

# 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  $E = -w \cdot \frac{d\Phi}{dt}, V$

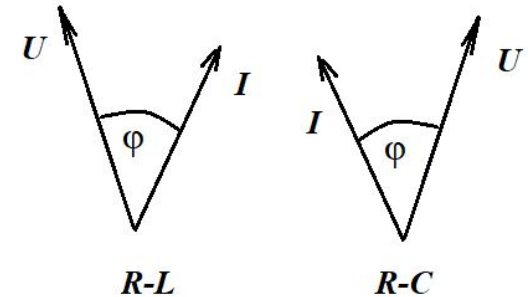
где  $w$  – число витков.  $\frac{d\Phi}{dt}$  – скорость изменения магнитного потока

## 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

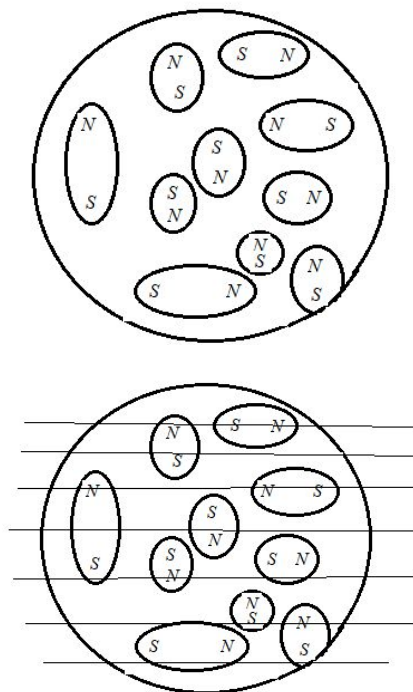
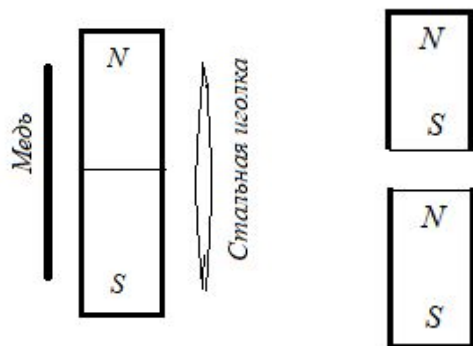
3. Механические потери - const

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

$$P_{mag} \sim f^\beta \quad \text{где } \beta = 1,6 - 2,0$$



**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**

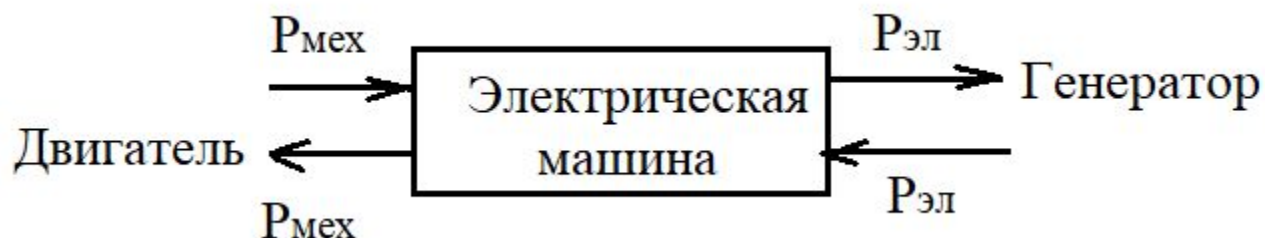
1012, 1124, 1213, 1411 .....  
 2013, 2212, 2314, 2414 .....  
 3011, 3112, 3311, 3412 .....

Класс нагревостойкости	Температура нагрева $t, ^\circ\text{C}$	Превышение температуры нагрева $\Delta t, ^\circ\text{C}$
B	135	95
F	155	115
H	180	140
C*	>180	-
200	200	160
300	300	260

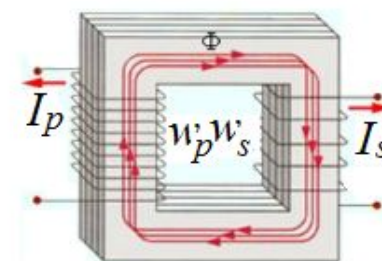
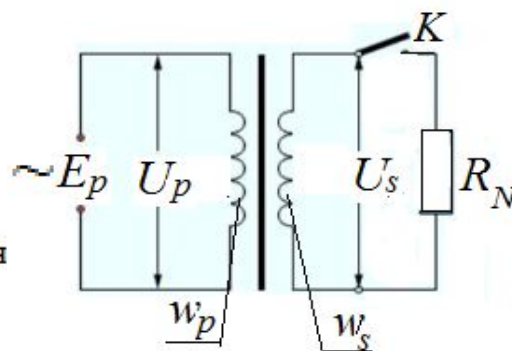
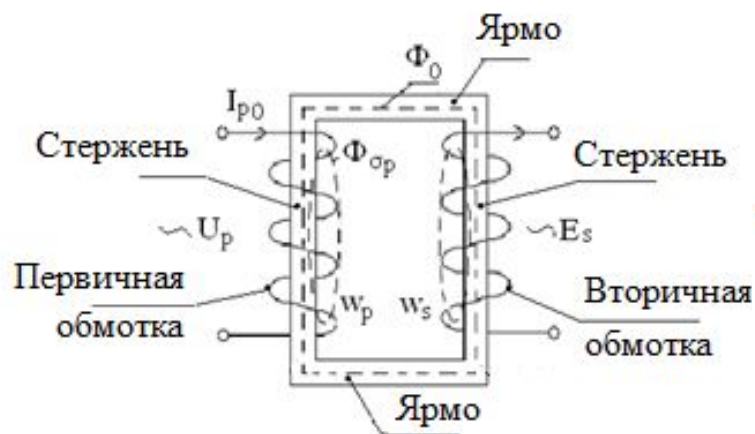
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma P_i}{P_1}, \text{ о. е. или } * 100\%$$

# 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

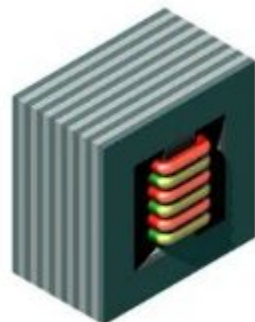
Если  $k_{tr} > 1$  – понижающий трансформатор

# Классификация трансформаторов

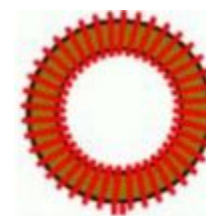
1. По назначению: промышленные, измерительные, специальные.
2. По количеству фаз: одно- и многофазные (обычно трехфазные).
3. По конструкции сердечника



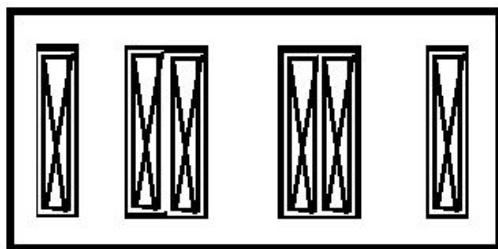
Стержневой



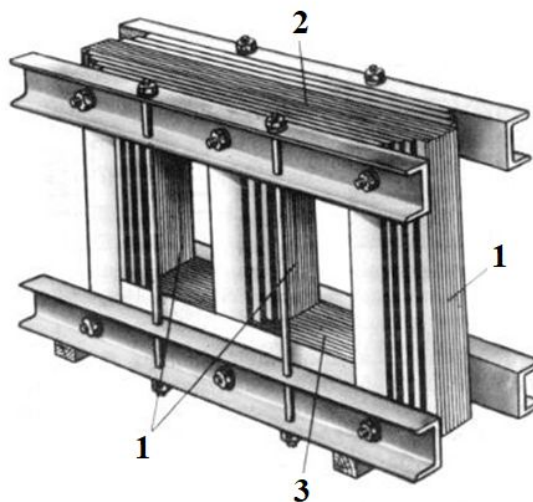
броневой



Тороидальный

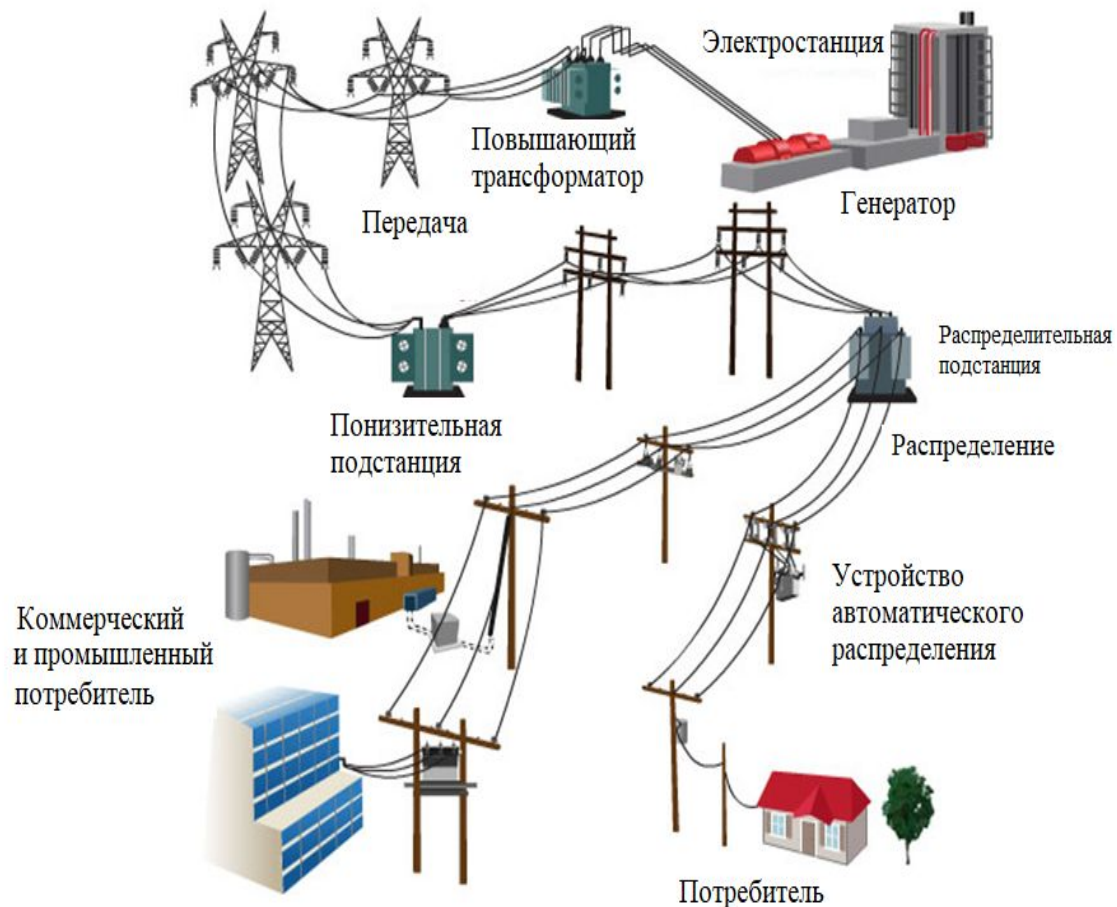


Броне-стержневой трех-  
фазный трансформатор



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

# Производство, передача, распределение и потребление электроэнергии



Три однофазных трансформатора возле блока АЭС

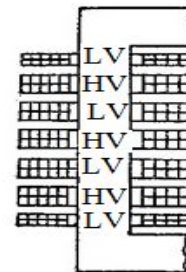
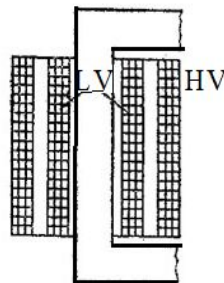
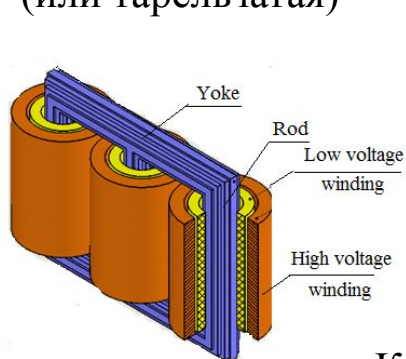


Однофазный трансформатор рядом с энергоблоком ТЭС



## Классификация трансформаторов (продолжение)

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



Дисковая (или «тарельчатая») конструкция.

Концентрические обмотки

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



Сухие трансформаторы (с воздушным охлаждением)



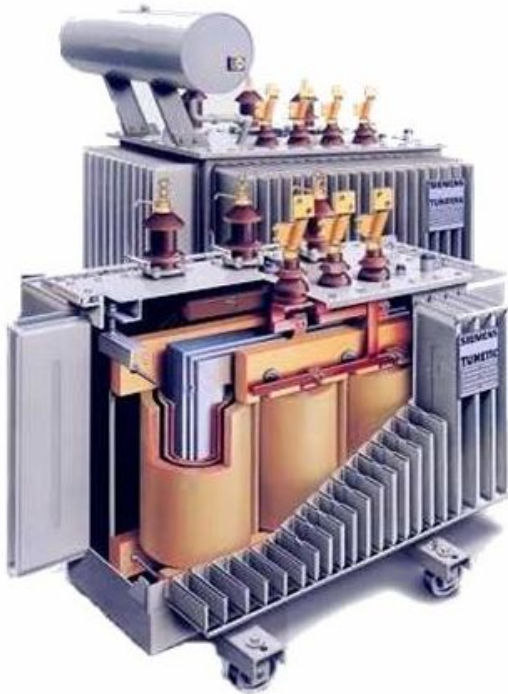
Конструкция с расширительным бачком



Конструкция без расширительного бачка

Трансформаторы с масляным охлаждением

## Трансформаторы с масляным охлаждением



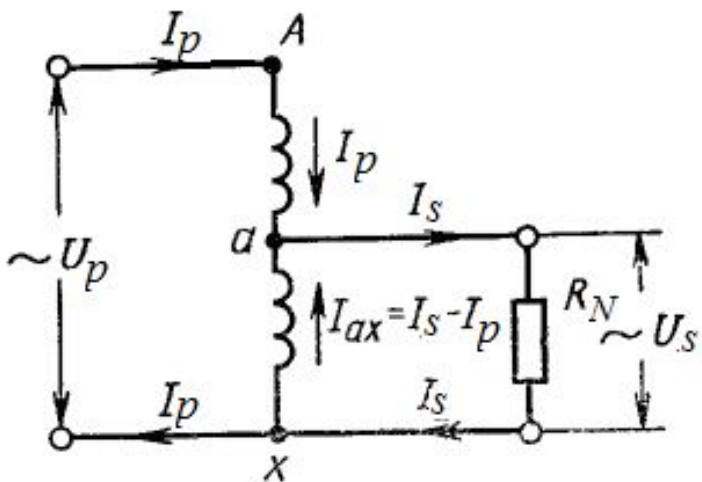
Основная особенность масляных трансформаторов заключается в том, что магнитопровод с обмотками размещается в баке, предварительно заполненном трансформаторным маслом.

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.

## 6. Классификация по количеству обмоток на фазу:

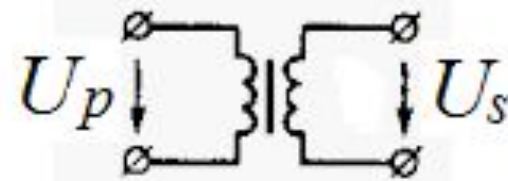
- с одной обмоткой - автотрансформаторы. Используются для соединения линий электропередачи с разным напряжением.



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

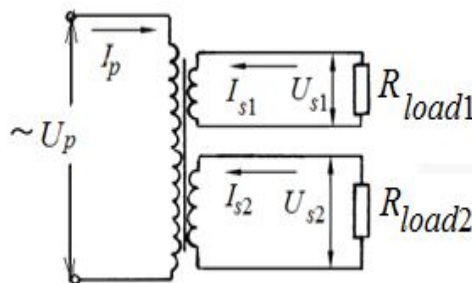
Небольшие автотрансформаторы используются в лабораториях для регулирования напряжения ЛАТР.

С двумя обмотками



С тремя обмотками

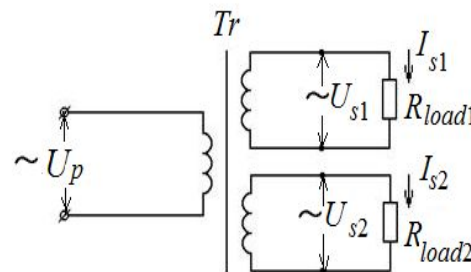
С одной первичной обмоткой и двумя вторичными обмотками с разным напряжением



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

Это трансформатор называется трансформатор с тремя обмотками

С одной первичной обмоткой и двумя вторичными обмотками с одинаковым напряжением



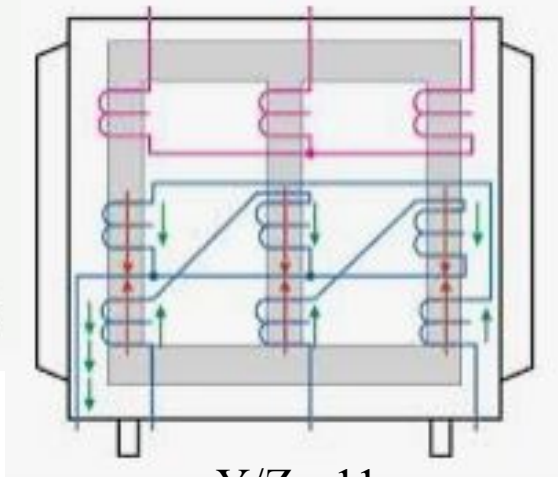
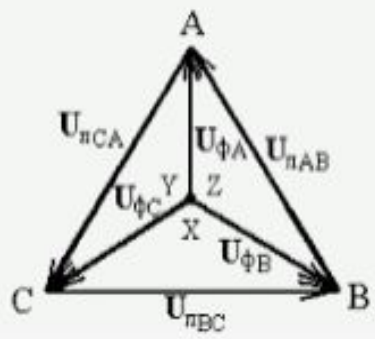
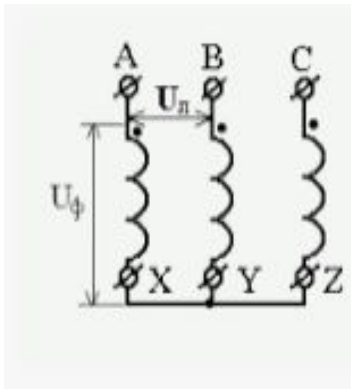
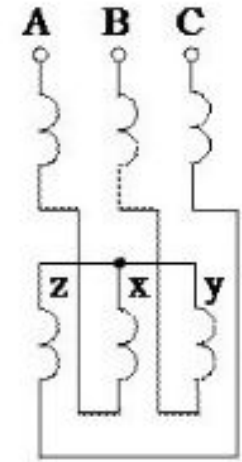
$$U_{s1} = U_{s2}$$

Это трансформатор называется трансформатор с расщепленной обмоткой

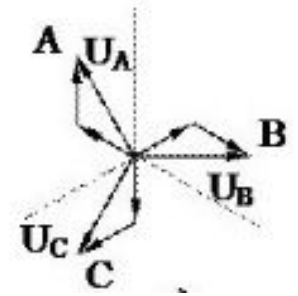


# Схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов

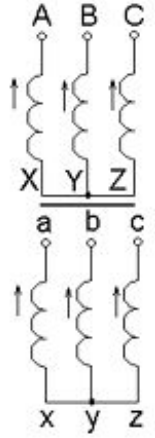
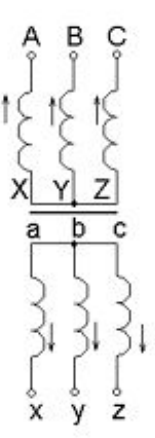
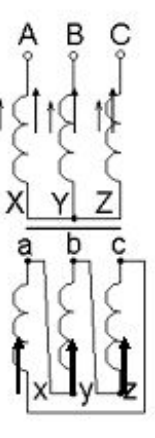
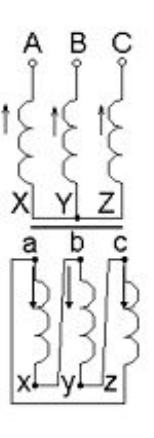
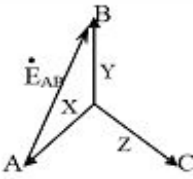
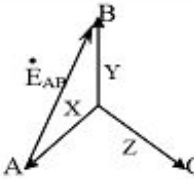
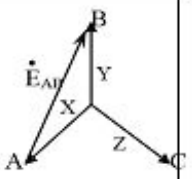
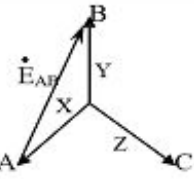
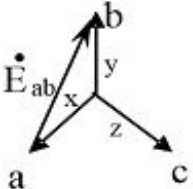
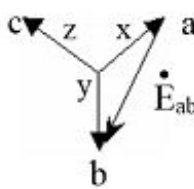
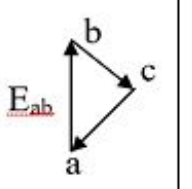
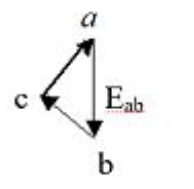

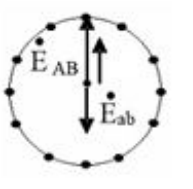
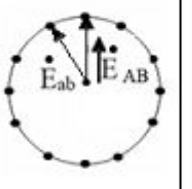
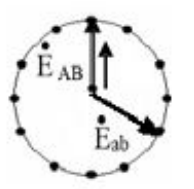
Схема соединения обмоток		Диаграмма векторов напряжения в режиме холостого хода		Условное обозначение
ВН	НН	ВН	НН	
				$\Delta/Y-11$ $\Delta/Y_0-11$



Y/Z - 11



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 обмотк можно создать 12 групп. Согласно ГОСТу, используют:  $Y/Y_0-0$  (старое обозначение – «12»)  $Y/\Delta -11$ ;  $Y_0/\Delta-11$

<p>Схема соединения обмоток трехфазного трансформатора</p> 			
<p>Векторная диаграмма ЭДС первичной обмотки</p> 			
<p>Векторная диаграмма ЭДС вторичной обмотки</p> 			
<p>Схема установления группы соединения обмоток</p> 			
<p>Обозначение схемы и группы</p>	<p><math>Y/Y - 0</math></p>	<p><math>Y/\Delta - 11</math></p>	<p><math>Y/\Delta - 5</math></p>

## 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.

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

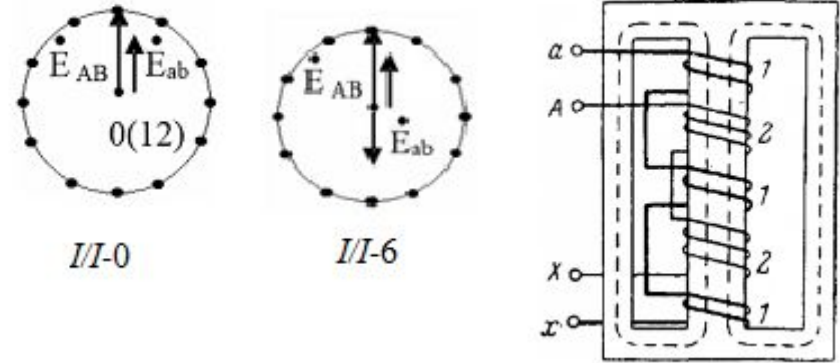
Реальные:  $E_s, I_s, U_s, Z_s, X_s, L_s, w_s$

Приведенные:  $E'_s, I'_s, U'_s, Z'_s, X'_s, L'_s, w'_s$

Приведенные значения

$$E'_s = E_p \quad E'_s = kE_s \quad U'_s = \frac{U_s \cdot I_s}{I'_s} = \frac{U_s \cdot I_s}{I_s} \cdot k = U_s \cdot k$$

$$I'_s = \frac{E_s I_s}{E'_s} = \frac{E_s \cdot I_s}{kE_s} = \frac{I_s}{k} \quad r'_s = \frac{I_s^2 \cdot r_s}{I'^2_s} = \frac{I_s^2 \cdot r_s}{\frac{I_s^2}{k^2}} = k^2 \cdot r_s$$



Коэффициент трансформации

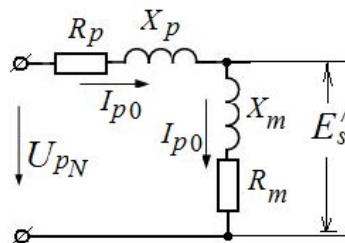
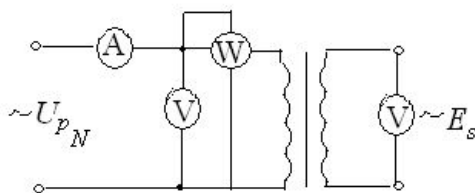
$$k = \frac{E_p}{E_s}$$

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)  $P_0 = P_{mag} \cdot \text{const}$

2) Коэффициент мощности в режиме холостого хода

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{m \cdot U_{pN} \cdot I_{p0}}$$

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:

$$U_{pN} = -E_p + I_{p0}a + jI_{p0}r;$$

$$I_{p0} = I_{p0}a + jI_{p0}r;$$

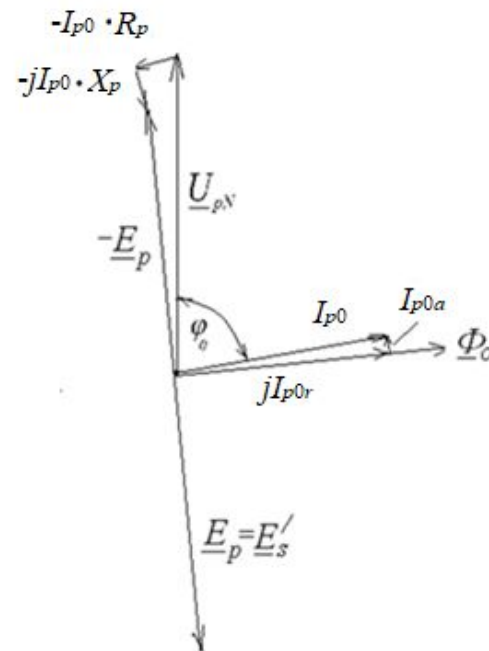
$$E_p = E_s'$$

Преобразуем первое уравнение:  $-E_p = U_{pN} - I_{p0}a - jI_{p0}r$

$$-E_p = U_{pN} - I_{p0}a - jI_{p0}r;$$

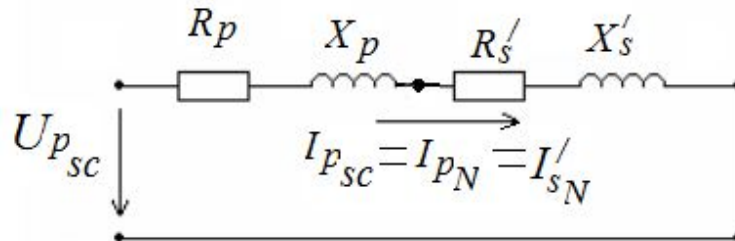
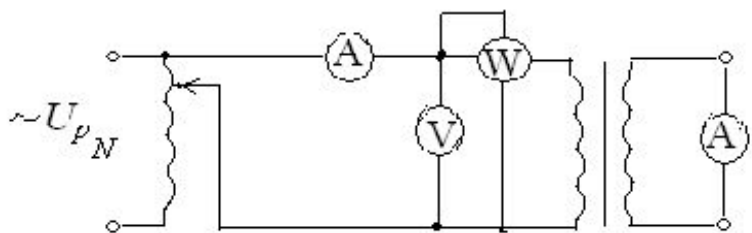
$$I_{p0} = I_{p0}a + jI_{p0}r;$$

$$E_p = E_s'$$





## Опыт лабораторного короткого замыкания

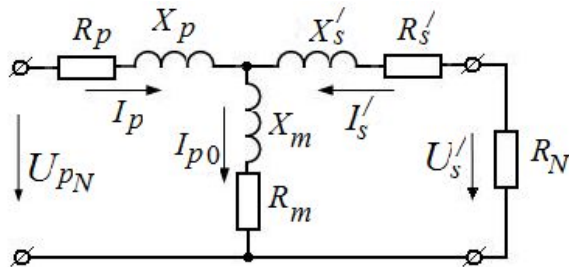


1. Номинальные электрические потери  $P_K$  – по ваттметру.
2. Коэффициент мощности режима лабораторного короткого замыкания  $\cos\varphi_k = \frac{P_k}{m \cdot U_{pk} \cdot I_{pN}}$
3. Напряжение короткого замыкания  $u_k$ , в %  $u_k = \frac{U_{pk}}{U_{pN}} \cdot 100\%$   
 $U_{pk}$  – напряжение лабораторного КЗ по вольтметру, В.  
 $U_{pN}$  – номинальное напряжение первичной обмотки, В.
4. Параметры схемы замещения трансформатора в режиме лабораторного КЗ

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = \frac{U_{pk}}{I_{pN}} \quad R_k = R_p + R'_s = \frac{P_k}{m \cdot I_{pN}^2} \quad X_k = X_p + X'_s = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad R_p = R'_s = \frac{R_k}{2} \quad X_p = X'_s = \frac{X_k}{2}$$

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

### Схема замещения трансформатора в номинальном режиме



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

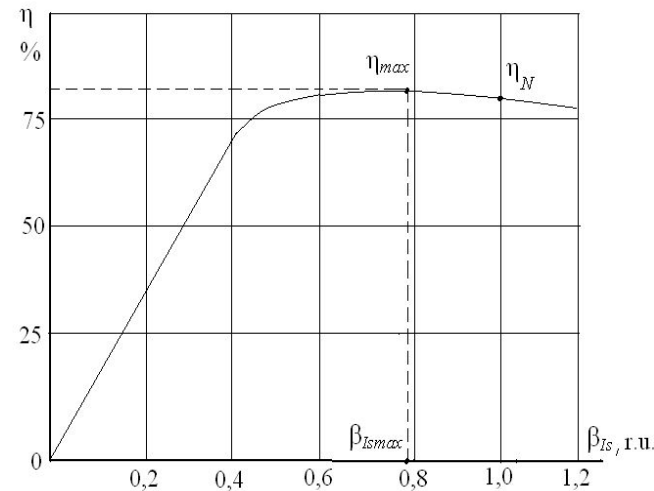
$$\eta_N = 1 - \frac{P_0 + \beta_{Is}^2 P_k}{\beta_{Is} \cdot S_N \cdot \cos \varphi_s + P_0 + \beta_{Is}^2 \cdot P_k}$$

Коэффициент нагрузки трансформатора

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

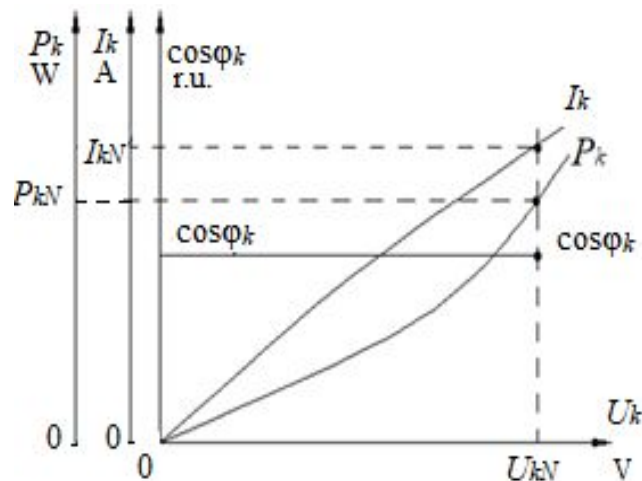
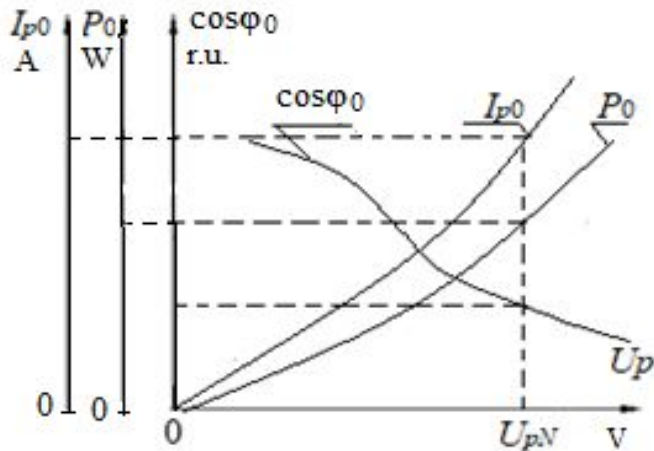
В номинальном режиме  $\beta_{Is} = 1$

$$\beta_{Is \max} = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}} \quad \eta_{\max} = 1 - \frac{P_0 + \beta_{Is \max}^2 \cdot P_k}{\beta_{Is \max} \cdot S_N \cdot \cos \varphi_s + P_0 + \beta_{Is \max}^2 \cdot P_k}$$



**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  $K_{tr1} = K_{tr2} = \dots = K_{tri}$ , где  $i$  – количество трансформаторов.

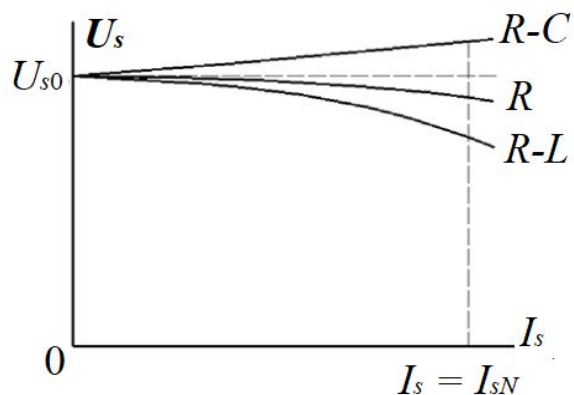
3. Трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения КЗ  $u_{k1} = u_{k2} = \dots = u_{ki}$ .

**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.

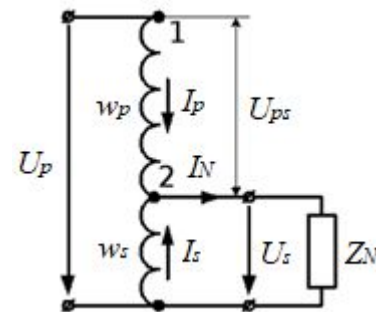
Если мощности трансформаторов разные, напряжения КЗ  $u_k$  должно отличаться. Для трансформатора с меньшей мощностью напряжение КЗ должно быть больше.

### Внешняя характеристика

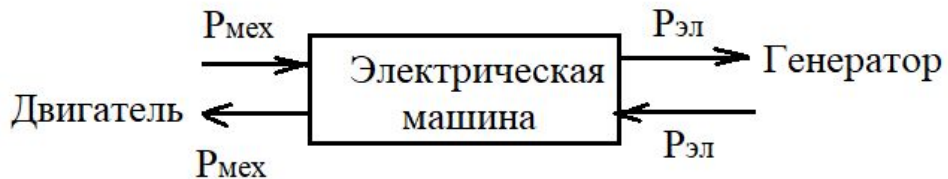
трансформатора  $U_s = f(I_s)$



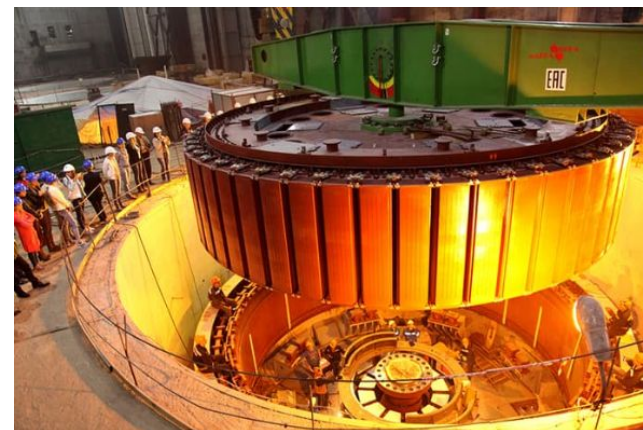
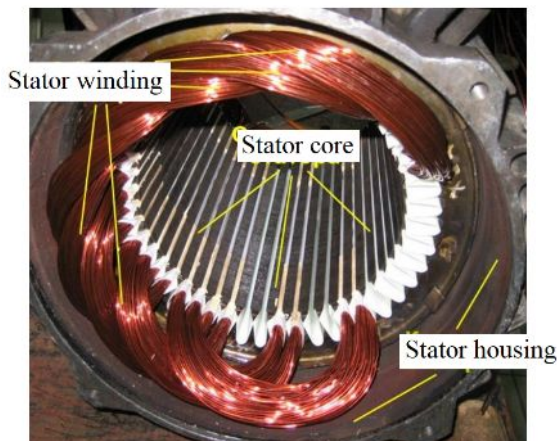
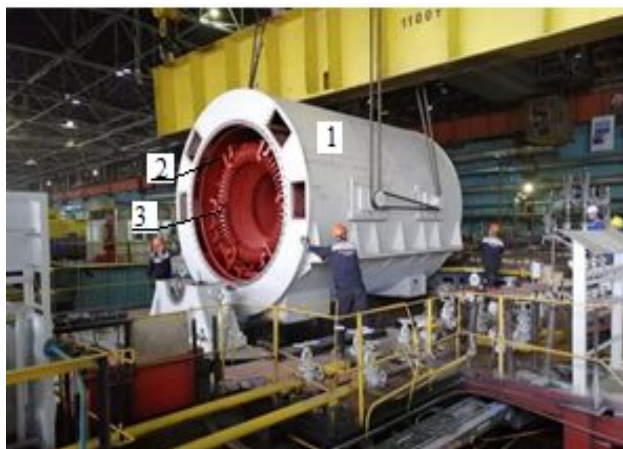
### АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ



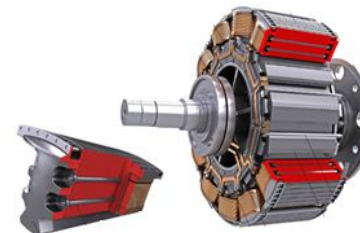
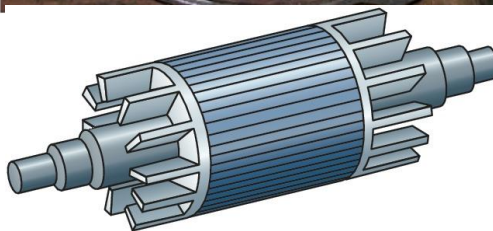
$$k_{trAT} = \frac{E_p}{E_s} = \frac{w_p}{w_s} < 2 \div 2,3$$



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

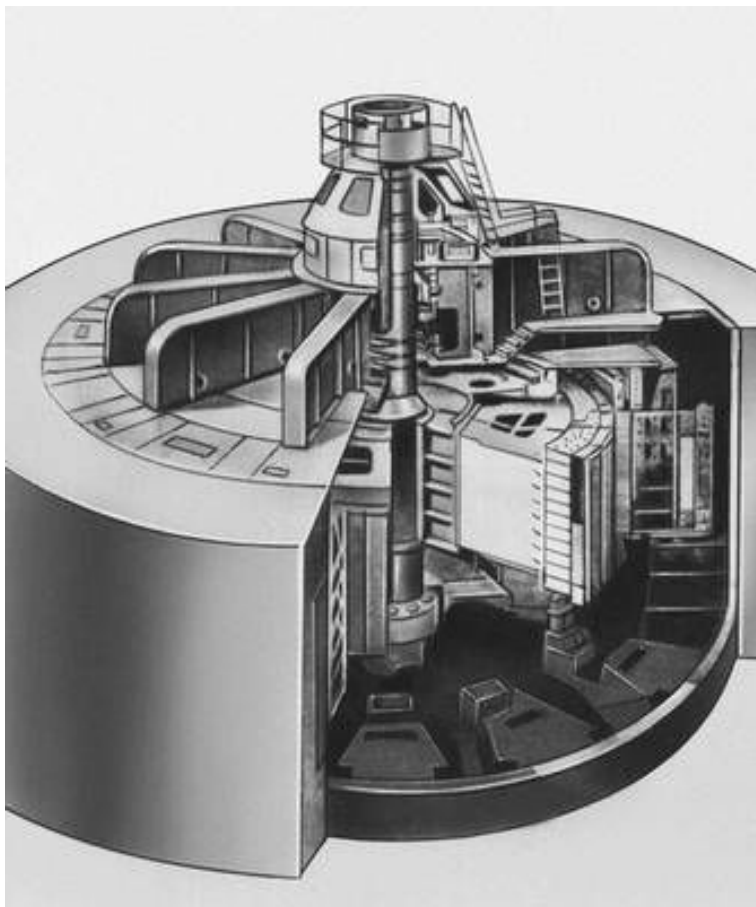


Ротор турбогенератора ТВ-325-2АУ3 на участке сборки

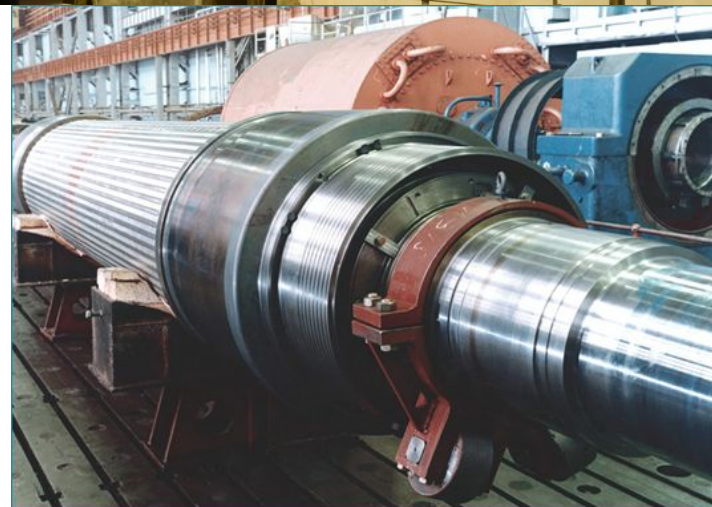
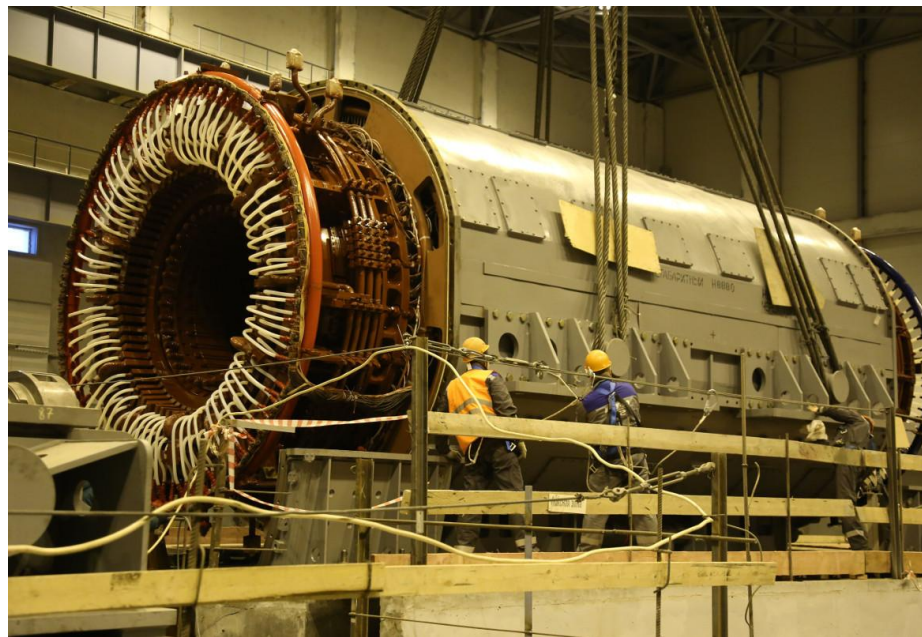




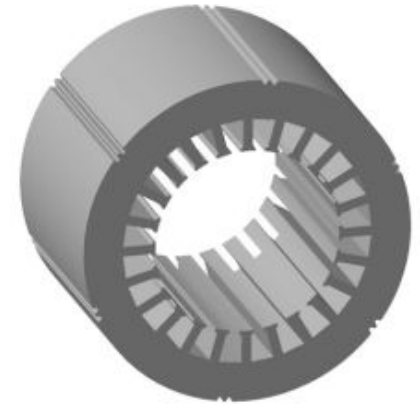
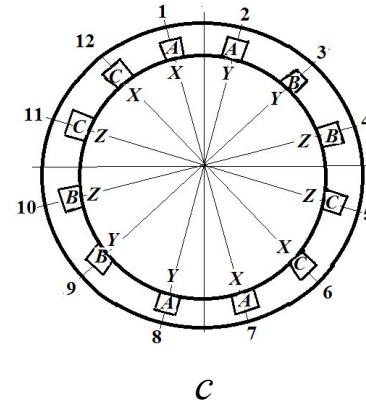
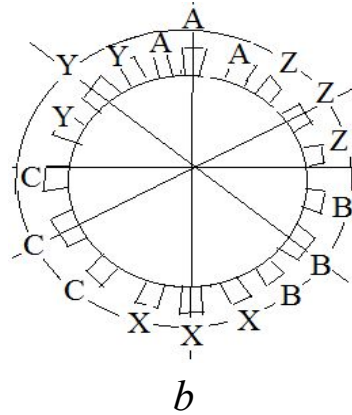
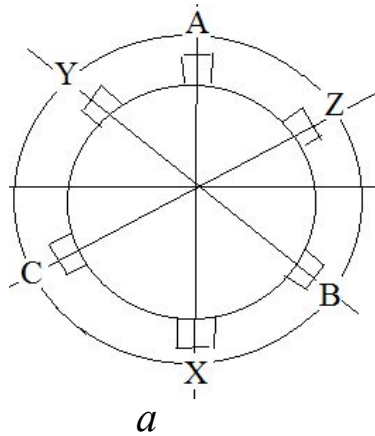
**Гидрогенераторы делают  
с явнополюсными роторам**



**Турбогенераторы делают  
с неявнополюсными роторам**



## Обмотки статора машин переменного тока



*a* – диаметральной и сосредоточенная обмотка ( $z_s = 6$ );

*b* – распределенная однослойная обмотка ( $z_s = 18$ );

*c* – распределенная укороченная двухслойная обмотка ( $z_s = 18$ )

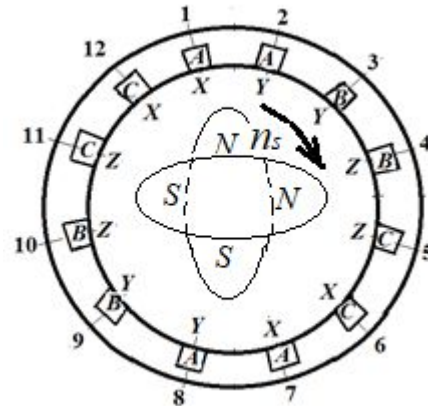
Число пазов на полюс

и фазу:  $q_s = \frac{Z_s}{2p \cdot m} = 2 \div 5$

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

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:

$\nu = 1$  – первая (рабочая) гармоника;

$\nu = 2n$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) – в машинах переменного тока с симметричной 3-фазной обмоткой четные гармоники не наводятся.

$\nu = 3k$ , где  $k = 1, 3, 5, \dots$  Эти гармоники можно уничтожить, соединив их по схеме «звезда»;

$\nu = 11, 13, 17, 19 \dots$  – 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.

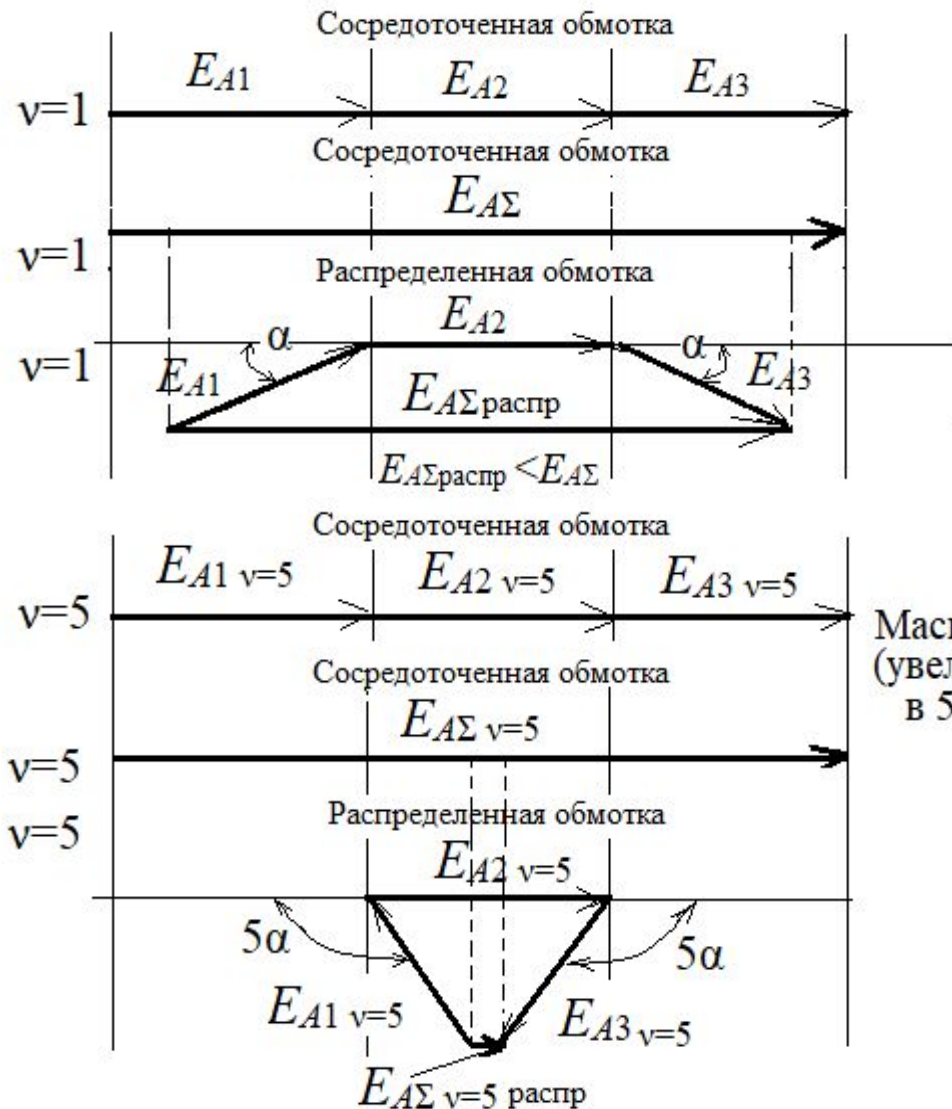
**Основные проблемы  $\nu = 5$  и  $\nu = 7$** , и эти гармоники должны быть максимально уменьшены, а лучше – подавлены полностью.

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**

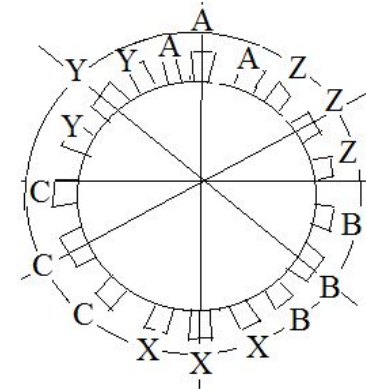
# Влияние распределения обмотки на уменьшение 5-й гармоники



Масштаб 5:1  
(увеличение в 5 раз)

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  $\nu$ -й гармоники распределенной обмотки по сравнению с ЭДС сосредоточенной обмотки,

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

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

$$K_{d,\nu} = \frac{\sin(\pi\nu/2m)}{q_s \cdot \sin(\pi\nu/2m \cdot q_s)} \quad \text{где } m \text{ – количество фаз; } 2p \text{ – количество полюсов; } Z_s \text{ – количество пазов статора; } q_s \text{ – количество пазов на полюс и фазу}$$

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

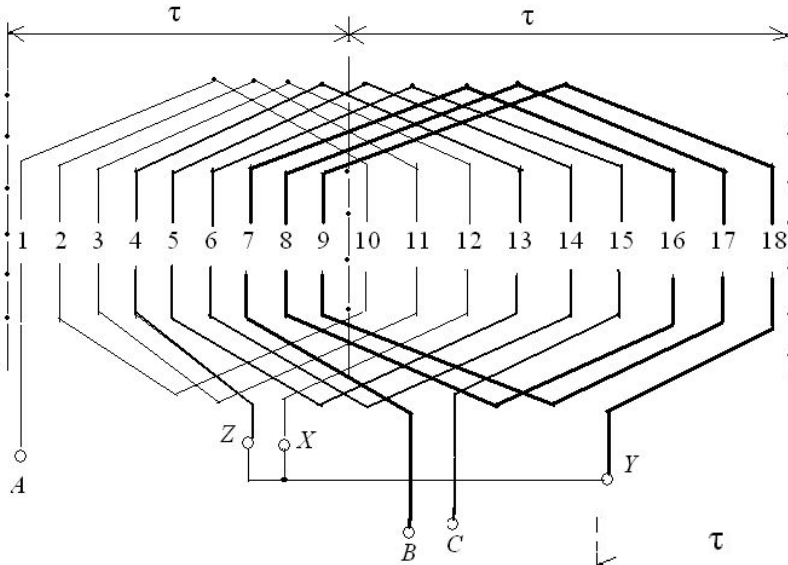
**Распределение обмоток используется всегда.** Укорочение обмотки применяется только для двухслойных обмоток статора. Для больших машин переменного тока обычно используются двухслойные обмотки. Первая гармоника ЭДС ( $\nu=1$ ) для укороченной и распределенной обмотки статора равна:

$$E_{s1} = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_s \cdot N_s \cdot K_{W1} \quad \text{где } K_{W1} = K_{p1} \cdot K_{d1} \text{ – обмоточный коэффициент первой (рабочей) гармоники}$$

$$K_{W1} < 1$$

## 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

