работу

Синхронизация с помощью лампового синхроскопа

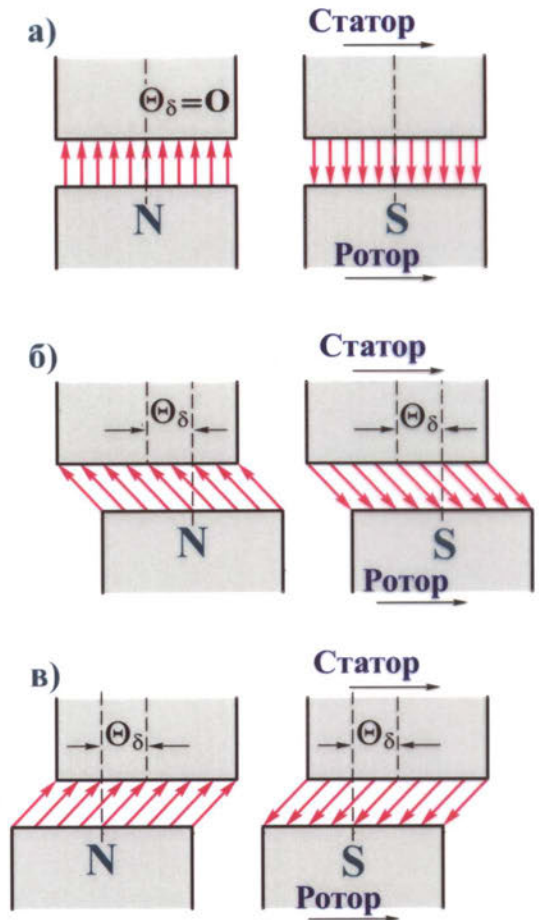
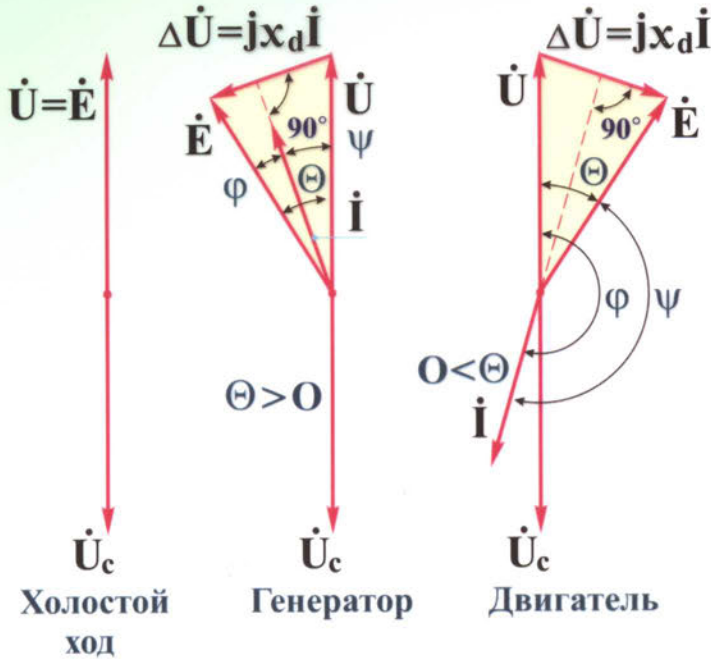


Синхронизация с помощью ламп применяется только для генераторов малой мощности. Для мощных генераторов используют электромагнитные синхроскопы. Нередко применяются автоматические синхронизаторы. В последние годы широко введен метод грубой синхронизации или самосинхронизации.

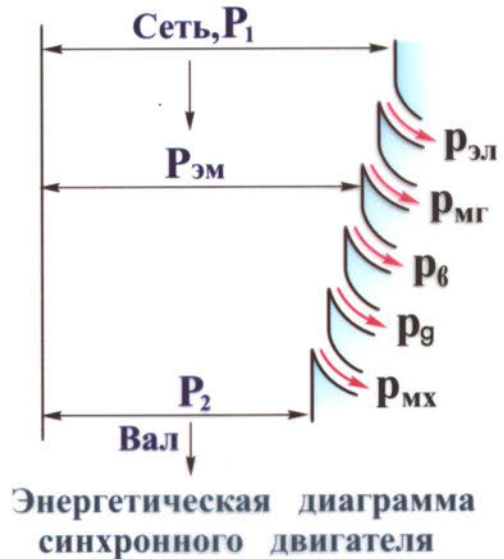
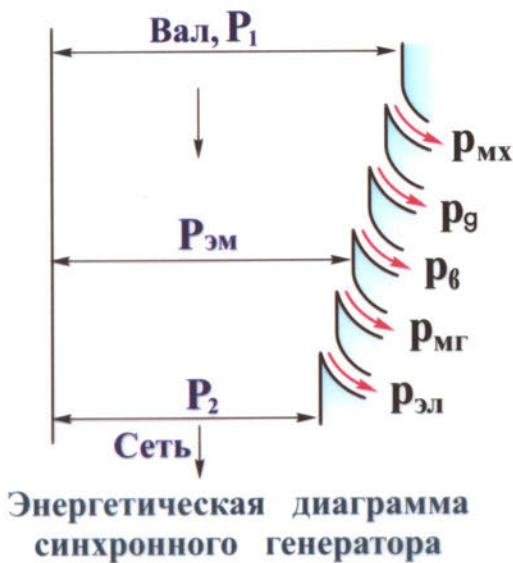


СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

СИНХРОННЫЕ РЕЖИМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СИНХРОННЫХ МАШИН С СЕТЬЮ

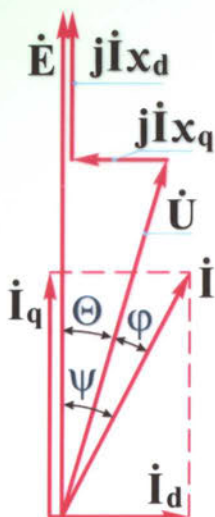


Синхронная машина в режимах работы:
 а) холостого хода,
 б) генератора,
 в) двигателя ($\Theta \approx \Theta_\delta$)



СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ МОЩНОСТЬ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ



$P_{эм} \approx P = mUI \cos \varphi$.
Согласно упрощенной векторной диаграмме явнополюсной СМ (смотрите рисунок)

$$P_{эм} = mUI \cos \varphi = mUI \cos(\psi + \theta) = mUI \cos \psi \cos \theta + mUI \sin \psi \sin \theta = mUI_q \cos \theta + mUI_d \sin \theta.$$

Из векторной диаграммы

$$I_q = \frac{U \sin \theta}{X_q}; \quad I_d = \frac{E - U \cos \theta}{X_d}.$$

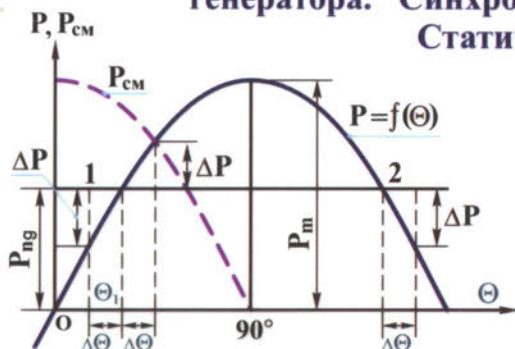
$$P = \frac{mUE}{X_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta.$$

$$M = \frac{mUE}{\Omega_1 X_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2\Omega_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta.$$

Для неявнополюсной синхронной машины $X_q = X_d$

$$P = \frac{mUE}{X_d} \sin \theta; \quad M = \frac{mUE}{\Omega_1 X_d} \sin \theta.$$

Угловая характеристика мощности неявнополюсного синхронного генератора. Синхронизирующая мощность и момент.



Статическая устойчивость.

Под статической устойчивостью понимают способность СМ при незначительных возмущениях установившегося режима восстанавливать этот режим после прекращения действия возмущений.

Режим СМ статически устойчив, если $\Delta P / \Delta \theta > 0$, $\Delta M = \frac{\Delta P}{\Omega_1} > 0$, и неустойчив, если $\Delta P / \Delta \theta < 0$, $\Delta M = \frac{\Delta P}{\Omega_1} < 0$.

Здесь ΔP и ΔM - синхронизирующие мощность и момент.

$$\Delta P = P_{см} \Delta \theta, \quad \Delta M = M_{см} \Delta \theta,$$

Где $P_{см}$ и $M_{см}$ - коэффициенты синхронизирующей мощности и синхронизирующего момента:

$$P_{см} = \frac{\Delta P}{\Delta \theta}; \quad M_{см} = \frac{\Delta M}{\Delta \theta} \text{ или в пределе } P_{см} = \frac{dP}{d\theta} = \frac{mUE}{X_d} \cos \theta;$$

$$M_{см} = \frac{dP}{\Omega_1 d\theta} = \frac{mUE}{\Omega_1 X_d} \cos \theta.$$



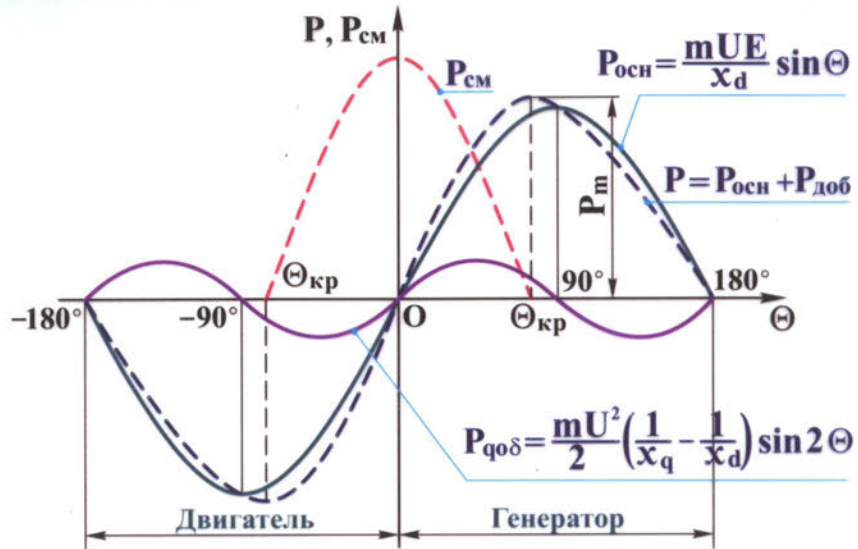
СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

УГЛОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ЯВНОПОЛЮСНОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

$$M = \frac{P}{\Omega_1};$$

$$P_{см} = \frac{dP}{d\Theta};$$

$$M_{см} = \frac{dP}{\Omega_1 d\Theta}.$$

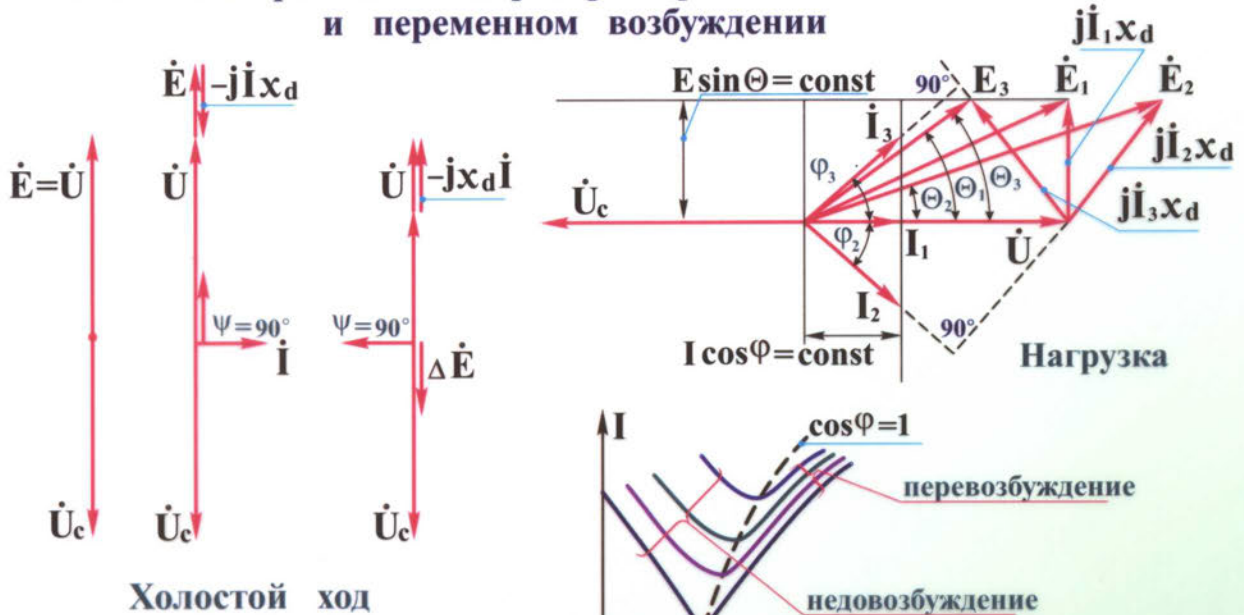


Статическая перегружаемость

$$k_n = \frac{P_m}{P_H} = \frac{M_m}{M_H} = \frac{mUE}{x_d} / \frac{mUE}{x_d} \sin \Theta_H.$$

Здесь Θ_H - угол при номинальной нагрузке ($U=U_H, i_\theta=i_{\theta H}$);
обычно $\Theta_H=20 \dots 35^\circ$; для мощных генераторов $k_n \geq 1,6 \dots 1,7$;
для синхронных двигателей $k_n=1,65$.

Работа синхронного генератора при постоянной мощности и переменном возбуждении



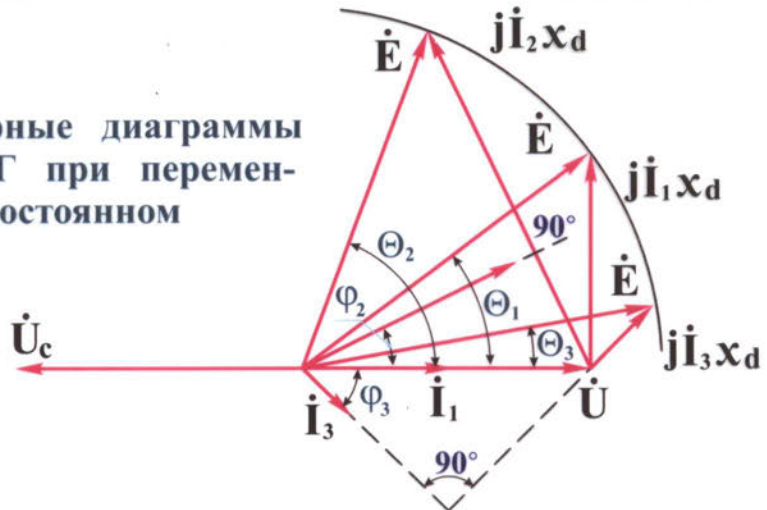
РНПО Росучприбор Южно-Уральский Государственный университет



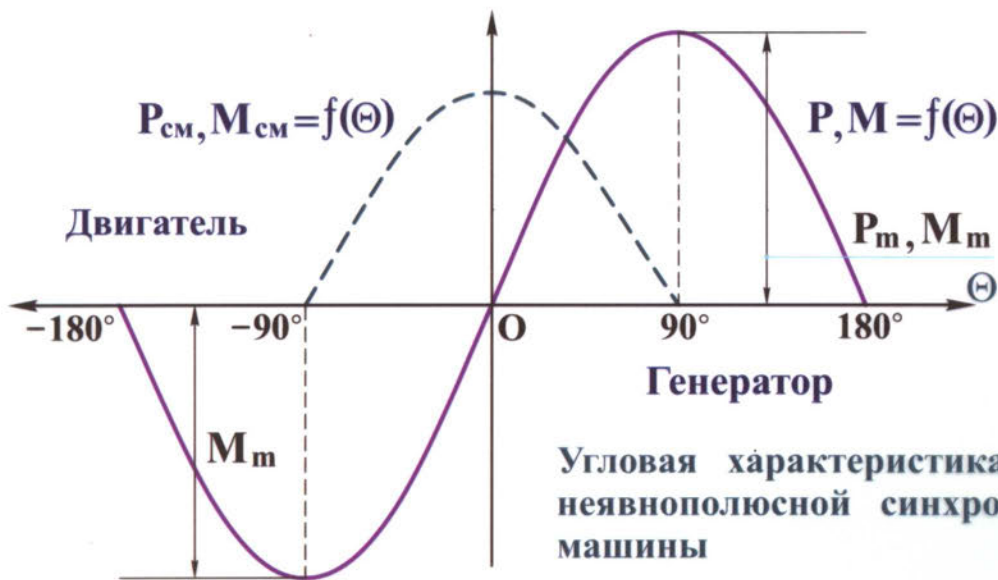
СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

РАБОТА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНО С СЕТЬЮ ПРИ ПОСТОЯННОМ ВОЗБУЖДЕНИИ И ПЕРЕМЕННОЙ МОЩНОСТИ

Упрощенные векторные диаграммы неявнополюсного СГ при переменной мощности и постоянном возбуждении



Синхронный двигатель



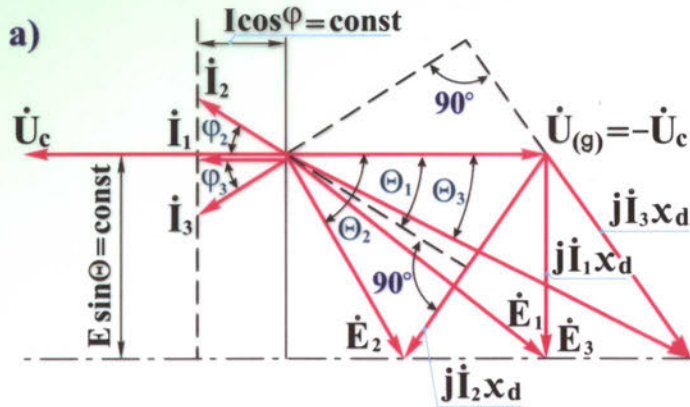
Угловая характеристика неявнополюсной синхронной машины

Для получения необходимого выражения мощности или момента двигателя следует в соответствующих выражениях для генераторного режима заменить Θ на $-\Theta$. Однако оперирование с отрицательными мощностями неудобно, и потому мощности и моменты двигательного режима принимаются положительными.

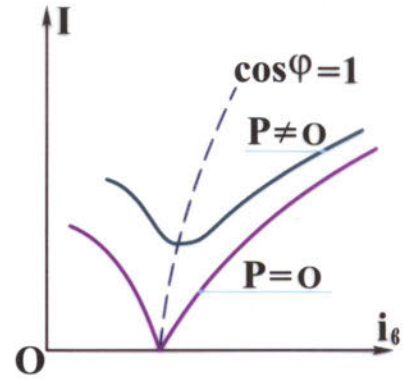


СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

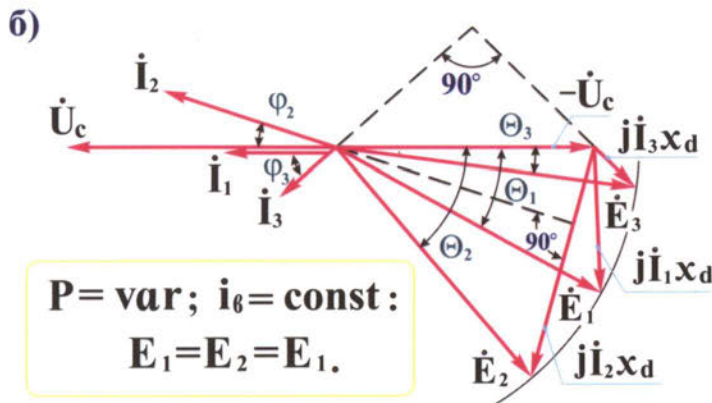
РЕЖИМЫ РАБОТЫ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ



$P = \text{const}; i_6 = \text{var}; E_3 > E_1; E_2 < E_1.$

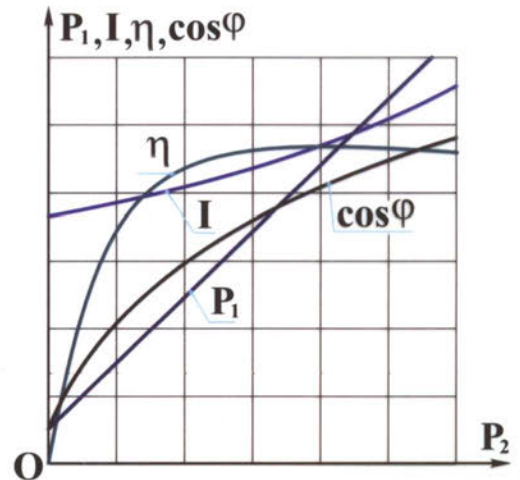


U - образные характеристики



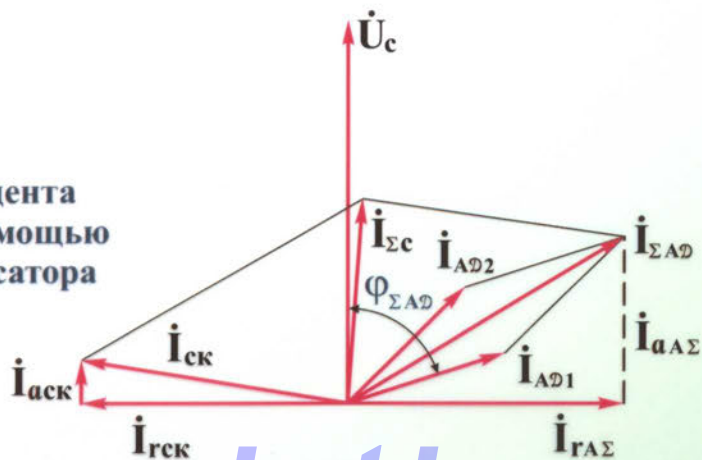
$P = \text{var}; i_6 = \text{const}; E_1 = E_2 = E_1.$

Упрощенные векторные диаграммы СД при изменении тока возбуждения (а) и мощности (б)



Рабочие характеристики синхронного двигателя

Улучшение коэффициента мощности сети с помощью синхронного компенсатора



СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

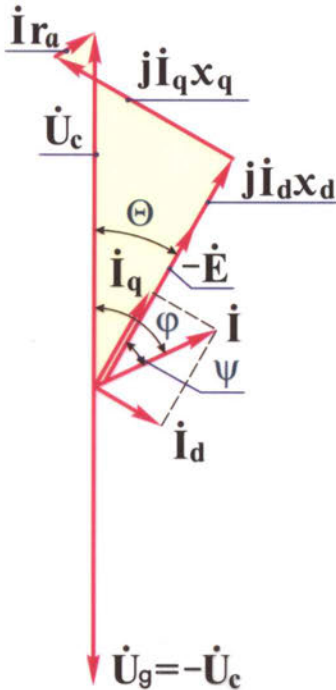
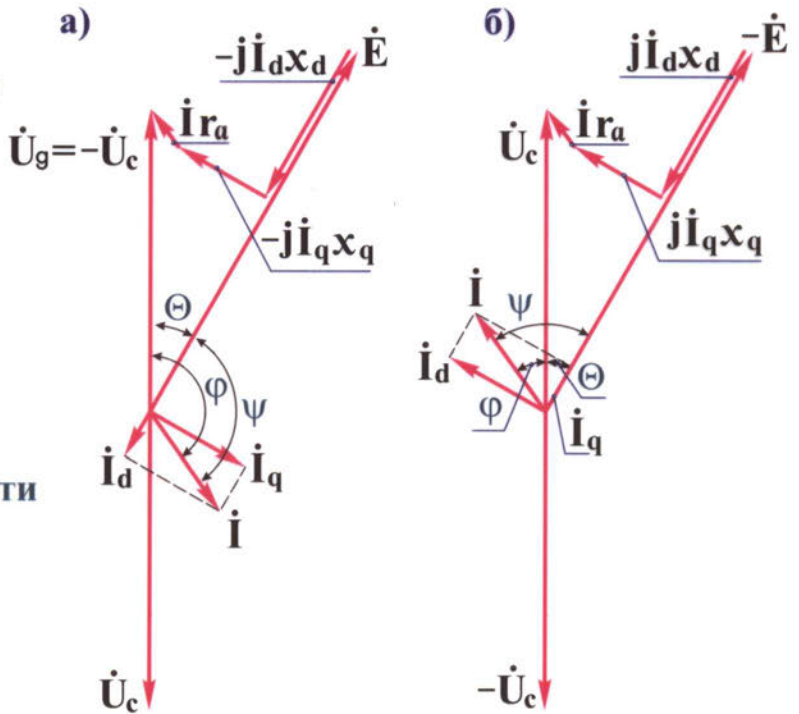
ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

$$\dot{U}_g = -\dot{U}_c = \dot{E} - j\dot{I}_d x_d - j\dot{I}_q x_q - \dot{I} r_a; \quad \dot{U}_c = -\dot{E} + j\dot{I}_d x_d + j\dot{I}_q x_q + \dot{I} r_a;$$

$$\dot{U}_g = -\dot{U}_c$$

Два варианта векторных диаграмм перевозбужденного синхронного двигателя:

- а) $P = mUI \cos \varphi < 0$ – СД отдает в сеть отстающий ток
- б) $P = mUI \cos \varphi > 0$ – СД потребляет из сети опережающий ток

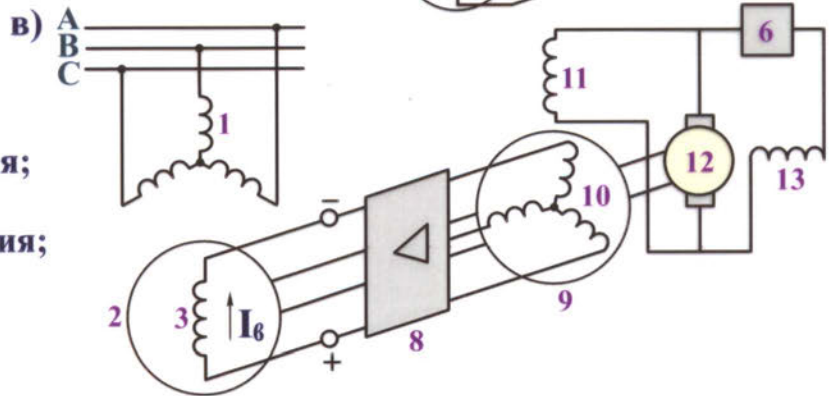
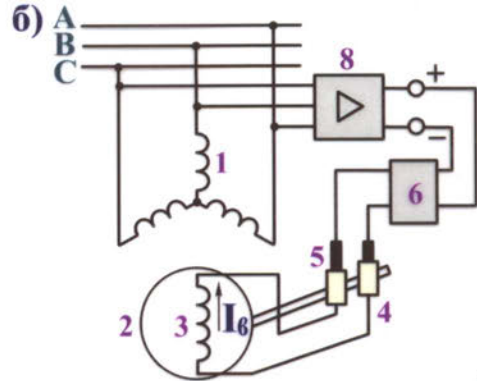
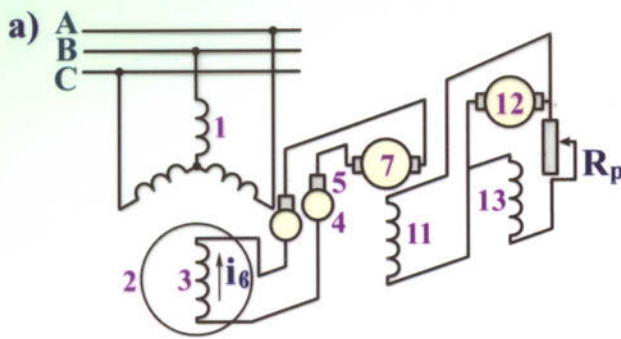


Векторная диаграмма недовозбужденного синхронного двигателя - СД потребляет из сети отстающий ток

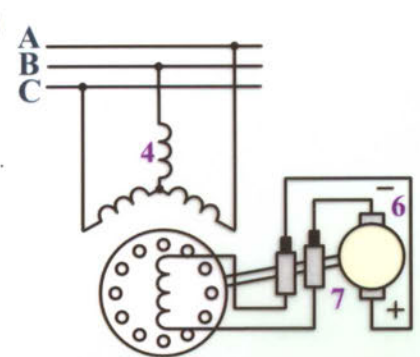
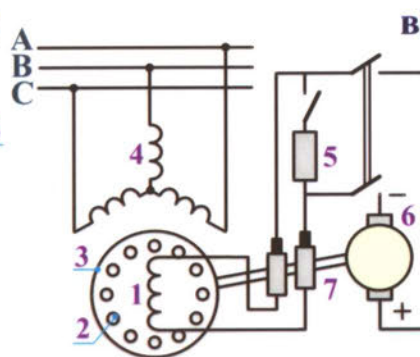
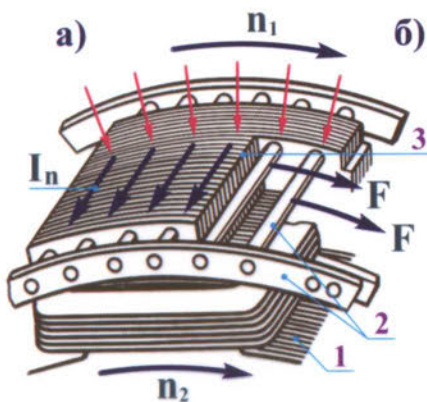


СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

СХЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН



- 1- обмотка якоря;
- 2- ротор генератора;
- 3- обмотка возбуждения;
- 4- кольца; 5- щетки;
- 6- регулятор напряжения;
- 7- возбудитель;
- 8- выпрямитель;
- 9- обмотка якоря возбудителя;
- 10- ротор возбудителя;
- 11- обмотка возбуждения возбудителя;
- 12- подвозбудитель;
- 13- обмотка возбуждения подвозбудителя;



Устройство пусковой обмотки синхронного двигателя (а) и схемы его асинхронного пуска (б, в)

- 1- обмотка возбуждения;
- 2- пусковая обмотка;
- 3- ротор; 4- обмотка якоря;
- 5- гасящий резистор;
- 6- якорь возбудителя;
- 7- кольца и щетки

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ВЫПРЯМЛЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ПОСТОЯННЫЙ С ПОМОЩЬЮ КОЛЛЕКТОРА

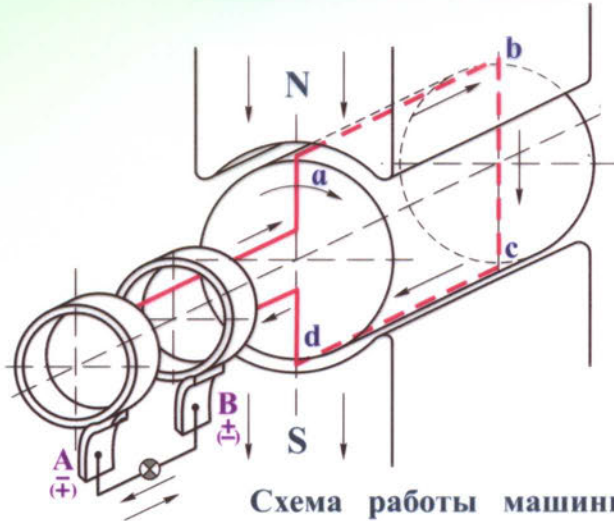
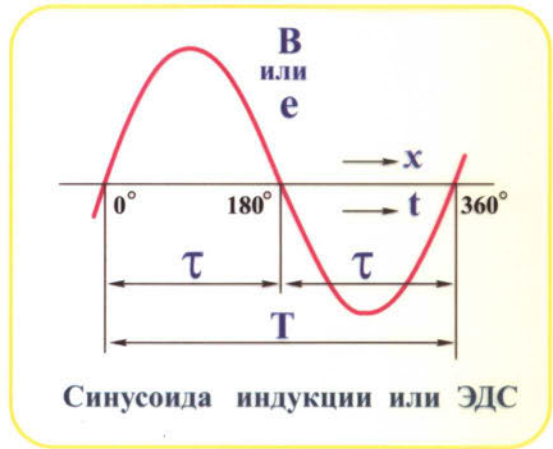


Схема работы машины переменного тока



Синусоида индукции или ЭДС



Кривые ЭДС в витке и напряжения на щетках коллекторной машины

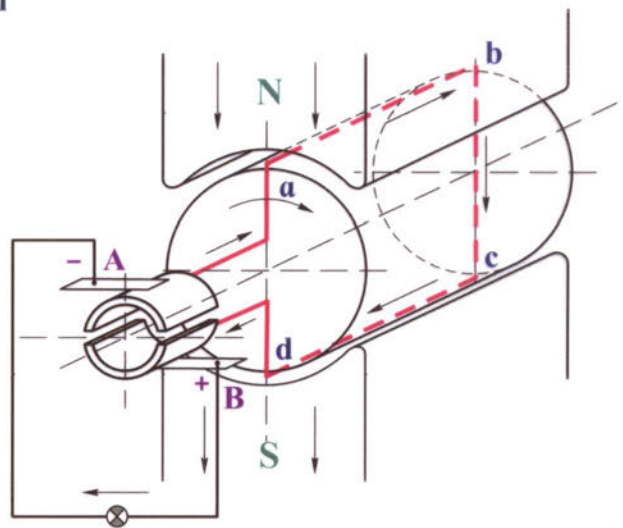
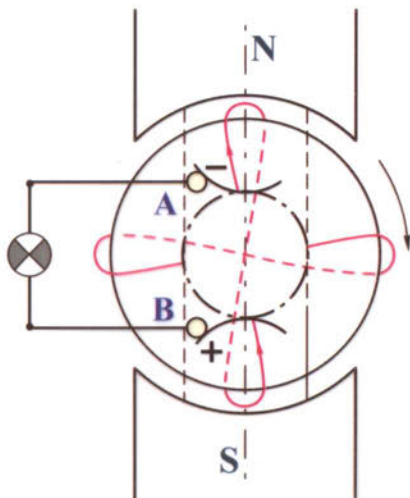
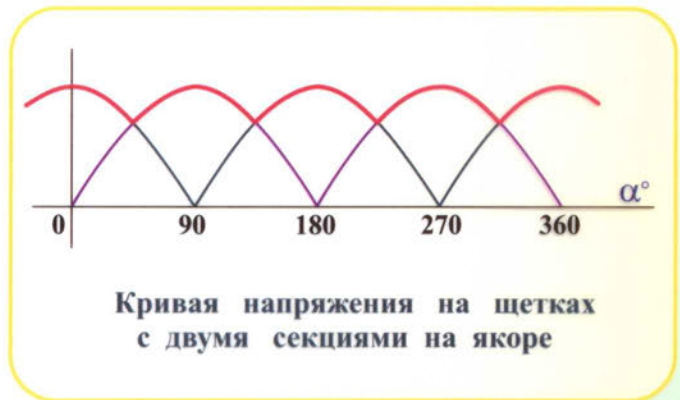


Схема работы машины постоянного тока



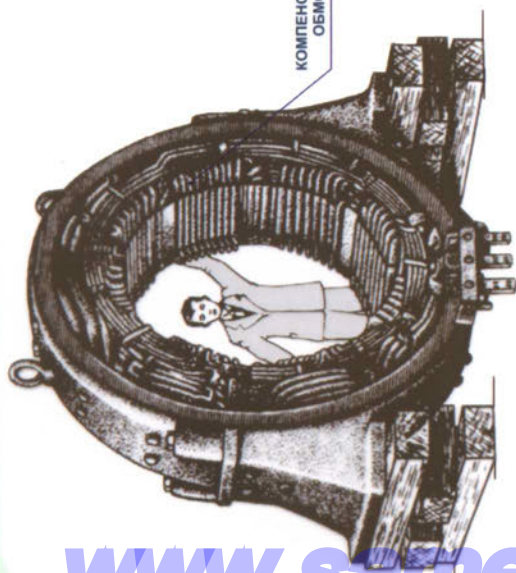
Барабанный якорь с двумя секциями



Кривая напряжения на щетках с двумя секциями на якоре

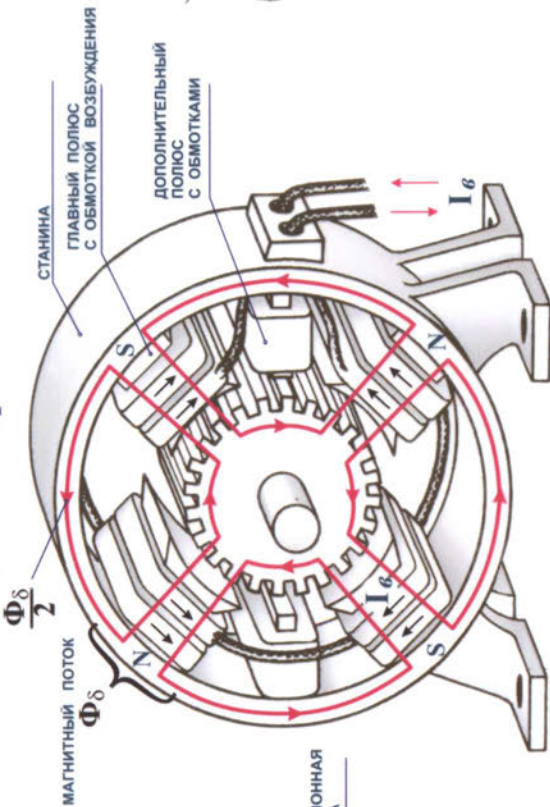
МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Многополюсная станина генератора на 1500квт. с комплексной обмоткой

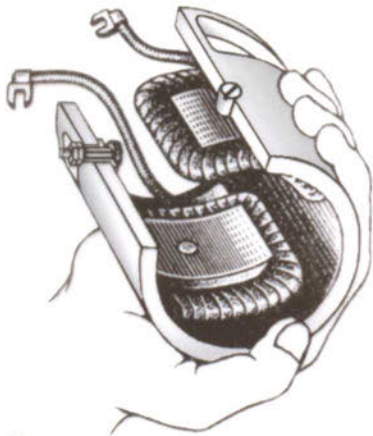


МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ МАШИНЫ

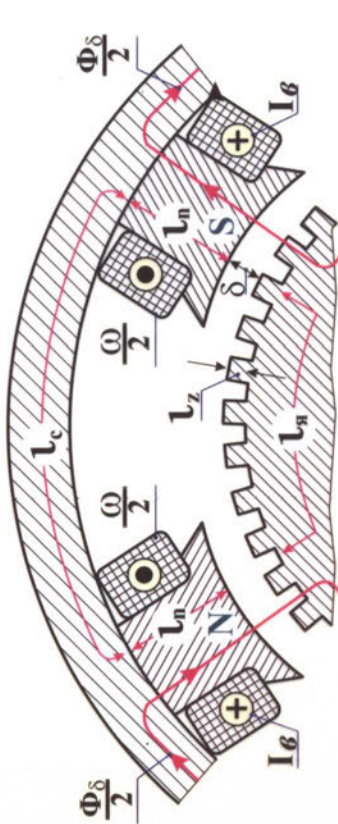
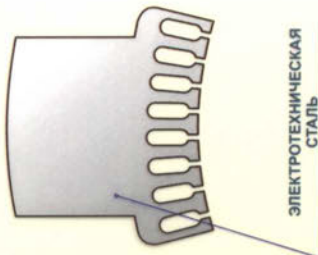
Магнитная цепь четырехполюсной машины



Двухполюсная станина генератора на 0,2 квт



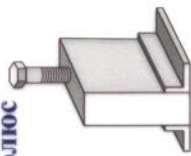
Полус с пазами для компенсационной обмотки



$$F_n = I_e \omega = H_e 2\delta + H_z l_z + H_y l_y + H_n 2l_n + H_c l_c = \sum H l$$

МДС на пару полюсов.
H-напряженность магнитного поля

Добавочный полюс



Обмотка добавочного полюса



Главный полюс



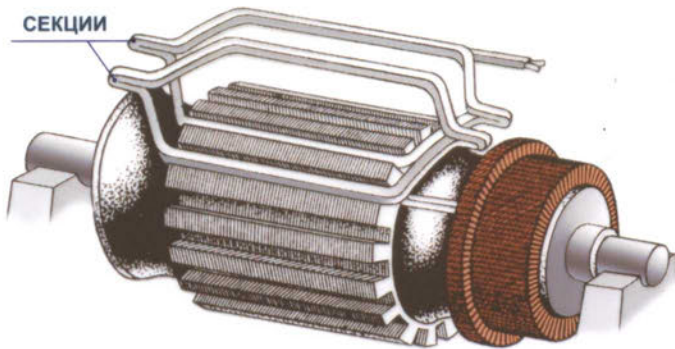
Обмотка главного полюса



МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ОБМОТКА ЯКОРЯ

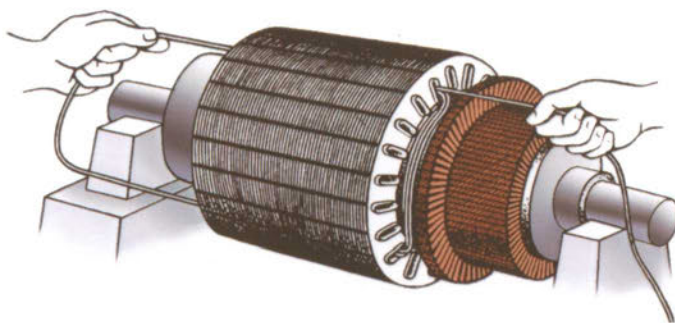
Укладка секций при открытых пазах



Двухслойная стержневая обмотка



Намотка якоря с полузакрытыми пазами



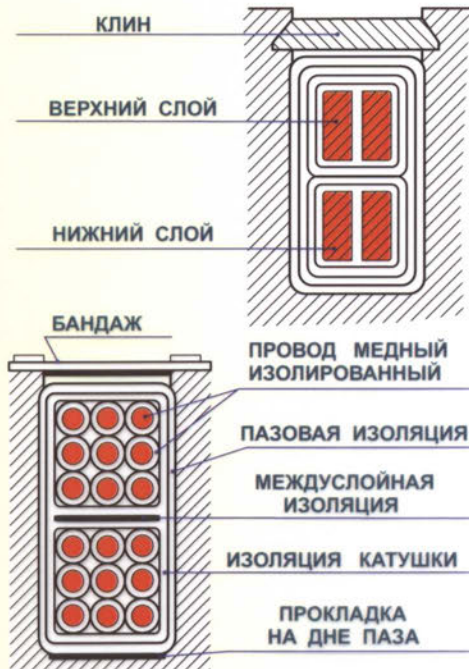
Секция катушечной обмотки



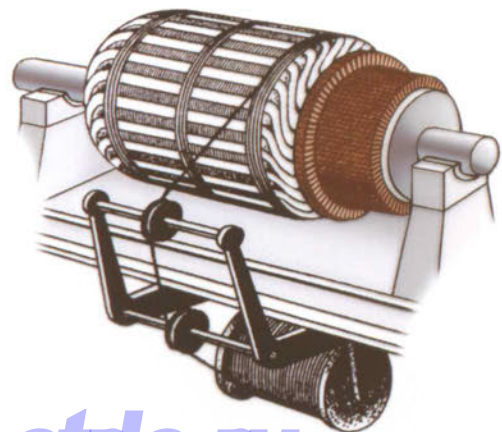
Полусекции стержневой обмотки



Пазы в разрезе



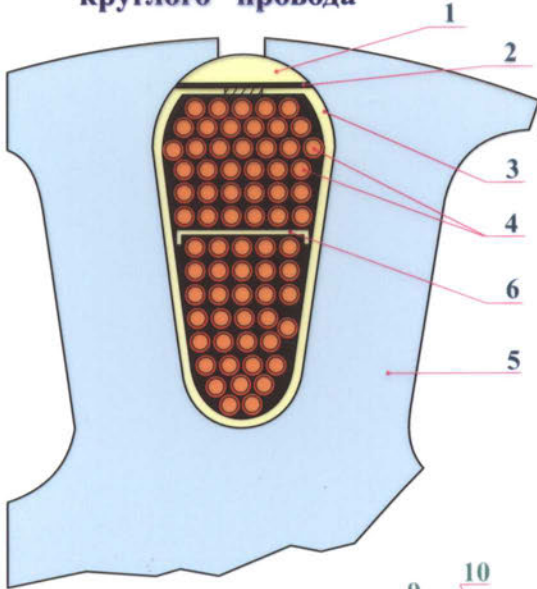
Бандажировка якоря



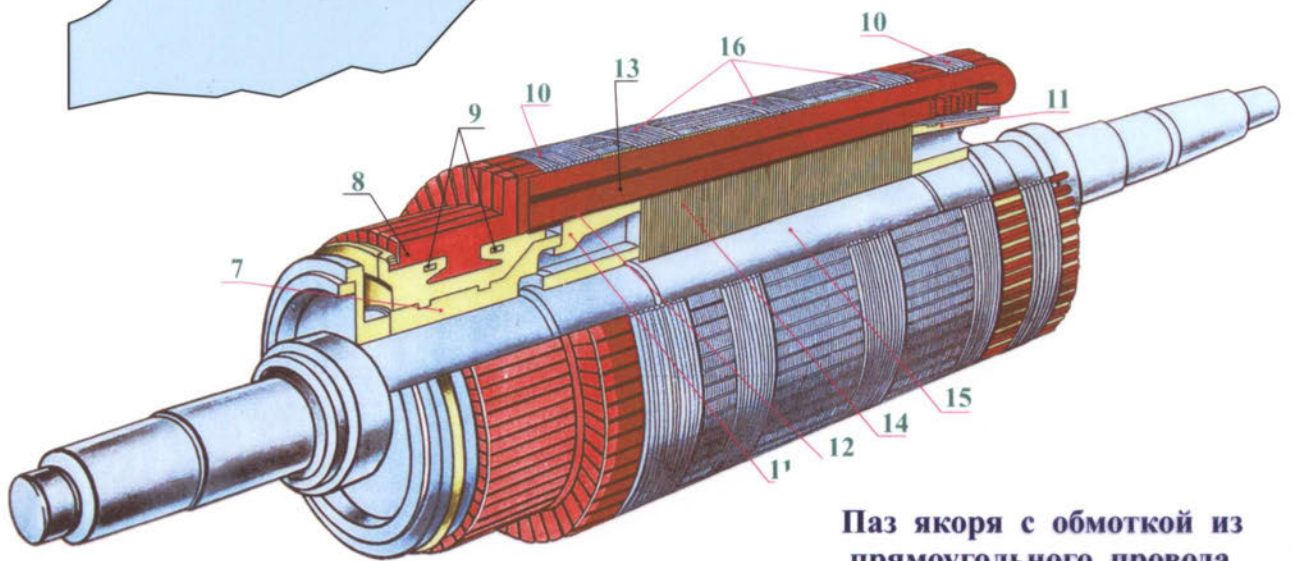
МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ЯКОРЬ МАШИНЫ
ПОСТОЯННОГО ТОКА

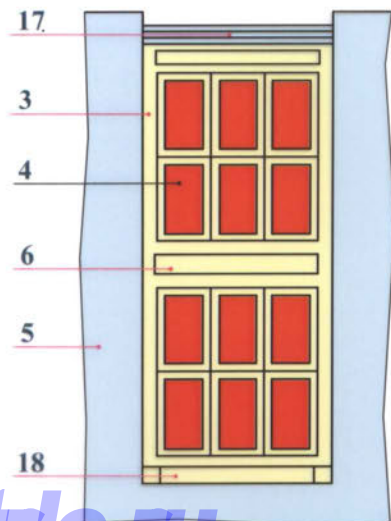
Паз якоря с обмоткой из
круглого провода



- 1 - клин;
- 2 - прокладка под клин;
- 3 - корпусная изоляция;
- 4 - проводники обмотки;
- 5 - зубец якоря;
- 6 - прокладка между слоями обмотки;
- 7 - втулка коллектора;
- 8 - коллекторные пластины;



Паз якоря с обмоткой из
прямоугольного провода



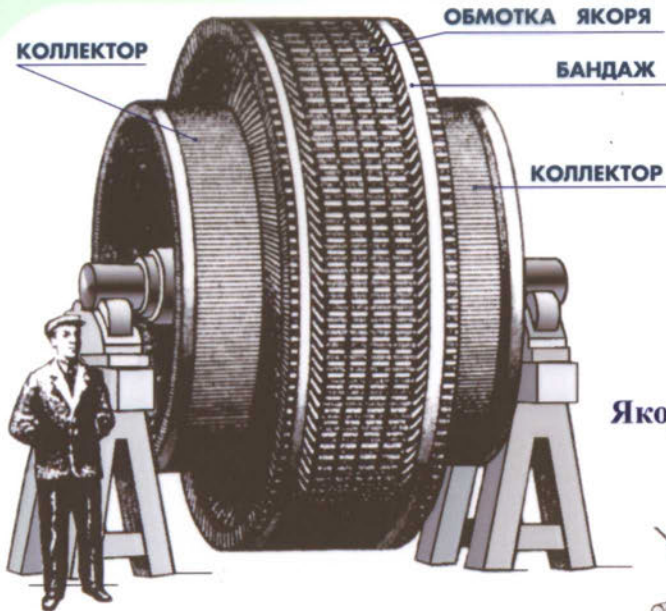
- 9 - армировочные кольца;
- 10 - бандажи на лобовых частях обмотки;
- 11 - нажимные втулки;
- 12 - изоляция между втулкой и обмоткой;
- 13 - обмотка якоря;
- 14 - магнитопровод якоря;
- 15 - вал;
- 16 - бандажи, крепящие пазовую часть обмотки;
- 17 - проволока бандажа;
- 18 - прокладка на дно паза



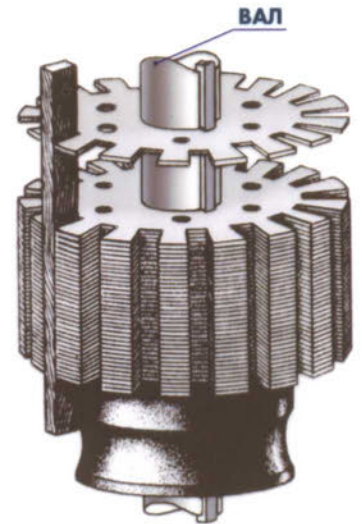
МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ЯКОРЬ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Якорь машины большой мощности



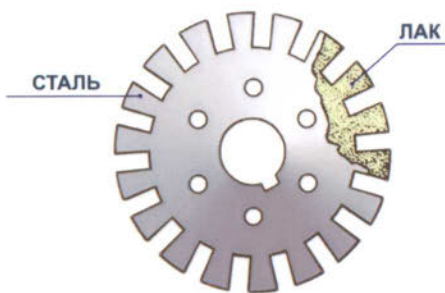
Сборка якоря



Якорь генератора на 0,2 квт



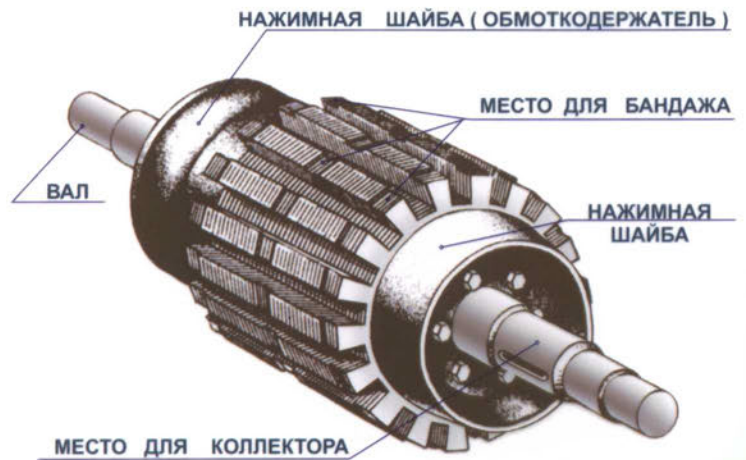
Лист пакета якоря из электротехнической стали



Сегмент сердечника якоря



Якорь без обмотки



Форма пазов

ПОЛУЗАКРЫТЫЕ ПАЗЫ



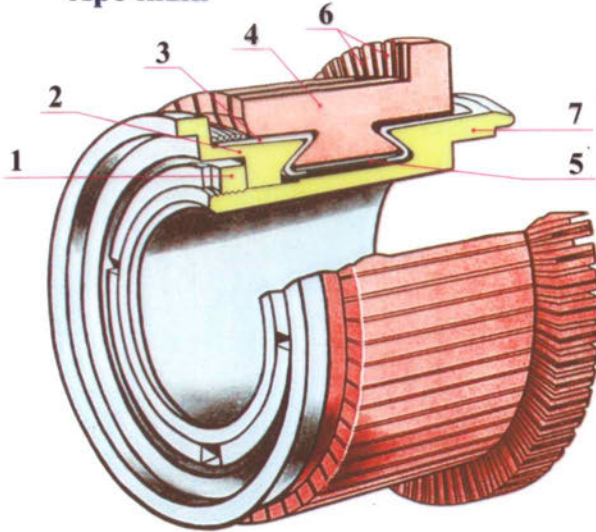
ПОЛУОТКРЫТЫЕ ПАЗЫ



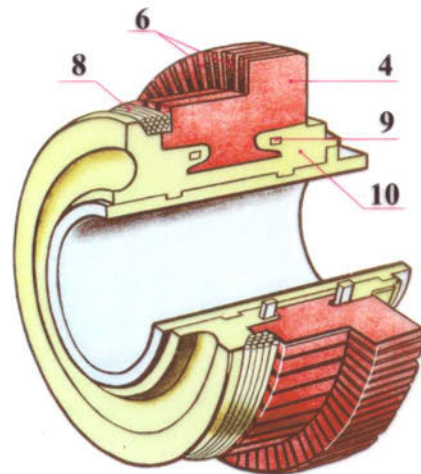
МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

КОЛЛЕКТОРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Арочный

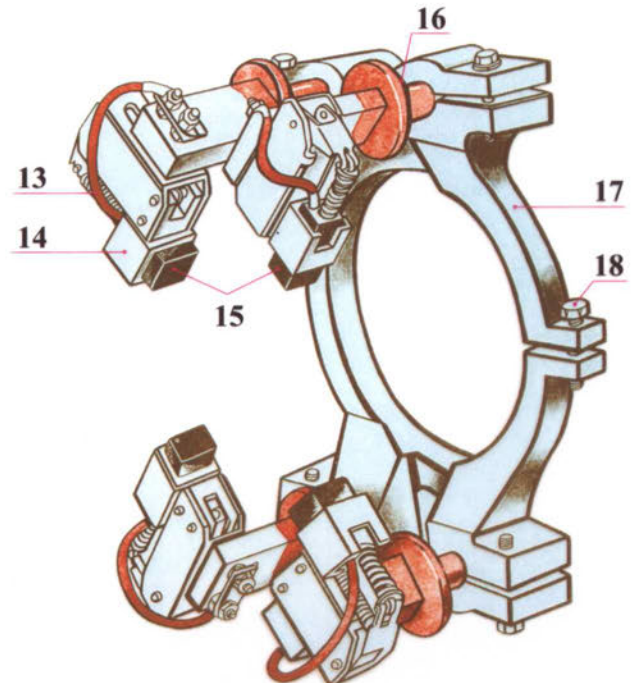
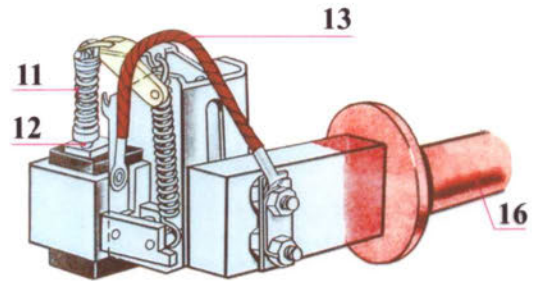


На пластмассе

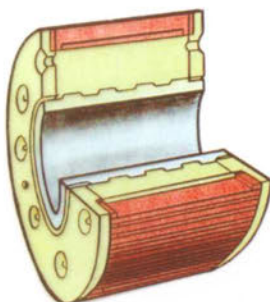


- 1 - стяжная гайка;
- 2 - нажимной конус;
- 3 - изолирующая манжета;
- 4 - коллекторная пластина;
- 5 - изолирующий цилиндр;
- 6 - изолирующая прокладка;
- 7 - втулка коллектора;
- 8 - уплотняющий бандаж;
- 9 - армировочное кольцо;
- 10 - пластмасса;
- 11 - нажимная пружина;
- 12 - нажимной палец;
- 13 - соединительные провода;
- 14 - щеткодержатель;
- 15 - щетки;
- 16 - палец щеткодержателя;
- 17 - траверса;
- 18 - болт крепления траверсы

Траверса и щеткодержатели



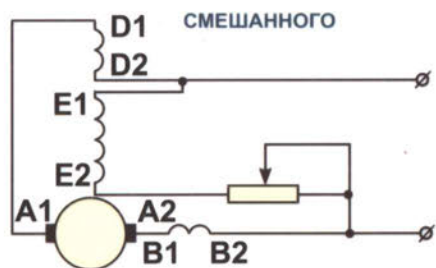
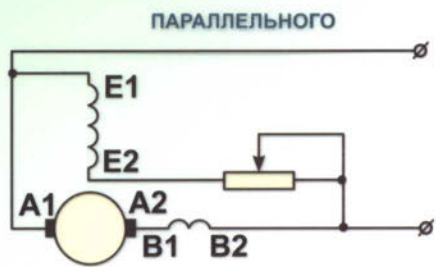
На пластмассе



МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

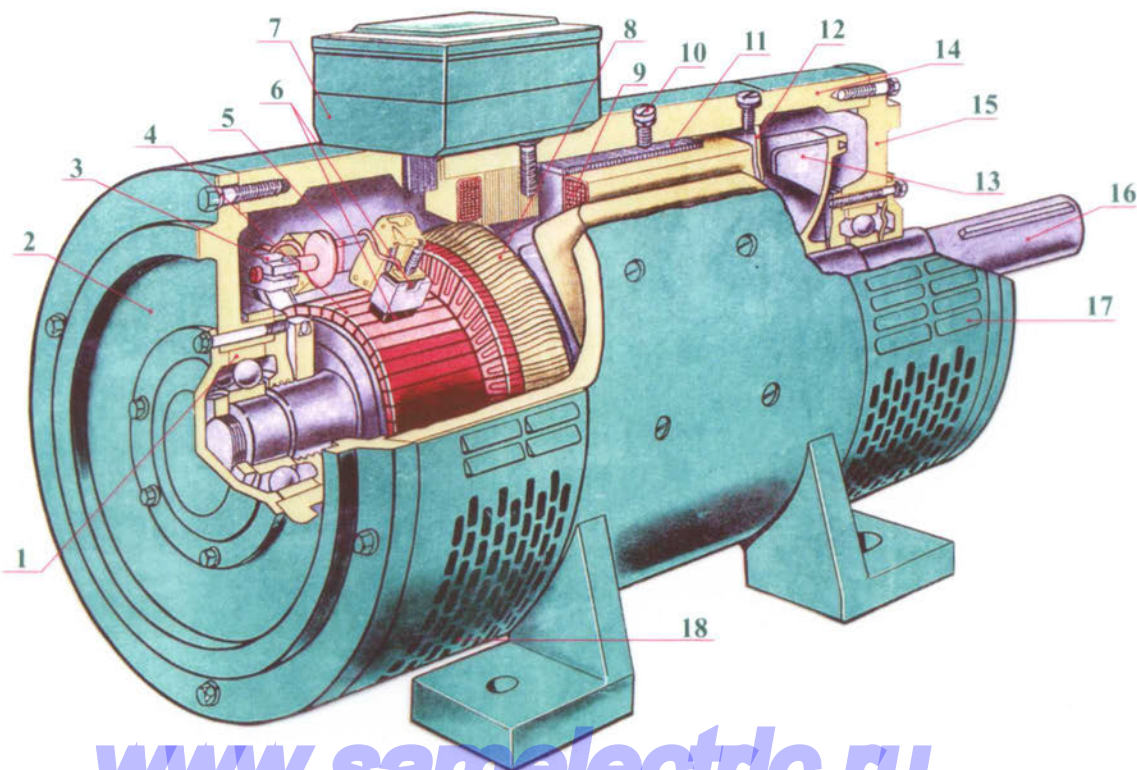
Схемы возбуждения машин постоянного тока



Обозначения выводов обмоток

ОБМОТКА ЯКОРЯ	A1	A2
ОБМОТКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ	E1	E2
ОБМОТКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ	D1	D2
ОБМОТКА ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ	B1	B2

- 1 - подшипник;
- 2 - задний подшипниковый щит;
- 3 - траверса щеткодержателя;
- 4 - коллектор;
- 5 - палец щеткодержателя;
- 6 - щетки;
- 7 - коробка выводов;
- 8 - обмотка якоря;
- 9 - обмотка возбуждения;
- 10 - болты крепления полюсов;
- 11 - сердечник полюса;
- 12 - воздухонаправляющий щиток;
- 13 - вентилятор;
- 14 - корпус;
- 15 - передний подшипниковый щит;
- 16 - вал;
- 17 - жалюзи для выхода воздуха;
- 18 - жалюзи для входа воздуха

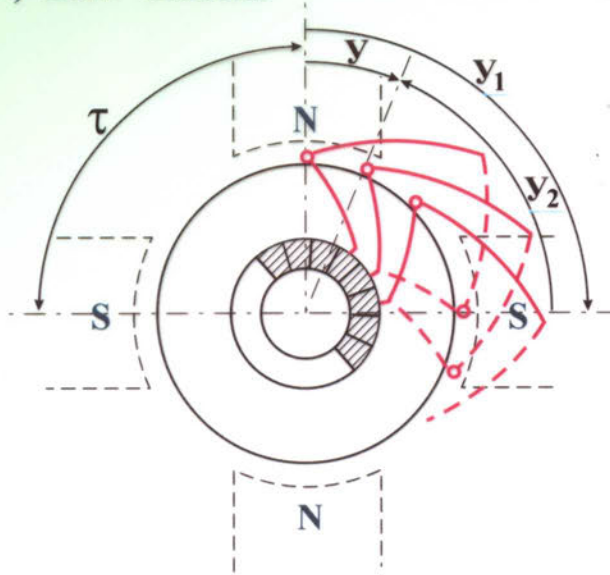


РНПО Росучприбор Южно-Уральский Государственный университет

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ПЕТЛЕВАЯ И ВОЛНОВАЯ ОБМОТКИ
(ПРИНЦИП ВЫПОЛНЕНИЯ)

Частичные (Y_1, Y_2) и результирующий (Y) шаги обмотки



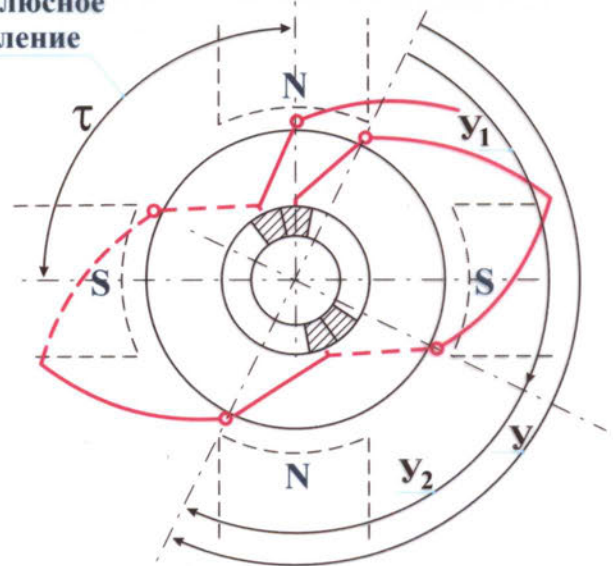
Секция петлевой обмотки

Лобовая часть

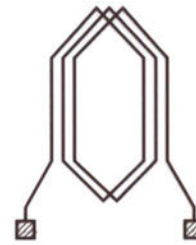


Активная часть

Полусное деление



Секция волновой обмотки



$$Y = Y_1 - Y_2$$

Результирующий шаг петлевой обмотки

$$Y_1 = \frac{Z_2}{2p} \mp \epsilon$$

Первый частичный шаг обмотки

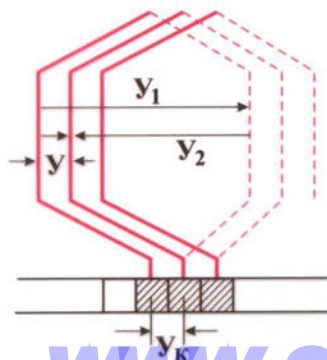
$$Y_2$$

Второй частичный шаг обмотки

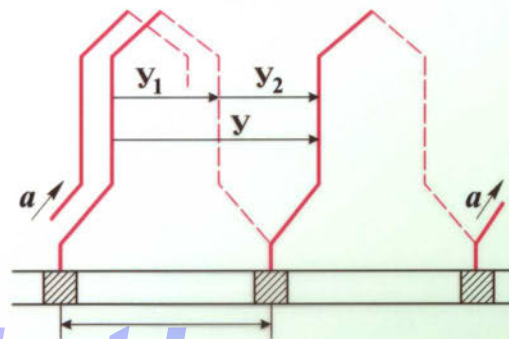
$$Y = Y_1 + Y_2$$

Результирующий шаг волновой обмотки

Развертка петлевой обмотки



Развертка волновой обмотки

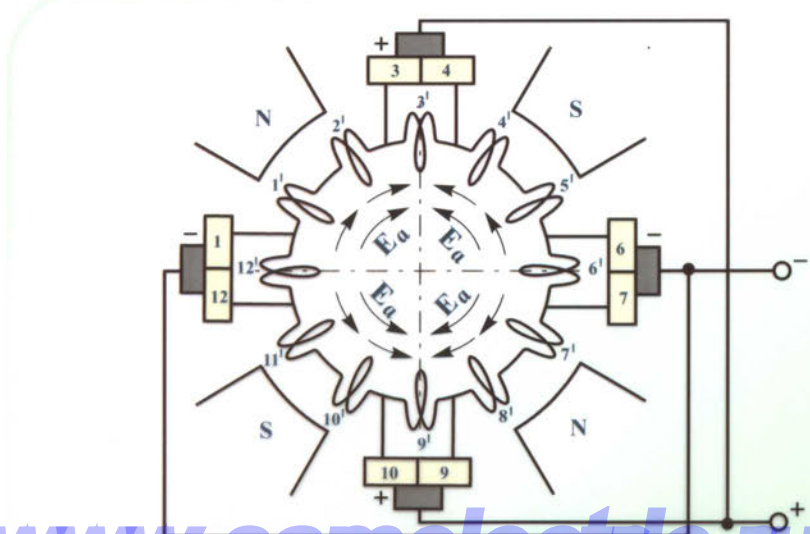
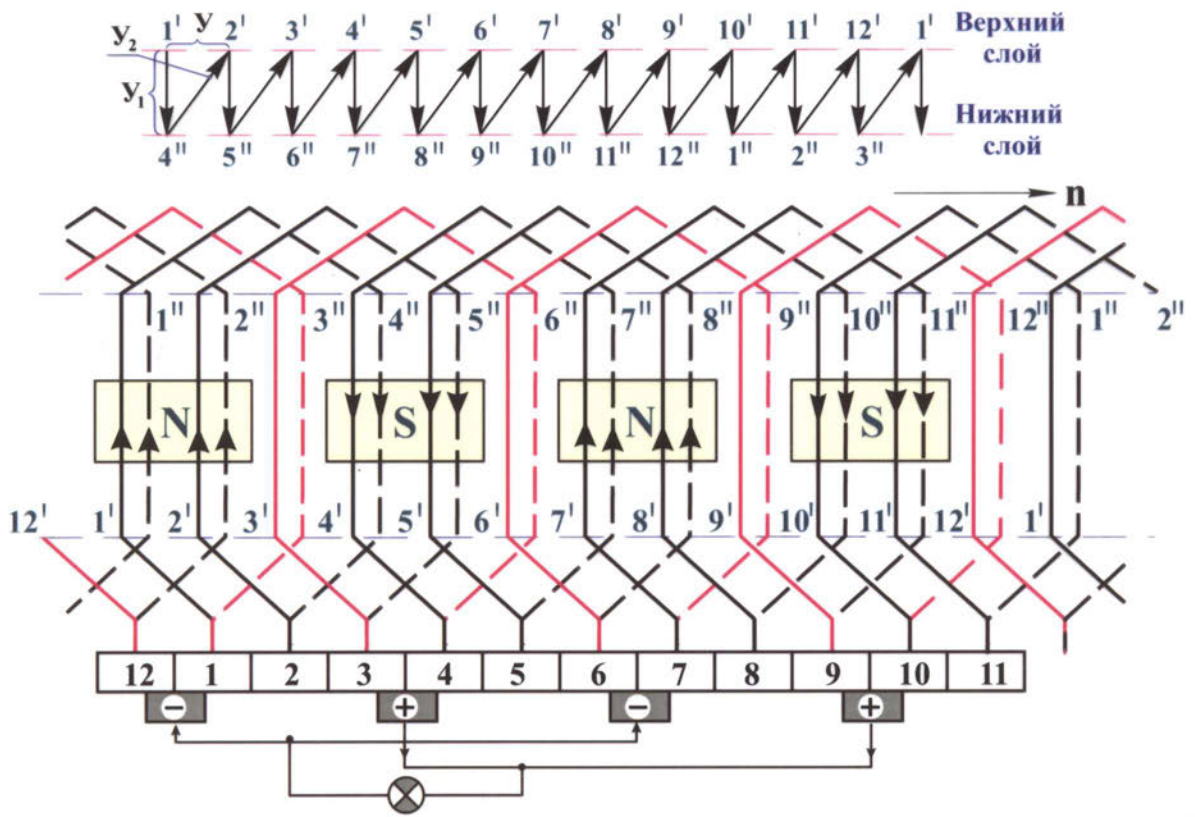


МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ПРИМЕР ПРОСТОЙ ПЕТЛЕВОЙ ОБМОТКИ

$$2p = 4 \quad Z = Z_3 = 12.$$

$$y = y_k = 1; \quad y_1 = \frac{Z_3}{2p} \mp \varepsilon = \frac{12}{4} \pm 0 = 3; \quad y_2 = y - y_1 = 1 - 3 = -2$$

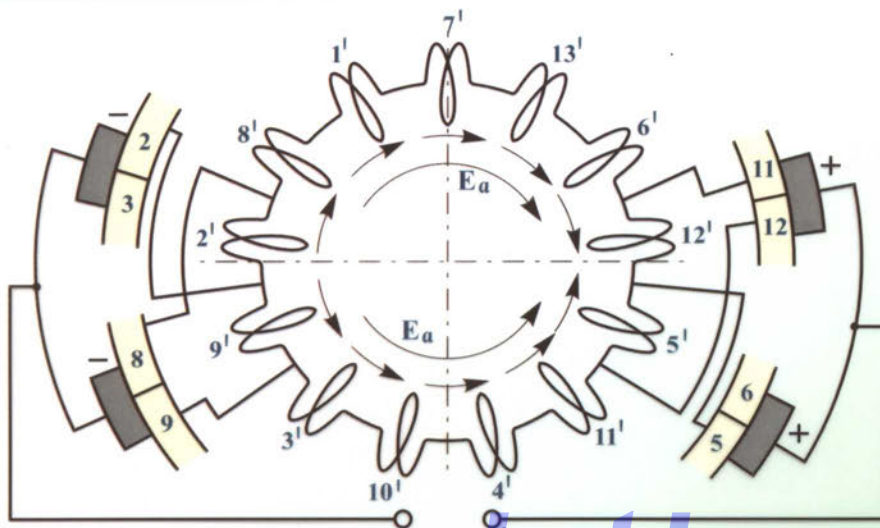
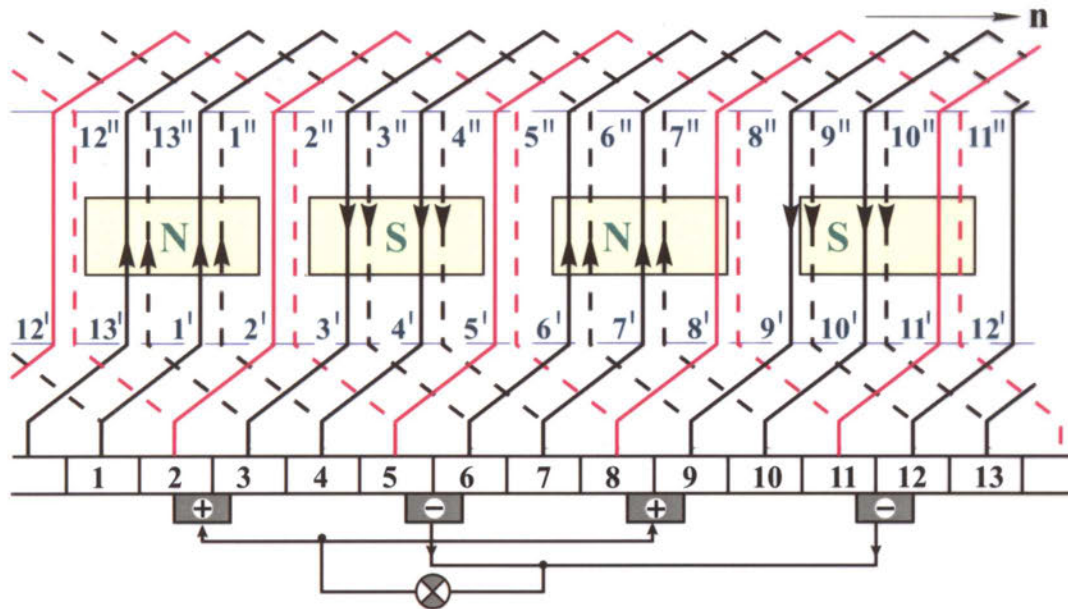
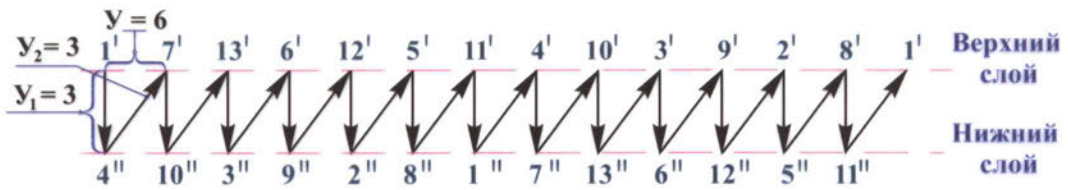


МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ПРИМЕР ПРОСТОЙ ВОЛНОВОЙ ОБМОТКИ

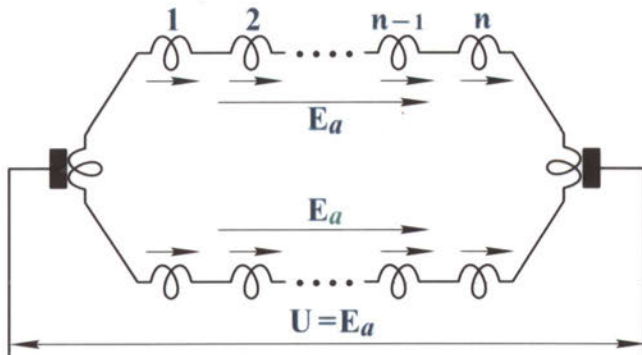
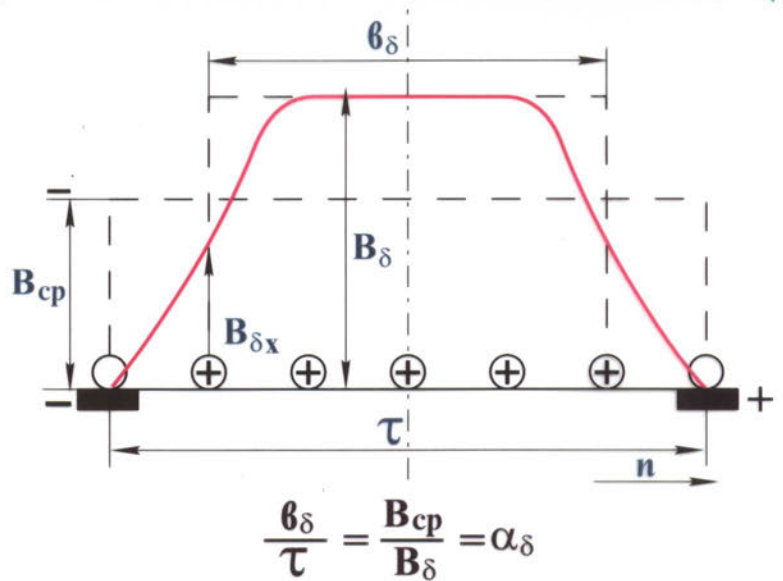
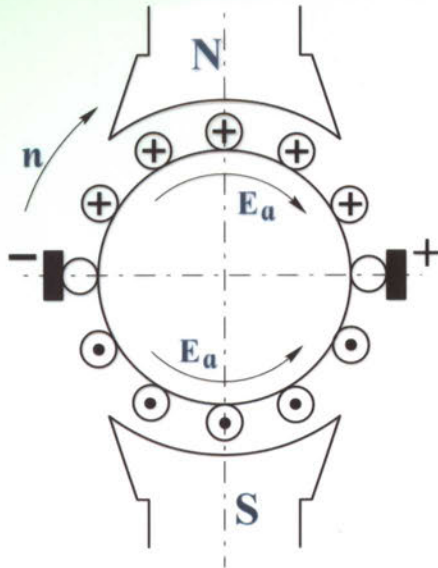
$$Z = Z_3 = 13; \quad 2p = 4.$$

$$y = \frac{Z_3 \mp 1}{p} = \frac{13 - 1}{2} = 6; \quad y_1 = \frac{Z_3}{2p} \mp \epsilon = \frac{13}{4} - \frac{1}{4} = 3; \quad y_2 = 6 - 3 = 3.$$



МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ЭДС ЯКОРЯ



ЭДС витка $e_x = 2B_{\delta x} \ell_{\delta} v$.
 Число витков в параллельной ветви $\frac{N}{4a}$, где N - полное число проводников обмотки якоря;
 $v = \frac{\pi D a n}{60}$ - окружная скорость якоря;
 ℓ_{δ} - активная длина проводника

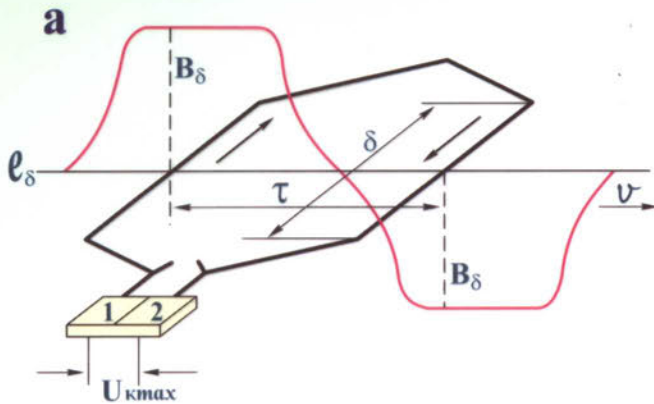
$$E_a = e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_{\frac{N}{4a}} = 2\ell_{\delta} v \sum_1^{\frac{N}{4a}} B_{\delta x}$$

$$\sum_1^{\frac{N}{4a}} B_{\delta x} = \frac{N}{4a} B_{cp}, \quad \text{где} \quad B_{cp} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} B_{\delta x} dx$$

$$E_a = \frac{pn}{60} \cdot \frac{N}{a} B_{cp} \ell_{\delta} \tau = \frac{pn}{60} \cdot \frac{N}{a} \Phi_{\delta} = C_e \Phi_{\delta} n, \quad C_e = \frac{pN}{60a}$$

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

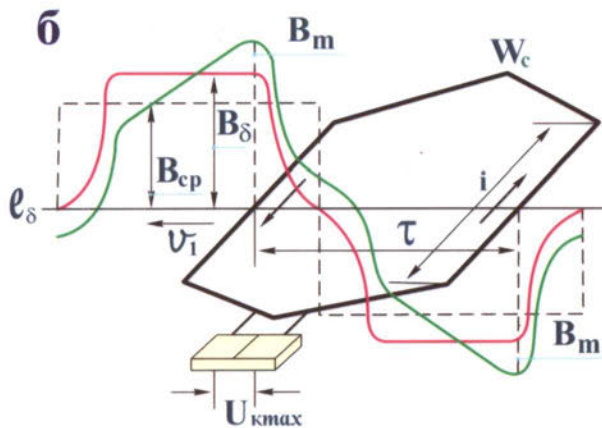
МАКСИМАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ МЕЖДУ СОСЕДНИМИ КОЛЛЕКТОРНЫМИ ПЛАСТИНАМИ:
а) ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ, б) ПРИ НАГРУЗКЕ



$U_{kmax} = e_{kmax} = 2W_c \ell_\delta B_\delta$,
где W_c - число витков секции, присоединенных к соседним коллекторным пластинам,

$$U_{kmax} = 2W_c \ell_\delta \frac{B_{cp}}{\alpha_\delta} = \frac{e_{cp}}{\alpha_\delta},$$

$$\ell_{cp} = \frac{U}{K/2a}$$



а $U_{kmax} = \frac{2aU}{\alpha_\delta K} = \frac{2pU}{\alpha_\delta K}$

б $U_{kmax} = \frac{2p\chi U_{1H}}{K}$

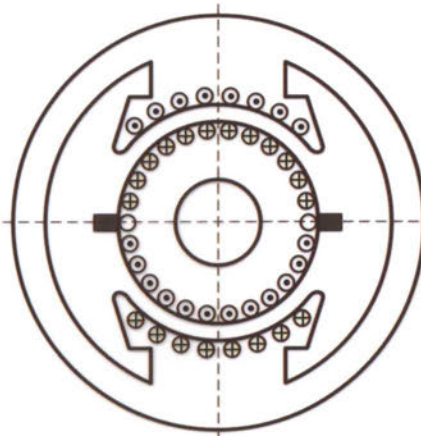
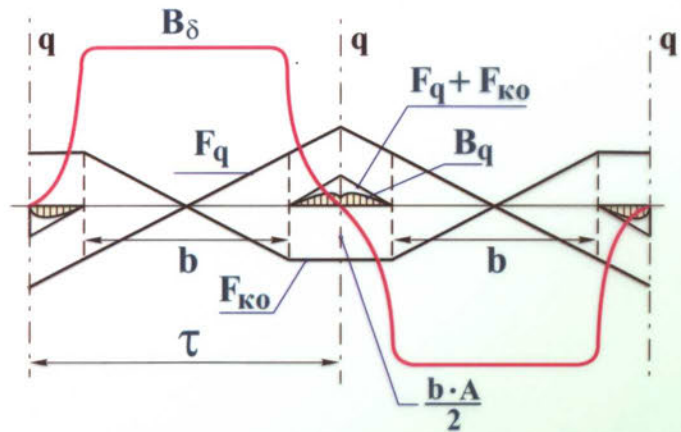


Схема размещения компенсационной обмотки



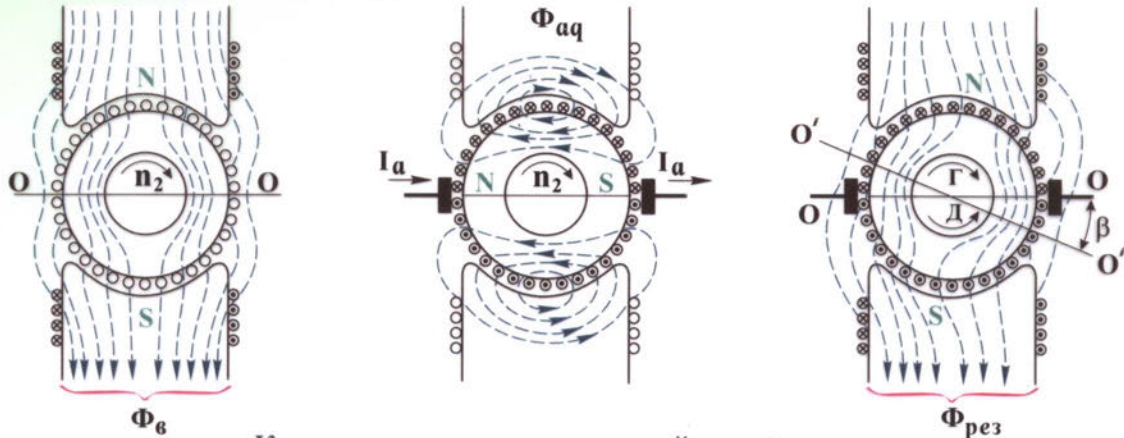
Кривые поперечной МДС якоря и МДС компенсационной обмотки. B_q - индукция результирующего поперечного поля машины



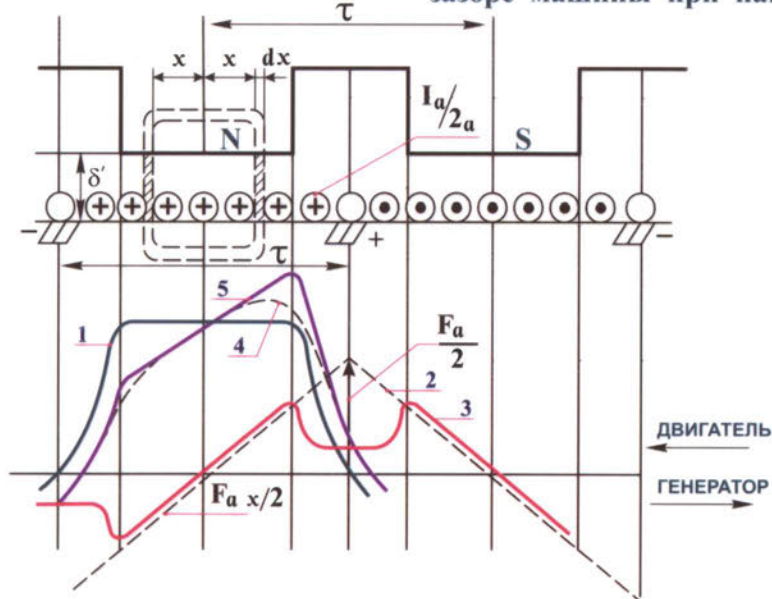
МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

РЕАКЦИЯ ЯКОРА

Характер магнитных полей машины постоянного тока, создаваемых обмоткой возбуждения (а), обмоткой якоря (б) и результирующего поля (в)



Кривые распределения полей в воздушном зазоре машины при нагрузке



- 1- кривая распределения индукции в воздушном зазоре при холостом ходе;
- 2- распределение МДС реакции якоря;
- 3- кривая распределения поля поперечной реакции якоря;
- 4- кривая распределения результирующего поля при отсутствии насыщения;
- 5- кривая распределения результирующего поля при наличии насыщения

Возникновение продольной (а) и поперечной (б) МДС якоря при сдвиге щеток с геометрической нейтрали

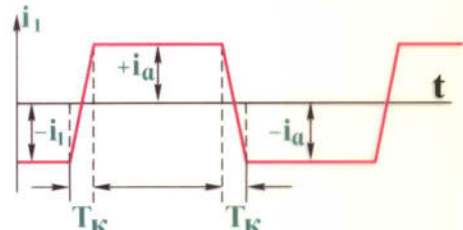


МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Коммутация тока в секции двухполюсной машины



КОММУТАЦИЯ ТОКА



$$T_k = \frac{b_m}{v_k}$$

Изменение тока в секции при вращении якоря

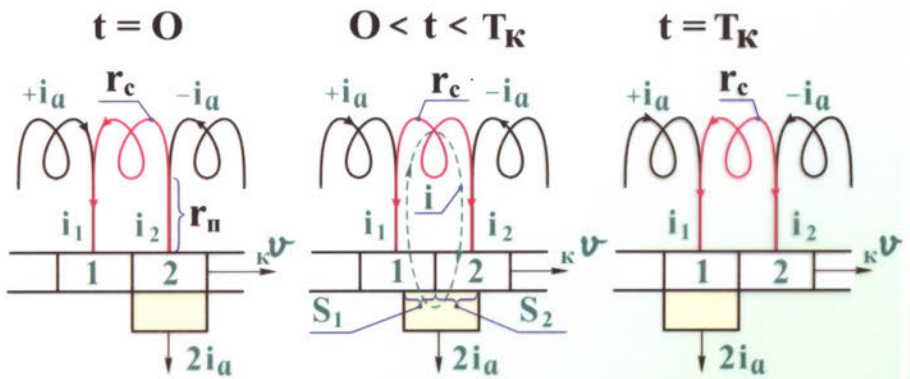
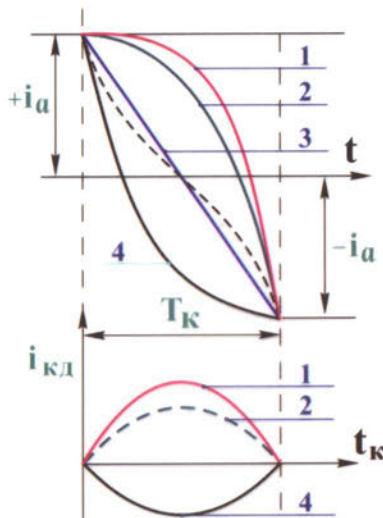
$$\sum e = e_L + e_M + e_K$$

$$e_r = e_L + e_M$$

$$e_L = -L_c \frac{di}{dt}, \quad e_{Lcp} = \frac{2L_c i_a}{T_k}; \quad e_M = \sum_1^n e_{Mn} = -\sum M_n \frac{di_n}{dt},$$

$$e_{Mcp} = \frac{2i_a}{T_k} \sum M_n; \quad e_K = 2B_k W_c \ell_\delta v_a.$$

Последовательные моменты коммутации секции



1-2 - замедленная коммутация

3 - прямолинейная коммутация

4 - ускоренная коммутация

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

УРАВНЕНИЯ КОММУТАЦИИ.
СПОСОБЫ УЛУЧШЕНИЯ КОММУТАЦИИ

$$i_2 = i_a + i; \quad i_1 = i_a - i$$

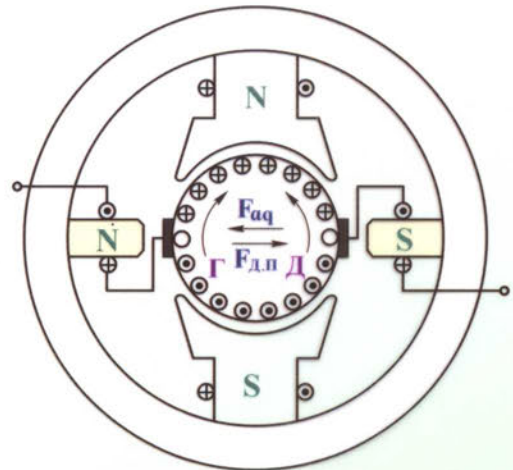
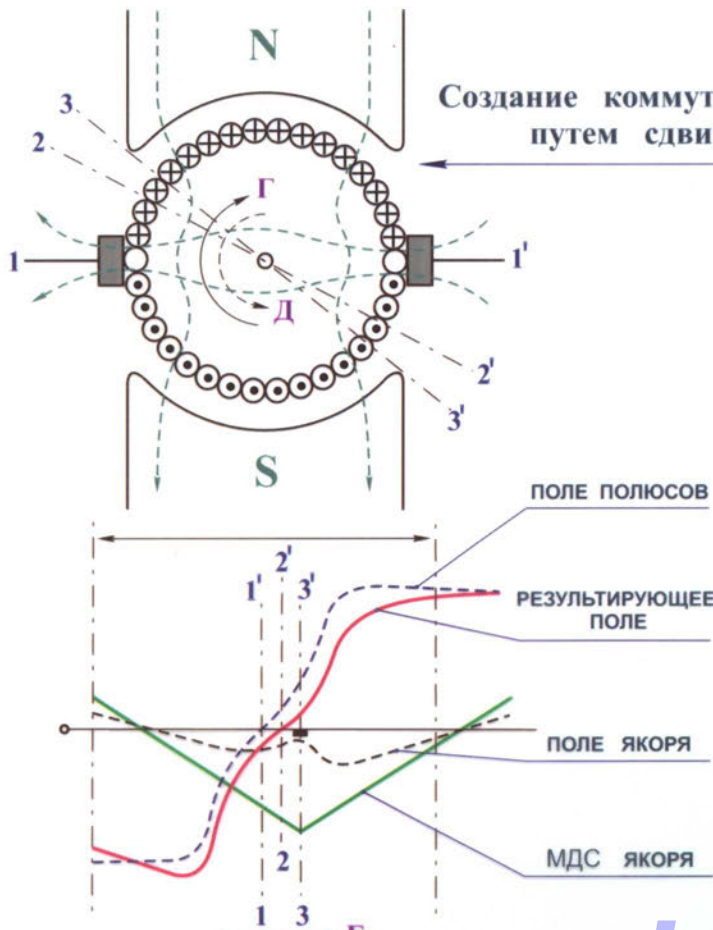
$$i r_c + i_2 r_n + i_2 r_{m2} - i_1 r_{m1} - i_2 r_n = \Sigma e \quad \text{При } \Sigma e = 0, \quad r_n = 0, \quad r_c = 0$$

$$i = i_a \frac{r_{m1} - r_{m2}}{r_{m1} + r_{m2}}$$

$$S_1 = S \frac{t}{T_k}, \quad S_2 = S \frac{T_k - t}{T_k}; \quad r_{m1} = r_m \cdot \frac{S}{S_1} = r_m \frac{T_k - t}{t}, \quad r_{m2} = r_m \cdot \frac{S_2}{S} = r_m \frac{T_k}{T_k - t}.$$

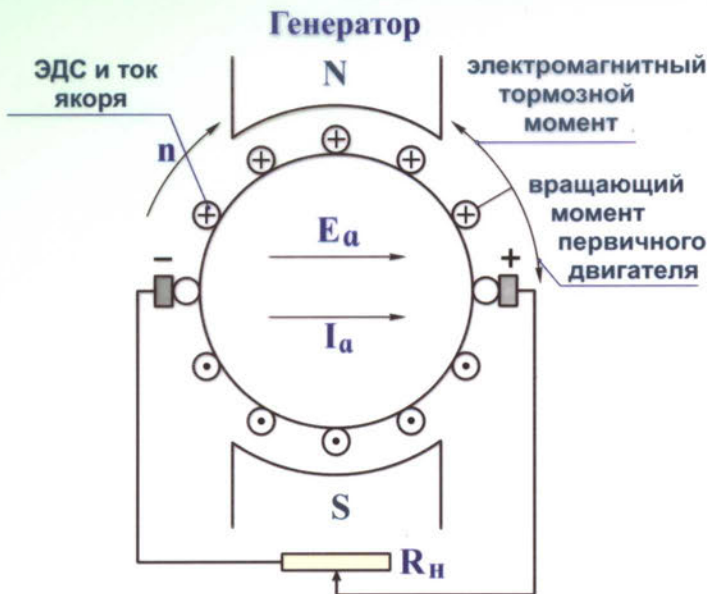
$$i = i_a \left(1 - 2 \frac{t}{T_k}\right)$$

$$\text{При } \Sigma e \neq 0 \quad i = i_a \frac{r_{m1} - r_{m2}}{r_{m1} + r_{m2}} + \frac{\Sigma e}{r_{m1} + r_{m2}} = i_l + i_{кл}$$



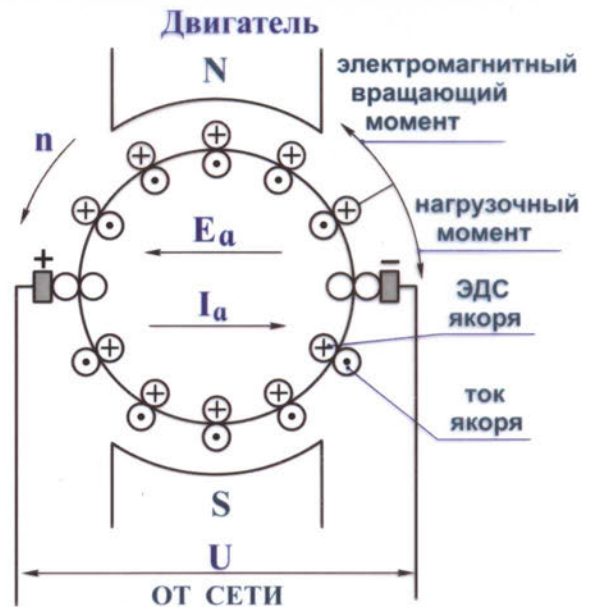
МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ОБРАТИМОСТЬ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА



$$U = E_a - I_a R_a; \quad E > U$$

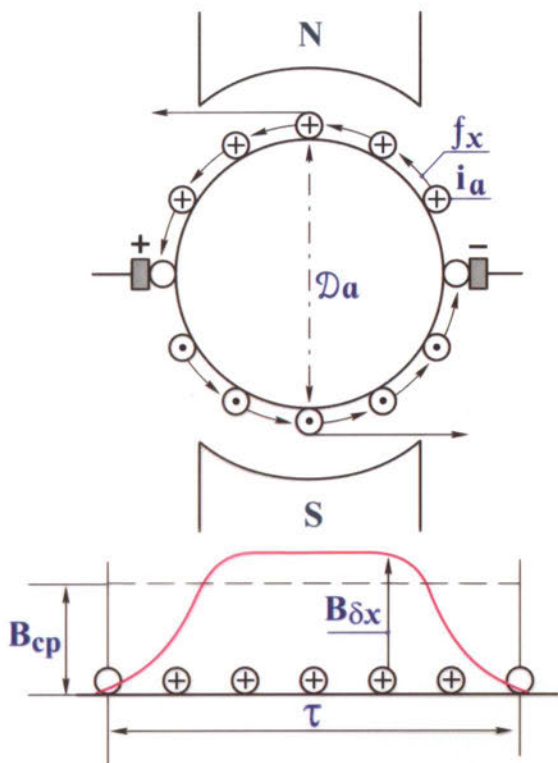
$$I_a = \frac{E_a - U}{R_a}$$



$$E_a = U - I_a R_a; \quad U > E_a$$

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a}$$

Электромагнитный момент машины постоянного тока



$$f_x = B_{\delta x} \cdot l_{\delta} \cdot i_a = B_{\delta x} l_{\delta} \frac{I_a}{2}$$

$$M_x = \frac{D_a}{2} f_x = \frac{D_a}{2} B_{\delta x} l_{\delta} \frac{I_a}{2}$$

Число проводников под одним полюсом

$$N^1 = \frac{N}{2\pi}$$

$$M^1 = \sum_1^{N/2p} \frac{D_a}{2} B_{\delta x} l_{\delta} \cdot \frac{I_a}{2} = \frac{D_a}{2} \cdot l_{\delta} \cdot \frac{I_a}{2} \sum_1^{N/2p} B_{\delta x} =$$

$$= \frac{D_a}{2} l_{\delta} \frac{I_a}{2a} \cdot \frac{N}{2p} B_{cp}, \quad \text{где } B_{cp} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} B_{\delta x} dx.$$

$$M = 2p \frac{D_a}{2} l_{\delta} \frac{I_a}{2a} \cdot \frac{N}{2p} B_{cp} = \frac{Np}{2\pi a} \cdot \frac{\pi D_a}{2p} B_{cp} l_{\delta} I_a =$$

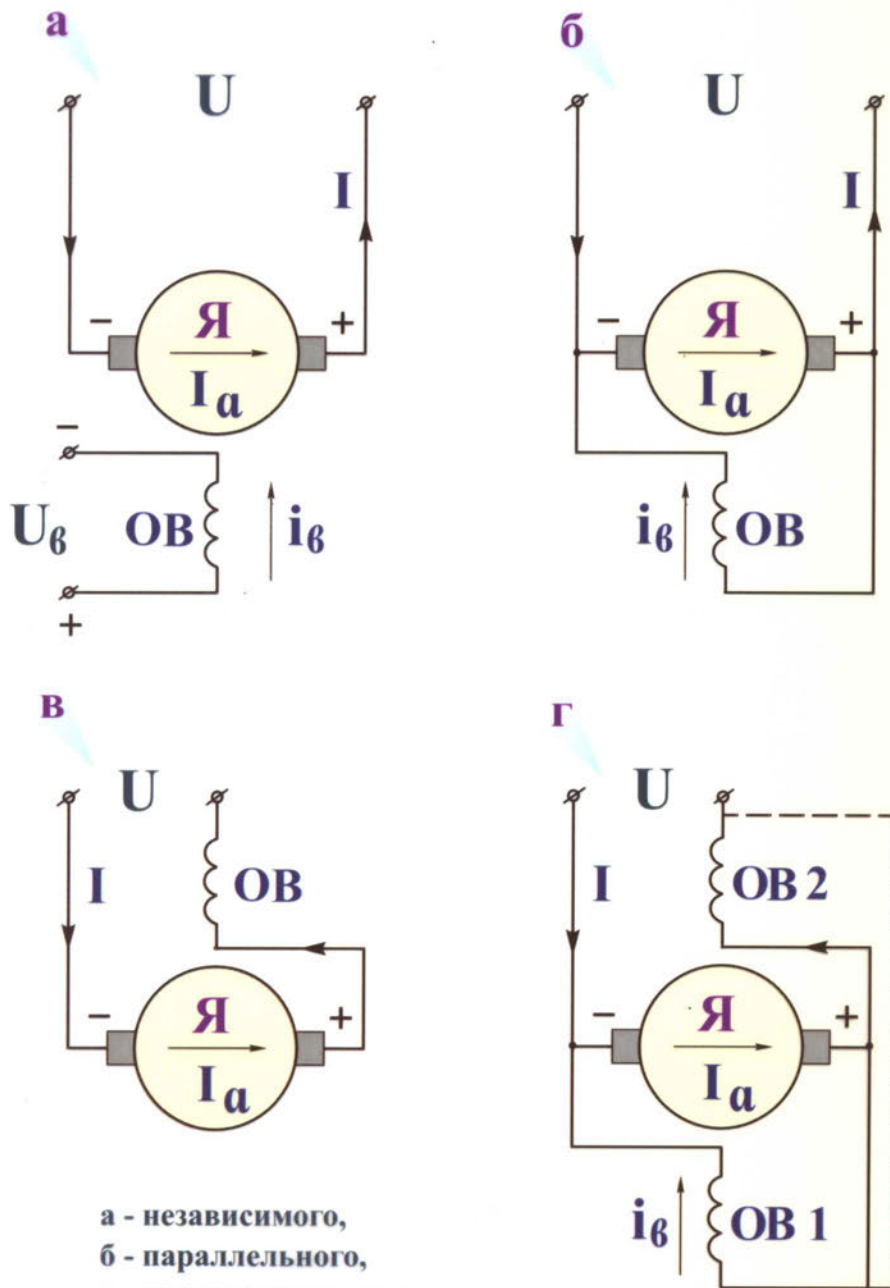
$$= \frac{N}{2\pi} \cdot \frac{p}{a} B_{cp} \tau l_{\delta} I_a = \frac{N}{2\pi} \cdot \frac{p}{a} \Phi_{\delta} I_a.$$

$$M = C_m \Phi_{\delta} I_a, \quad \text{где } C_m = \frac{N}{2\pi} \cdot \frac{p}{a}$$

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Принципиальные схемы генераторов постоянного тока



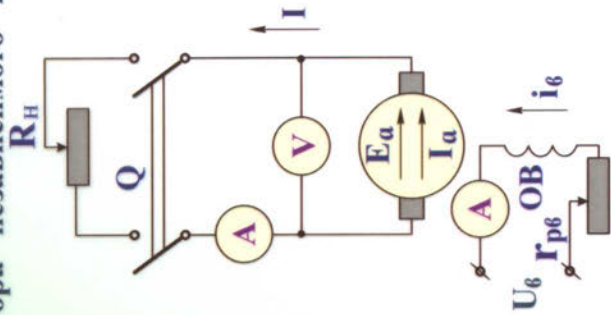
а - независимого,
 б - параллельного,
 в - последовательного,
 г - смешанного возбуждения



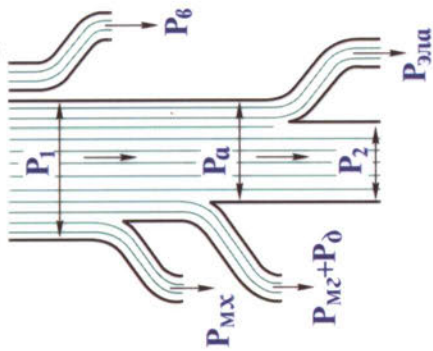
МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА.
ГЕНЕРАТОР НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

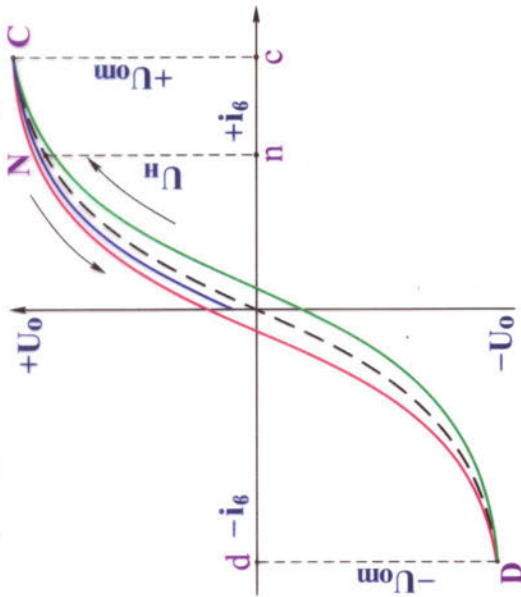
Схема для снятия характеристик генератора независимого возбуждения



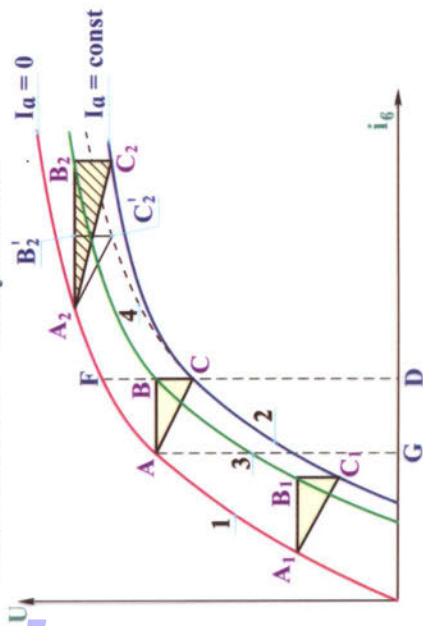
Энергетическая диаграмма генератора постоянного тока независимого возбуждения



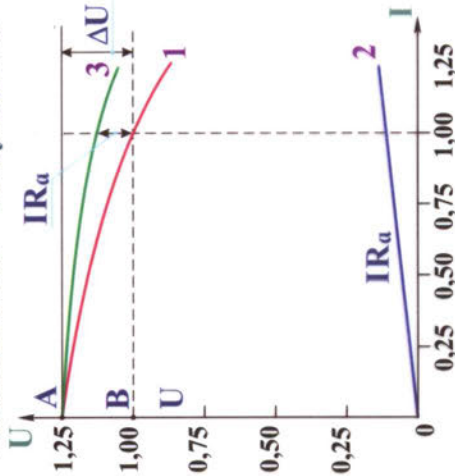
Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения



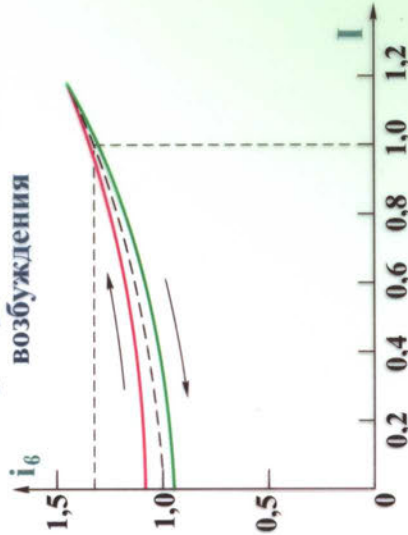
Нагрузочная характеристика независимого возбуждения



Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения



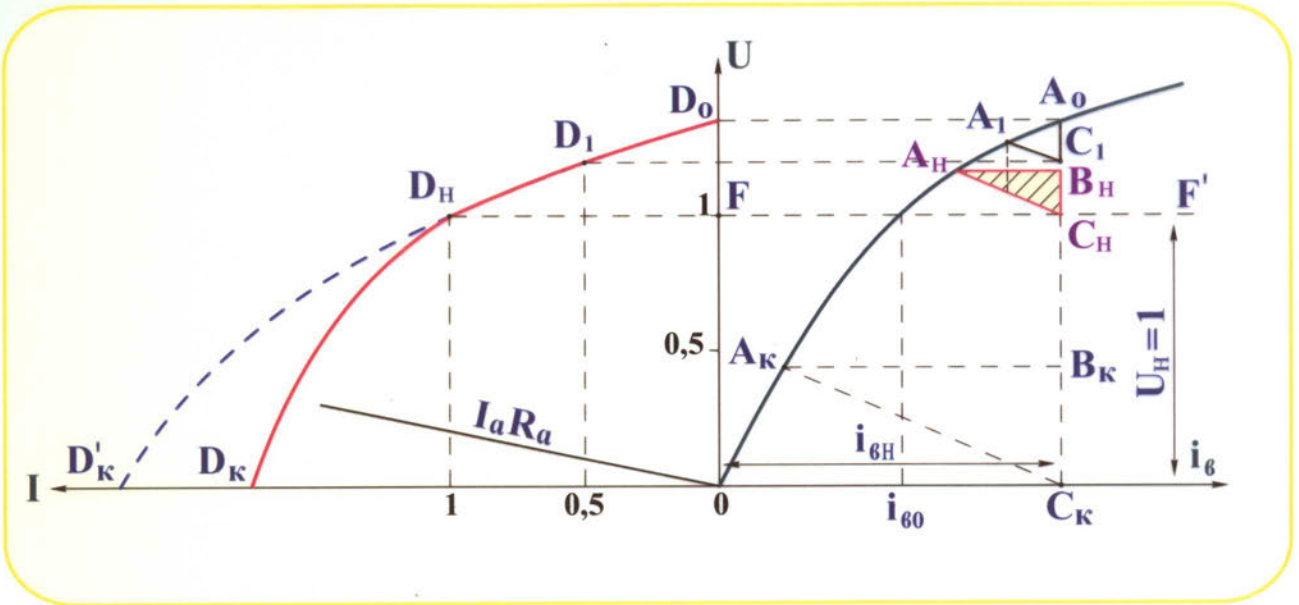
Регулировочная характеристика генератора независимого возбуждения



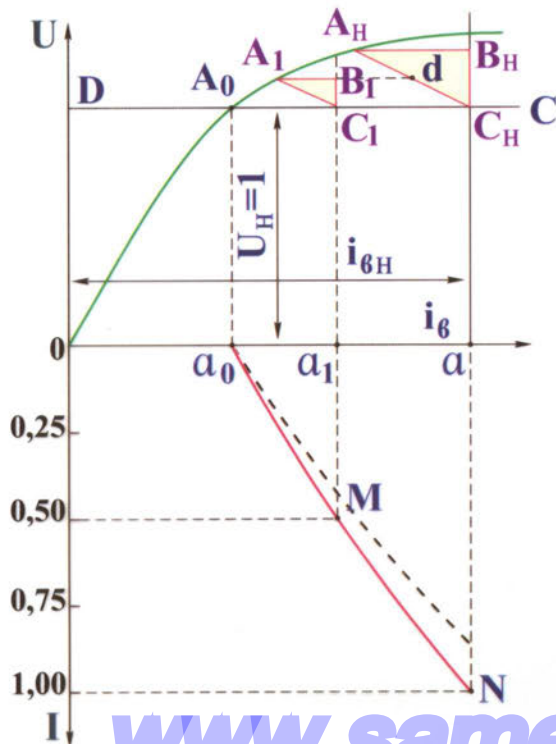
МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА.
ГЕНЕРАТОР НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

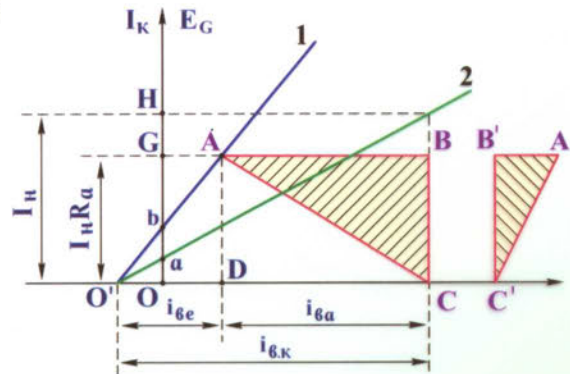
Приближенное построение внешней характеристики генератора независимого возбуждения



Построение регулировочной характеристики генератора независимого возбуждения



Построение характеристического треугольника

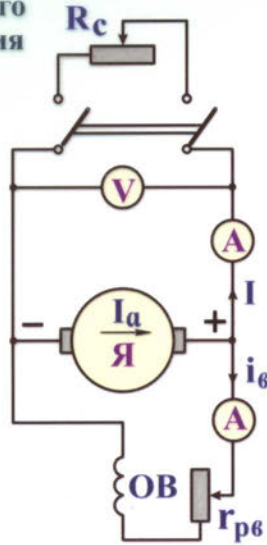


1 - характеристика холостого хода;
2 - характеристика короткого замыкания

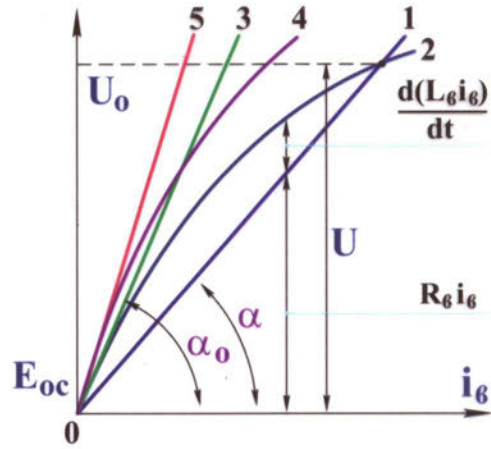
МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА.
ГЕНЕРАТОР ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

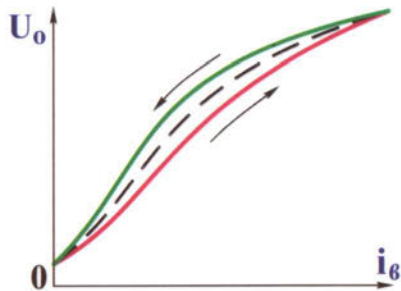
Схема генератора параллельного возбуждения



Условия самовозбуждения генератора параллельного возбуждения



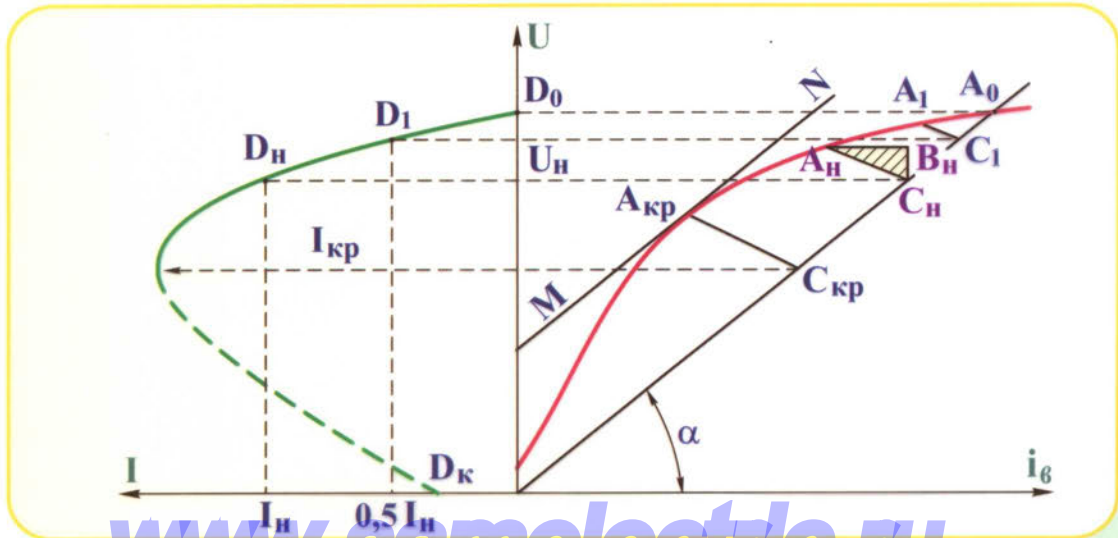
Характеристики холостого хода генератора параллельного возбуждения



Внешняя характеристика генератора параллельного (1) и независимого (2) возбуждения



Приближенное построение внешней характеристики генератора параллельного возбуждения



www.samelectric.ru



МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА.
ГЕНЕРАТОР ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Сравнение внешних (а) и регулировочных (б) характеристик генераторов независимого (1), параллельного (2), смешанного возбуждения с согласным (3) и встречным (4) включением последовательной обмотки

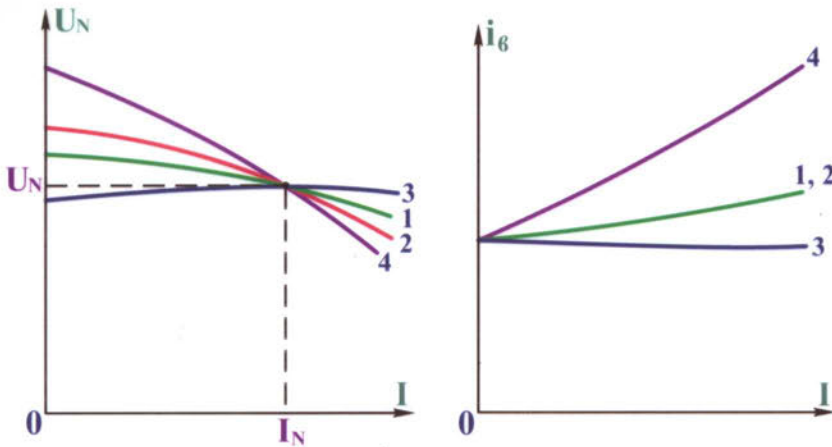
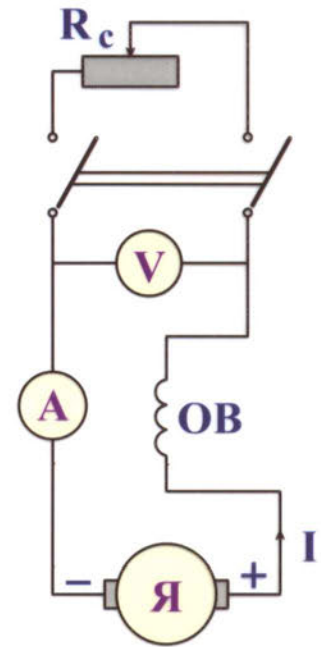
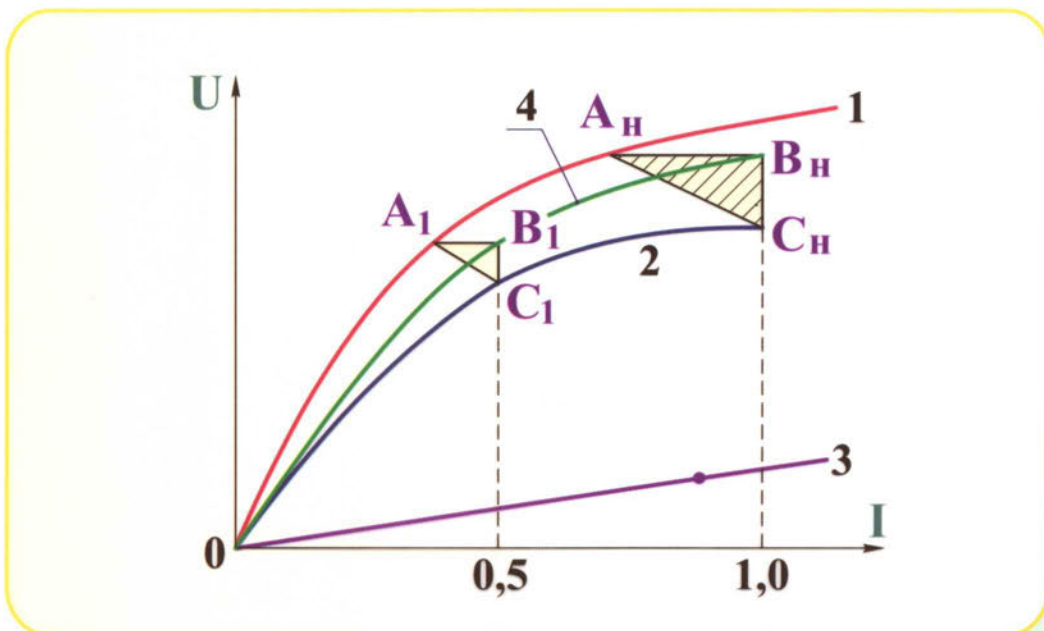


Схема генератора последовательного возбуждения



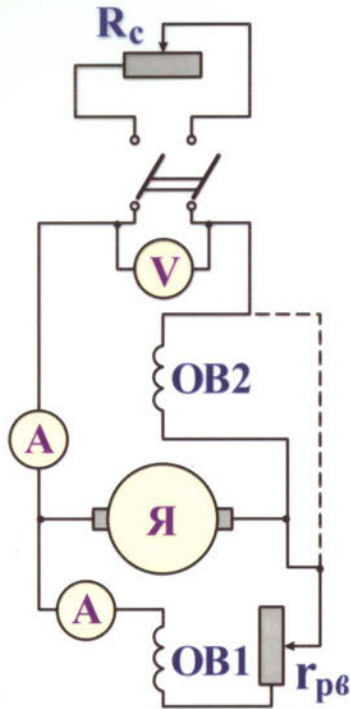
Приближенное построение внешней характеристики генератора последовательного возбуждения



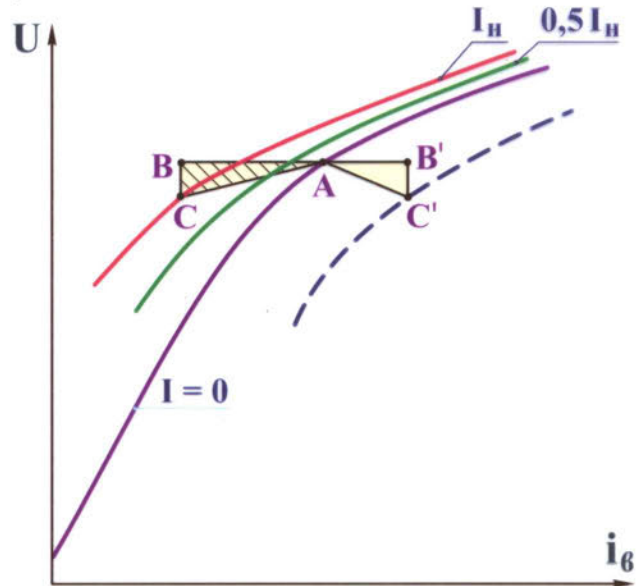
МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА.
ГЕНЕРАТОР СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

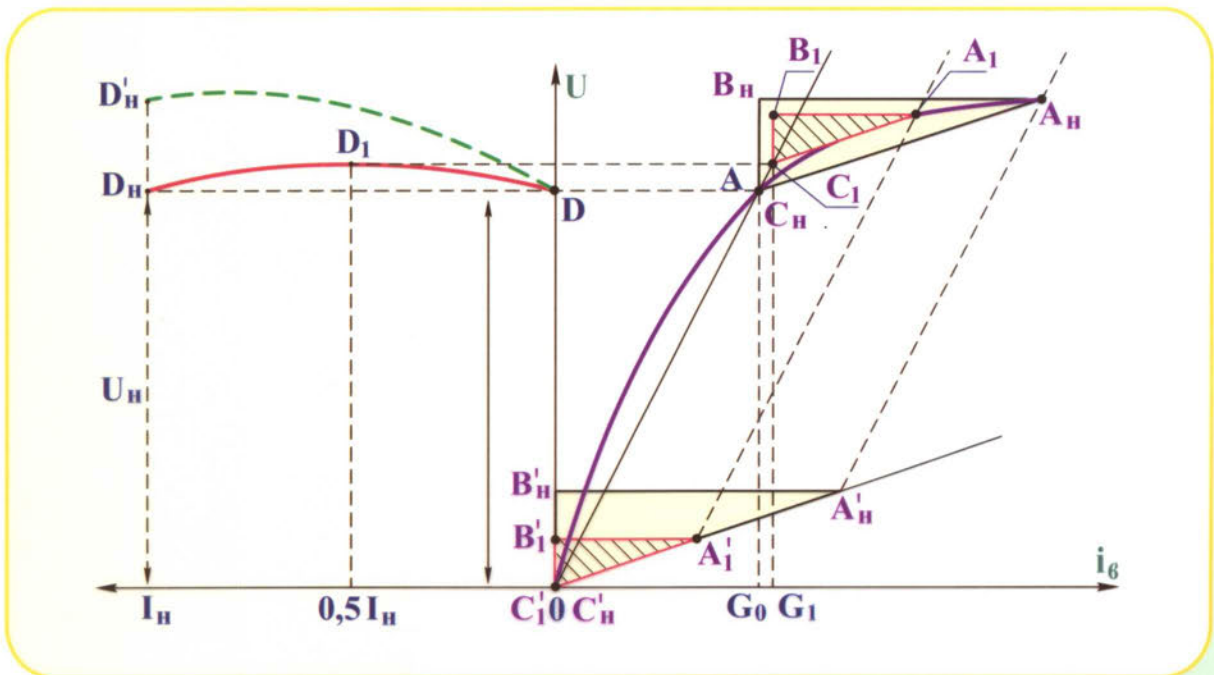
Схема генератора смешанного возбуждения



Построение нагрузочной характеристики генератора смешанного возбуждения



Приближенное построение внешней характеристики генератора смешанного возбуждения



МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ДВИГАТЕЛЬ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

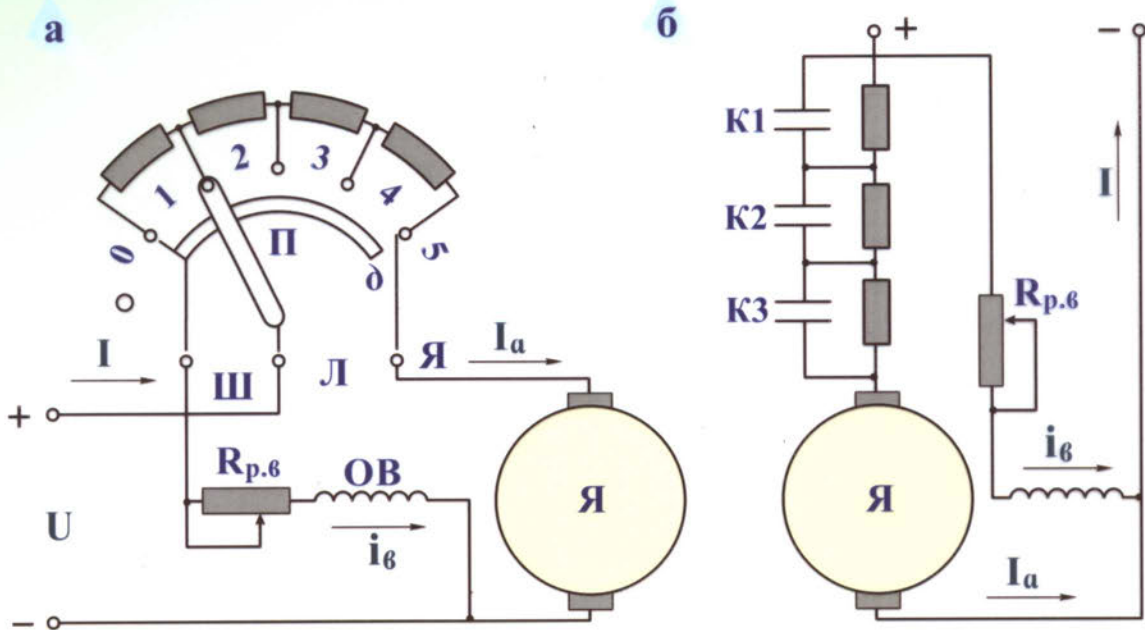
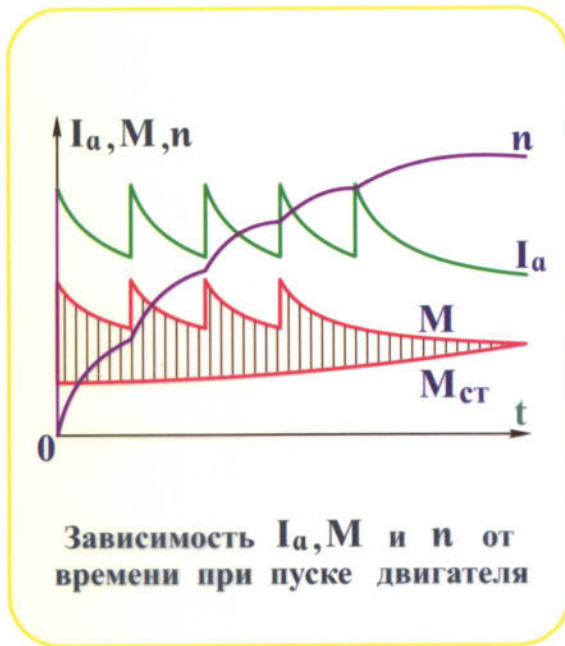
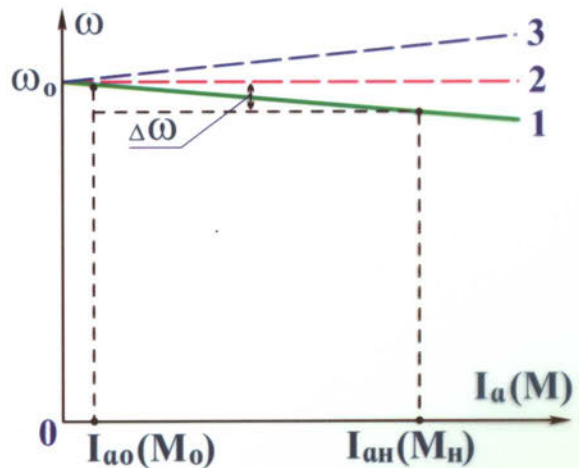


Схема пуска двигателя параллельного возбуждения с помощью пускового реостата (а) и пусковых сопротивлений



Зависимость I_a, M и n от времени при пуске двигателя



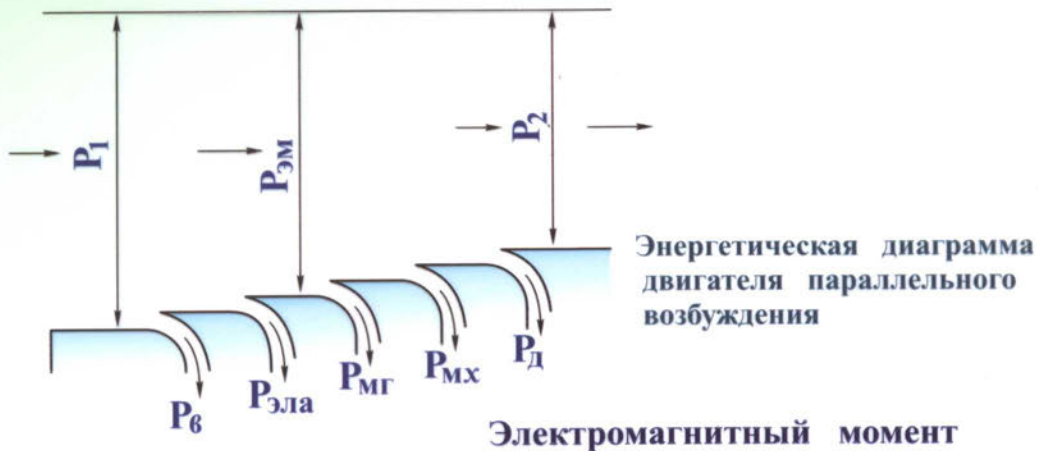
Виды естественных скоростных и механических характеристик двигателя параллельного возбуждения



МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

Энергетическая диаграмма двигателя и уравнения моментов



$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega} = M_0 + M_H + M_\delta.$$

При установившемся режиме работы $M_\delta = 0$,

$$M_{эм} = M_0 + M_H = M_{ст} \approx M_H = M.$$

Частота вращения

$$E = C_e \Phi_\delta n = U - I R_a, \text{ откуда}$$

$$n = \frac{U - I R_a}{C_e \Phi_\delta}$$

Так как $n = \frac{30 \omega}{\pi}$ и $C_e = \frac{p}{60} \cdot \frac{N}{a}$, то

угловая частота вращения

$$\omega = \frac{U - I R_a}{C_m \Phi_\delta}, \text{ где } C_m = \frac{N}{2\pi} \cdot \frac{p}{a}.$$

Согласно выражению

$$M = C_m \Phi_\delta I$$

$$\omega = \frac{U}{C_m \Phi_\delta} - \frac{R_a M}{C_m^2 \Phi_\delta^2}$$

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

$$\omega = \frac{U - (R_a + R_{pa})}{C_M \Phi_\delta} ; \quad \omega = \frac{U}{C_M} - \frac{(R_a + R_{pa})}{C_M \Phi_\delta^2}$$

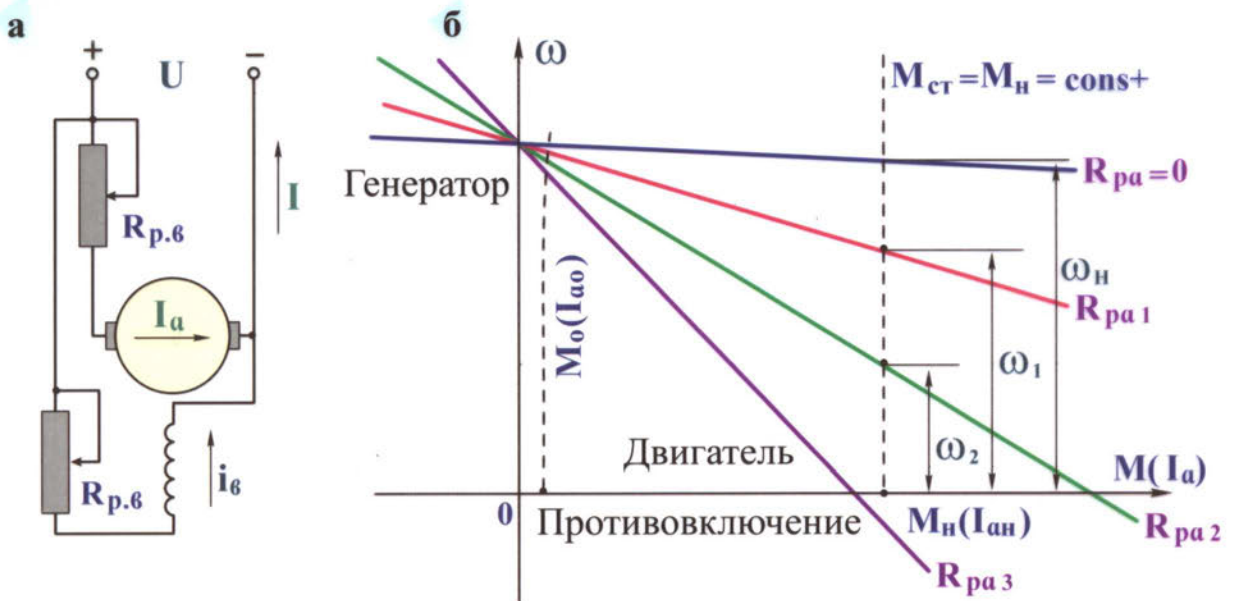
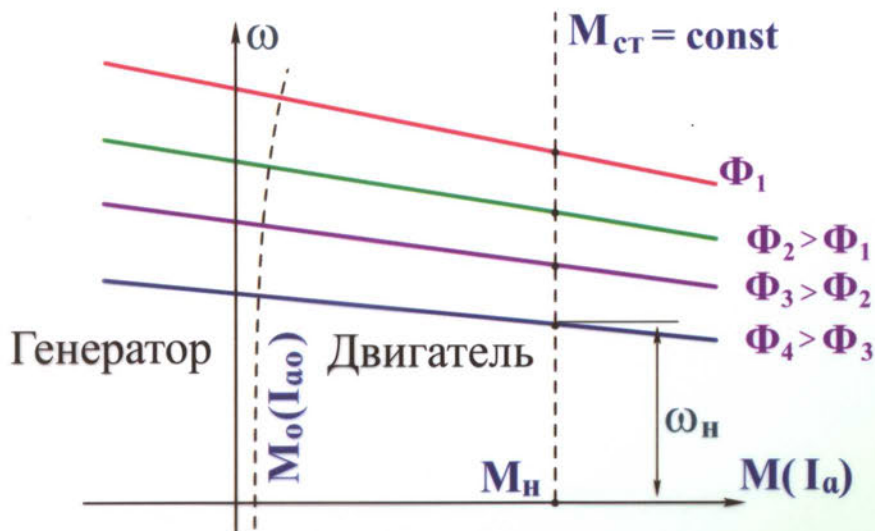


Схема регулирования частоты вращения двигателя параллельного возбуждения с помощью сопротивления в цепи якоря (а) и соответствующие механические и скоростные характеристики (б)



Механические и скоростные характеристики двигателя параллельного возбуждения при разных потоках возбуждения



МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

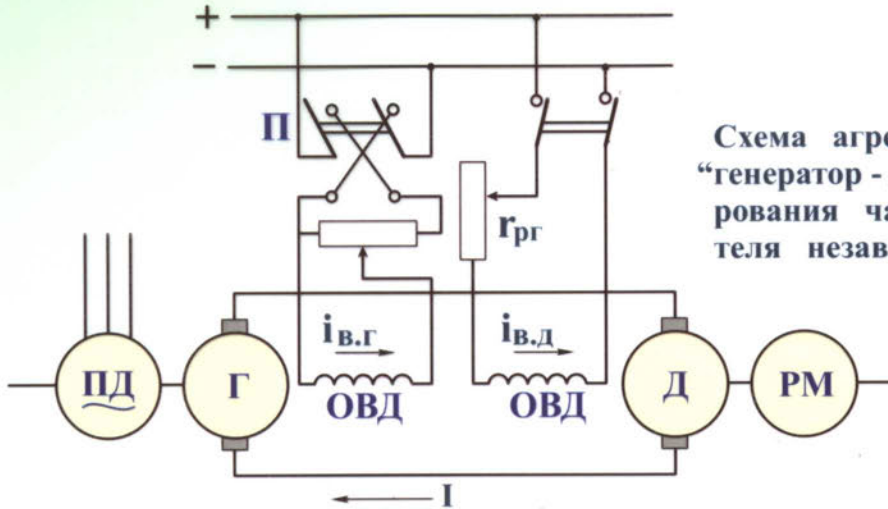
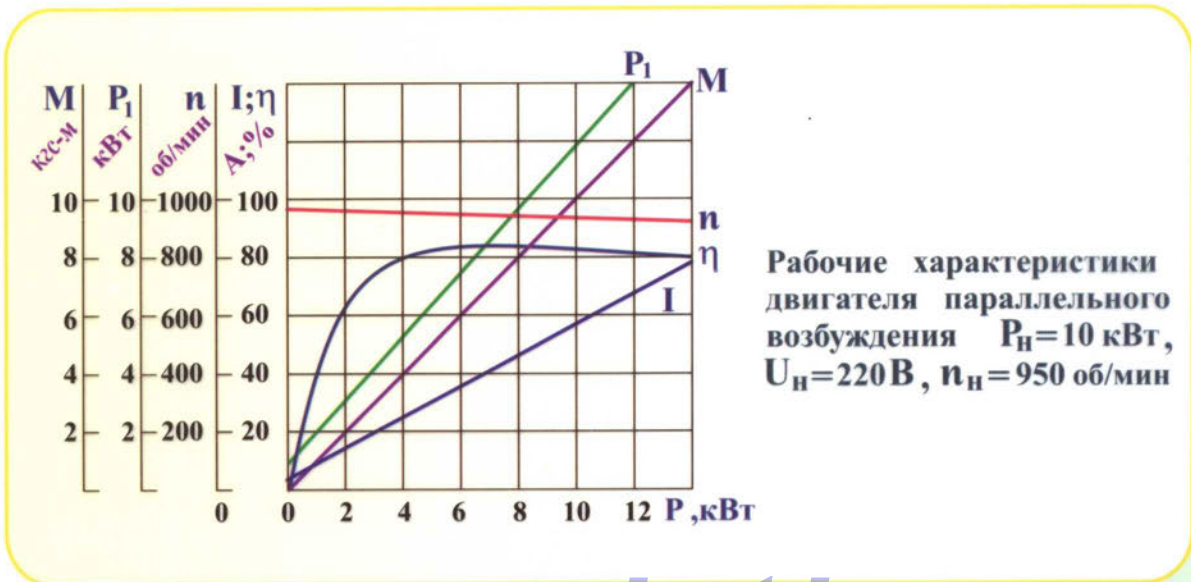
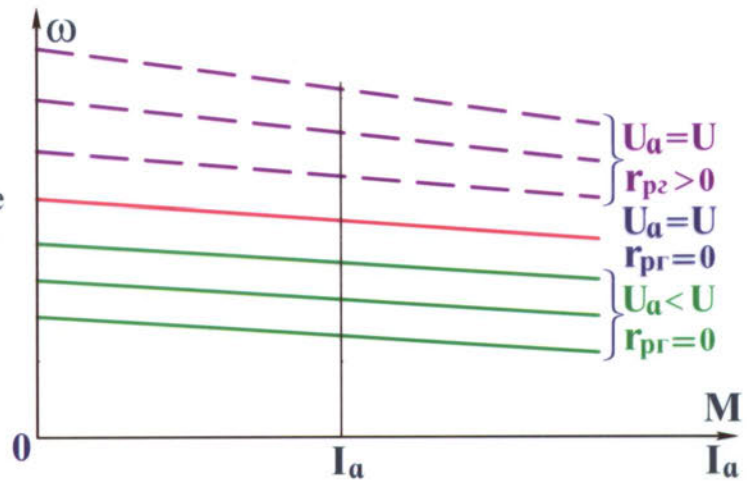


Схема агрегата "генератор - двигатель" для регулирования частоты вращения двигателя независимого возбуждения

Скоростные и механические характеристики при комбинированном способе регулирования



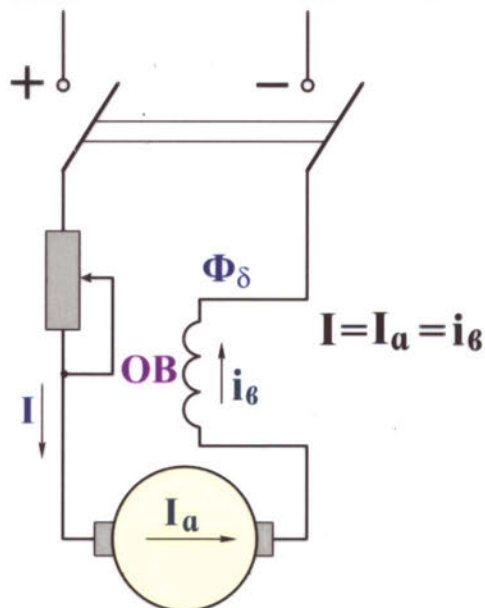
Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения $P_H=10$ кВт, $U_H=220$ В, $n_H=950$ об/мин



МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ДВИГАТЕЛЬ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Схема включения двигателя последовательного возбуждения



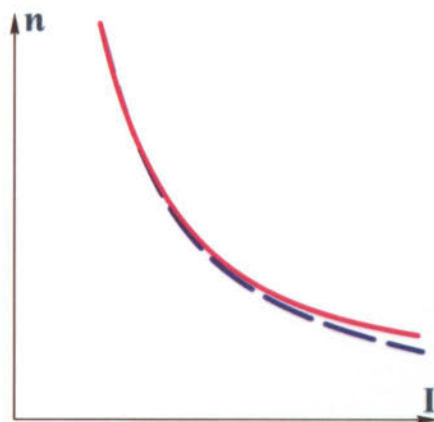
$$\Phi_{\delta} = K_{\phi} I$$

При отсутствии насыщения $K_{\phi} = \text{const}$

$$\omega = \frac{U - R_a I}{C_M K_{\phi} I} = \frac{U}{C_M K_{\phi} I} - \frac{R_a}{C_M K_{\phi}}$$

$M = C_M K_{\phi} I^2$, откуда $I = \sqrt{M / C_M K_{\phi}}$ и

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{C_M K_{\phi}} \sqrt{M}} - \frac{R_a}{C_M K_{\phi}} = \frac{U}{K_M \sqrt{M}} - \frac{R_a}{K_M^2}, \text{ где } K_M = \sqrt{C_M K_{\phi}}$$

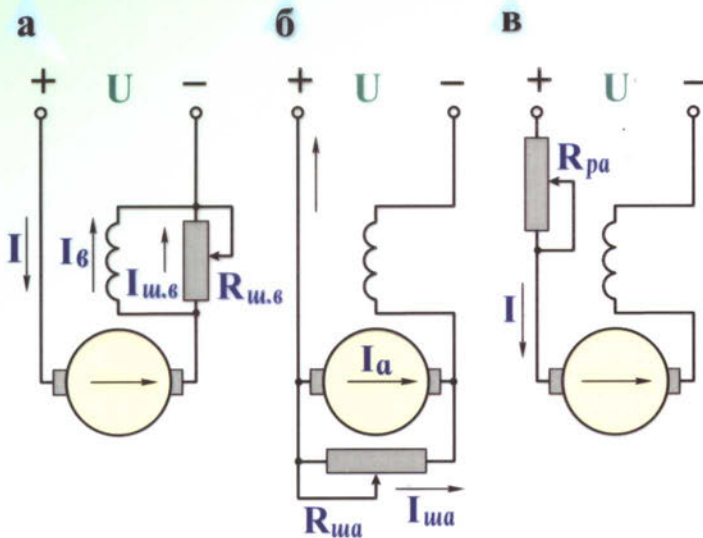


Естественная скоростная характеристика двигателя последовательного возбуждения



МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ



а) $i_б = \frac{R_{ш.б}}{R_a + R_{ш.б}} I = K_{об} \cdot I$,
 где $K_{об} = \frac{R_{ш.б}}{R_a + R_{ш.б}}$.

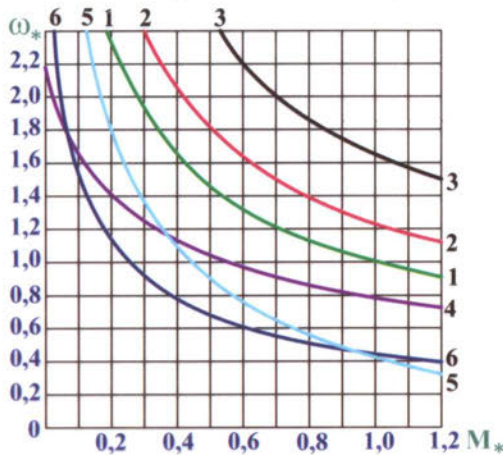
б) Механическая характеристика 4 соответствует случаю $I_{ш.а} \approx 0,5 I_n$.

в) Механическая характеристика 5 соответствует $R_{ра*} = 0,5$.

Механическим характеристикам 1, 2, 3 соответствует $K_{об} = 1; 0,6; 0,3$.

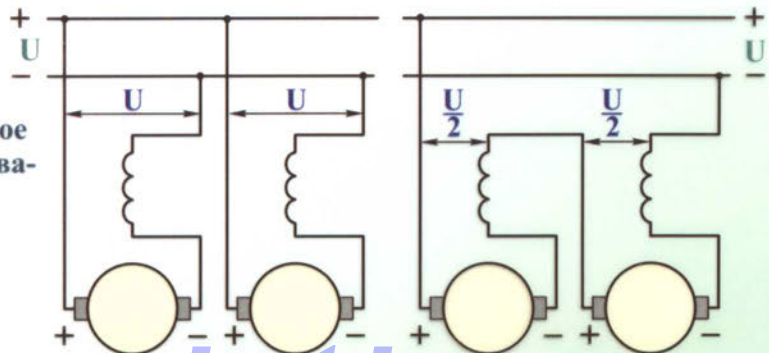
$K_{\Phi} = \text{const}^2$;
 $R_{a*} = 0,1$.

Схемы регулирования частоты вращения двигателя последовательного возбуждения посредством шунтирования обмотки возбуждения (а), шунтирования якоря (б) и включения сопротивления в цепь якоря (в)



Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения при разных способах регулирования частоты вращения (в относительных единицах)

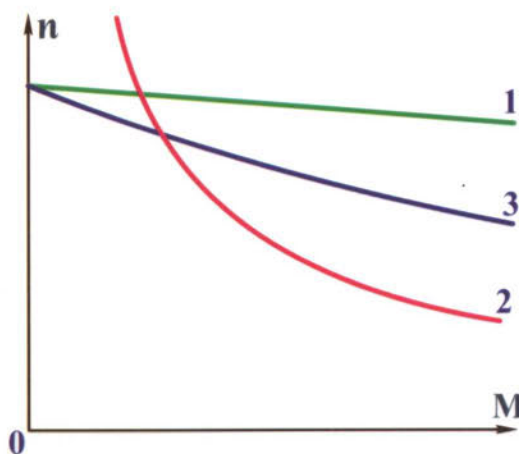
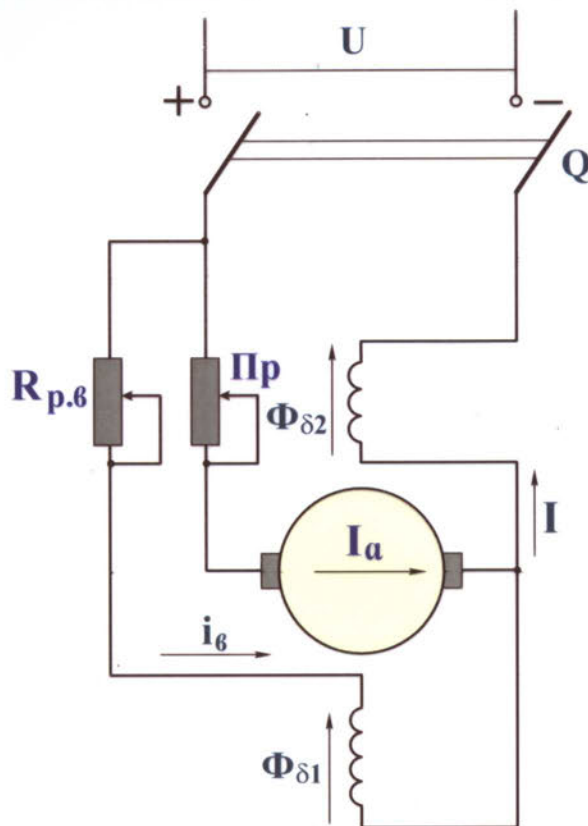
Параллельное и последовательное включение двигателей последовательного возбуждения для изменения частоты вращения



МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.
ДВИГАТЕЛЬ СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Схема включения двигателя смешанного возбуждения



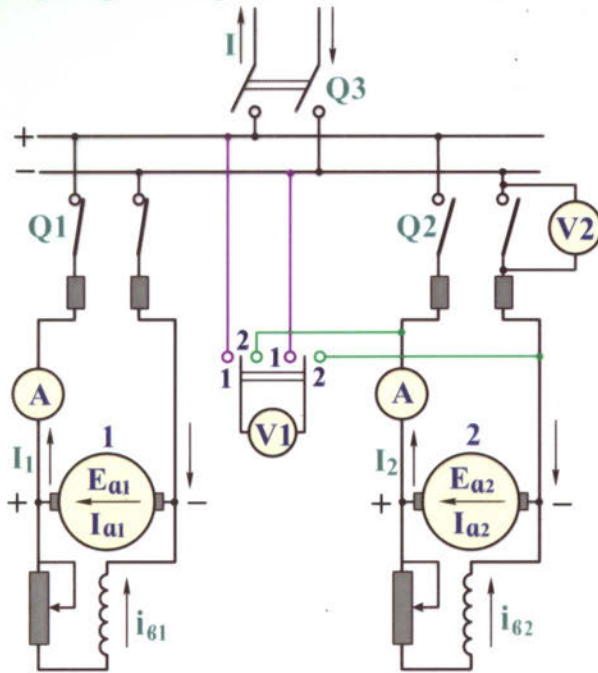
Естественные механические характеристики двигателей параллельного (1), последовательного (2) и смешанного возбуждения с согласным включением последовательной обмотки (3)



МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Схема параллельной работы генераторов параллельного возбуждения



Параллельная работа генераторов в режиме внешних характеристик

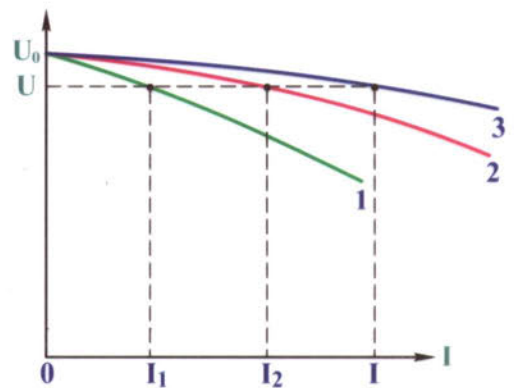
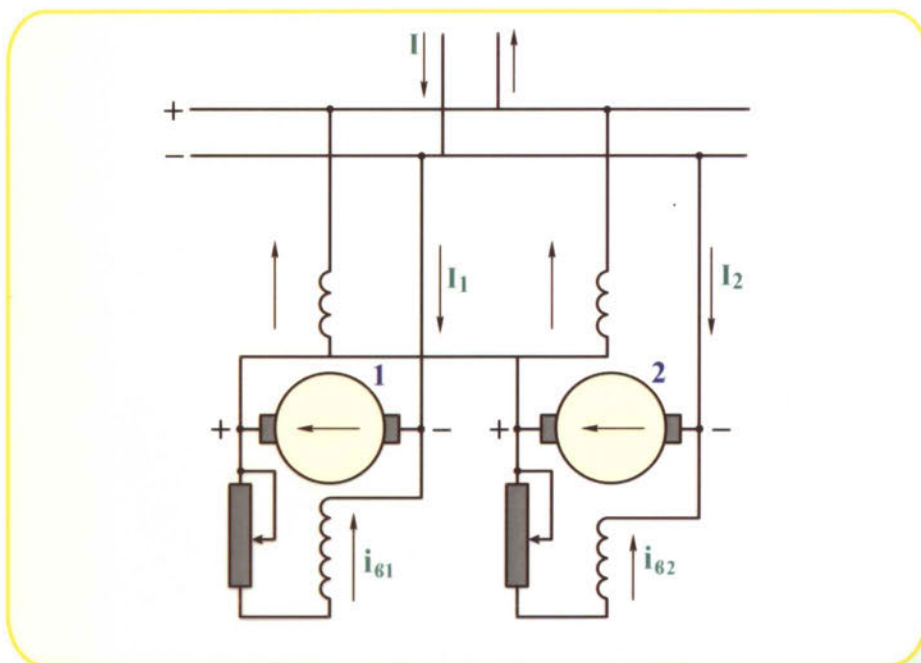


Схема параллельной работы генераторов смешанного возбуждения с согласным включением последовательных обмоток



Раздел 1. Трансформаторы

1. Типы магнитных систем
2. Способы прессовки магнитных систем
3. Силовой трансформатор. Реактор
4. Элементы конструкции и способы охлаждения масляных трансформаторов
5. Цилиндрические обмотки
6. Винтовые обмотки
7. Непрерывные обмотки
8. Конструктивные схемы однофазных и трехфазных трансформаторов
9. Холостой ход трансформатора
10. Намагничивание магнитопроводов трансформаторов
11. Нагрузка трансформатора
12. Схемы замещения трансформатора
13. Режим установившегося короткого замыкания трансформатора
14. Режим установившегося короткого замыкания трансформатора
15. Изменение вторичного напряжения трансформатора
16. Потери и КПД трансформатора
17. Автотрансформаторы
18. Автотрансформаторы
19. Трехобмоточный трансформатор
20. Параметры трехобмоточных трансформаторов
21. Схемы и группы соединений трансформаторов
22. Группы соединений обмоток трехфазных трансформаторов
23. Параллельная работа трансформаторов

Раздел 2. Машины переменного тока

24. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (исполнение IP 44)
25. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (исполнение IP 23)
26. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (исполнение 6 кВ)
27. Статор асинхронного двигателя
28. Короткозамкнутые роторы асинхронных двигателей
29. Асинхронный двигатель с фазным ротором
30. Фазный ротор асинхронного двигателя
31. Охлаждение электрических машин
32. Охлаждение электрических машин
33. Конструктивное исполнение электрических машин
34. Синхронный явнополюсный двигатель
35. Ротор явнополюсной синхронной машины
36. Гидрогенератор красноярской ГЭС
37. Статор гидрогенератора
38. Ротор гидрогенератора
39. Турбогенератор с водяным охлаждением
40. Ротор и статор турбогенератора
41. Электродвижущие силы обмоток переменного тока
42. Электродвижущие силы обмоток переменного тока
43. ЭДС от основной гармоники поля
44. ЭДС катушечной группы
45. ЭДС от высших гармоник поля
46. Обмотки машин переменного тока. Однослойные обмотки переменного тока
47. Обмотки машин переменного тока. Однослойные

- обмотки переменного тока
48. Обмотки машин переменного тока. Однослойные обмотки переменного тока
49. Двухслойные обмотки переменного тока
50. Двухслойные обмотки
51. Двухслойные обмотки
52. Двухслойные обмотки
53. Магнитодвижущие силы обмоток переменного тока
54. Магнитодвижущие силы обмоток переменного тока
55. МДС фазной обмотки
56. Вращающиеся волны МДС
57. Первая гармоника МДС трехфазной обмотки (аналитический вывод)
58. Первая гармоника МДС трехфазной обмотки (графическое построение)
59. Первая гармоника МДС двухфазной обмотки
60. Магнитные поля обмоток переменного тока
61. Потоки рассеяния обмоток переменного тока

Раздел 3. Асинхронные машины

62. Принцип действия асинхронных машин
63. Рабочий процесс в асинхронном двигателе
64. Приведение вращающейся машины к неподвижной, работающей как трансформатор
65. Основные уравнения и векторная диаграмма асинхронного двигателя
66. Асинхронные машины. Схема замещения
67. Электромагнитный момент асинхронной машины
68. Электромагнитный момент
69. Критическое скольжение и максимальный момент
70. Круговая диаграмма асинхронной машины
71. Круговая диаграмма асинхронной машины
72. Построение круговой диаграммы по экспериментальным данным
73. Построение круговой диаграммы по экспериментальным данным
74. Пуск трехфазных асинхронных двигателей
75. Асинхронные двигатели с вытеснением тока в обмотке ротора
76. Асинхронные двигатели с вытеснением тока в обмотке ротора
77. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей
78. Регулирование частоты вращения изменением числа полюсов
79. Схемы систем частотного регулирования
80. Регулирование частоты вращения фазных асинхронных двигателей
81. Регулирование частоты вращения фазных асинхронных двигателей
82. Асинхронный генератор (АГ)
83. Индукционный регулятор

Раздел 4. Синхронные машины

84. Магнитное поле СМ при холостом ходе и параметры обмотки возбуждения
85. Магнитное поле СМ при холостом ходе и параметры обмотки возбуждения
86. Магнитное поле и параметры обмотки якоря
87. Магнитное поле и параметры обмотки якоря
88. Магнитное поле и параметры обмотки якоря
89. Магнитное поле и параметры обмотки якоря

90. Векторная диаграмма напряжения генераторов
91. Характеристики синхронного генератора (СГ)
92. Характеристики СГ
93. Учет насыщения при построении векторных диаграмм напряжений СГ
94. Параллельная работа синхронных машин. Синхронизация СГ
95. Синхронные режимы параллельной работы синхронных машин с сетью
96. Электромагнитная мощность и электромагнитный момент синхронной машины.
97. Угловая характеристика активной мощности явнополюсной синхронной машины
98. Работа синхронного генератора параллельно с сетью при постоянном возбуждении и переменной мощности
99. Режимы работы синхронных двигателей
100. Векторные диаграммы синхронных двигателей
101. Схемы возбуждения синхронных машин

Раздел 5. Машины постоянного тока

102. Выпрямление переменного тока в постоянный с помощью коллектора
103. Магнитная цепь машины
104. Обмотки якоря
105. Якорь машины постоянного тока
106. Якорь машины постоянного тока
107. Коллекторы электрических машин
108. Двигатель постоянного тока
109. Петлевая и волновая обмотки (принцип выполнения)
110. Пример простой петлевой обмотки
111. Пример простой волновой обмотки

112. ЭДС якоря
113. Максимальное значение напряжения между соседними коллекторными пластинами а) при холостом ходе б) при нагрузке
114. Реакция якоря
115. Коммутация якоря
116. Уравнения коммутации. Способы улучшения коммутации
117. Обратимость машин постоянного тока
118. Генераторы постоянного тока
119. Генераторы постоянного тока. Генератор независимого возбуждения
120. Генераторы постоянного тока. Генератор независимого возбуждения
121. Генераторы постоянного тока. Генератор параллельного возбуждения
122. Генераторы постоянного тока. Генератор последовательного возбуждения
123. Генераторы постоянного тока. Генератор смешанного возбуждения
124. Двигатель параллельного возбуждения
125. Двигатели постоянного тока
126. Регулирование частоты вращения двигателя параллельного возбуждения
127. Регулирование частоты вращения двигателя параллельного возбуждения
128. Двигатель последовательного возбуждения
129. Регулирование частоты вращения двигателя последовательного возбуждения
130. Двигатели постоянного тока. Двигатель смешанного возбуждения
131. Параллельная работа генераторов постоянного тока