Электрические машины

Шевченко Валентина Владимировна 067-407-84-55 +Telegram; 050-407-84-54

Курс – лекции, лабораторные работы, практические занятия.

Литература: 1) Кацман М.М. Электрические машины

2) Токарев М.Ф. Электрические машины, Москва, 1993

Основные законы :

1) Закон сохранения энергии

2) Закон электромагнитной индукции $E = -w \cdot \dfrac{d\Phi}{dt}$, V

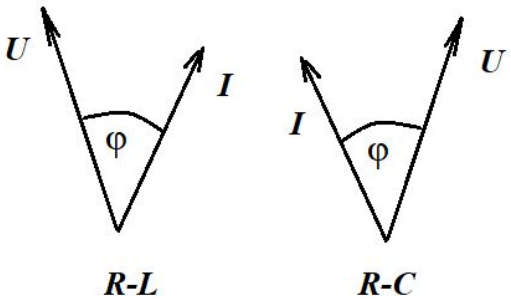
где w – число витков. $\dfrac{d\Phi}{dt}$ - скорость изменения магнитного потока

Мощность:

1. Активная $P = m \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi$, Вт

2. **Реактивная** $Q = m \cdot U \cdot I \cdot \sin\varphi$, вар.

3. **Полная** $S = m \cdot U \cdot I$ или $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$, ВА



Потери:

1.Электрические потери I^2R *– закон Джоуля,* Вт*;* I^2Rt *–Закон Джоуля-Ленца,* Дж **-var**

2.Магнитные потери (Потери в стали) **- const**

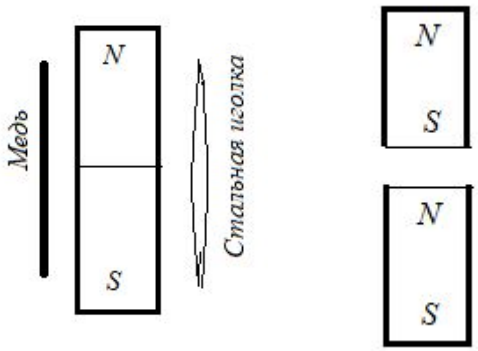
3. Механические потери - const

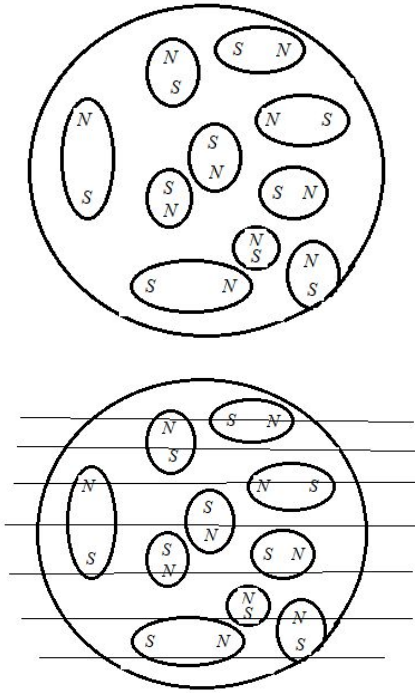
4. Добавочные потери- const

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma P_i}{P_1}, \text{о.е. или} * 100\%$$

Магнитные потери

$P_{mag} \sim f^{\beta}$ где β = 1,6 – 2,0





Стандартная толщина шихтованных пластин: 0,5 мм, 0,35 мм, 0,28 мм, 0,2 мм

Коэффициент заполнения сердечника сталью
$K_{ст}$ = 0,9-0,95

Изоляция пластин: лак или Оксидная пленка

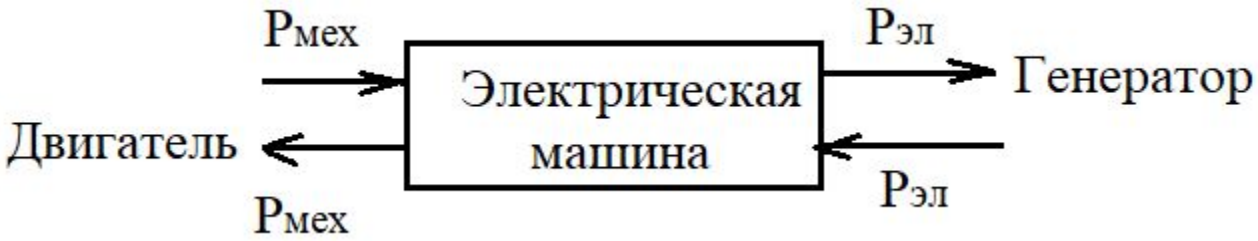
Марки электротехнической стали
1012, 1124, 1213, 1411 ……
2013, 2212, 2314, 2414 ……
3011, 3112, 3311, 3412 ……

Класс нагрево-стойкости	Температура нагрева t, °C	Превышение температуры нагрева Δt, °C
B	135	95
F	155	115
H	180	140
C*	>180	-
200	200	160
300	300	260

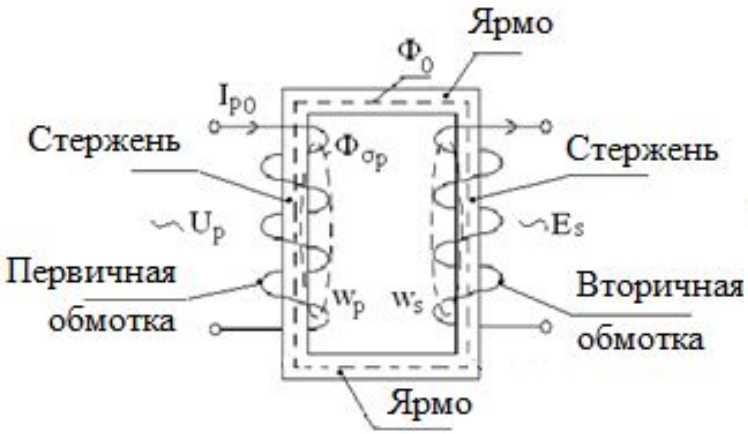
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma P_i}{P_1}, \text{о. е. или} * 100\%$$

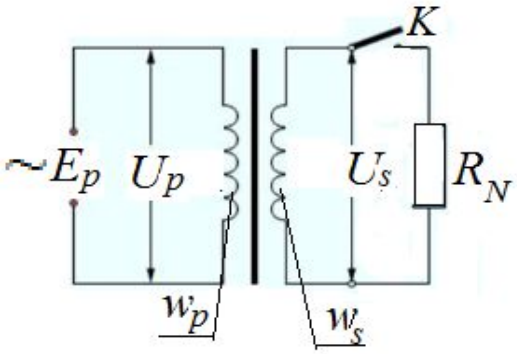
Электрическая машина – электромеханический преобразователь

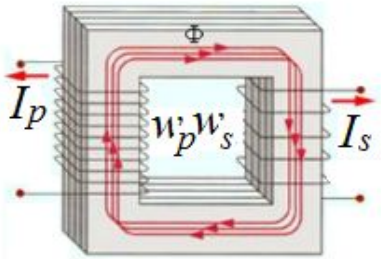
- **Принцип обратимости электрических машин**



Трансформатор







$$E_p = -w_p \cdot \frac{d\Phi}{dt}, \text{ В}$$

$$E_s = -w_s \cdot \frac{d\Phi}{dt}, \text{ В}$$

$$k_{tr} = \frac{E_p}{E_s} = \frac{w_p}{w_s}$$

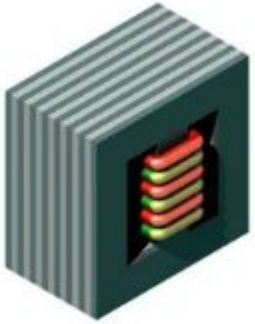
Если k_{tr}<1 – повышающий трансформатор

Если k_{tr} >1 – понижающий трансформатор

Классификация трансформаторов

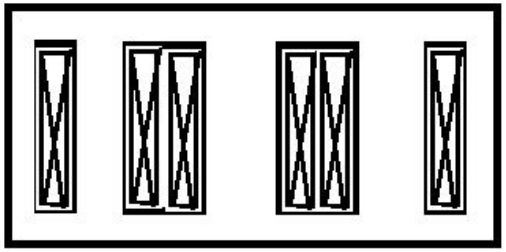
1. **По назначению**: промышленные, измерительные, специальные.
2. **По количеству фаз**: одно- и многофазные (обычно трехфазные).
3. **По конструкции сердечника**

Стержневой

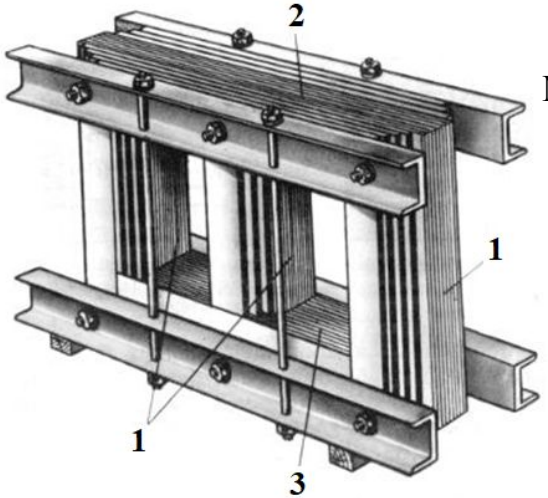


броневой

Тороидальный

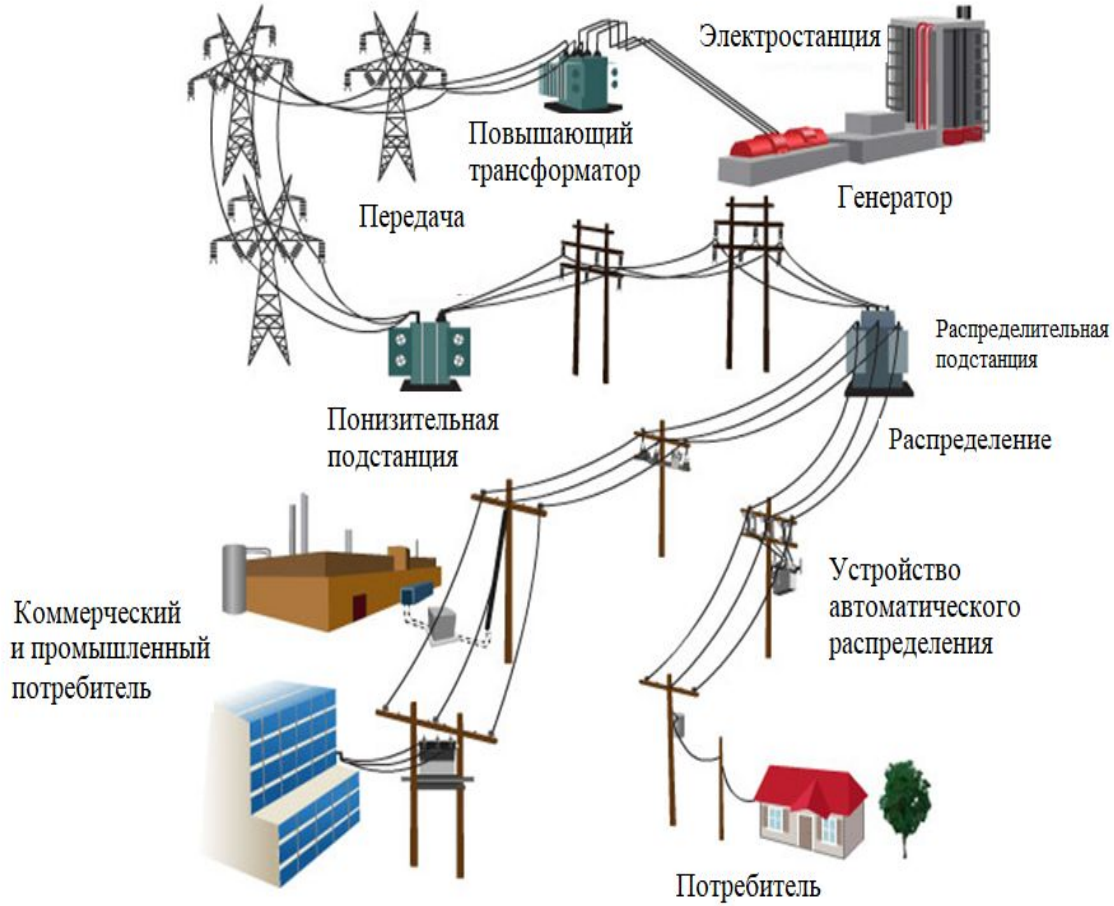


Броне-стержневой трех-фазный трансформатор



Магнитопровод трехфазного трех-стержневого трансформатора:
1 - стержни; 2 – верхнее ярмо;
3 - нижнее ярмо

Производство, передача, распределение и потребление электроэнергии

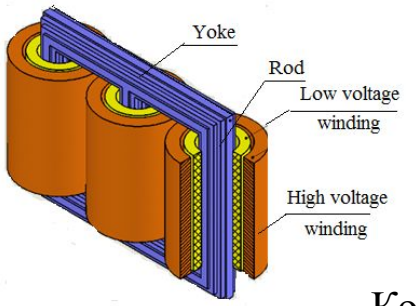


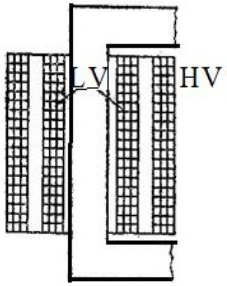
Три однофазных трансформатора возле блока АЭС

Однофазный трансформатор рядом с энергоблоком ТЭС

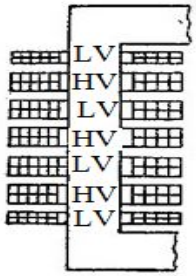
Классификация трансформаторов (продолжение)

4. Классификация по конструкции обмоток: концентрическая (одна в другой) и дисковая (или тарельчатая)





Концентрические обмотки



Дисковая (или «тарельчатая») конструкция.

5. Классификация по способу охлаждения: сухая (воздушное охлаждение) и с масляным охлаждением. Преимущество сухих трансформаторов - их пожаробезопасность.

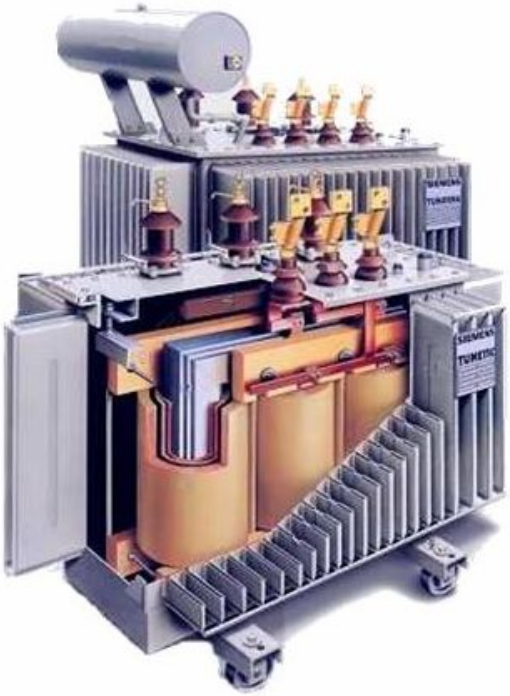
Сухие трансформаторы (с воздушным охлаждением)

Трансформаторы с масляным охлаждением

Конструкция с расширительным бачком

Конструкция без расширительного бачка

Трансформаторы с масляным охлаждением



Основная особенность масляных трансформаторов заключается в том, что магнитопровод с обмотками размещается в баке, предварительно заполненном трансформаторным маслом.

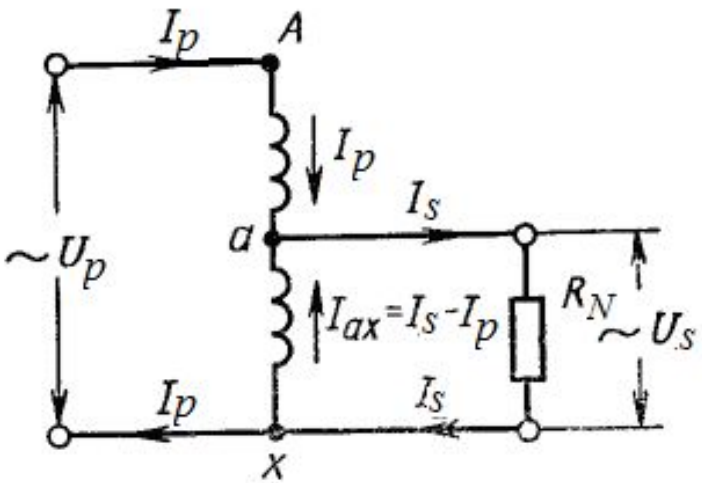
1) Масло отводит тепло от обмоток и магнитопровода через стенки бака и трубы радиатора, что усиливает охлаждение.

Масло также улучшает изоляцию, поскольку электрическая прочность масла значительно выше, чем у воздуха. Уменьшены габариты и вес бака.

Классификация трансформаторов (продолжение)

6 . Классификация по количеству обмоток на фазу:

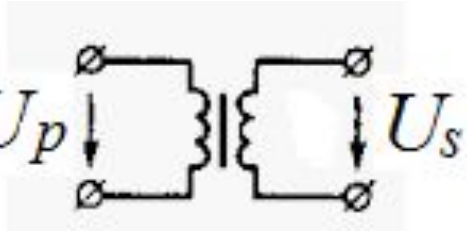
- с **одной** обмоткой - автотрансформаторы. Используются для соединения линий электропередачи с разным напряжением.



Коэффициент трансформации автотрансформатора должен быть не более 2-2,3.

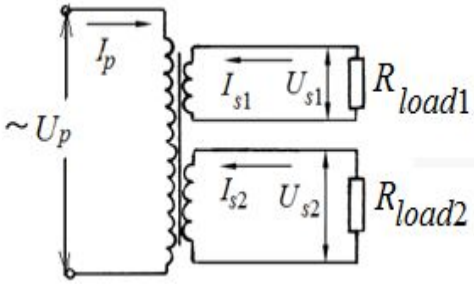
Небольшие автотрансформаторы используются в лабораториях для регулирования напряжения ЛАТР.

С двумя обмотками



С тремя обмотками

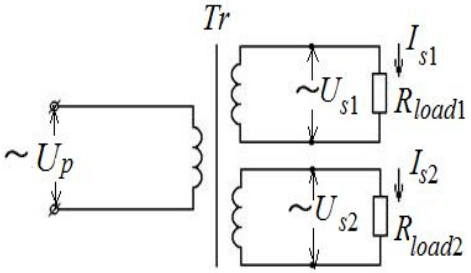
С одной первичной обмоткой и двумя вторичными обмотками с разным напряжением



$U_{s1} \neq U_{s2}$

Это трансформатор называет **трансформатор с тремя обмотками**

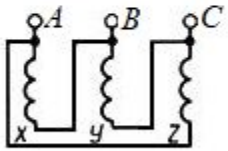
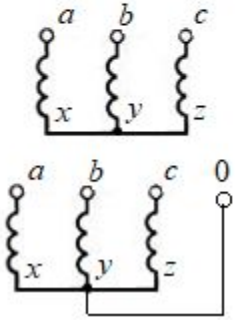
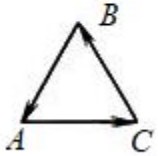
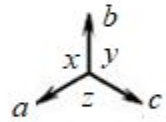
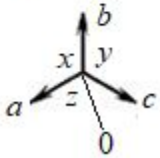
С одной первичной обмоткой и двумя вторичными обмотками с одинаковым напряжением

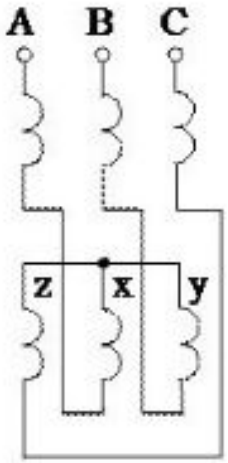


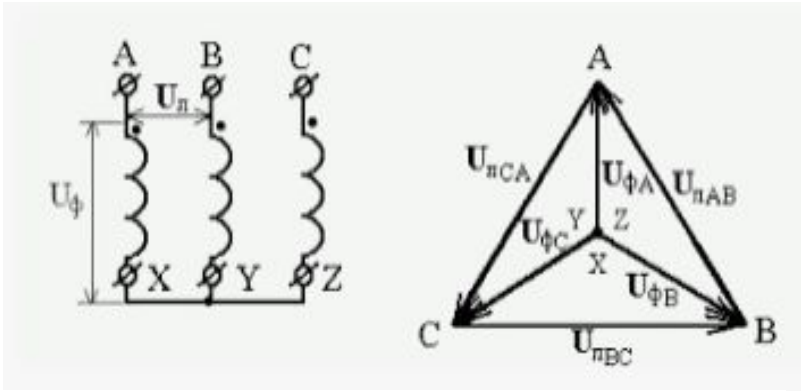
$U_{s1} = U_{s2}$

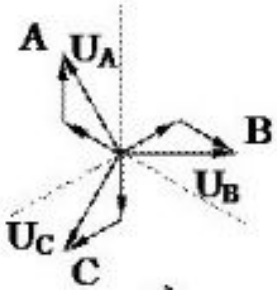
Это трансформатор называет **трансформатор с расщепленной обмоткой**

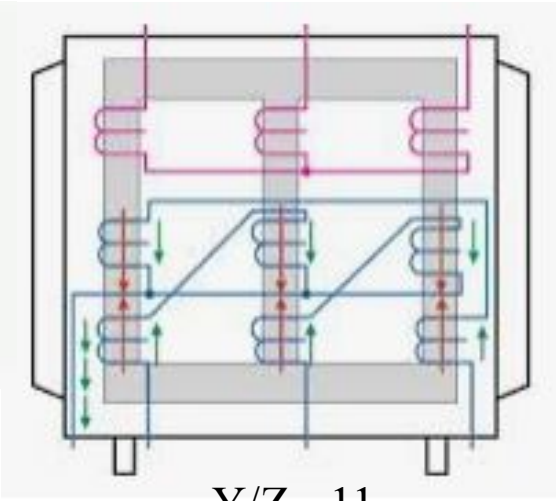
Схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов

Схема соединенеия обмоток		Диаграмма векторов напряжения в режиме холостого хода		Условное обозначение
ВН	НН	ВН	НН	
				Δ/Y-11
				$Δ/Y_0$-11





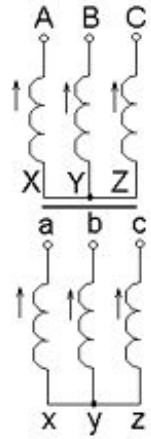
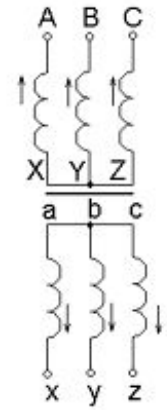
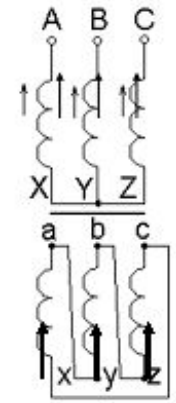
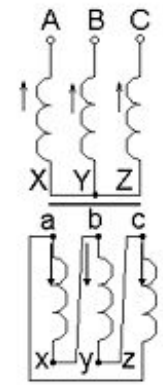
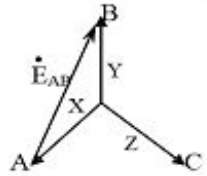
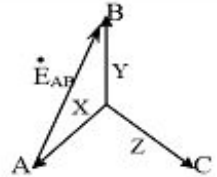
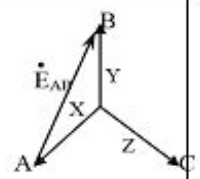
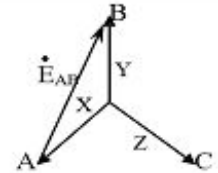
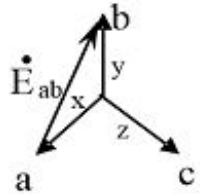
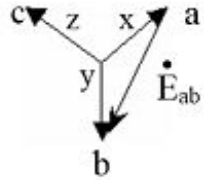
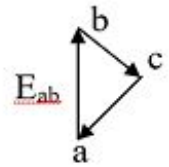
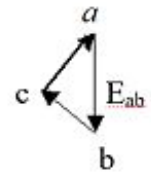
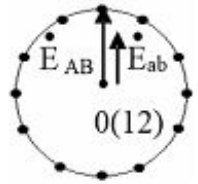
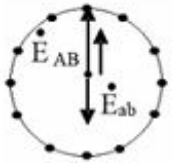




Y/Z - 11

Группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов

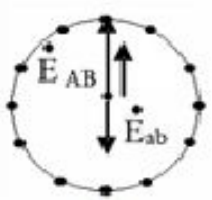
Группа соединения обмоток определяется углом сдвига между **одноименными** линейными напряжениями первичной и вторичной обмоток. Для определения группы соединения обмотки вектор высокого напряжения направляется на 12:00, как минутная стрелка часов. Начало вектора низкого напряжения соединен с началом вектора высокого напряжения. Направление вектора низкого напряжения покажет «час» - **группу соединений обмотки.** Применением различных способов соединения обмоток можно создать 12 групп. Согласно ГОСТу, используют: Y/Y_0-**0** (старое обозначение – «12») Y/Δ -**11**; Y_0/Δ-**11**

Схема соединения обмоток трехфазного трансформатора				
Векторная диаграмма ЭДС первичной обмотки				
Векторная диаграмма ЭДС вторичной обмотки				
Схема установления группы соединения обмоток				
Обозначение схемы и группы	Y/Y - 0	Y/Y - 6	Y/Δ - 11	Y/Δ - 5

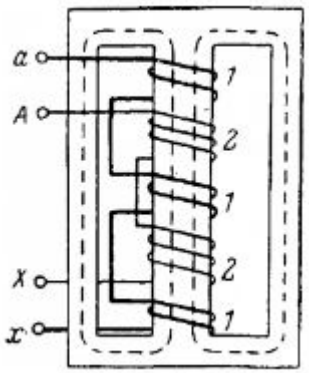
Группа соединения обмоток трехфазных трансформаторов зависят от:

1) от схем соединения обмоток;
2) от маркировки концов трансформаторов;
3) от направления навивки обмотки;
4) От числа фаз. Трехфазные обмотки могут иметь 12 групп, однофазные обмотки имеют две группы: нулевую и шестую.

I/I-0



I/I-6



«**Приведенный трансформатор**» - трансформатор, параметры вторичной обмотки которого приведены к параметрам первичной обмотки.

<u>Реальные:</u> $E_s, I_s, U_s, Z_s, X_s, L_s, w_s$

<u>Приведенные:</u> $E_s^/, I_s^/, U_s^/, Z_s^/, X_s^/, L_s^/, w_s^/$

Приведенные значения

$$E_s' = E_p \qquad E_s^/ = kE_s \qquad U_s^{'} = \frac{U_s \cdot I_s}{I_s^{'}} = \frac{U_s \cdot I_s}{I_s} \cdot k = Us \cdot k$$

$$I_s^{'} = \frac{E_s I_s}{E_s^{'}} = \frac{E_s \cdot I_s}{kE_s} = \frac{I_s}{k} \qquad r_s^{'} = \frac{I_s^2 \cdot r_s}{I_s^{'2}} = \frac{I_s^2 \cdot r_s}{\frac{I_s^2}{k^2}} = k^2 \cdot r_s$$

Коэффициент трансформации

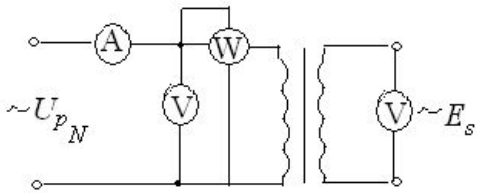
$$k = \frac{E_p}{E_s}$$

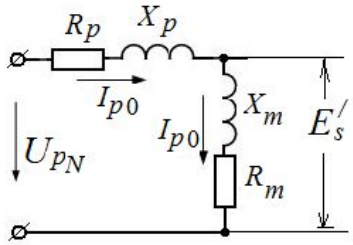
Приведенный коэффициент трансформации

$$k = \frac{E_p}{E_s^/} = 1$$

Проведение опытов холостом ходу и лабораторного короткого замыкания

Экспериментальная схема и схемы замещения трансформаторов в режимах холостого хода и лабораторного короткого замыкания





В опыте холостого хода можно определить:

1) Потери холостого хода = потерям в стали (магнитные потери) $P_0 = P_{mag}$. **const**

2) Коэффициент мощности в режиме холостого хода $\cos\varphi_0 = \dfrac{P_0}{m \cdot U_{pN} \cdot I_{p0}}$

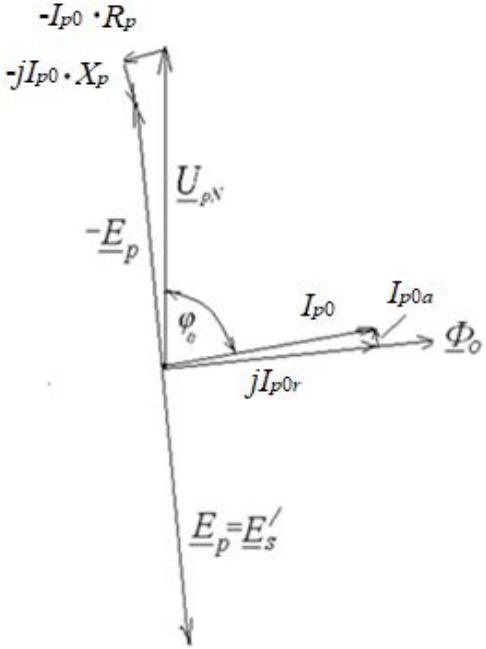
3) Ток намагничивания (ток х.х.) I_{p0} ;

4) Параметры схемы замещения x_p, R_p, x_m, R_m.

$$Z_0 = \frac{U_{pN}}{I_{p0}}; \quad Z_0 = \sqrt{R_p^2 + x_p^2}; \quad R_{p0} = R_p + R_m; \quad R_{p0} = \frac{P_{mag}}{m \cdot I_{p0}^2} \quad x_0 = x_p + x_m; \quad x_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2};$$

Величину $E_s^/$ можно определить только графически, поэтому построим векторную диаграмму по уравнениям:

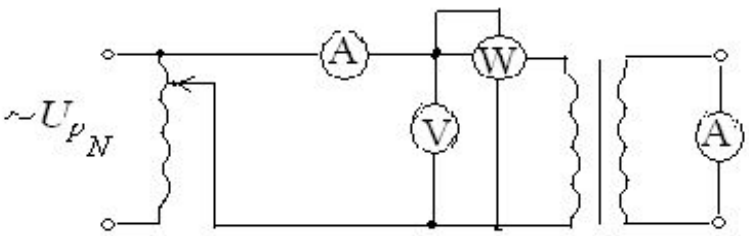
$$U_{pN} = -E_p + I_{p0a} + jI_{p0r};$$
$$I_{p0} = I_{p0a} + jI_{p0r};$$
$$E_p = E_s^/$$

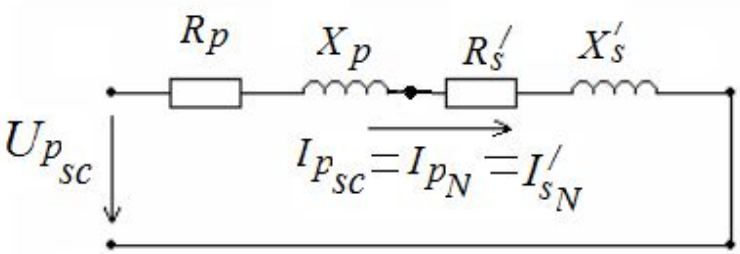


Преобразуем первое уравнение: $-E_p = U_{pN} - I_{p0a} - jI_{p0r}$

$$-E_p = U_{pN} - I_{p0a} - jI_{p0r};$$
$$I_{p0} = I_{p0a} + jI_{p0r};$$
$$E_p = E_s^/$$

Опыт лабораторного короткого замыкания





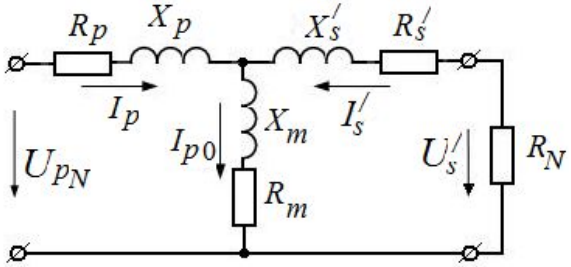
1. Номинальные электрические потери P_K – по ваттметру.
2. Коэффициент мощности режима лабораторного короткого замыкания $\cos\varphi_k = \dfrac{P_k}{m \cdot U_{pk} \cdot I_{pN}}$
3. Напряжение короткого замыкания $\boldsymbol{u_k}$, в **%** $u_k = \dfrac{U_{pk}}{U_{pN}} \cdot 100\ \%$

   U_{pk} – напряжение лабораторного КЗ по вольтметру, В.
   U_{pN} – номинальное напряжение первичной обмотки, В.
4. Параметры схемы замещения трансформатора в режиме лабораторного КЗ

$$Z_k = \sqrt{R_K^2 + X_K^2} = \frac{U_{pk}}{I_{pN}} \qquad R_k = R_p + R_s^/ = \frac{P_k}{m \cdot I_{pN}^2} \qquad X_k = X_p + X_s^/ = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \qquad R_p = R_s^{'} = \frac{R_k}{2} \qquad X_p = X_s^{'} = \frac{X_k}{2}$$

$$R_m = R_o - R_p \qquad X_m = X_o - X_p$$

Схема замещения трансформатора в номинальном режиме

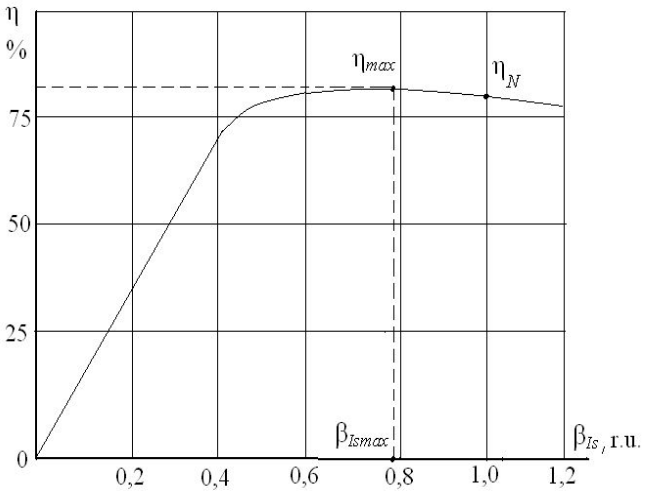


КПД по известным значениям потерь мощности в режиме ХХ и в режиме лабораторного КЗ

$$\eta_N = 1 - \frac{P_0 + \beta_{Is}^2 P_k}{\beta_{Is} \cdot S_N \cdot \cos\varphi_s + P_0 + \beta_{Is}^2 \cdot P_k}$$

Коэффициент нагрузки трансформатора

$$\beta_{Is} = \frac{I_s}{I_{sN}}$$

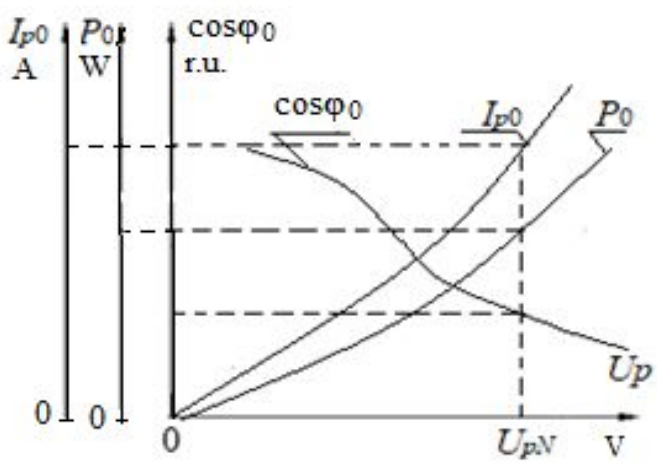


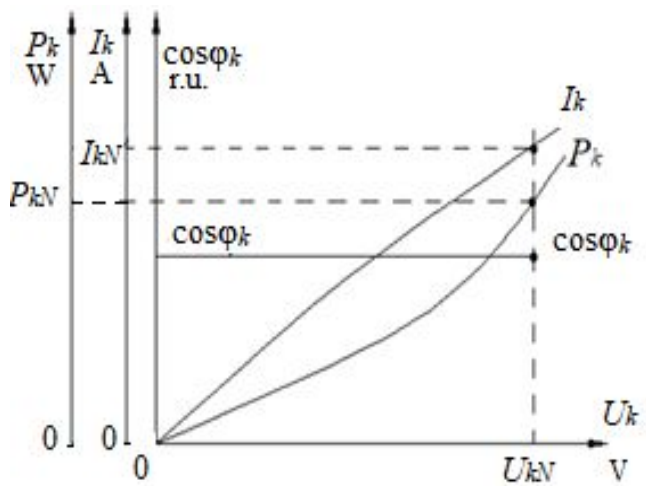
В номинальном режиме $\beta_{Is}=1$

$$\beta_{Is\,\max} = \sqrt{\frac{P_o}{P_k}} \qquad \eta_{\max} = 1 - \frac{P_o + \beta_{Is\,\max}^2 \cdot P_k}{\beta_{Is\,\max} \cdot S_N \cdot \cos\varphi_s + P_o + \beta_{Is\,\max}^2 \cdot P_k}$$

Максимум КПД будет при равенстве постоянных и переменных потерь

Характеристики холостого хода и лабораторного КЗ трансформатора





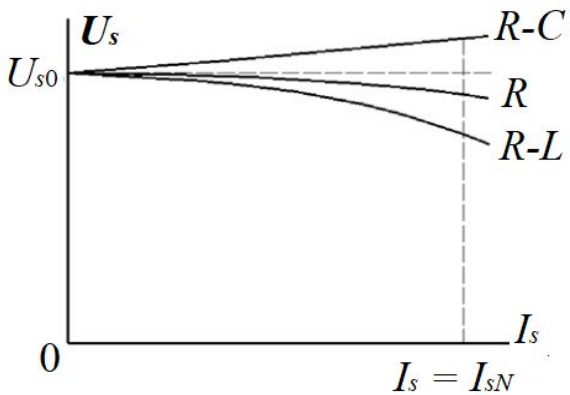
Условия включения трансформаторов на параллельную работу

1. Трансформаторы должны иметь одинаковые группы соединения: «0» или «11».
Это самое главное условие.
2. Трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации
$K_{tr1} = K_{tr2} = ... = K_{tri}$, где i – количество трансформаторов.

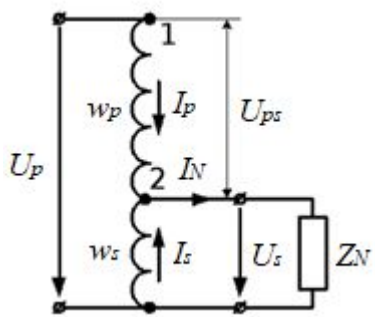
3. Трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения КЗ $u_{k1}=u_{k2} = ... u_{ki}$.

Еще одно требование: мощность трансформаторов может отличаться только на одну ступень.
Мощности трансформаторов имеют определенные значения: 100, 125, 160, 200, 250, 400, 630, 1000, 1250, 1600 кВА и другие.
Если мощности трансформаторов разные, напряжения КЗ $\boldsymbol{u_k}$ должно отличаться. Для трансформатора с меньшей мощностью напряжение КЗ должно быть больше.

Внешняя характеристика
трансформатора $U_s = f(I_s)$

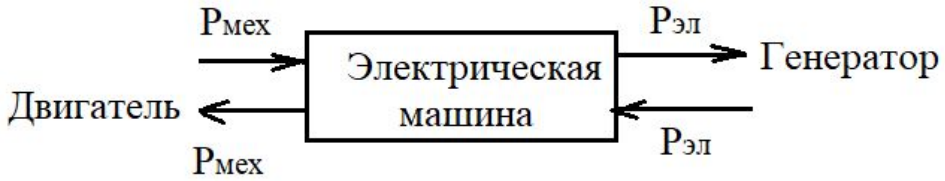


АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

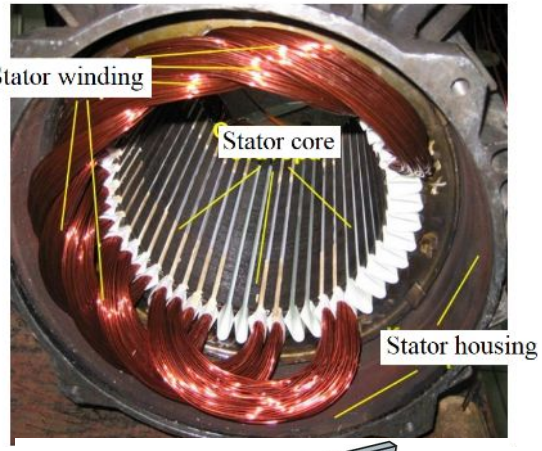


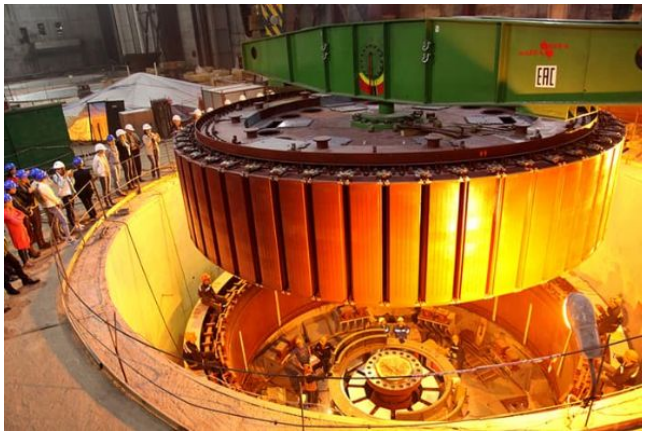
$$k_{trAT} = \frac{E_p}{E_s} = \frac{w_p}{w_s} < 2 \div 2{,}3$$

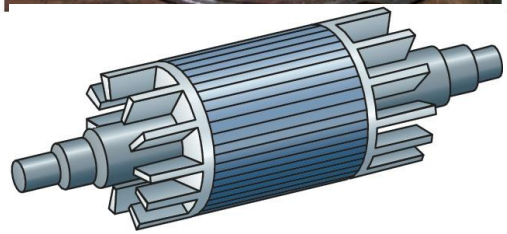
Общие вопросы теории машин переменного тока

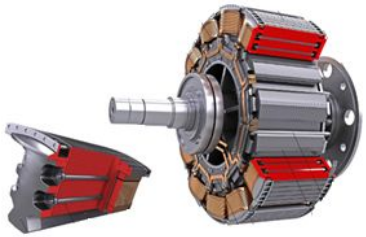


Статоры машин переменного тока (асинхронных и синхронных машин) одинаковые.

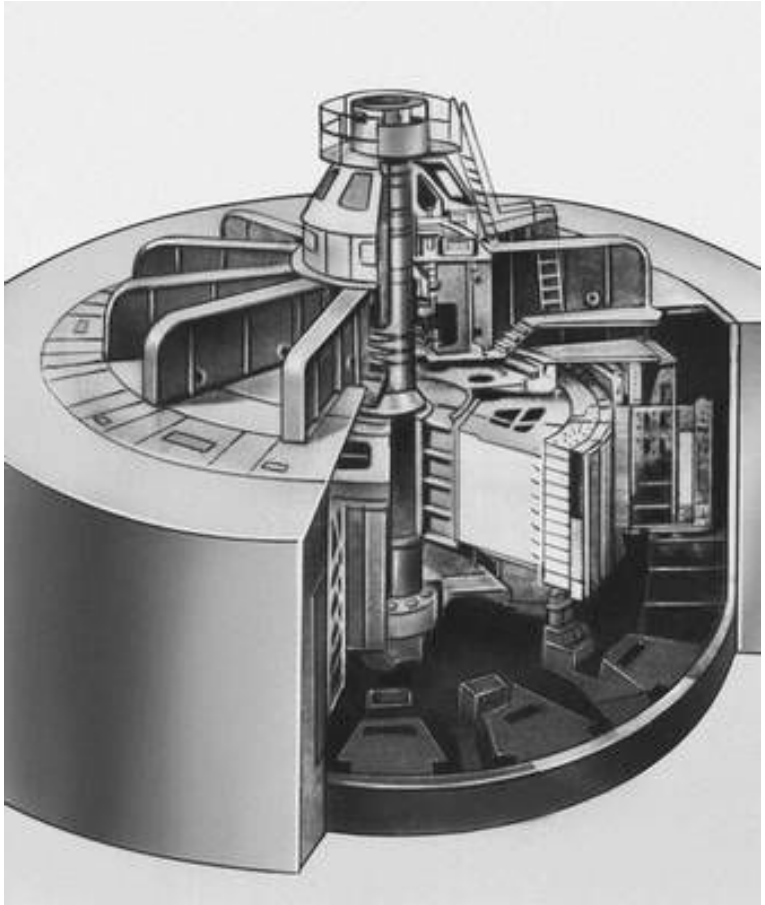




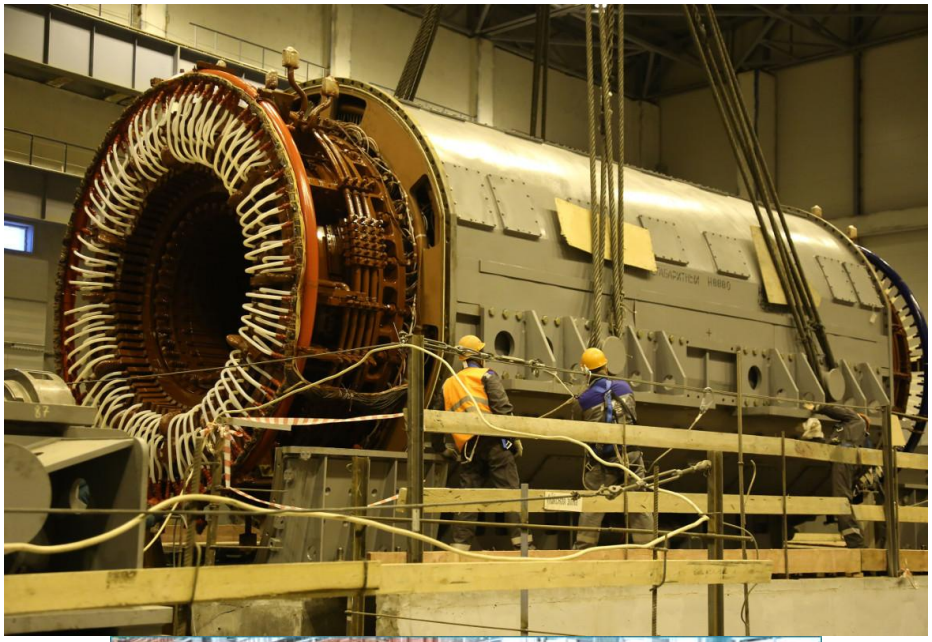


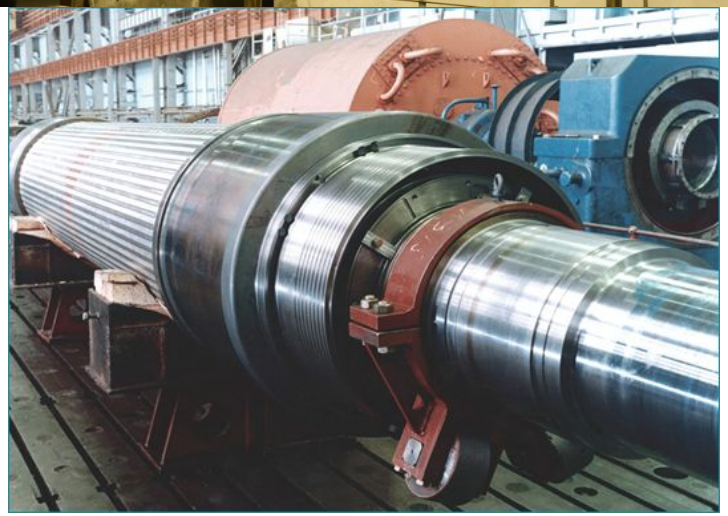


Гидрогенераторы делают с явнополюсными роторам

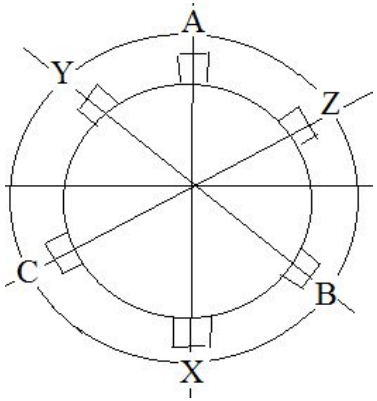


Турбогенераторы делают с неявнополюсными роторам

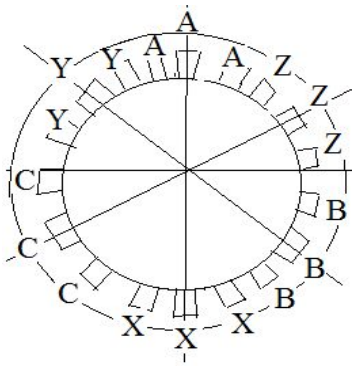




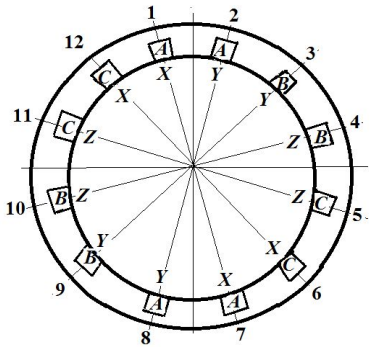
Обмотки статора машин переменного тока



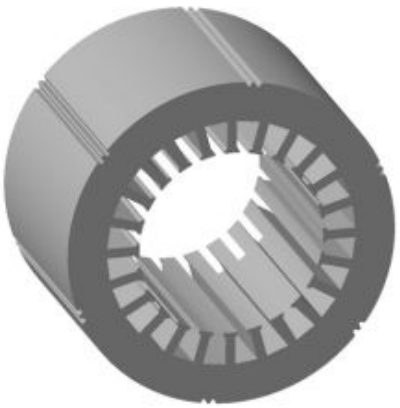
a



b



c



a – диаметральная и сосредоточенная обмотка (z_s = 6);

b – распределенная однослойная обмотка (z_s = 18);

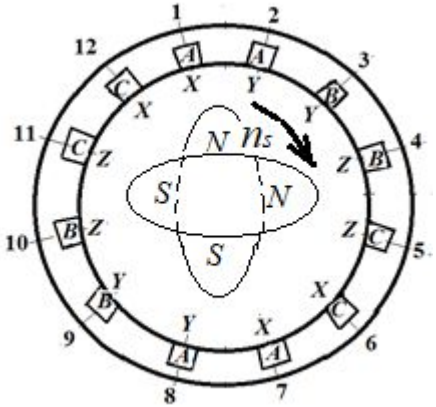
с – распределенная укороченная двухслойная обмотка (z_s = 18)

Число пазов на полюс и фазу: $q_s = \dfrac{Z_s}{2p \cdot m} = 2 \div 5$

$$n_s = \frac{60 \cdot f_s}{p} \quad \text{об/мин}$$

Это «синхронная скорость»

Создание кругового вращающегося магнитного поля



Гармоники в токе и напряжении обмотки статора

Для работы машин переменного тока нужна только первая гармоника тока для создания магнитного поля в воздушном зазоре. Но в токе появляются высшие гармоники, потому что обмотка находится в пазах. С этими гармониками надо бороться.

Способы уменьшения высших гармоник:

ν = 1 – первая (рабочая) гармоника;

ν = 2*n* (*n*=1, 2, 3, ...) – в машинах переменного тока с симметричной 3-фазной обмоткой **четные гармоники не наводятся.**

ν = 3*k*, где *k* = 1, 3, 5, …. Эти гармоники можно уничтожить, соединив их по схеме «звезда»;

ν = 11, 13, 17, 19 … – мы **пренебрегаем этими гармониками**. Они имеют небольшие амплитуды, обратно пропорциональные номеру гармоники. Например, в 11-й гармонике амплитуда равна 1/11 по сравнению с амплитудой первой гармоники.

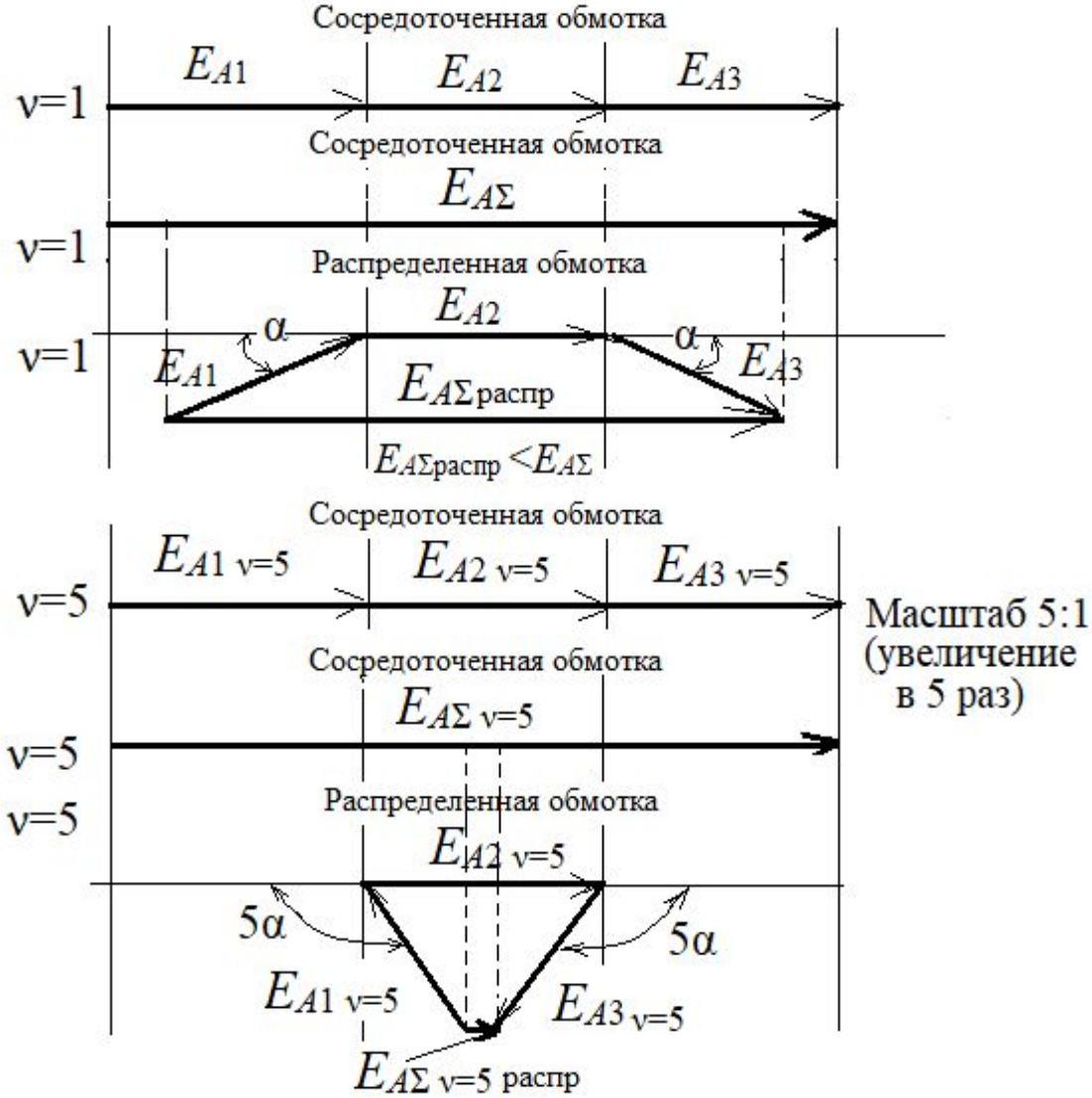
Основные проблемы ν = 5 и ν =7, и эти гармоники должны быть максимально уменьшены, а лучше – подавлены полностью.

Для уменьшения 5-й и 7-й гармоник используется РАСПРЕДЕЛЕНИЕ и УКОРОЧЕНИЕ обмоток (укорочение - только для двухслойных обмоток).

The shortening and distribution of the stator winding decrease the first EMF harmonic. For the first harmonic - it's bad, but the shortening and distribution allows you to remove the 5th and 7th harmonics, clear the first harmonic, and its shape becomes better.

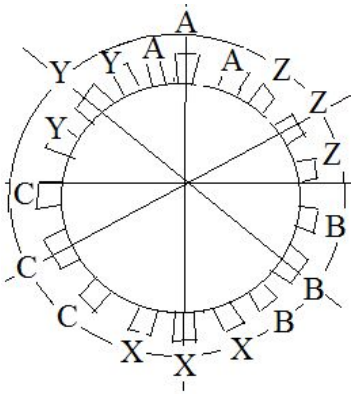
The winding factor ($K_{W\nu}$) shows how much the EMF of the shortened and distributed winding decreases compared to the diametrical and concentrated winding

Влияние распределения обмотки на уменьшение 5-й гармоники



спределение на три паза

$$q_s = \frac{Z_s}{2p \cdot m} = \frac{18}{2 \cdot 3} = 3$$



$$E_{s1} = 4{,}44 \cdot \Phi \cdot f_s \cdot N_s \cdot K_{W1}$$

ЭДС 1-й гармоники распределенной обмотки уменьшается на величину обмоточного коэффициента K_{W1}<1 по сравнению с сосредоточенной.

Обычно рассчитывают обмоточные коэффициенты для 1-й, 5-й и 7-й гармоник:

$$K_{W\nu} = K_{p.\nu} \cdot K_{d.\nu}$$

где $K_{p.\nu}$ – коэффициент распределения, объясняющий уменьшение ЭДС ν-й гармоники распределенной обмотки по сравнению с ЭДС сосредоточенной обмотки,

$$K_{p.\nu} = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \beta_s \cdot \nu\right)$$, где β_s – величина укорочения; ν – номер гармоники

$K_{d.\nu}$ - коэффициент укорочения учитывает уменьшение ЭДС ν-й гармоники приведенной обмотки по сравнению с ЭДС диаметральной обмотки.

$$K_{d.\nu} = \frac{\sin(\pi\nu / 2m)}{q_s \cdot \sin(\pi\nu / 2m \cdot q_s)}$$

где m – количество фаз; $2p$ – количество полюсов; Z_s – количество пазов статора; q_s – количество пазов на полюс и фазу $q_s = \frac{Z_s}{2p \cdot m}$

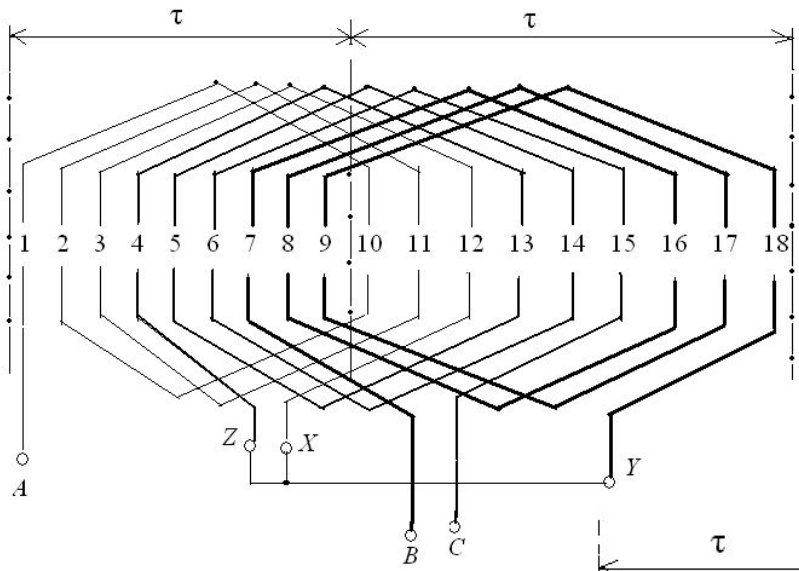
Распределение обмоток используется всегда. Укорочение обмотки применяется только для двухслойных обмоток статора. Для больших машин переменного тока обычно используются двухслойные обмотки. Первая гармоника ЭДС (ν=1) для укороченной и распределенной обмотки статора равна:

$$E_{s1} = 4{,}44 \cdot \Phi \cdot f_s \cdot N_s \cdot K_{W1}$$

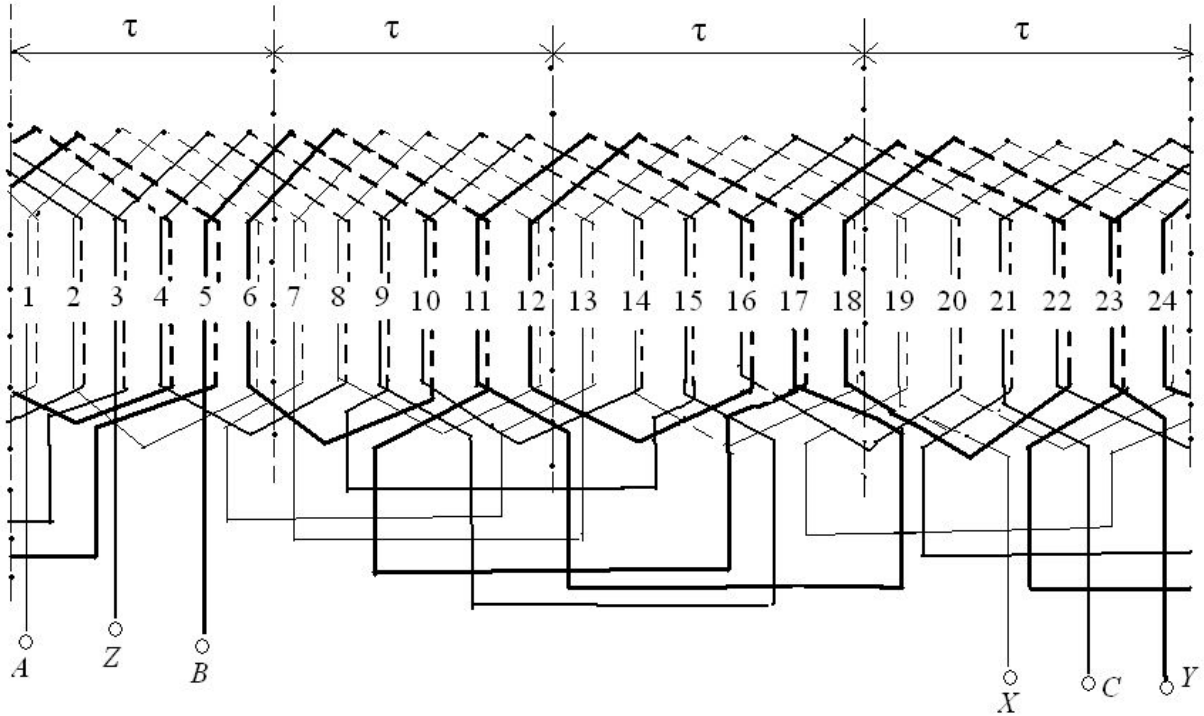
где $K_{W1} = K_{p1} \cdot K_{d1}$ - обмоточный коэффициент первой (рабочей) гармоники

$$K_{W1} < 1$$

Схемы обмотки статора



Трехфазная однослойная распределенная обмотка Z_s=18; $2p$=2; q_s=3
Соединение обмотки – «звезда»



Трехфазная двухслойная распределенная и укороченная на один паз обмотка
Z_s=24; $2p$=4; q_s=2
Соединение обмотки – не показано