



СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



**ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ и ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

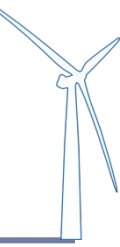
Тема лекции

**«ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ КОРАБЛЕЙ»**

**Машины переменного тока**

**к.т.н., доцент Шайтор Николай Михайлович**





## Вопросы лекции

- 1. ПОНЯТИЕ О ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ**
- 2. СИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ**





## РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА по разделу 5 «Электрооборудование кораблей»

1. Яковлев Г.С. Судовые электроэнергетические системы. –Л: Судостроение, - 1967. – 387с.
2. Вилесов Д.В., Краснов В.В., Мещанинов П.А. и др. Электрооборудование судов. – Л.: Судостроение, 1982 – 264с.
3. Онищенко Г.Б. Электрический привод. – М.: Академия, 2006 – 288с.
4. Чекунов К.А. Судовые электроприводы и электродвижение судов. – Л.: Судостроение, 1986 – 352с.
5. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего применения.
6. Справочник судового электротехника. Под редакцией Г.И. Китаенко, том 2 –Л.: судостроение, 1980 – 623с.
7. Электрическая защита судового электрооборудования. Колязин Е.А. и др. – Л.: судостроение, 1983 – 283с.





# 1. ПОНЯТИЕ О ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

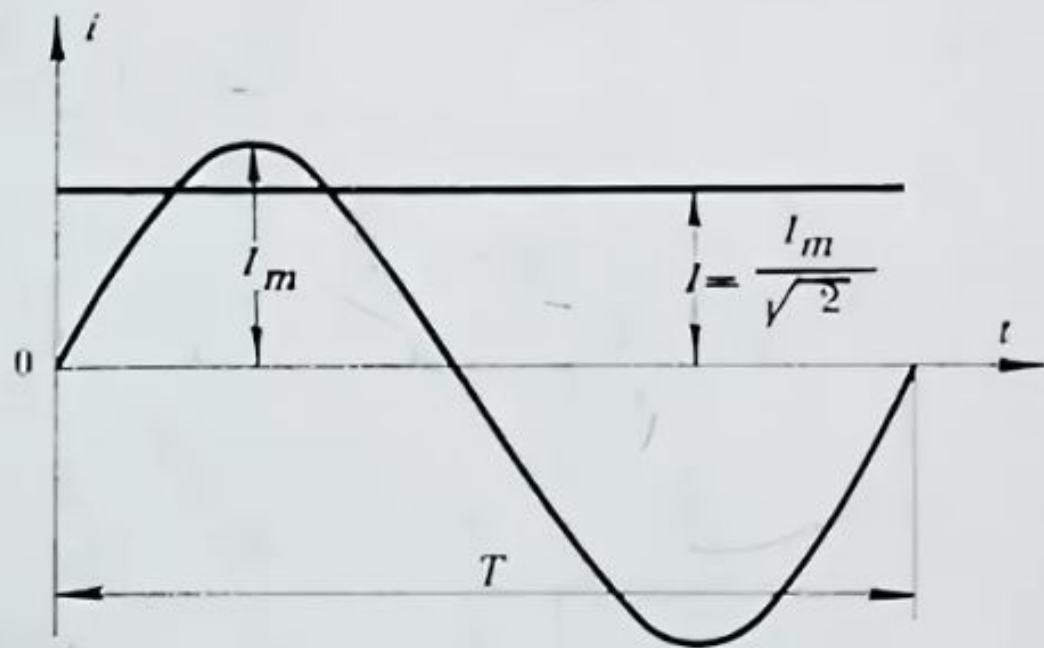


## Действующее значение тока и напряжения

Действующее значение переменного тока равно значению такого эквивалентного постоянного тока, который, проходя через то же сопротивление, что и переменный ток, выделяет в нем за период то же количество тепла.

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 I_m$$

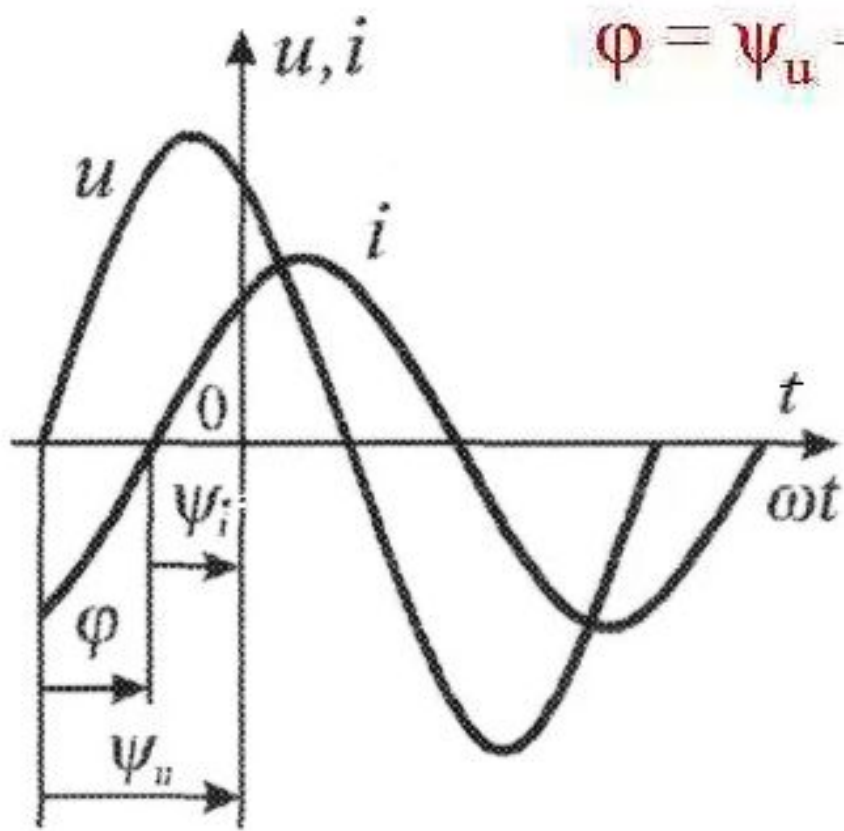
$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 U_m$$



Действующее значение  
синусоидального переменного тока

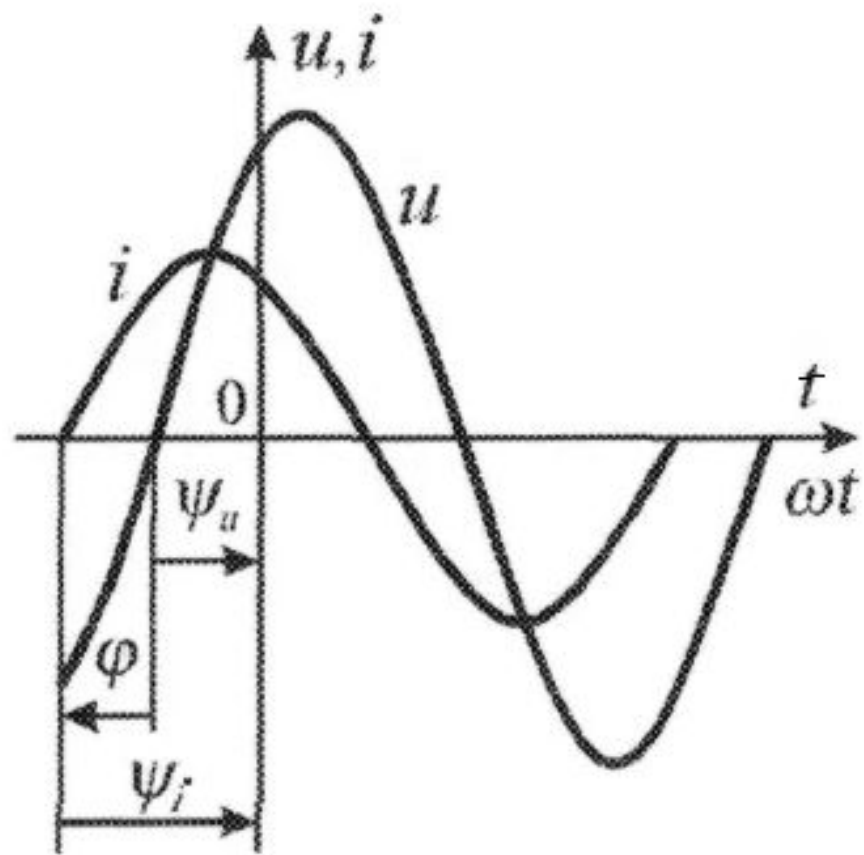
Начальная фаза тока (ЭДС, напряжения)  $\psi_i, \psi_e, \psi_u$  — это значение фазы в момент времени  $t = 0$ .

Разность начальных фаз двух синусоидальных величин одной и той же частоты называют **сдвигом фаз**.

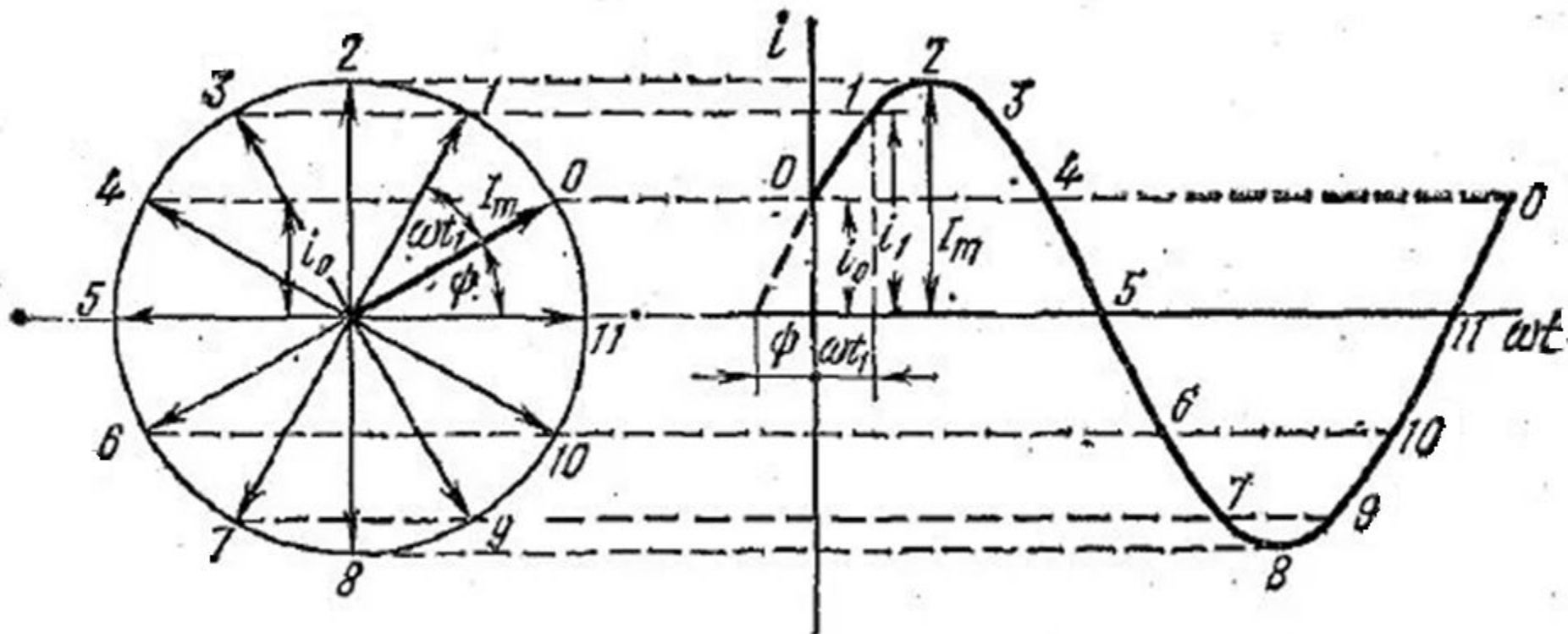
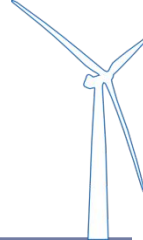


a)

$$\varphi = \psi_u - \psi_i$$



б)



К вопросу о векторной диаграмме

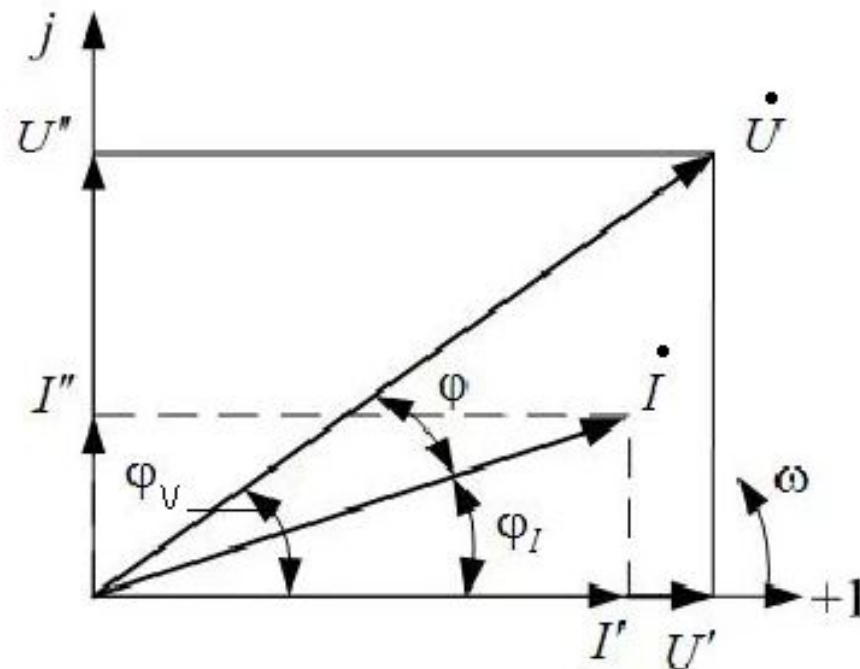


Векторы напряжения и тока на комплексной плоскости можно представить в виде :

$$\dot{U} = U' + jU'' ,$$

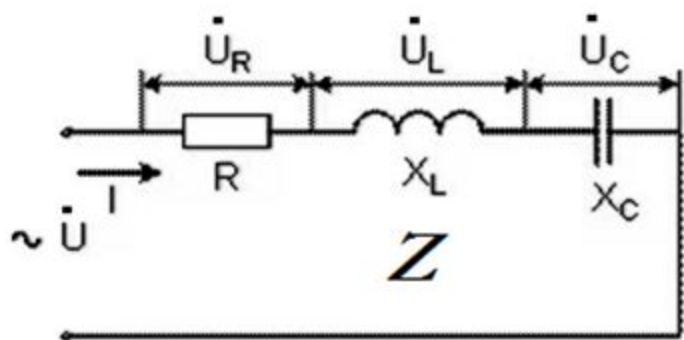
$$\dot{I} = I' + jI'' ,$$

где  $U', I'$  - вещественные составляющие напряжения и тока,  $U'', I''$  - мнимые составляющие напряжения и тока.



*Изображение векторов  $\dot{U}, \dot{I}$  на комплексной плоскости*





$R$  — активное сопротивление

$X_L = \omega L$  — индуктивное сопротивление

$X_C = \frac{1}{\omega C}$  — емкостное сопротивление

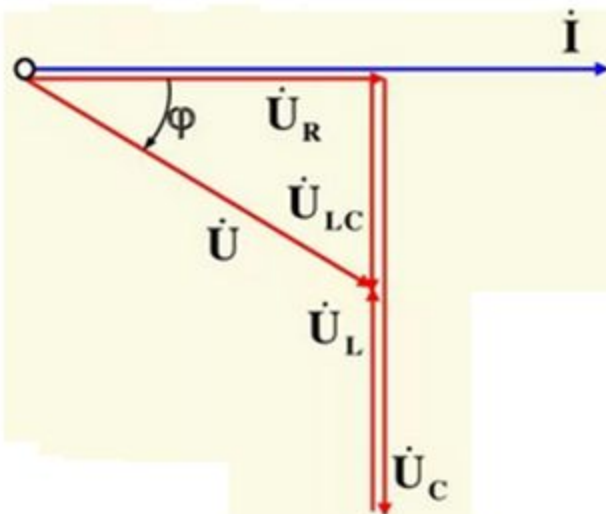
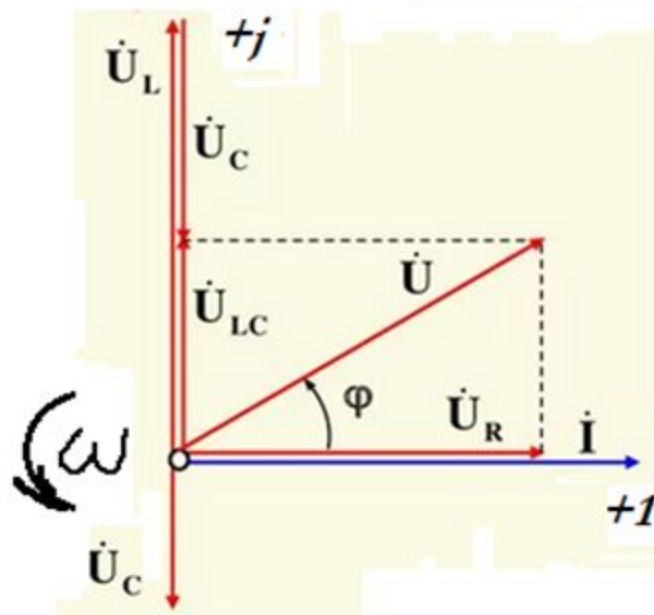
$X = X_L - X_C$  — реактивное сопротивление

$Z = \sqrt{X^2 + R^2}$  полное сопротивление

$\omega = 2\pi f$  — угловая частота тока

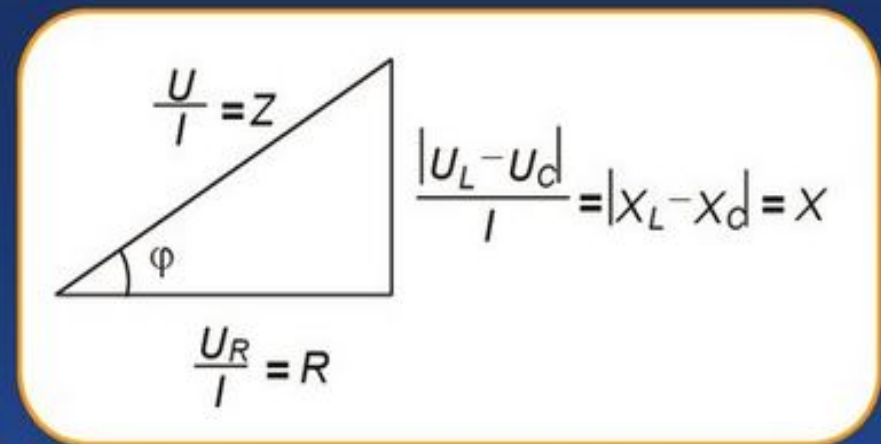
1

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = \dot{U}_R + \dot{U}_{LC}$$



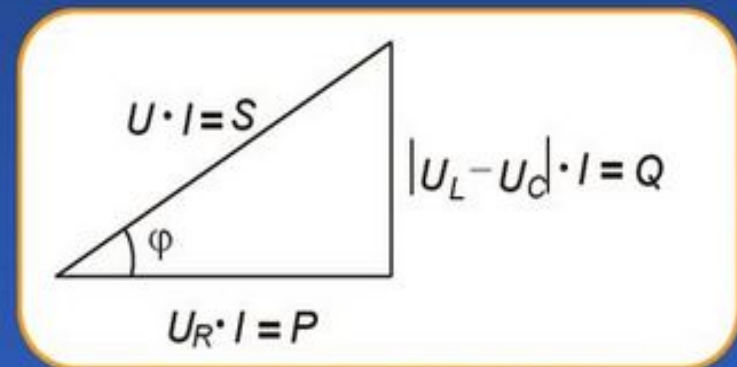
## Треугольники сопротивлений и мощностей

Если разделить все стороны треугольника напряжений на ток  $I$ , получим подобный ему треугольник сопротивлений.



$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \quad \varphi = \text{Arc tg} \frac{X}{R}, \quad R = Z \cdot \cos\varphi, \quad X = Z \cdot \sin\varphi.$$

Умножением всех сторон треугольника напряжений на ток, получаем треугольник мощностей.



Активная мощность, Вт:

$$P = U_R \cdot I = R \cdot I^2 = U \cdot I \cdot \cos\varphi.$$

Реактивная мощность, вар:

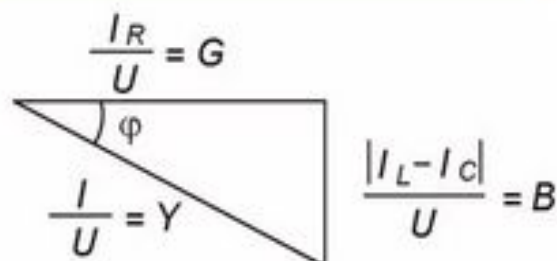
$$Q = |U_L - U_C| \cdot I = X \cdot I^2 = U I \sin\varphi.$$

Полная (кажущаяся) мощность, ВА:

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

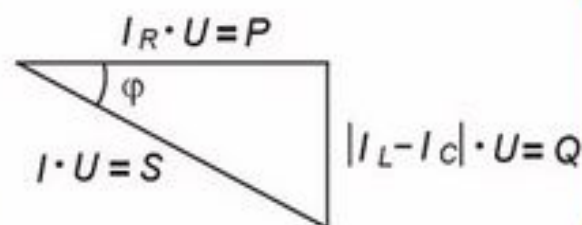
## Треугольники сопротивлений и мощностей

Разделив все стороны треугольника токов на напряжение, получим подобный ему треугольник проводимостей.



$$Y = \sqrt{G^2 + B^2}, \quad G = Y \cos \varphi, \quad B = Y \sin \varphi, \quad \varphi = \text{Arc tg} \frac{B}{G}, \quad Y = \sqrt{(\sum G)^2 + (\sum B_L - \sum B_C)^2}.$$

Умножив все стороны треугольника токов на напряжение, получим треугольник мощностей.



Комплексная проводимость – это величина, обратная комплексному сопротивлению:

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{R + jX}, \quad \underline{Y} = \frac{R - jX}{(R + jX)(R - jX)} = \frac{R - jX}{R^2 + X^2} = \frac{R}{R^2 + X^2} - j \frac{X}{R^2 + X^2}$$

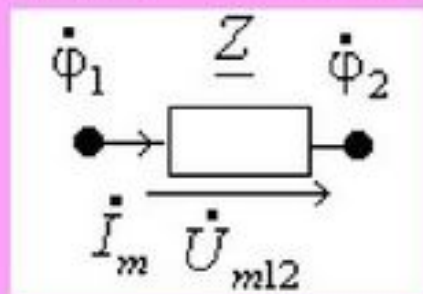
# 1.3. Комплексное сопротивление элемента (участка цепи)

• Под комплексным сопротивлением элемента понимают отношения комплексной амплитуды входного напряжения к комплексной амплитуде входного тока:

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}_{1m}}{\dot{I}_{1m}} = Z \cdot e^{j\varphi_Z(\omega)} = R + jX$$

$R$  – активное (резистивное) сопротивление,  $X$  – реактивное сопротивление,  $Z = (R^2 + X^2)^{1/2}$  – модуль комплексного сопротивления или полное сопротивление

$\varphi = \psi_u - \psi_i = \arctg(X/R)$  – аргумент или начальная фаза комплексного сопротивления



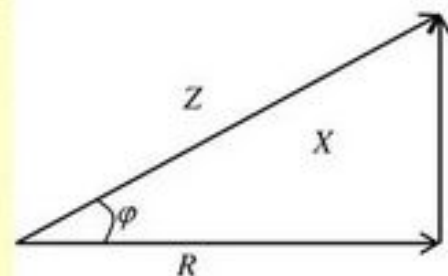
Взаимосвязь между полным, активным и реактивным сопротивлением графически представляется векторной диаграммой в виде «*треугольника сопротивления*».

По виду записи комплексного сопротивления можно судить о характере участка цепи:

$\underline{Z} = R$  – активное (резистивное) сопротивление;

$\underline{Z} = R + jX$  — активно-индуктивное сопротивление;

$\underline{Z} = R - jX$  — активно-емкостное.



Комплексное сопротивление  
(полное)

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = z \cdot e^{j\varphi}$$

$$Z = z \cdot \cos \varphi + j \cdot z \cdot \sin \varphi$$

$$Z = r + j \cdot x$$

$r$  - активное сопротивление  
 $x$  - реактивное сопротивление  
 $z$  - полное сопротивление

Комплексная проводимость  
(полная)

$$Y = \frac{\dot{I}}{\dot{U}} = \frac{1}{z \cdot e^{j\varphi}} = y \cdot e^{-j\varphi}$$

$$Y = y \cdot \cos \varphi - j \cdot y \cdot \sin \varphi$$

$$Y = g + j \cdot b$$

$g$  - активная проводимость  
 $b$  - реактивная проводимость  
 $y$  - полная проводимость

**Закон Ома  
в комплексной форме**

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z}$$

$$\dot{U} = \frac{\dot{I}}{Y}$$

$$\dot{U} = \dot{I} \cdot Z$$

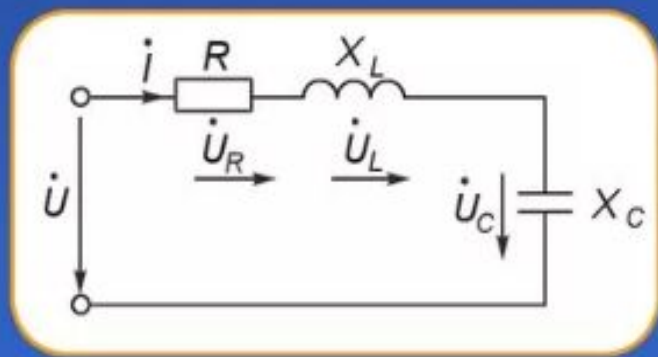
$$\dot{I} = \dot{U} \cdot Y$$

В цепях переменного тока закон Ома выполняется для всех значений, законы Кирхгофа – только для мгновенных и комплексных, которые учитывают фазные соотношения.

Первый закон Кирхгофа:  $\sum_{k=1}^n i_k = 0, \quad \sum_{k=1}^n \dot{I}_k = 0.$

Второй закон Кирхгофа:  $\sum_{i=1}^m u_i = \sum_{j=1}^l e_j, \quad \sum_{i=1}^m \dot{U}_i = \sum_{j=1}^l \dot{E}_j.$

Закон Ома в комплексной форме:  $\dot{U} = \underline{Z} \dot{I}.$



$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C,$$

$$\dot{U} = R\dot{I} + jX_L\dot{I} - jX_C\dot{I} = [R + j(X_L - X_C)]\dot{I} = \underline{Z}\dot{I},$$

$$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C) = R + jX.$$

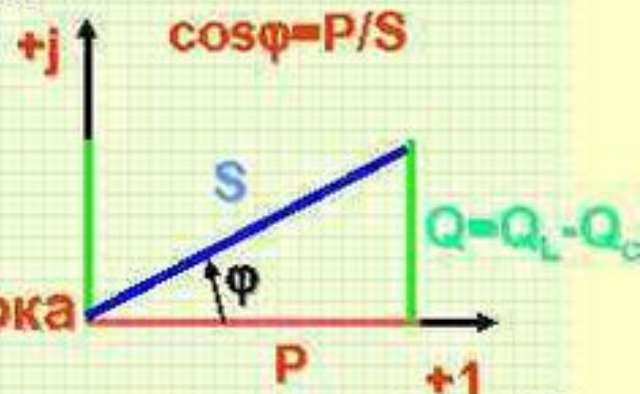
Уравнения, составленные по законам Кирхгофа, называют уравнениями электрического состояния.

## 2. Мощность в комплексном виде

- На комплексной плоскости получаем

$$\bar{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}^* = P + jQ$$

$\dot{I}^* = I e^{-j\psi}$  - сопряженный комплекс тока



Баланс мощности

Треугольник мощностей

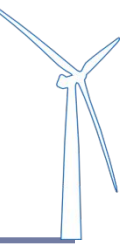
В любой t алгебраическая сумма мгновенных  $p_{ис}$  равна алгебраической сумме  $p_{пр}$  всех приемников энергии.

Алгебраическая сумма активных мощностей всех  $p_{ис}$  арифметической сумме мощностей всех резисторов.

$$\sum P_{ист} = \sum RI^2$$

$$\sum Q_{ист} = \sum x_L I^2 - \sum x_C I^2 = \sum Q_L + \sum Q_C$$

Алгебраическая сумма реактивных мощностей всех источников равна алгебраической сумме мощностей всех индуктивных и емкостных элементов.



## 2. СИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

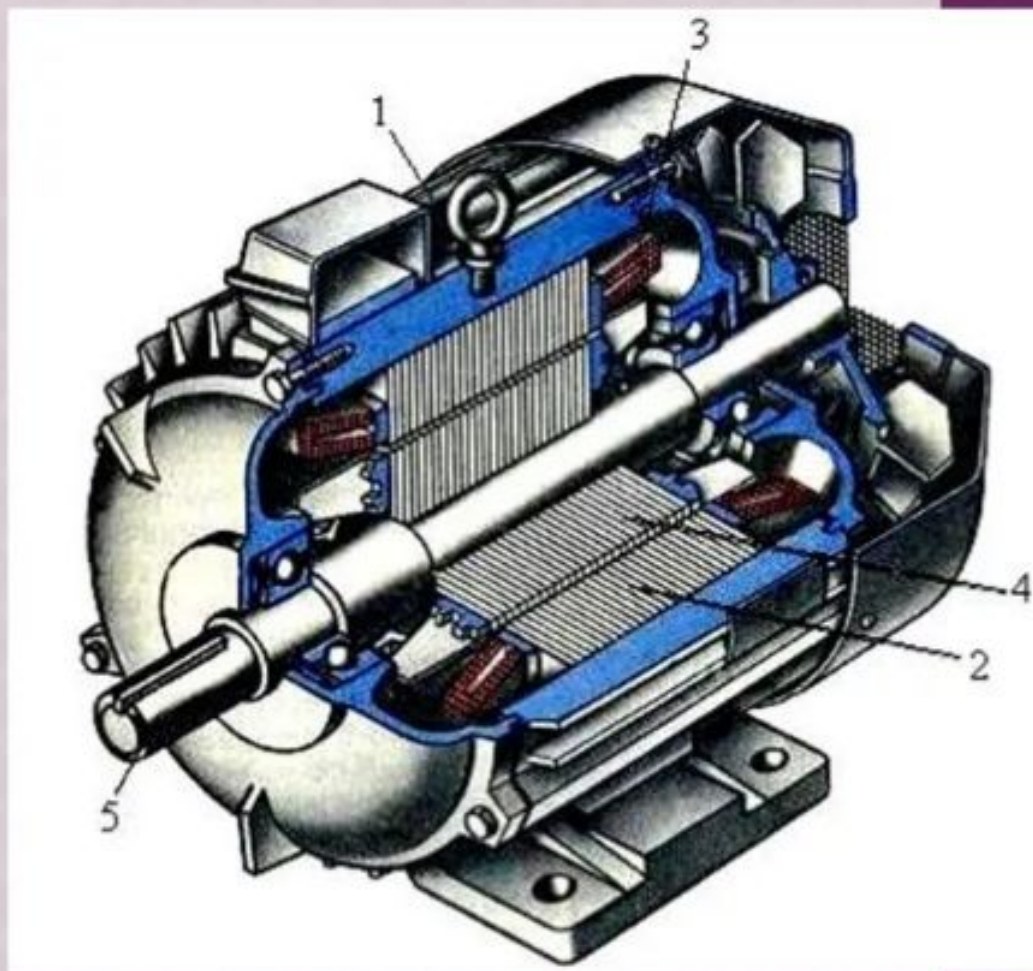




# **ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**



- 1 - СТАНИНА;**
- 2 - СЕРДЕЧНИК  
СТАТОРА;**
- 3 - ОБМОТКА  
СТАТОРА;**
- 4 - СЕРДЕЧНИК  
РОТОРА;**
- 5 - ВАЛ.**





Судовой дизель Генератор ДГ-50

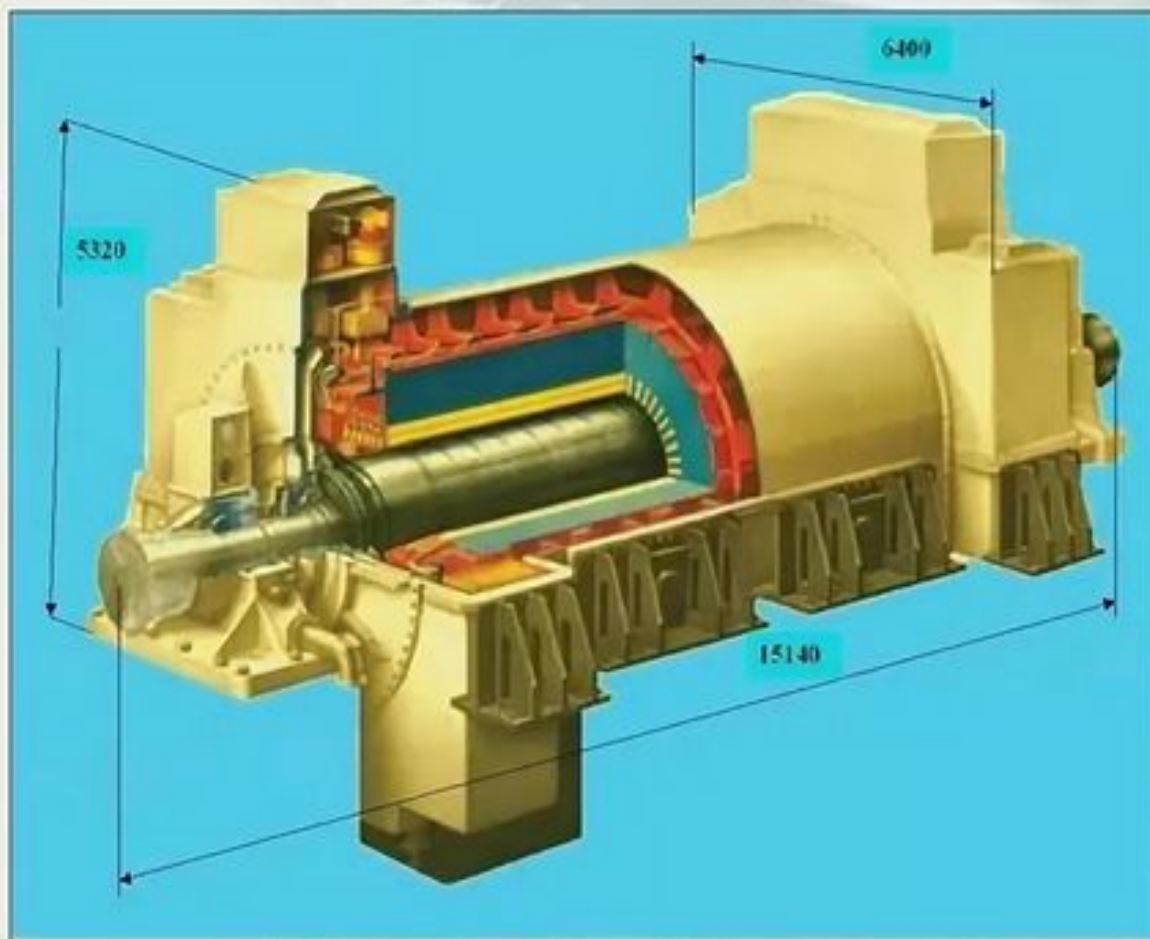
24 3 2010



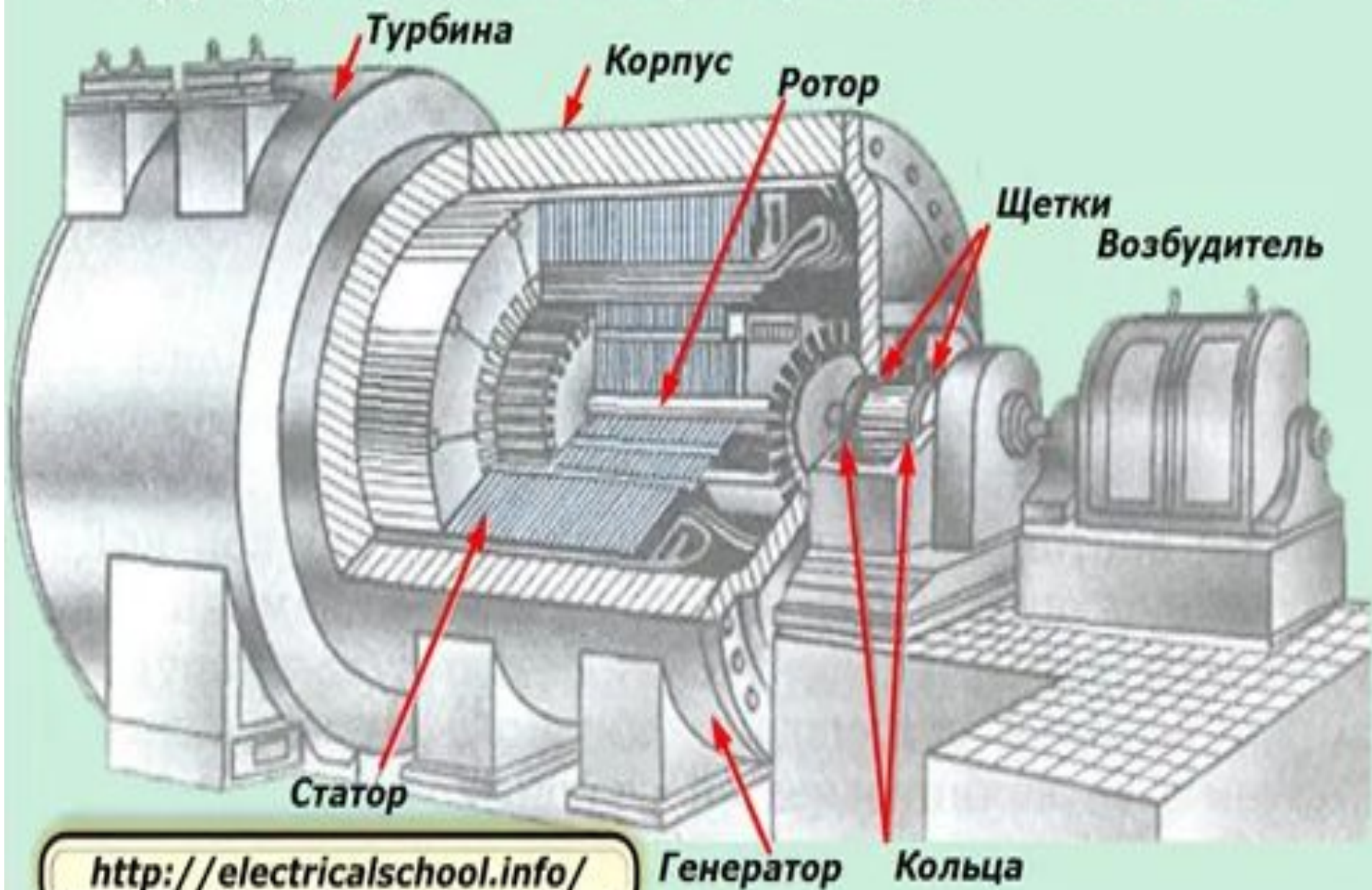
## Основные характеристики турбогенератора ТВВ-1200-4



- Номинальная мощность генератора 1200 МВт.
- Мощность 1280 МВт при температуре технической воды на входе в газоохладители 25°С.
- Напряжение 24 кВ.
- Водородно-водяное охлаждение
- Частота вращения 1500 об/мин.
- КПД - 99,04 %.
- Монтажные веса:  
статора – 380 т  
ротора – 220 т
- Удельный расход материалов 0,54 кг/кВА.
- Период между капитальными ремонтами до 8 лет.



# Структурная схема генератора переменного тока



<http://electricalschool.info/>

# Генераторы переменного тока

Если виток вращается в постоянном магнитном поле с постоянной угловой скоростью  $\omega$ , то в этом витке возбуждается ЭДС индукции, численно равная изменению магнитного потока через площадь этого витка в единицу времени:

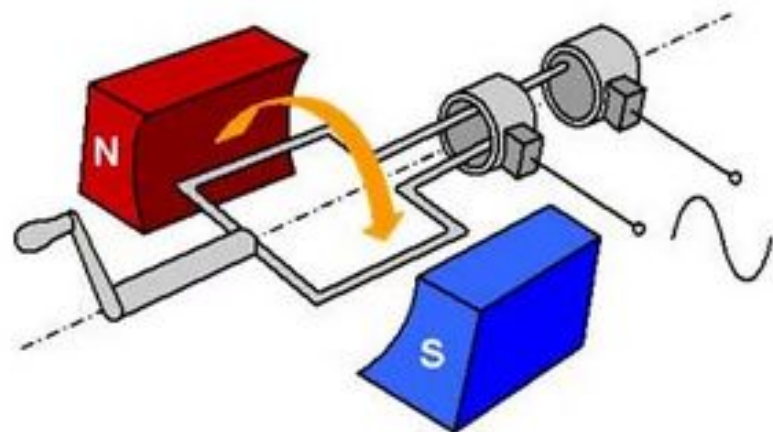
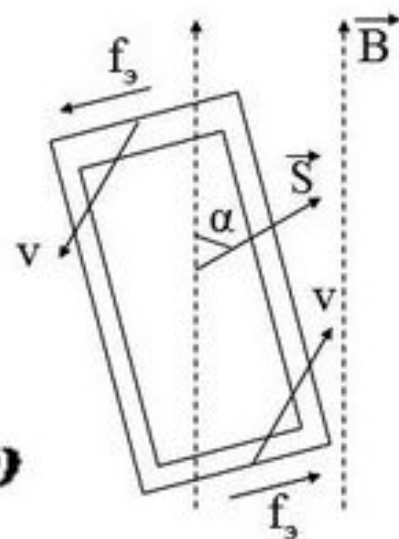
$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \omega t = \Phi_0 \cdot \cos \omega t$$

магнитный поток через один виток

$S$  - площадь витка.  $f_3$  - сторонние силы, вызывающие движение электронов в проводнике.

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{d\Phi}{dt} = \Phi_0 \omega \sin \omega t = \mathcal{E}_0 \sin \omega t$$

$$\mathcal{E}_0 = BS\omega$$



Если вращается катушка из  $N$  витков:

$$\mathcal{E}_0 = BS\omega N$$

При этих условиях ЭДС индукции и индукционный ток синусоидальные

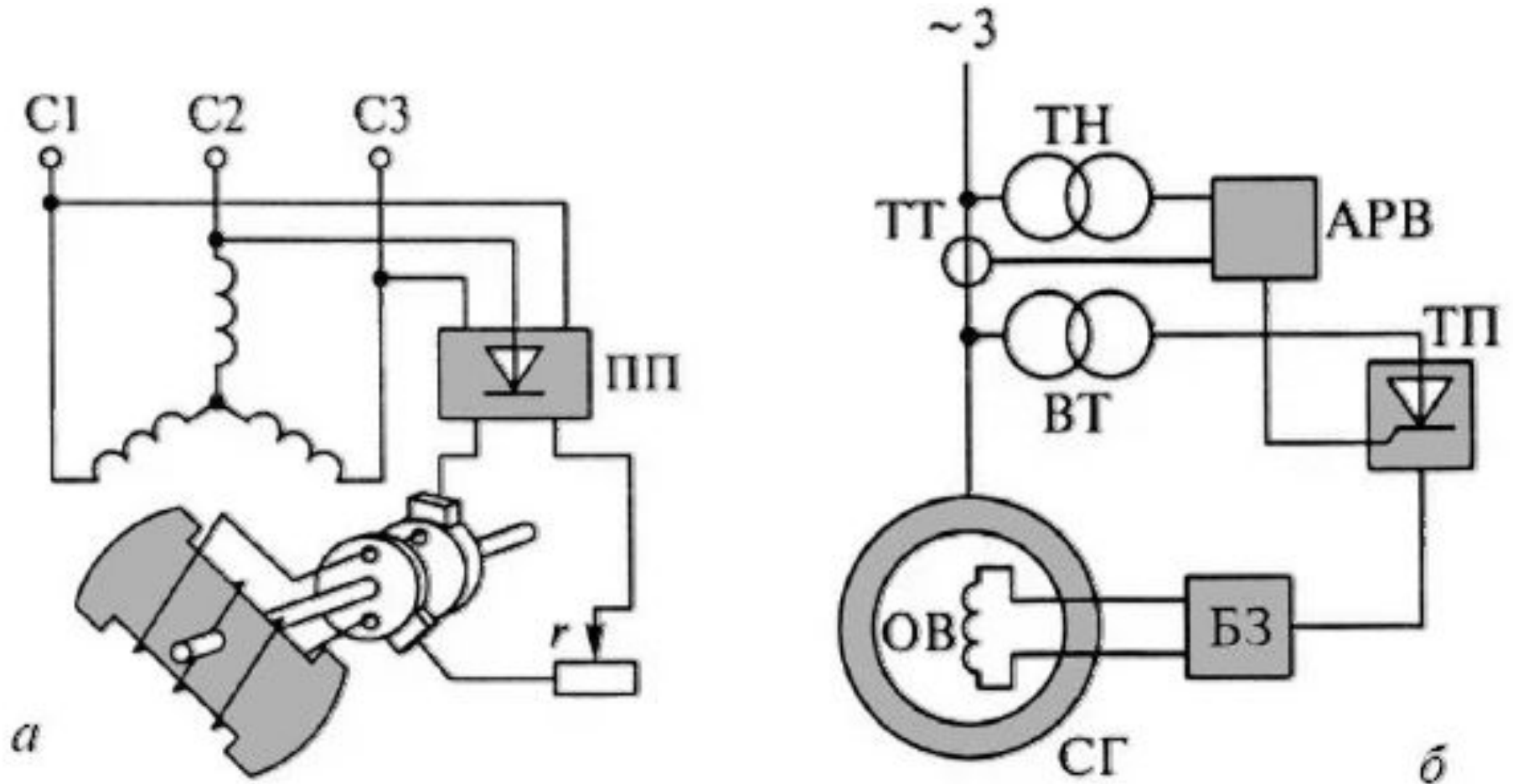
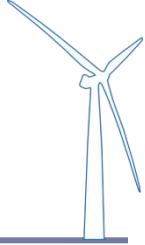
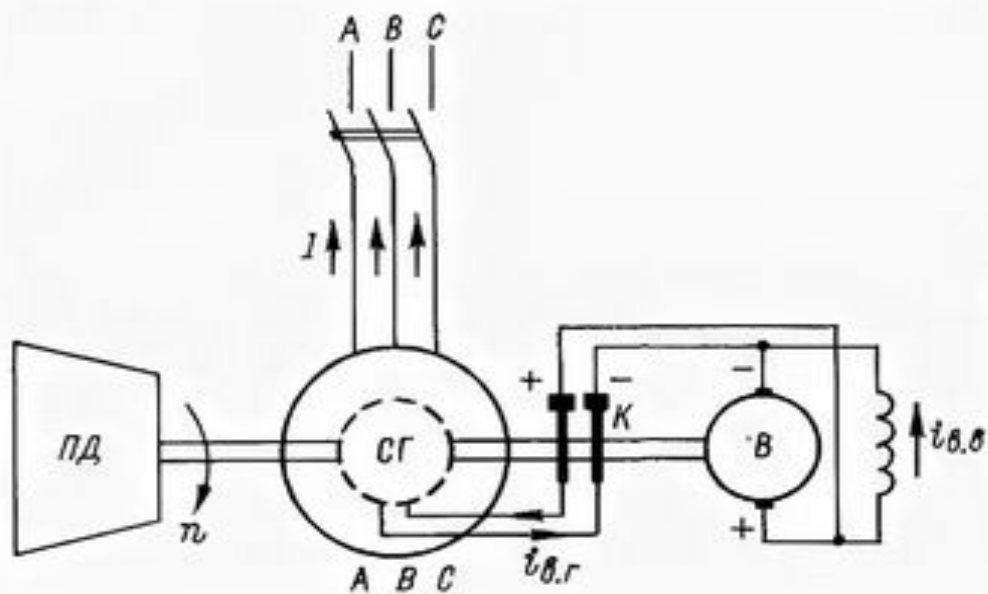


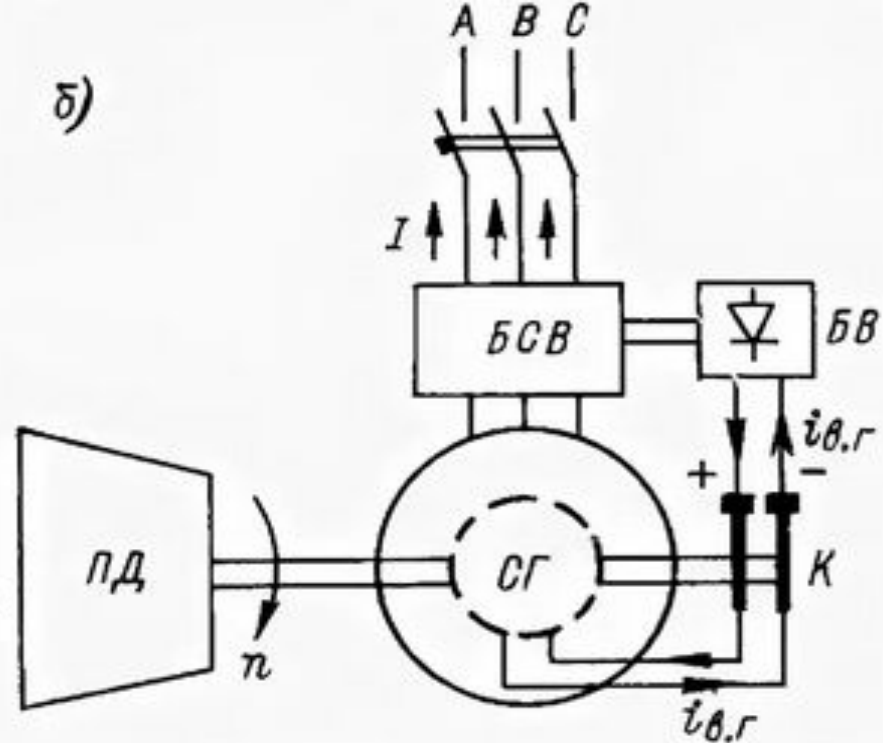
Рис. 1.4. Принцип самовозбуждения синхронных генераторов



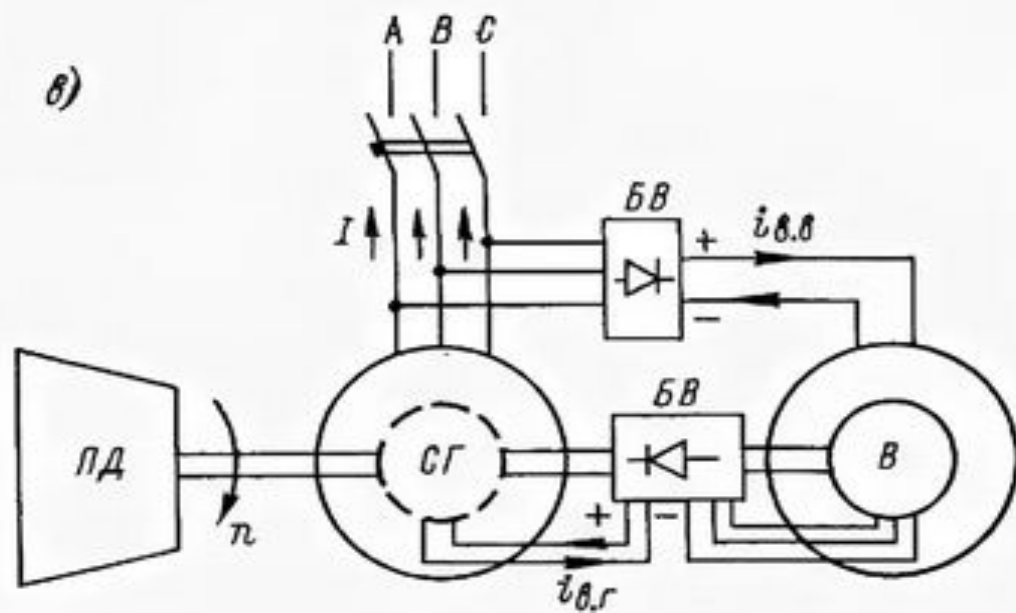
a)



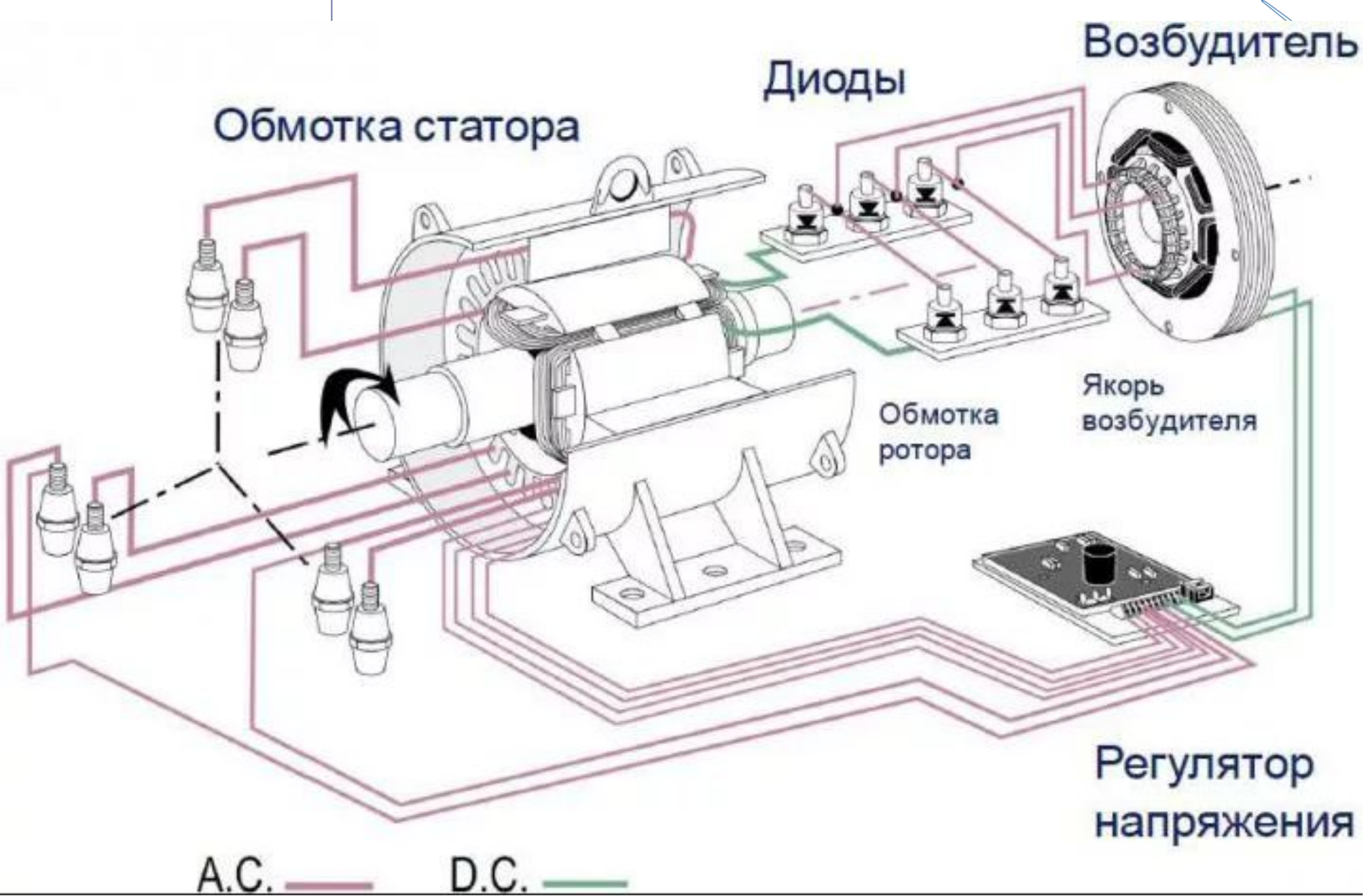
б)



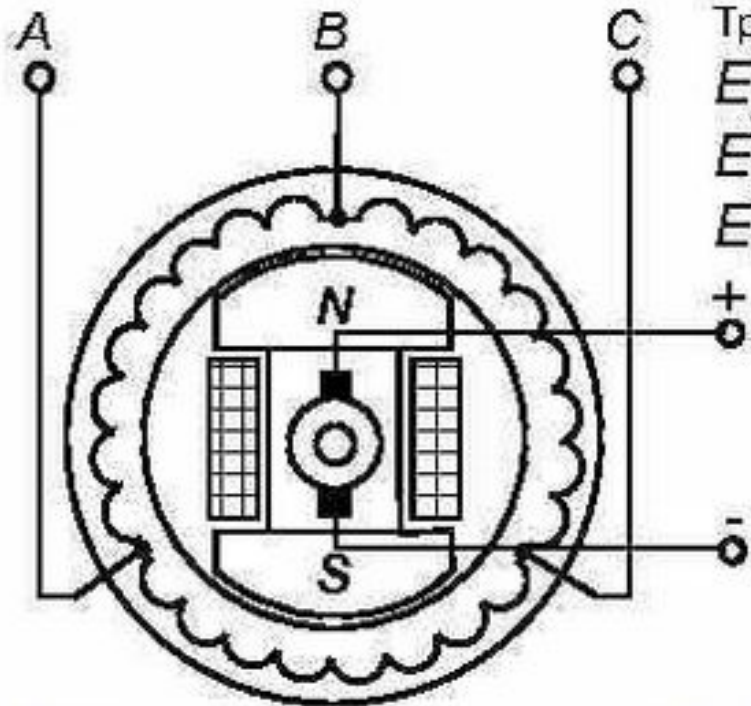
в)







## Принцип действия синхронного генератора



Трёхфазная система ЭДС: При подключении нагрузки:

$$E_A = E_m \sin \omega t$$

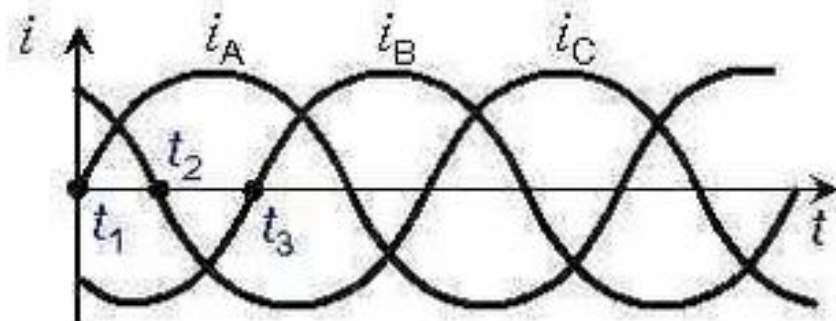
$$E_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$E_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$

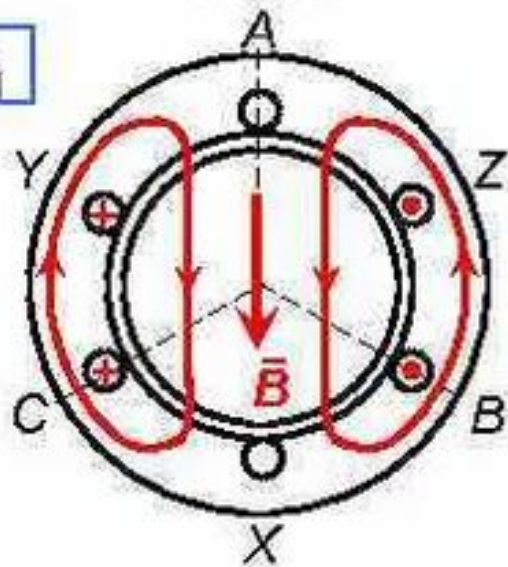
$$I_A = I_m \sin \omega t$$

$$I_B = I_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

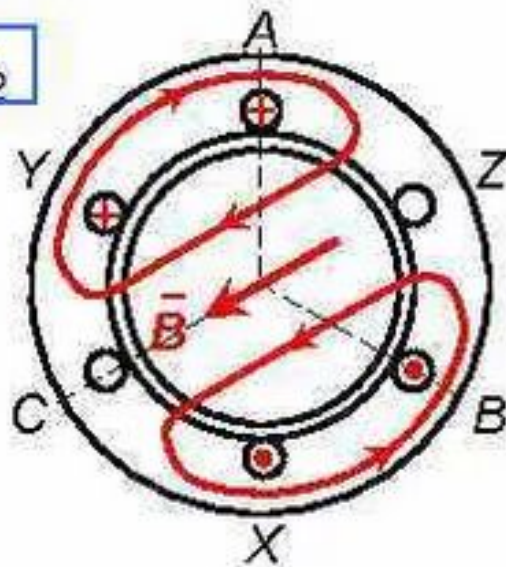
$$I_C = I_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$



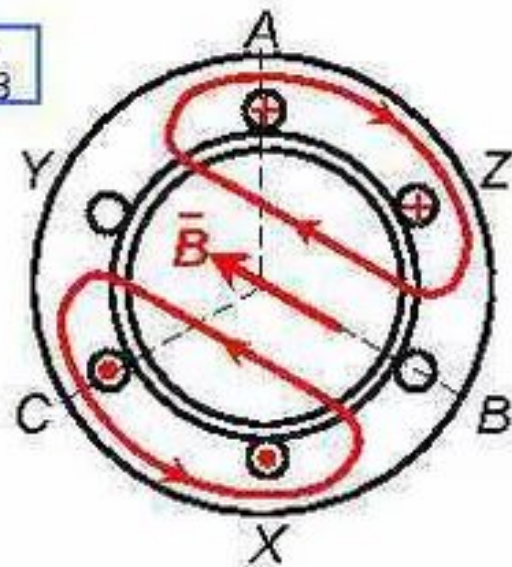
$t_1$



$t_2$



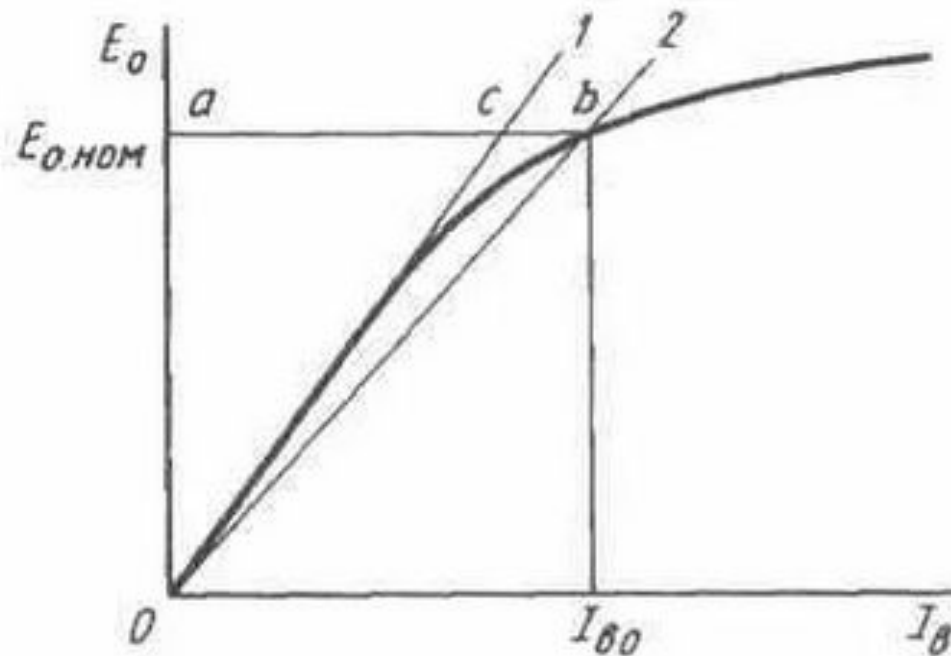
$t_3$



# Работа синхронного генератора при холостом ходе

$$n = \frac{60 f}{p} \quad f = \frac{pn}{60} \quad E = c_e n \Phi$$

$$E_0 = 4,44 f w_a k_{об} \Phi_B$$



*Характеристика холостого хода*

$$E_0 = f(I_B)$$

$$\Phi = f(I_B)$$

## Реакция якоря синхронной машины

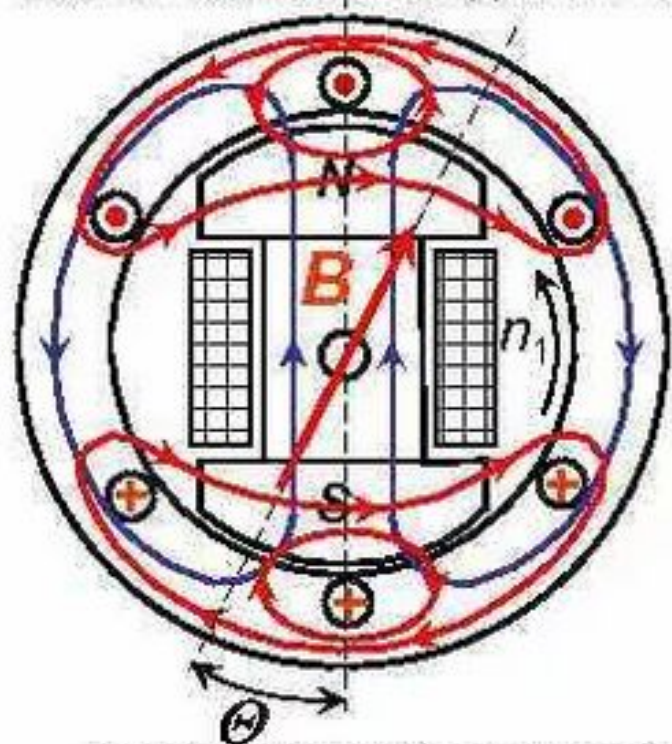
В машине, работающей под нагрузкой, т.е. при токах статора  $I \neq 0$ , магнитное поле создается не только МДС ротора, но и МДС токов статора

*Воздействие МДС якоря на магнитное поле ротора называют реакцией якоря.*

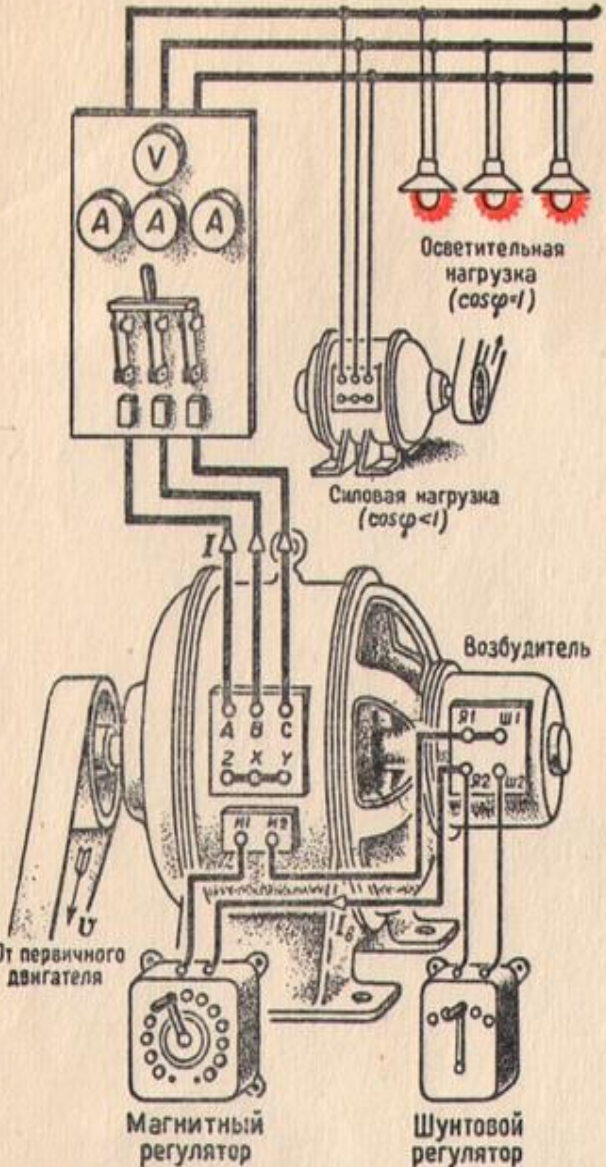
В ненасыщенной машине в результате действия реакции якоря одна половина полюса размагничивается а другая – подмагничивается; кривая распределения магнитной индукции  $B$  сдвигается навстречу направлению вращения на угол  $\theta$ , но результирующий магнитный поток  $\Phi$  остается неизменным.

В насыщенной машине размагничивающее действие реакции якоря под одной половиной полюса сказывается сильнее, чем подмагничивающее - под другой половиной полюса. В результате снижается поток  $\Phi$ , а, следовательно, и ЭДС, и электромагнитный момент.

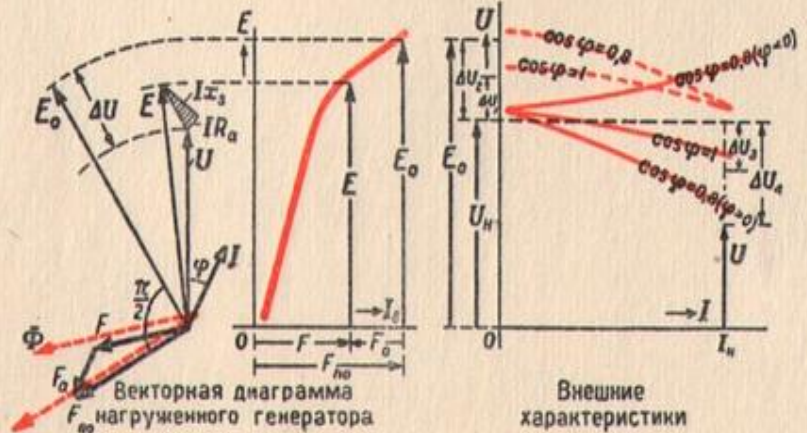
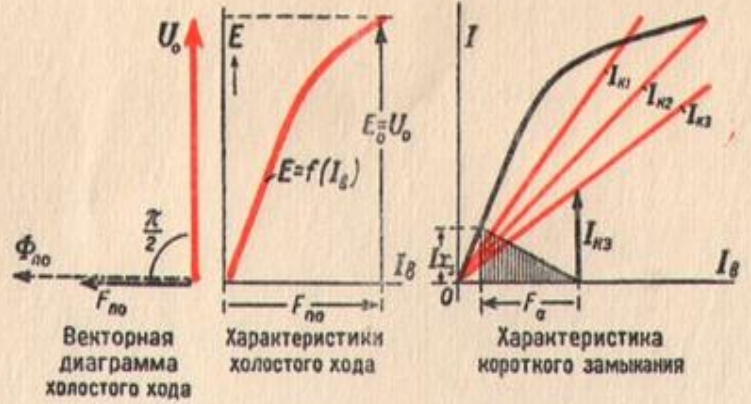
При индуктивном характере тока нагрузки размагничивающее действие реакции якоря усиливается, а при достаточной емкостной нагрузке – реакция якоря оказывает подмагничивающее воздействие.



# СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР



Генератор с возбудителем на валу



$$U_0 = E_0 \quad U = E - \Delta U$$

Напряжение генератора при холостом ходе и при нагрузке

$$\Delta U = \frac{E_0 - U_n}{E_0} 100 \%$$

Повышение напряжения

$$\Delta U = \frac{U_n - U}{U_n} 100 \%$$

Понижение напряжения

Изменение напряжения генератора, вызываемое падением напряжения в цепи якоря ( $IR_a; IX_s$ ) и реакцией якоря

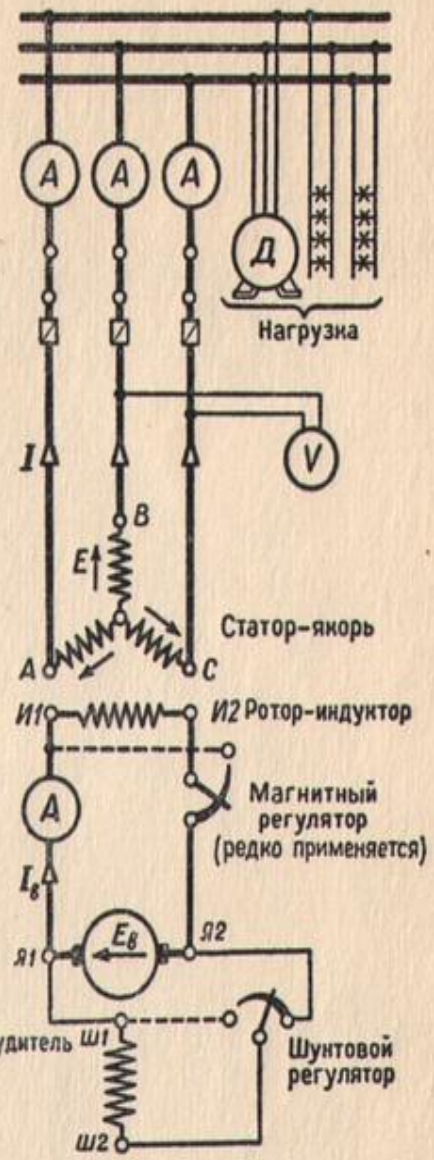
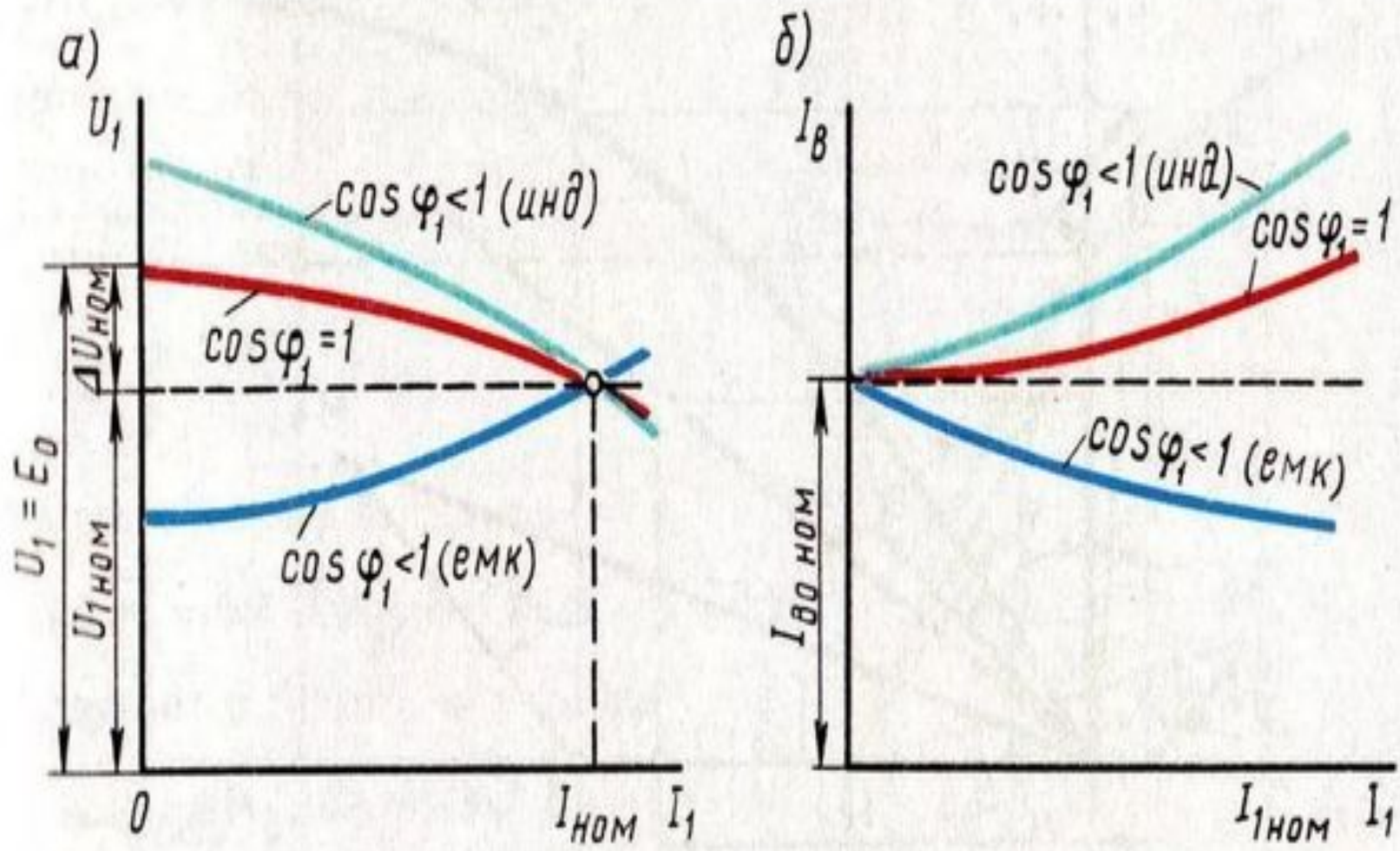


Схема генератора



Внешние (а) и регулировочные (б) характеристики синхронного генератора

# Уравнение ЭДС синхронного генератора

В *нагруженной явнополюсной синхронной машине* результирующий магнитный поток создают несколько МДС:

1. МДС обмотки возбуждения  $F_0$  создает магнитный поток возбуждения  $\Phi_0$ , который индуцирует в обмотке статора основную ЭДС генератора  $E_0$ .
2. Продольная составляющая МДС реакции якоря  $F_{ad}$  создает магнитный поток  $\Phi_{ad}$ , который индуцирует в обмотке статора ЭДС реакции якоря по продольной оси  $E_{ad}$ , значение которой пропорционально индуктивному сопротивлению реакции якоря по продольной оси  $X_{ad}$ .
3. Поперечная составляющая МДС реакции якоря  $F_{aq}$  создает магнитный поток  $\Phi_{aq}$ , который индуцирует в обмотке статора ЭДС реакции якоря по поперечной оси  $E_{aq}$ , значение которой пропорционально индуктивному сопротивлению реакции якоря по поперечной оси  $X_{aq}$ .

4. Магнитный поток рассеяния обмотки статора  $\Phi_{\sigma 1}$  индуцирует в обмотке статора ЭДС рассеяния:

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j \dot{I}_1 X_1, \quad \text{где } X_1 - \text{индуктивное}$$

сопротивление рассеяния обмотки статора.

## Уравнение ЭДС синхронного генератора

5. Ток в обмотке статора  $I_1$  создает падение напряжения в активном сопротивлении фазной обмотки:  $U_{r1} = I_1 r_1$ .

По второму закону Кирхгофа для обмотки статора:

$$\dot{U}_1 = \sum \dot{E} - \dot{I}_1 r_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma 1} - \dot{I}_1 r_1.$$

- уравнение ЭДС явнополюсного синхронного генератора.

В неявнополюсных синхронных машинах реакция якоря может быть представлена полной МДС статора (якоря)  $F_a$ , а ЭДС реакции якоря  $E_a$ , пропорциональна индуктивному сопротивлению реакции якоря  $X_a$ :

$$\dot{E}_a = -j \dot{I}_1 X_a.$$

Кроме того, поток реакции якоря  $\Phi_a$  и поток рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$  создаются одним и тем же током  $I_1$ , следовательно, индуктивные сопротивления  $X_a$  и  $X_1$  можно представить как сумму:  $X_c = X_a + X_1$ ,

где  $X_c$  – синхронное индуктивное сопротивление неявнополюсной машины.



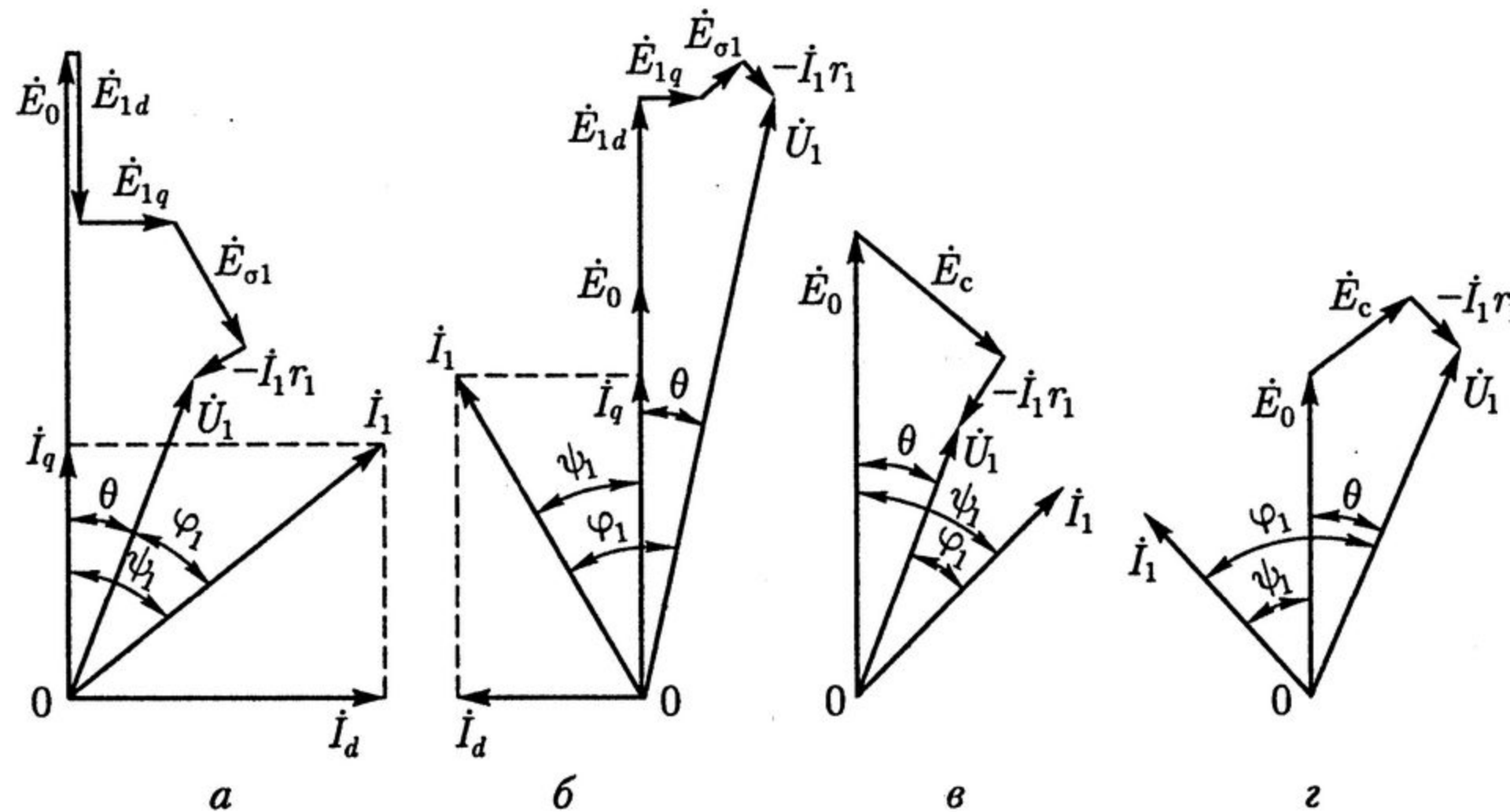
# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Уравнения и векторные диаграммы синхронного генератора. сл. 29

1. Основное уравнение и основная векторная диаграмма СГ

$$\Phi_0 \rightarrow E_0; \quad \Phi_a \begin{cases} \rightarrow \Phi_{ad} \rightarrow E_{ad} \\ \rightarrow \Phi_{aq} \rightarrow E_{aq} \end{cases}; \quad \Phi_\sigma \rightarrow E_\sigma$$
$$I \cdot r_1 = -E_r$$

$$\underline{U} = \sum \underline{E} = \underline{E}_0 + \underline{E}_{ad} + \underline{E}_{aq} + \underline{E}_\sigma + \underline{E}_r$$



Векторные диаграммы явнополюсного (а, б) и неявнополюсного (в, з) синхронных генераторов при нагрузке:

а и в — активно-индуктивной; б и з — активно-емкостной



## 2. Преобразованное уравнение и преобразованная векторная диаграмма СГ

$$r_l = 0$$

$$\underline{U} = \underline{E}_0 - j \cdot \underline{I}_d \cdot X_{ad} - j \cdot \underline{I}_q \cdot X_{aq} - \underbrace{j \cdot \underline{I} \cdot X_\sigma}_{-j \cdot (\underline{I}_d + \underline{I}_q) \cdot X_\sigma}$$

$$\underline{U} = \underline{E}_0 - j \cdot \underline{I}_d \cdot (\underbrace{X_{ad} + X_\sigma}_{X_d}) - j \cdot \underline{I}_q \cdot (\underbrace{X_{aq} + X_\sigma}_{X_q})$$

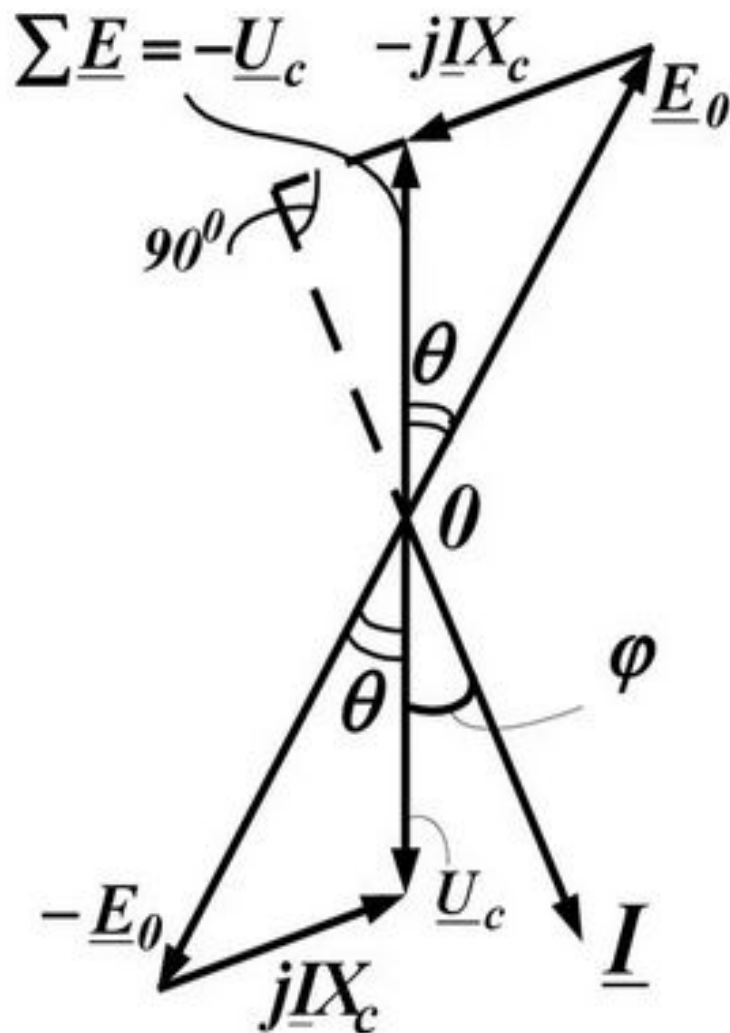
$$\underline{U} = \underline{E}_0 - j \cdot \underline{I}_d \cdot X_d - j \cdot \underline{I}_q \cdot X_q$$



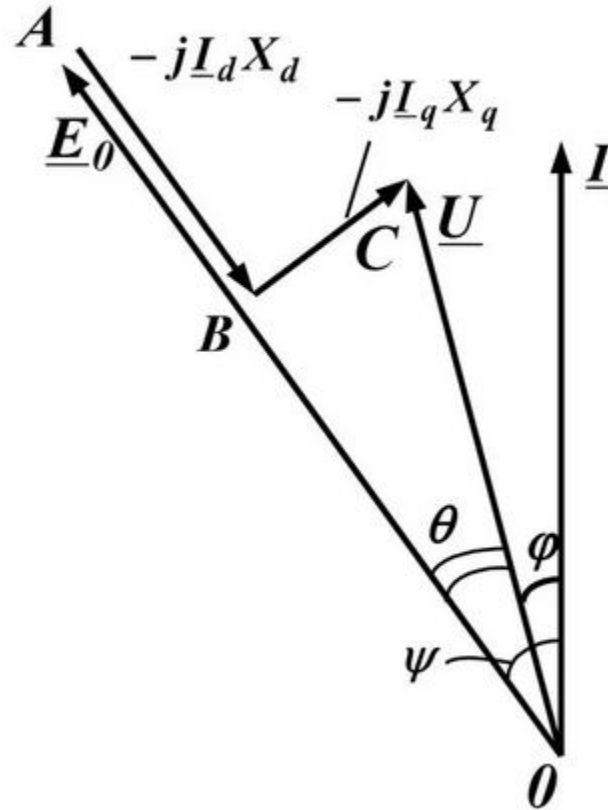
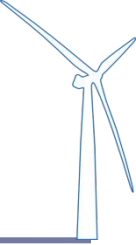
Режимы работы синхронной машины:

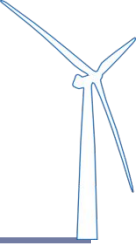
1) генератор,  $P_{мех} \Rightarrow P_{эл}$ .

2) двигатель,  $P_{эл} \Rightarrow P_{мех}$ .  $\angle \theta$  - меняет знак

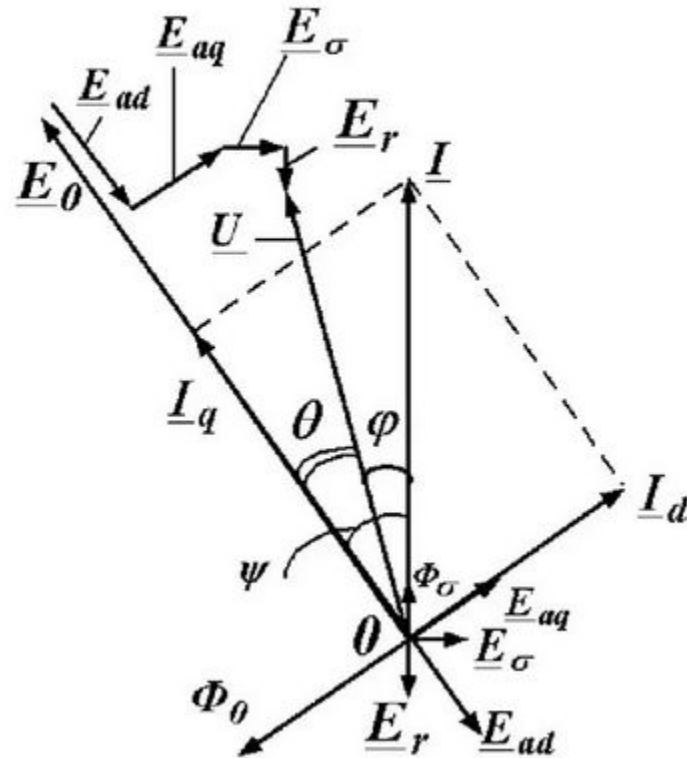


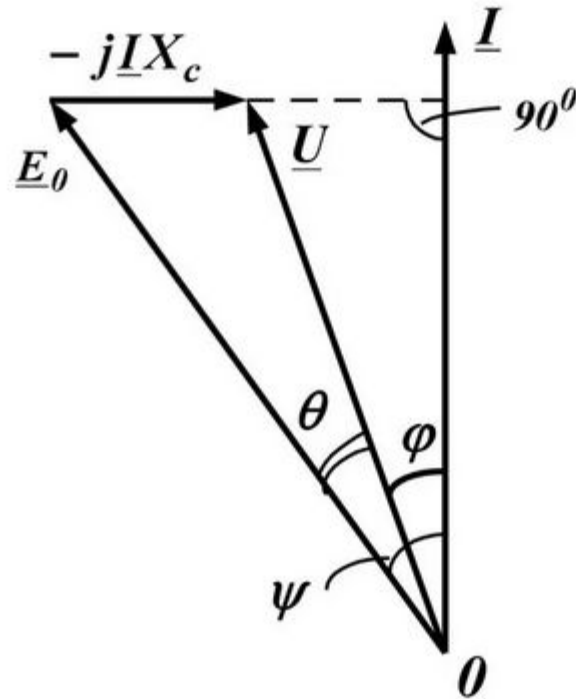
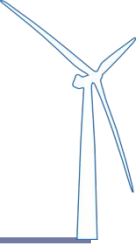
$$\underline{U} = -\sum \underline{E}$$

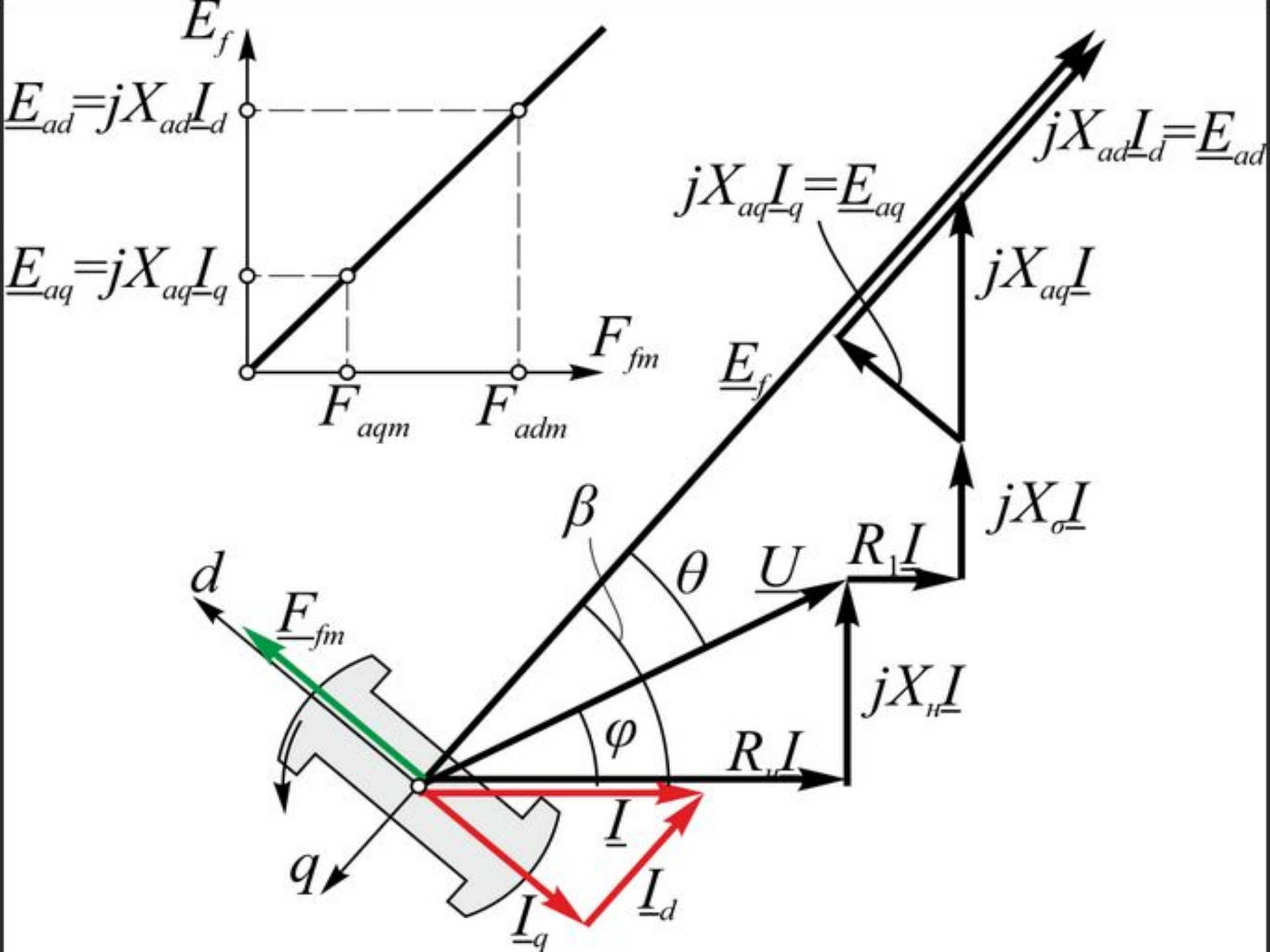




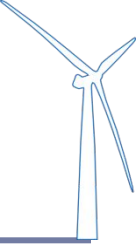
Задаемся  $0^\circ < \psi < 90^\circ$











## Векторные диаграммы синхронных машин

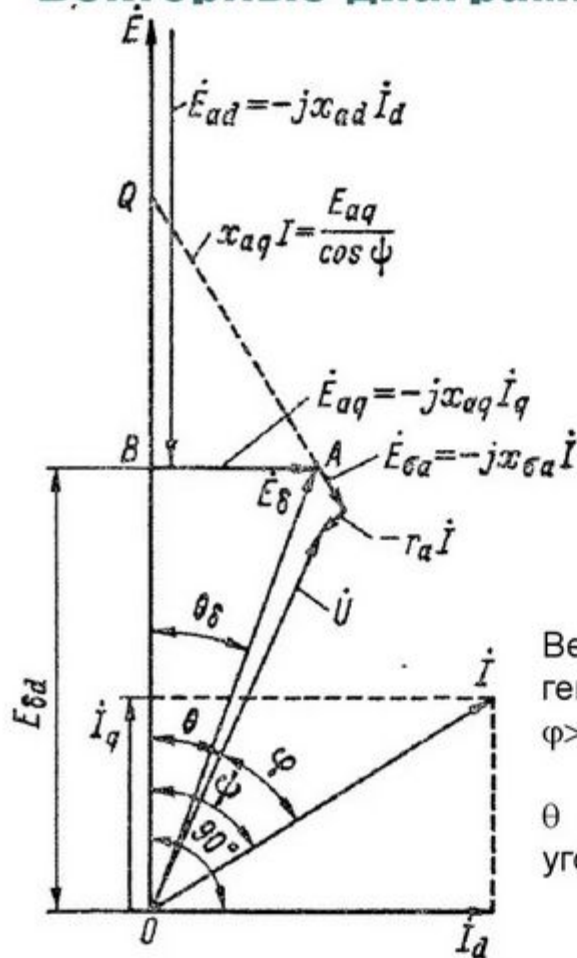


Диаграмма Блонделя  
Явнополюсная машина

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a} - \dot{I}r_a$$

$$\begin{cases} \dot{U} = \dot{E}_0 - jx_{ad}\dot{I}_d - jx_{aq}\dot{I}_q - jx_{\sigma a}\dot{I} - r_a\dot{I} \\ \dot{I} = \dot{I}_d + \dot{I}_q \end{cases}$$

Векторная диаграмма явнополюсного генератора при активно-индуктивной нагрузке  $\varphi > 0$ ,  $\psi > 0$ ,  $I_d > 0$ , реакция якоря размагничивающая

$\theta$  - угол нагрузки,  
угол между векторами ЭДС и напряжения

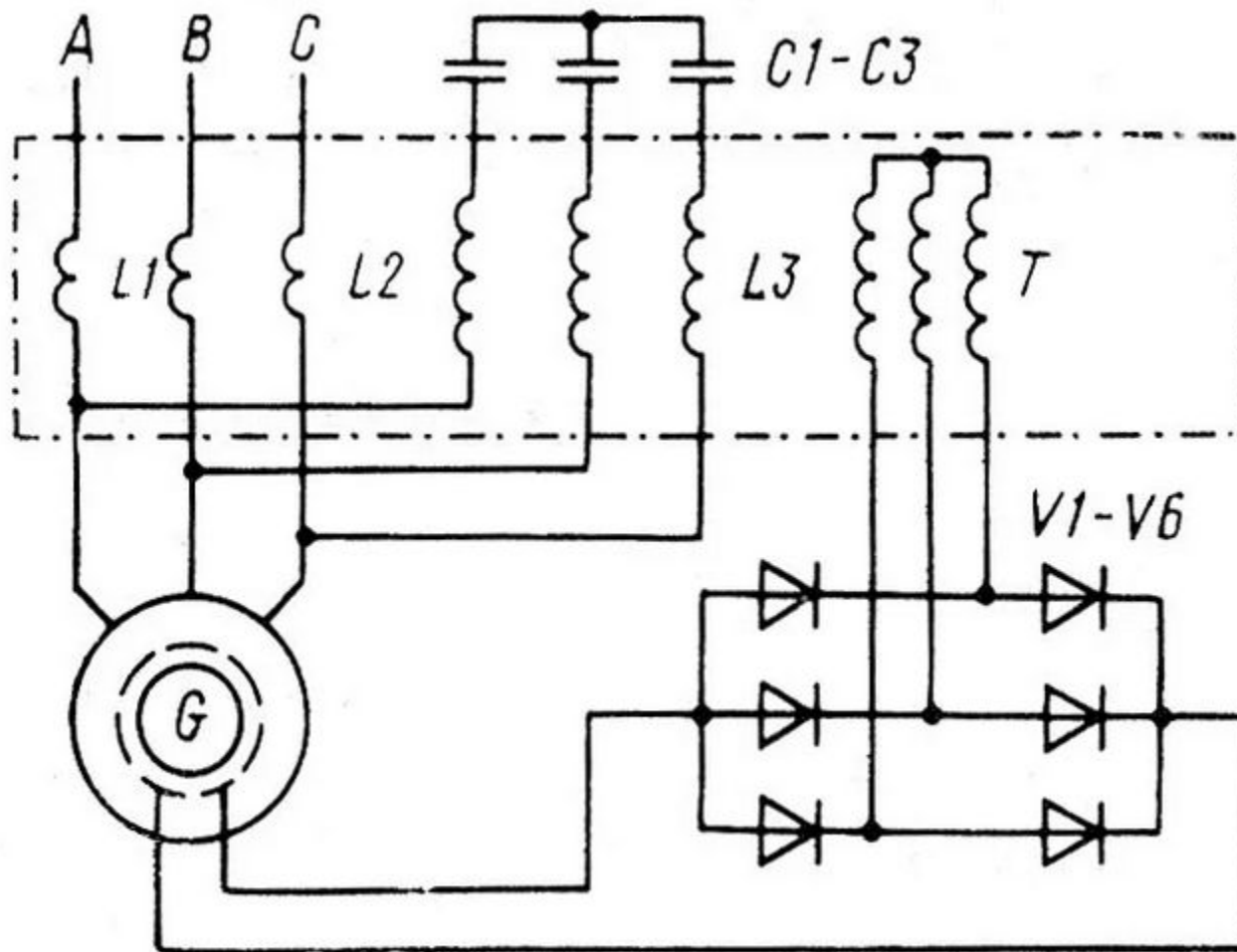
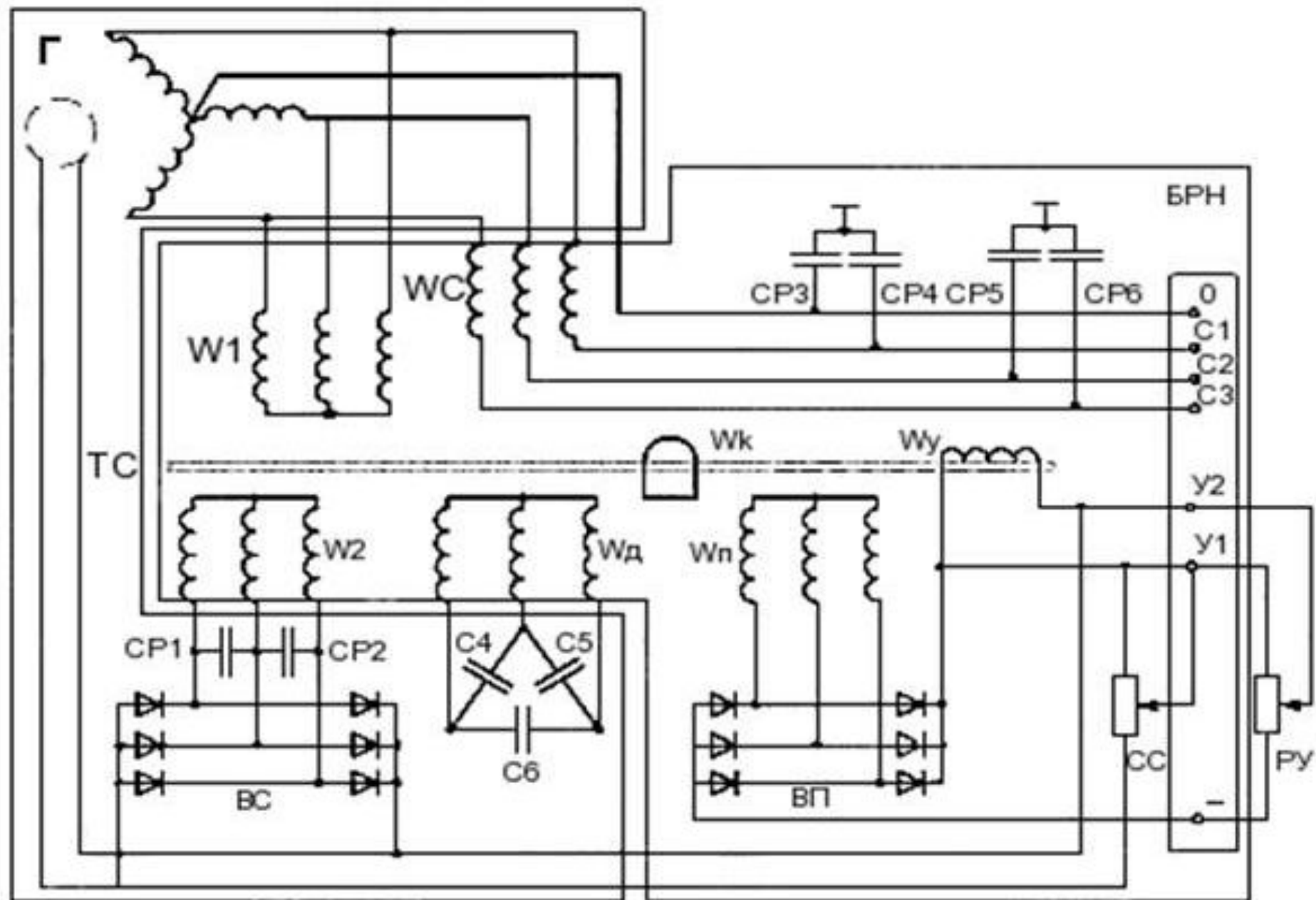
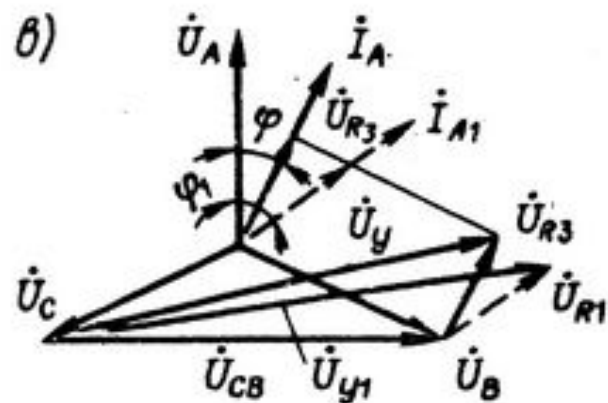
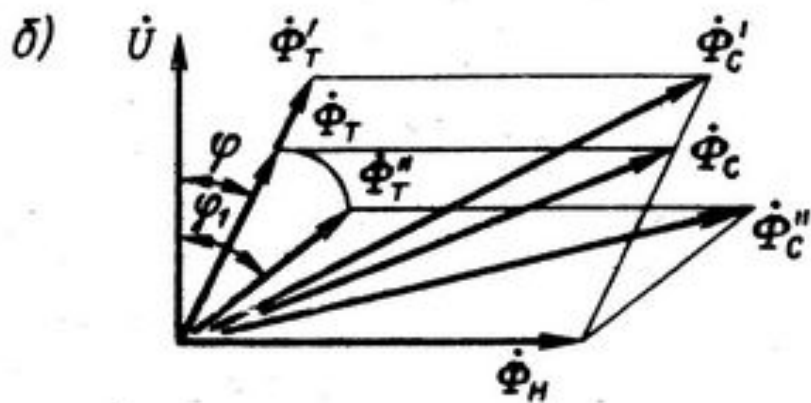
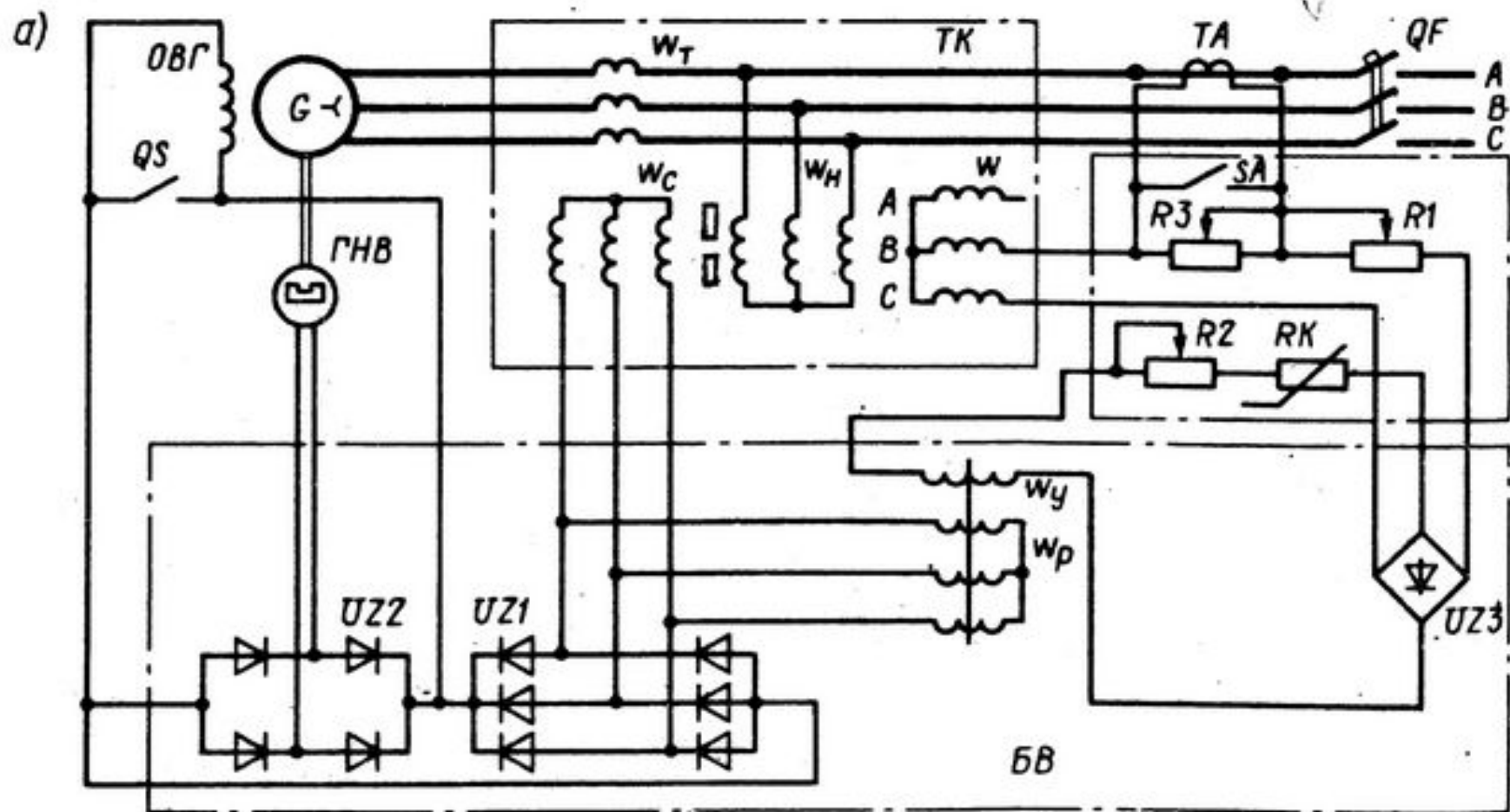


Схема генератора с блоком регулирования напряжения. Автономная работа.



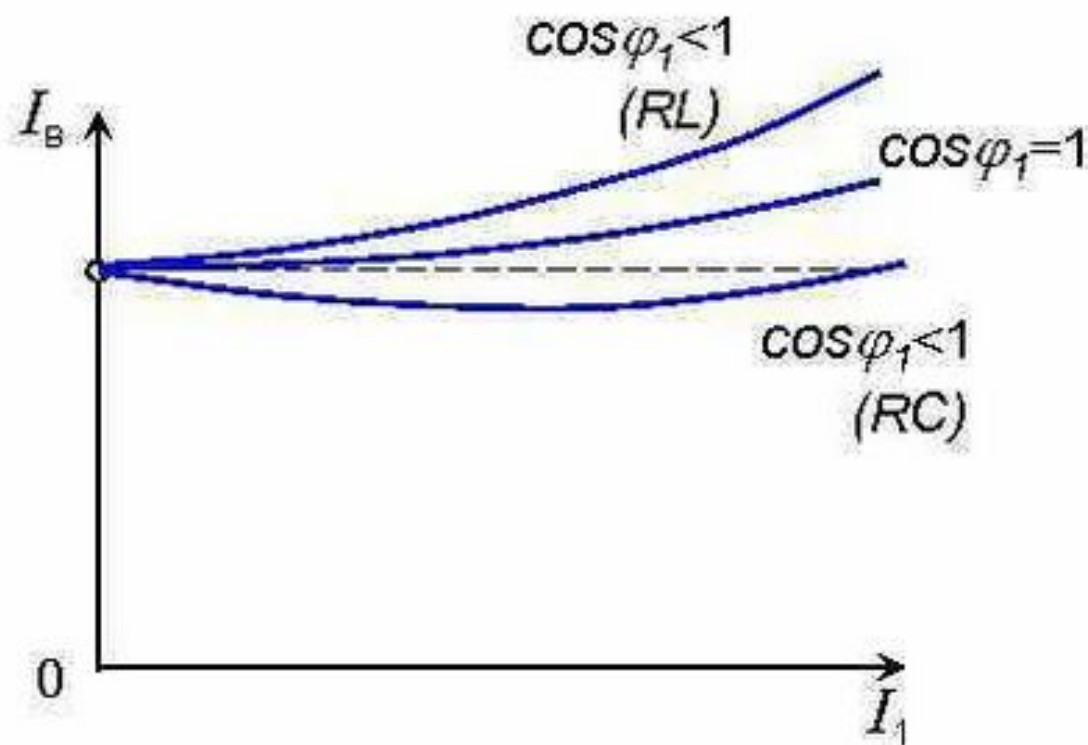


## Регулировочная характеристика синхронного генератора

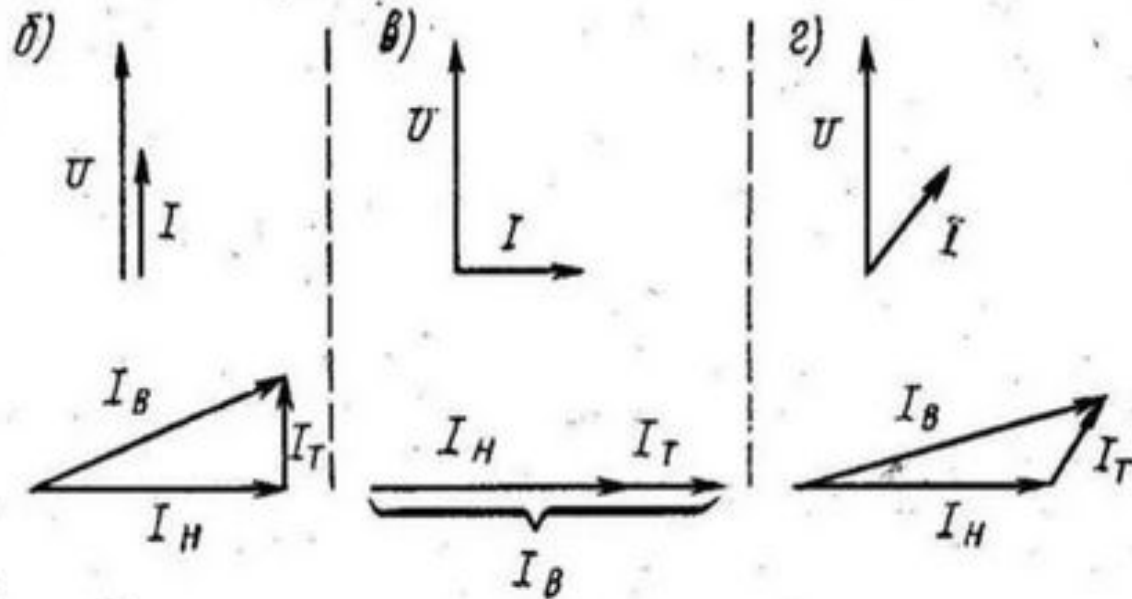
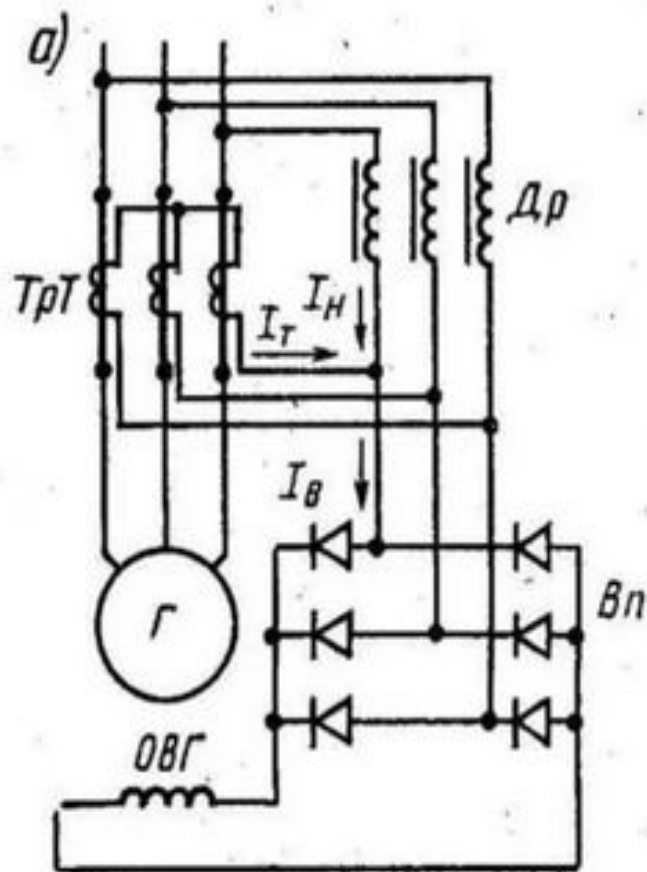
Регулировочная характеристика показывает, как следует изменять (регулировать) ток возбуждения генератора при изменениях нагрузки, чтобы напряжение на зажимах генератора оставалось неизменно равным номинальным.

Регулировочная характеристика:

$$I_B = f(I_1) \text{ при } U_1 = U_{1H} = \text{const}, \cos \varphi_1 = \text{const} \text{ и } n_1 = \text{const}.$$



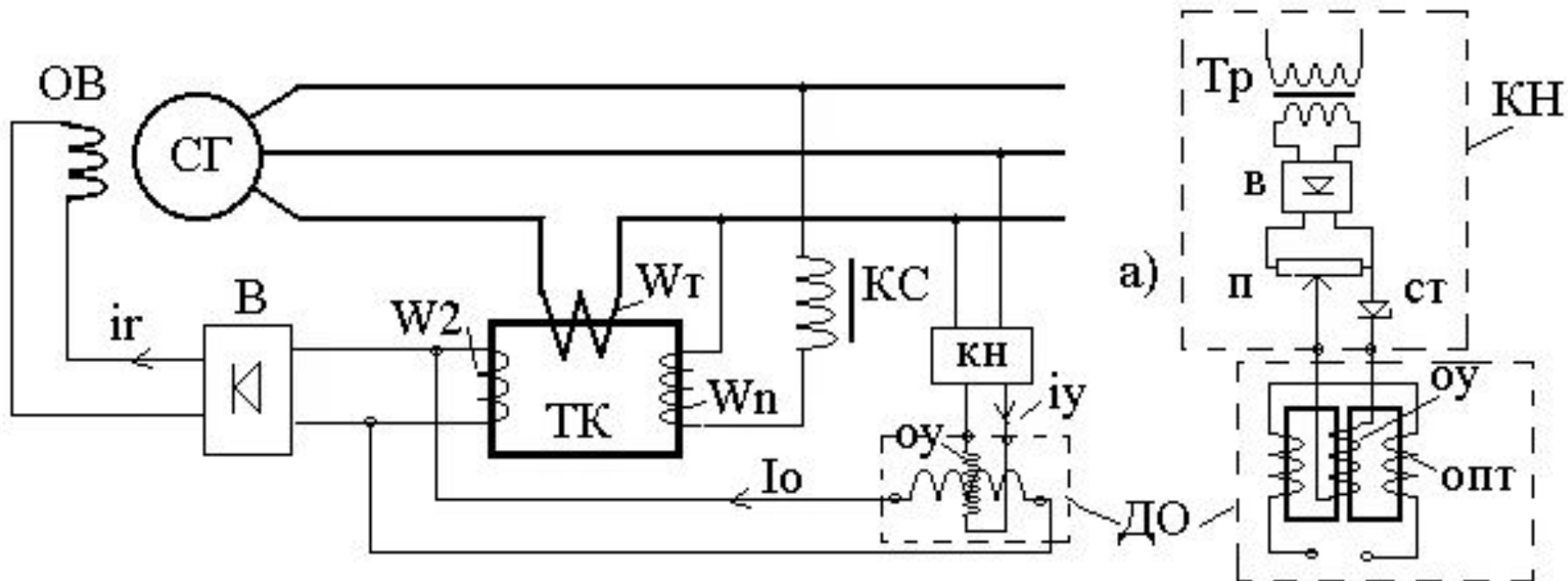
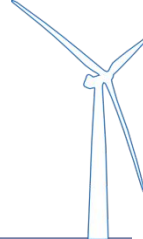
# Системы самовозбуждения генераторов серии SSED

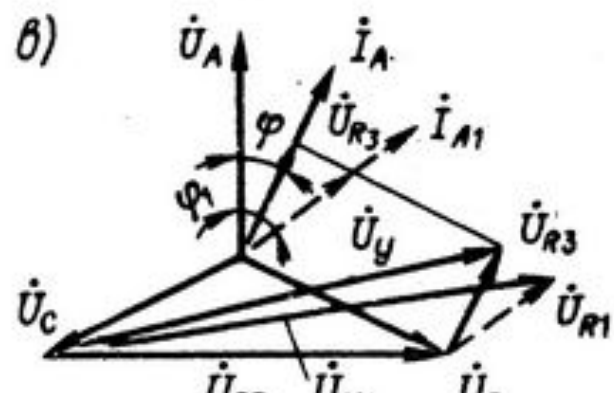
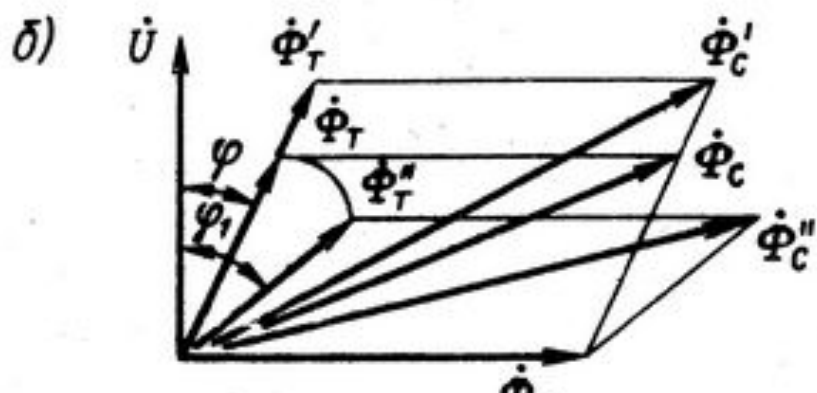
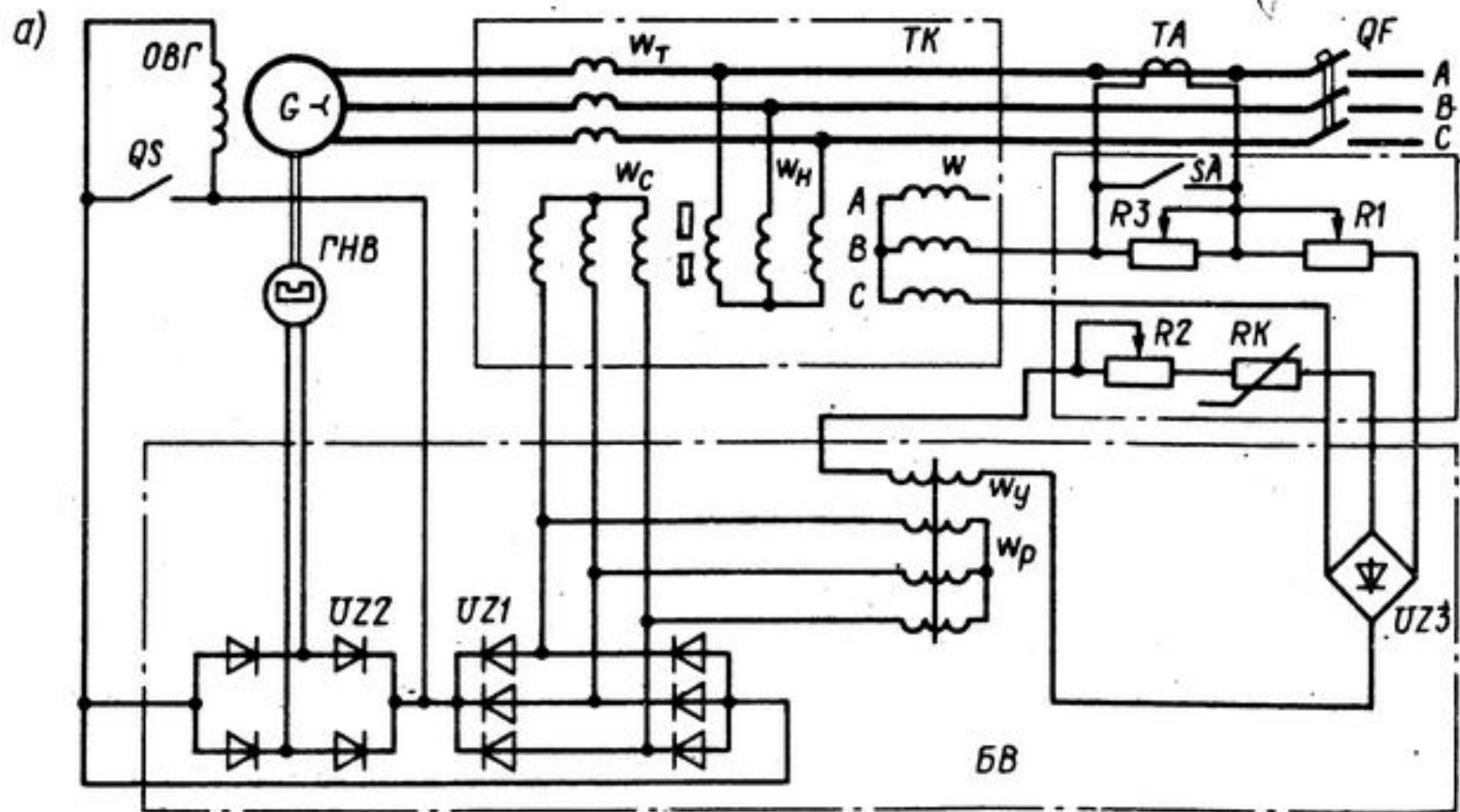


Система самовозбуждения генераторов

SSED:

а — принципиальная схема; б — векторные диаграммы активной, в — индуктивной, г — смешанной нагрузок генератора







# Параллельная работа синхронных машин

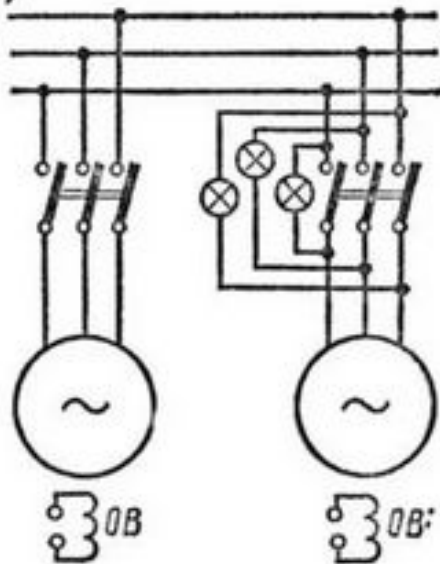
## Особенности параллельной работы СГ

В энергосистеме параллельно работают несколько сотен машин, следовательно

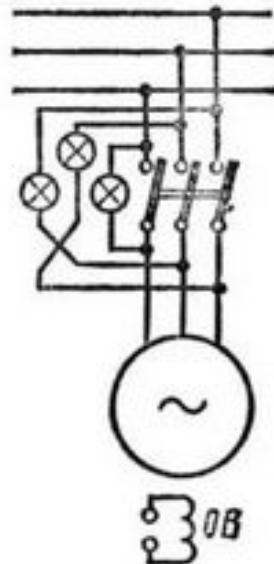
$$P_{\text{сети}} \gg P_{\text{ген}} \Rightarrow U_{\text{ген}} = U_{\text{сети}} = \text{const},$$

$$f_{\text{ген}} = f_{\text{сети}} = \text{const}$$

а)



б)



Схемы включения синхронных генераторов на параллельную работу методом точной синхронизации

а – на потухание света; б – на вращение света

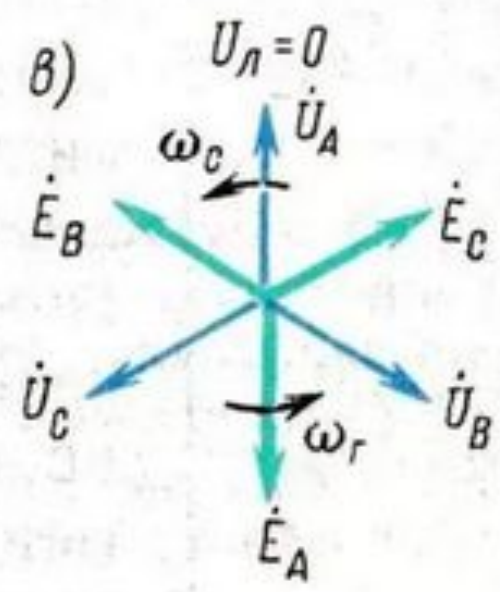
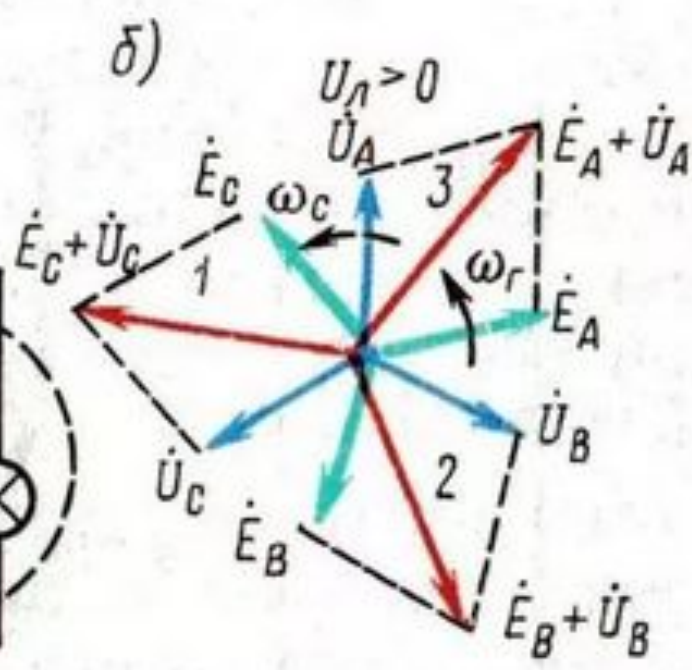
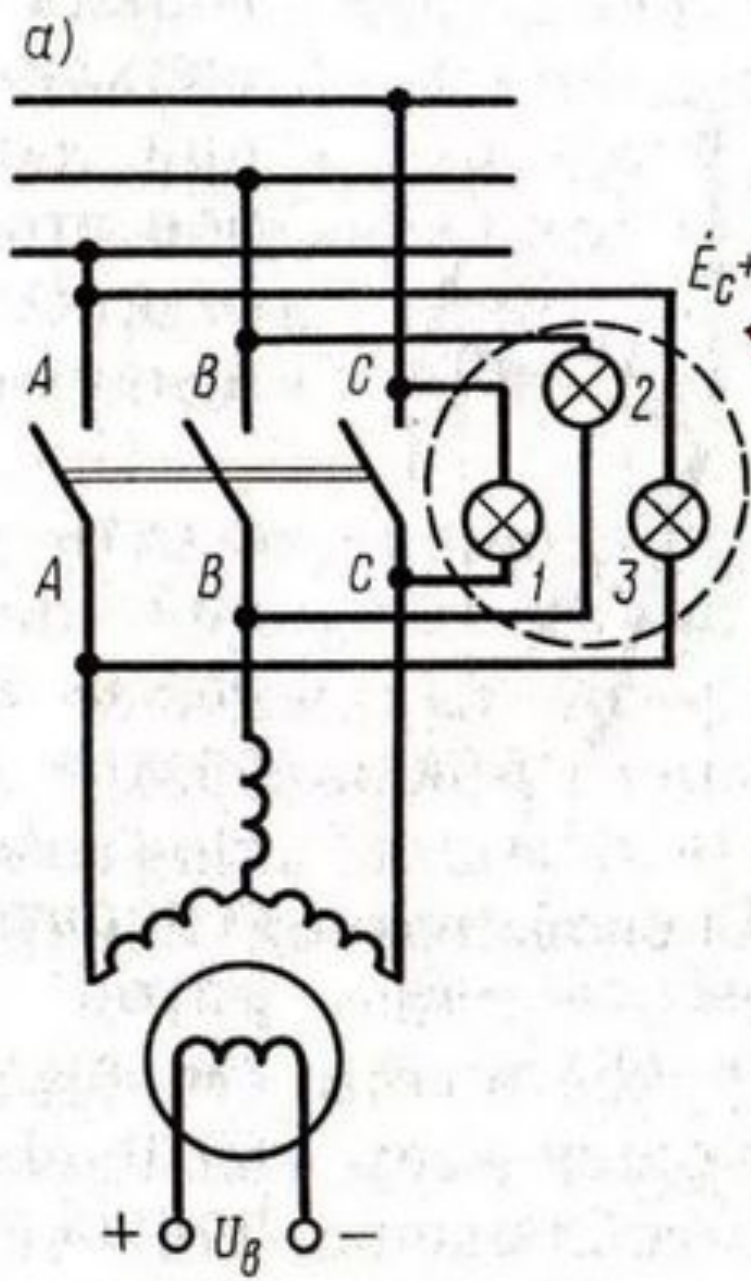
## Метод точной синхронизации

Условия включения на параллельную работу

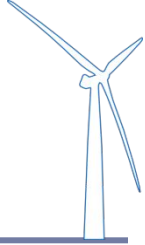
1. Равенство напряжений СГ и сети
2. Равенство частот напряжения СГ и сети
3. Одинаковое чередование фаз СГ и сети
4. Одинаковые фаза напряжений СГ и сети

## Метод самосинхронизации

1. Проверяется чередование фаз.
2. Разгоняется генератор до  $n = n_n$  при  $I_f = 0$ .
3. Обмотка якоря подключается к сети.
4. Подается питание на ОВ



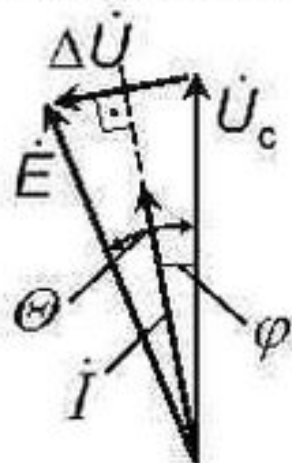
Ламповый синхроскоп



## Параллельная работа синхронных машин

### 2) Изменение активной мощности. Режим генератора и двигателя.

Чтобы включенный на параллельную работу СГ принял на себя активную нагрузку и работал в режиме генератора необходимо увеличить движущий механический момент (например, увеличив поступление пара в турбину).

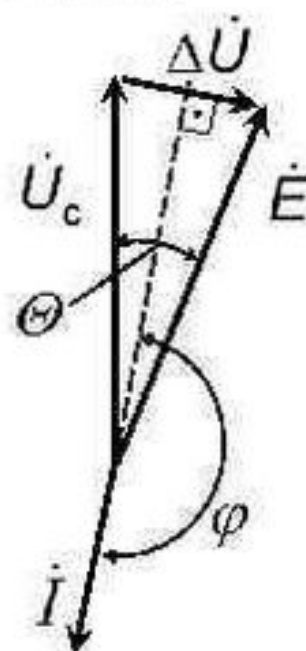


Вектора ЭДС генератора «забегут» вперед на угол  $\Theta$  и возникнет ток, отстающий от  $\Delta U$  на  $90^\circ$ , но при этом  $-90^\circ < \varphi < 90^\circ$ .

При этом  $P = m_1 U I \cos \varphi_1 > 0$ , т.е. машина отдает активную мощность в сеть.

Если притормозить ротор СГ, создав на валу механическую нагрузку, то ЭДС генератора будут отставать от  $U_c$  на угол  $\Theta$  и возникнет ток отстающий от  $\Delta U$  на  $90^\circ$ , но при этом  $90^\circ < \varphi < 270^\circ$ .

При этом  $P = m_1 U I \cos \varphi_1 < 0$  т.е. машина работает в режиме двигателя, потребляя активную мощность из сети.



## U – образные характеристики синхронного генератора

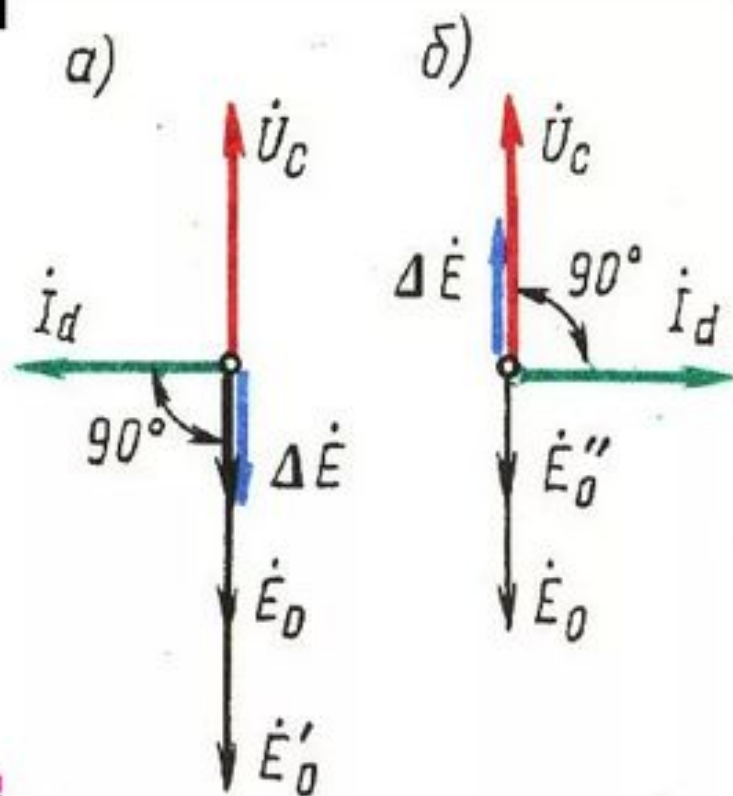


Рис. 97. Векторные диаграммы ЭДС синхронного генератора, включенного на параллельную работу

Активная мощность генератора:

$$P_2 = m_1 \cdot U_C \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = const \quad (11)$$

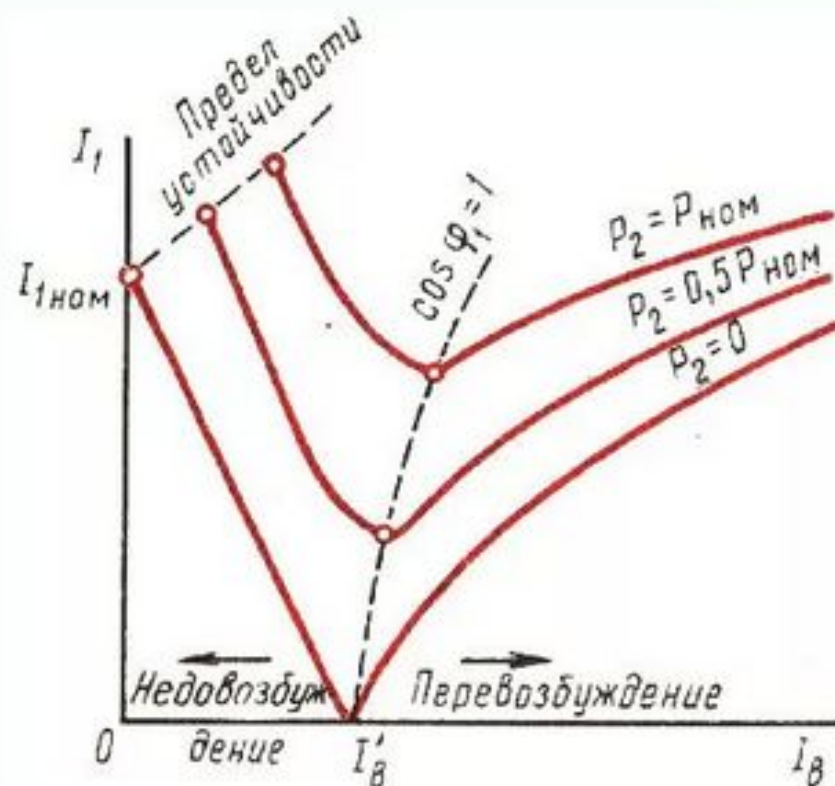


Рис 98. U – образные характеристики синхронного генератора

## Электромагнитный момент синхронной машины

Электромагнитный момент  $M_{эм}$  синхронной машины создается в результате взаимодействия вращающегося магнитного поля статора с основным магнитным потоком ротора  $\Phi_0$

$$M_{эм} = P_{эм} / \omega_1,$$

где  $\omega_1$  - угловая синхронная скорость вращения

$$\omega_1 = 2 \pi n_1 / 60 = 2 \pi f_1 / p.$$

Электромагнитная мощность неявнополюсной синхронной машины

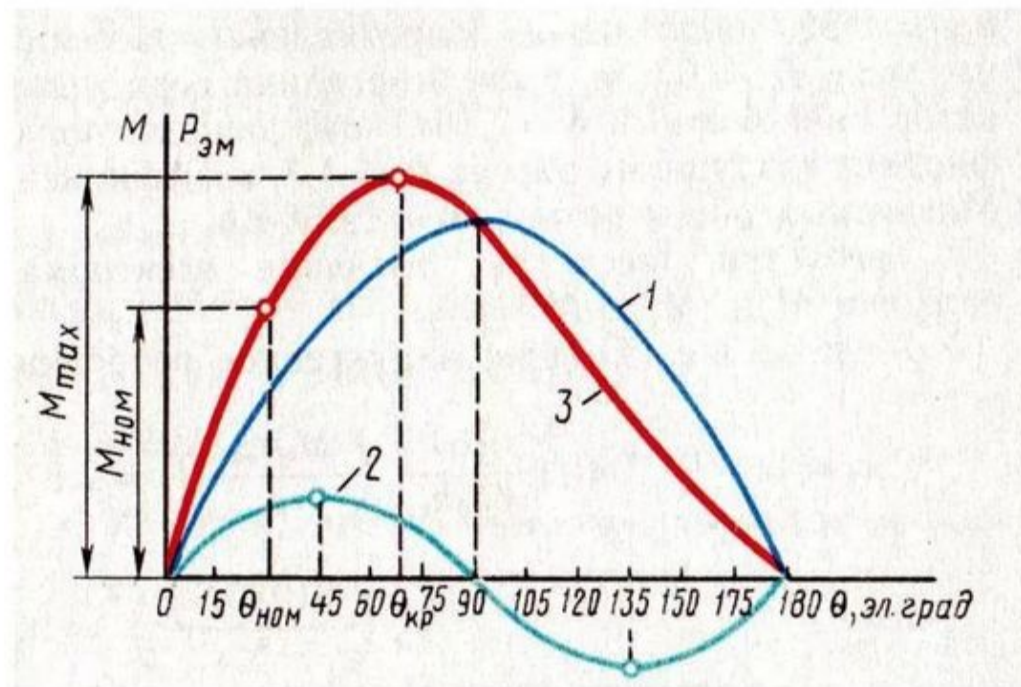
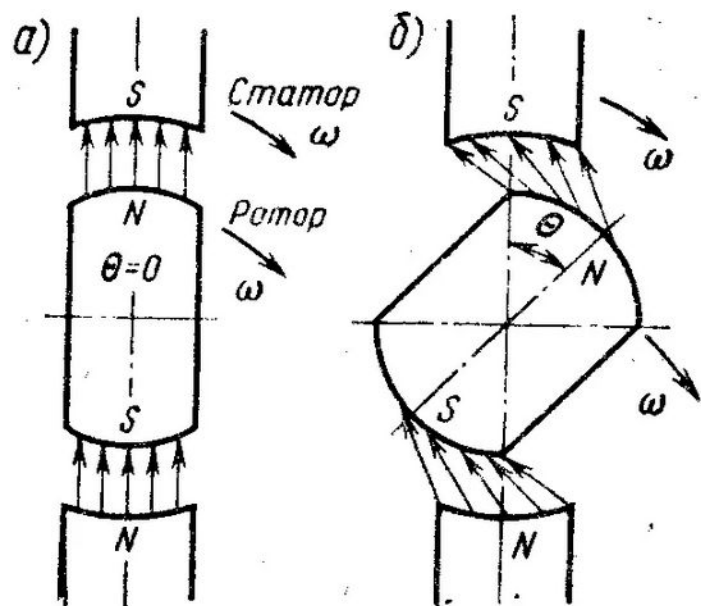
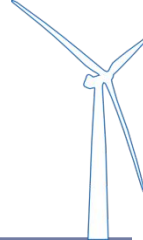
$$P_{эм} = \frac{m_1 U_1 E_0}{X_c} \sin \theta,$$

где  $X_c$  – синхронное индуктивное сопротивление обмотки статора

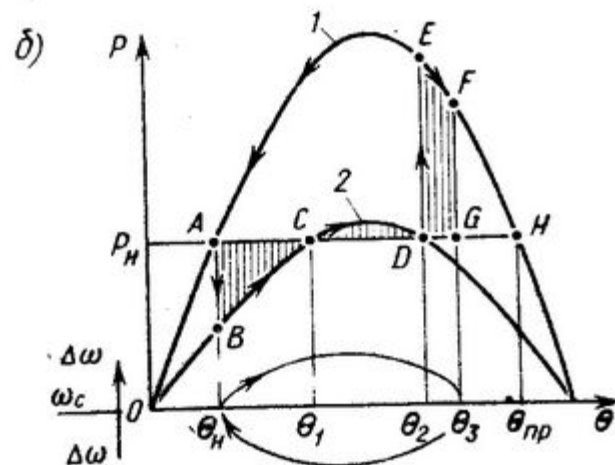
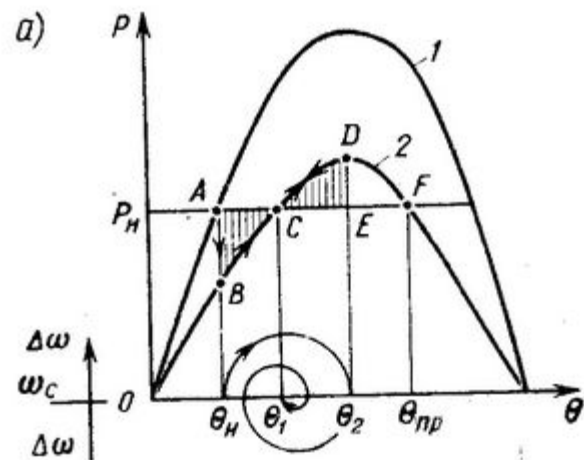
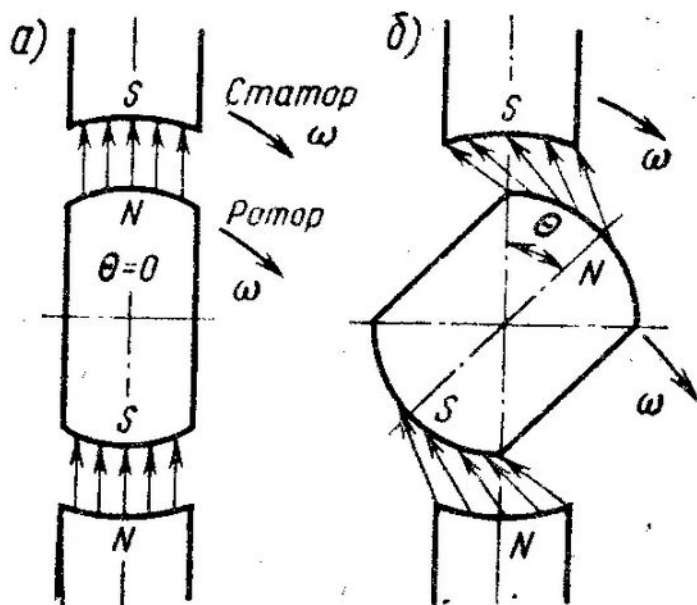
Для явнополюсного синхронного генератора

$$P_{эм} = \frac{m_1 U_1 E_0}{X_d} \sin \theta + \frac{m_1 U_1^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta,$$

где  $X_d$  и  $X_q$  – синхронные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной оси



Угловая характеристика синхронного генератора с явно выраженными полюсами





# Автоматизированная система синхронизации синхронного генератора при параллельной работе.

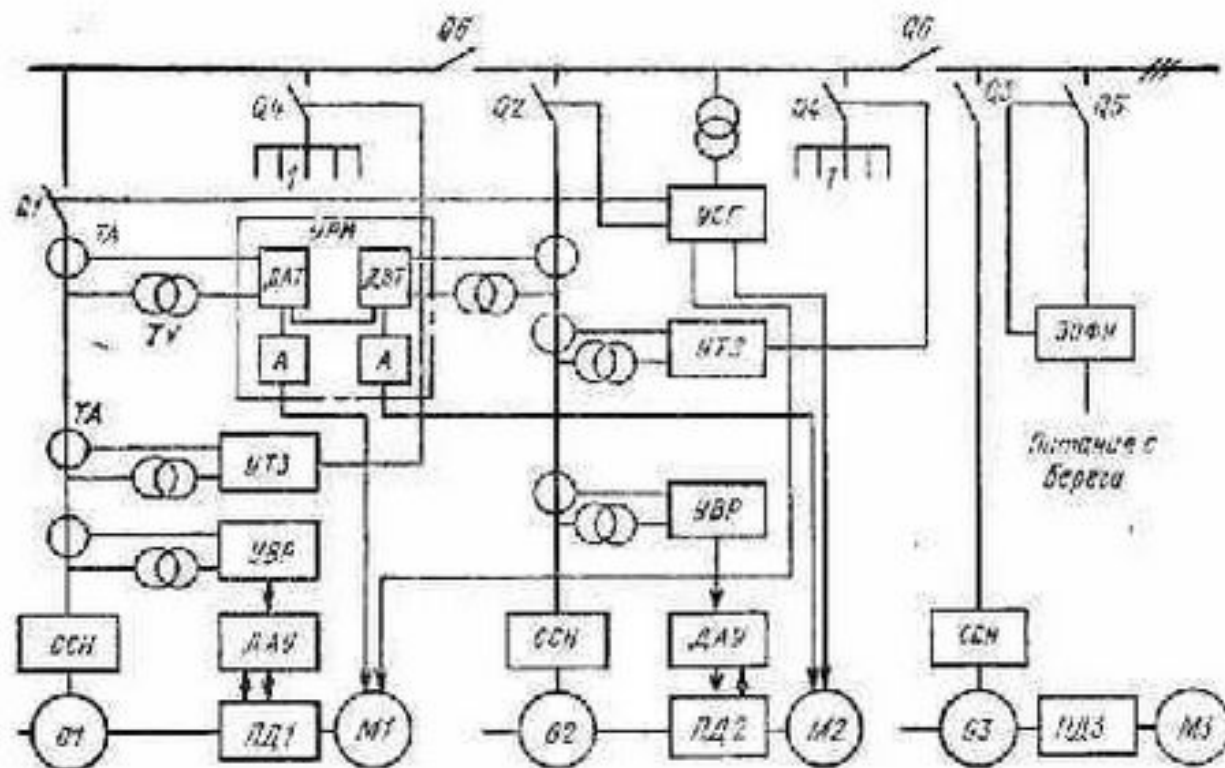


Схема автоматизированной судовой электростанции

УРМ – устройство распределения активной мощности

ДАТ – датчик активного тока

А – усилитель

ТА – трансформатор тока

ТВ – трансформатор напряжения

УТЗ – устройство токовой защиты

УВР – устройство включения резерва

ССН – система стабилизации напряжения (АРН – автоматическое регулирование напряжения СГ)

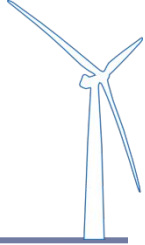
ДАУ – дистанционное управление дизелем

ПД1 – приводной дизель СГ

М1 – серводвигатель с импульсным управлением

УСГ – устройство синхронизации генератора при включении на параллельную работу

ЗОФН – устройство для защиты от работы на 2х фазах при питании с берега.



**СПАСИБО  
ЗА  
ВНИМАНИЕ**

**заведующий кафедрой ВИЭ и ЭЭС  
к.т.н., доцент Шайтор Николай Михайлович**

