

---

# Электрические машины

## СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

---

# Синхронные машины



## 3.1. КОНСТРУКЦИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН

# Конструкция синхронных машин

Синхронные генераторы, двигатели, компенсаторы  
Обратимые синхронные машины на ГАЭС

- обмотка возбуждения (пост.ток)
- обмотка якоря (3-фазная распределенная)

ОВ вращается относительно ОЯ  
→ наводится ЭДС (3-фазная)

$$f = \frac{pn_p}{60}$$

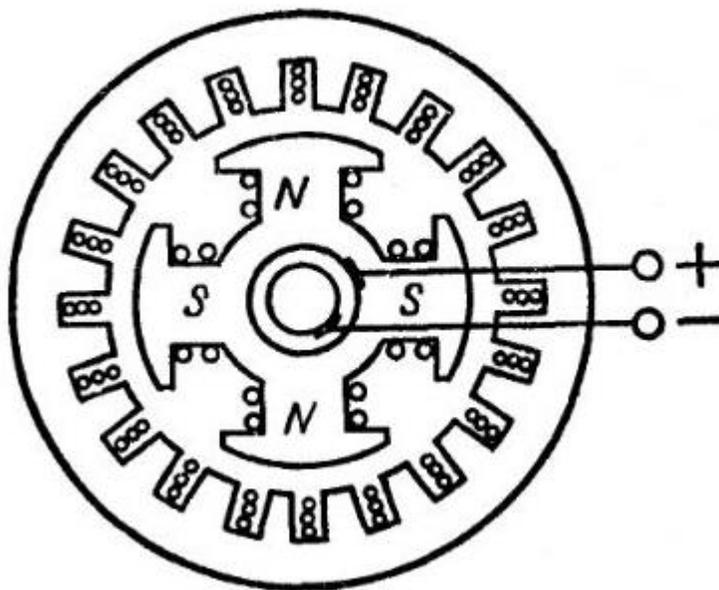
При включении нагрузки

→ 3-фазный ток в ОЯ

→ вращающееся поле якоря

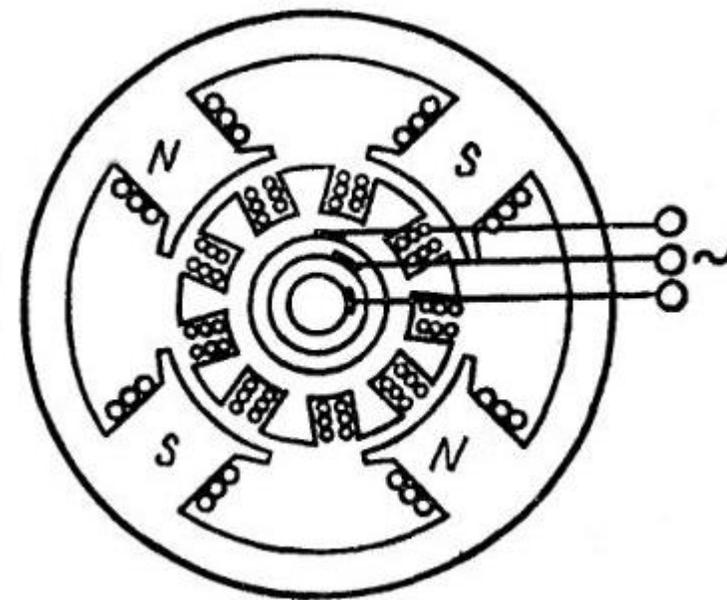
$$n_c = \frac{60f}{p}$$

$n_p = n_c \rightarrow$  «синхронная машина»



Традиционная конструкция

- ОВ на роторе
- ОЯ на статоре



Обращенная конструкция

- ОВ на статоре
- ОЯ на роторе

# Конструкция синхронных машин

По конструкции ротора

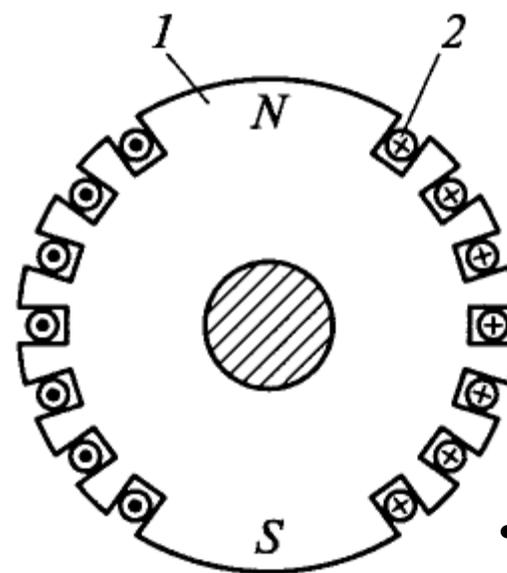
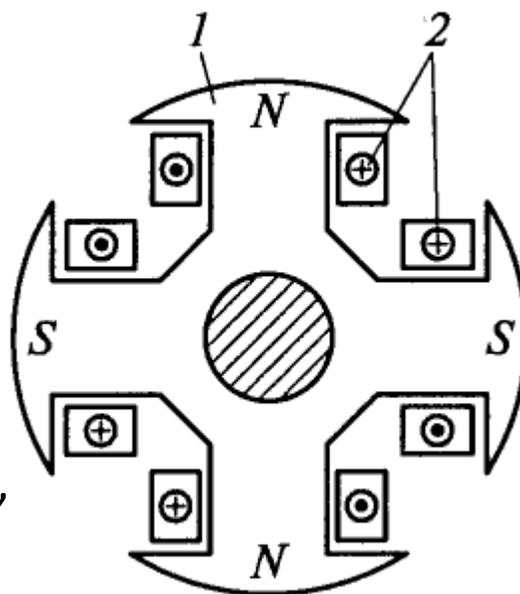
- явнополюсные СМ
- неявнополюсные СМ

Явнополюсный ротор

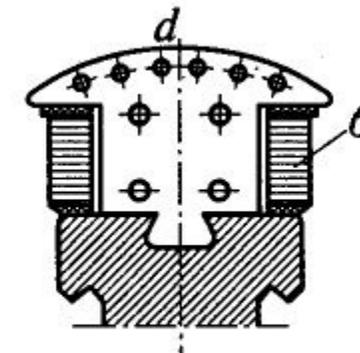
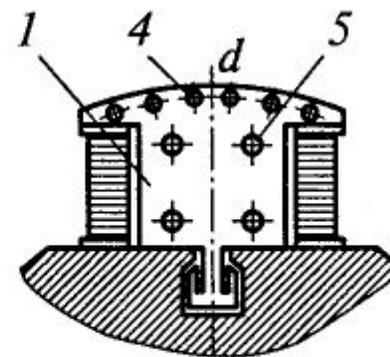
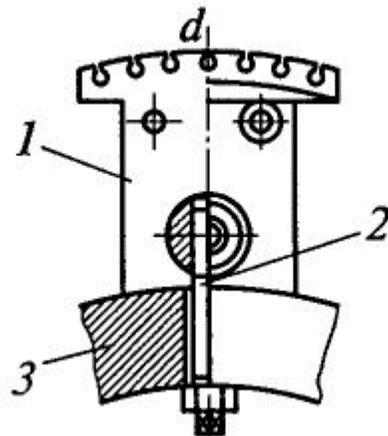
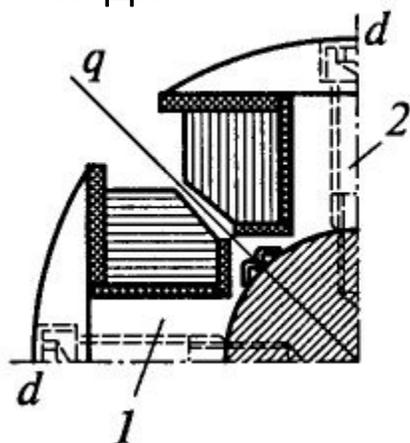
- Полюс шихтованный (1-2 мм, «полюсная» сталь)
- Крепится к ободу (ярмо)
- ОВ из шинной меди

Способы крепления полюсов

- болты
- хвосты



- Продольная ось  $d$
- Поперечная ось  $q$



# Конструкция синхронных машин

Демпферная обмотка – в полюсных наконечниках

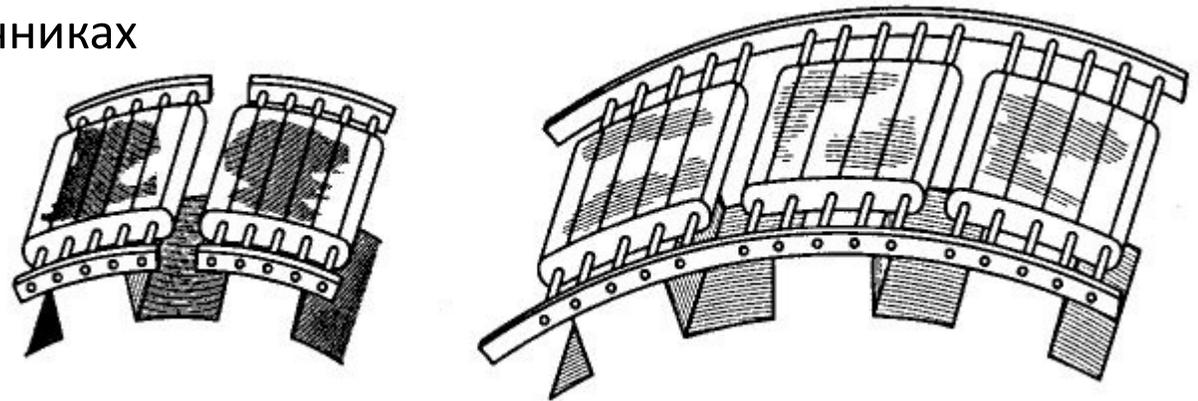
- стержни в пазах
- КЗ сегменты

Демпферная обмотка в генераторе

- ослабляет поле обратной последовательности при несимметричной нагрузке
- демпфирует колебания ротора (качания при парал. работе)

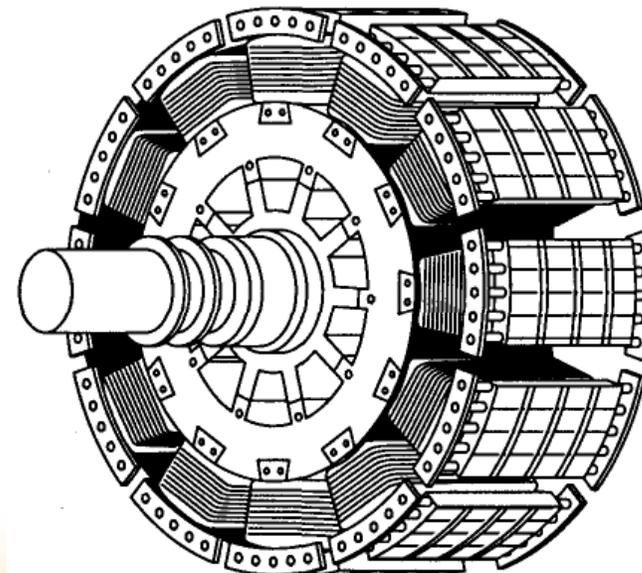
Демпферная обмотка в двигателе

- пусковая обмотка (асинхронный пуск)
- демпфирует колебания ротора (пульсации момента нагрузки)



Продольная ДО

Продольно-поперечная ДО



Ротор явнополюсной синхронной машины

# Конструкция синхронных машин

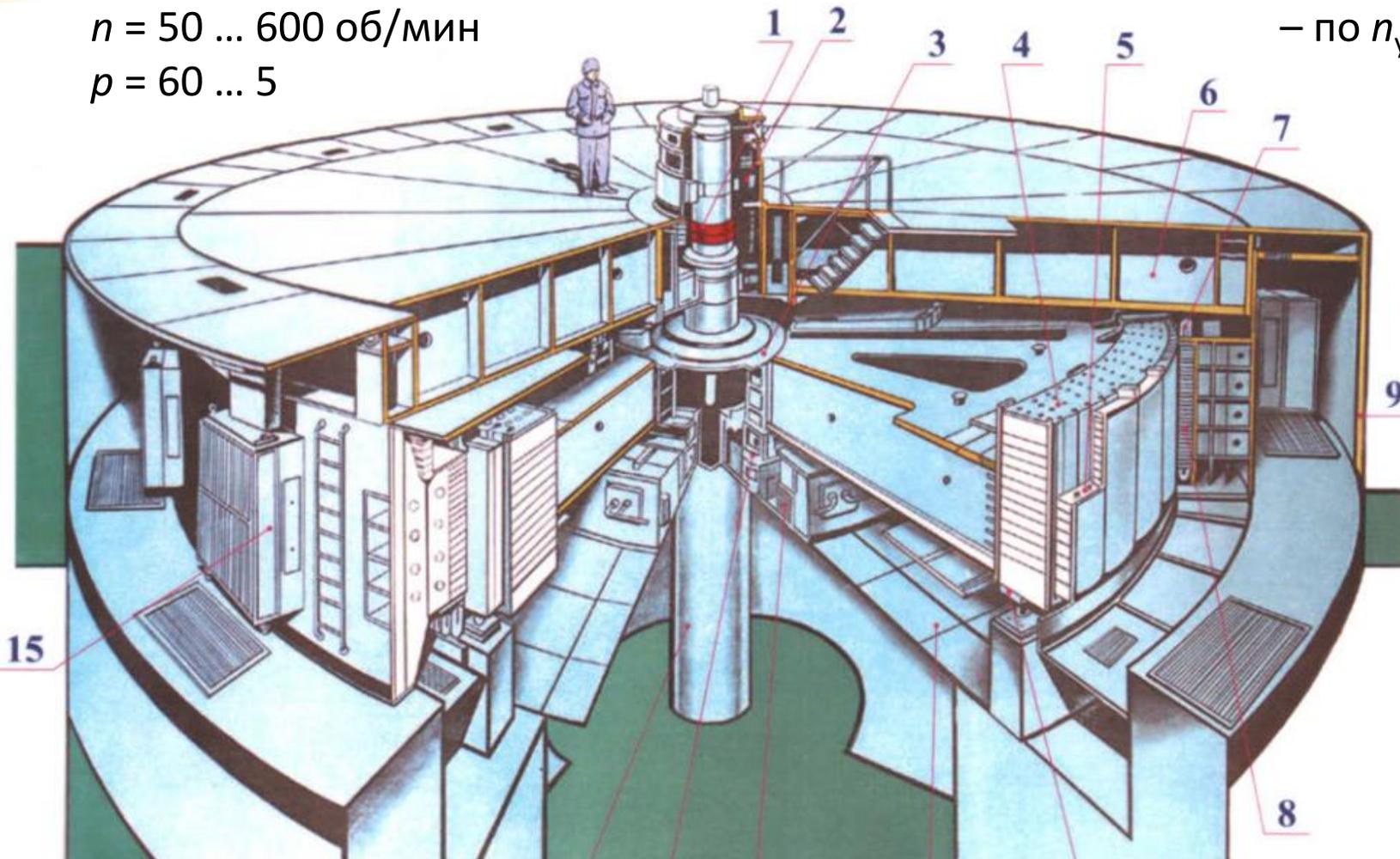
## Гидрогенераторы

$n = 50 \dots 600$  об/мин

$p = 60 \dots 5$

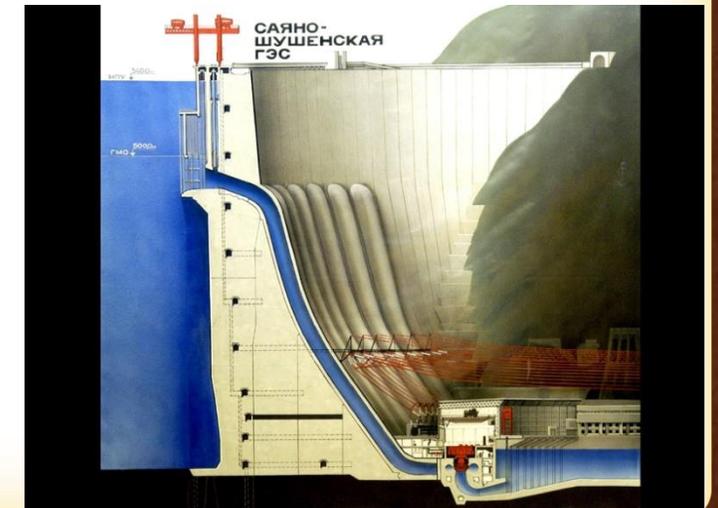
## Механическая прочность

– по  $n_{уг} = 2 \dots 3 n_c$



## Саяно-Шушенская ГЭС 10 генераторов

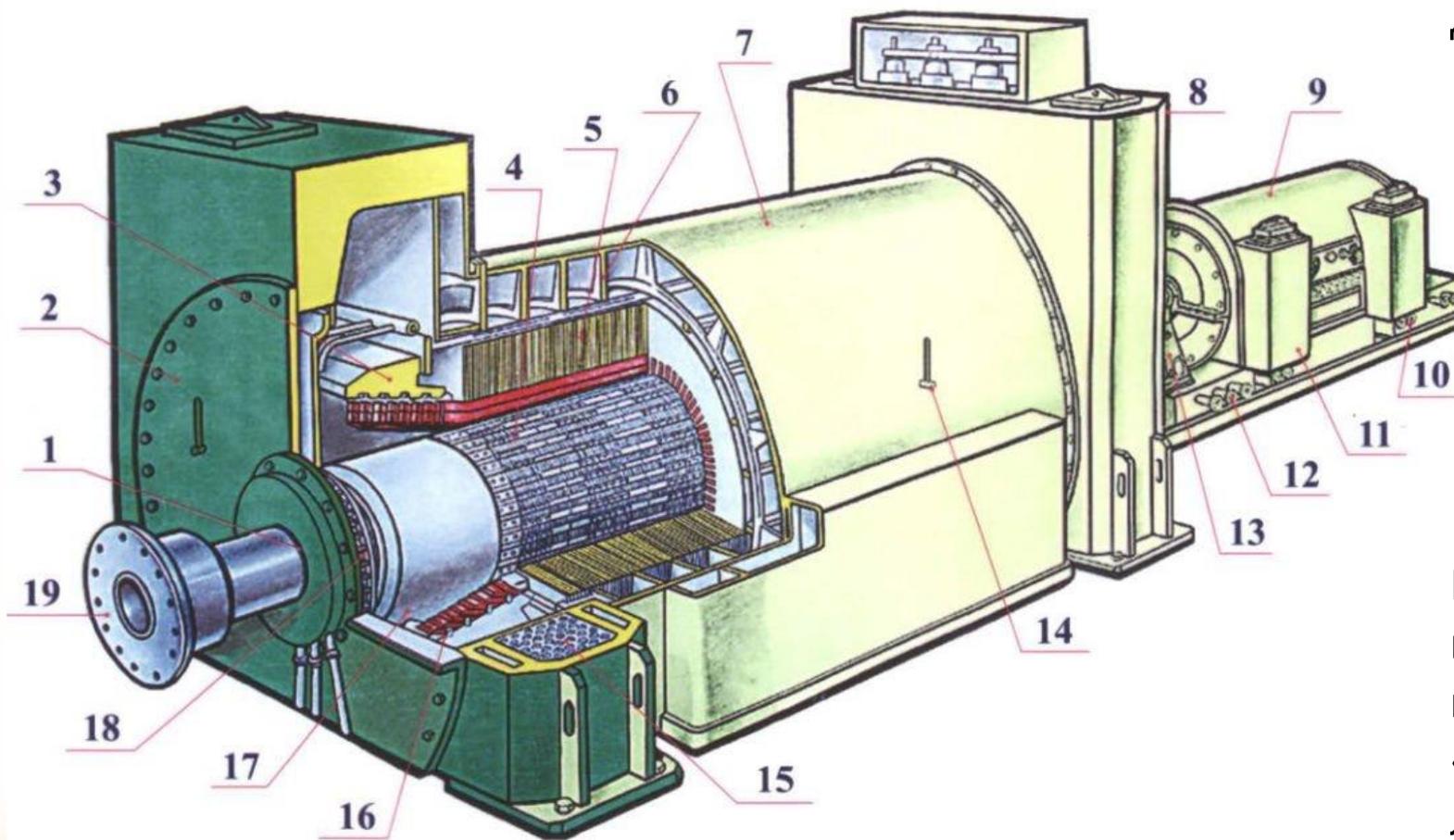
- $S = 715$  МВА
- $n = 143$  об/мин,  $2p = 42$
- $D_a = 15$  м,  $D_p = 12$  м
- $l_1 = 2,75$  м



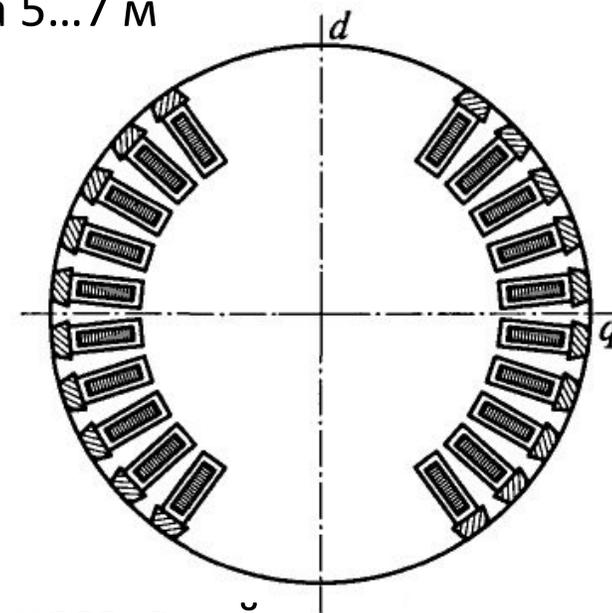
# Конструкция синхронных машин

## Турбогенераторы

$n = 1500$  или  $3000$  об/мин



диаметр ротора 1200...1250 мм  
длина 5...7 м



Ротор массивный  
пазы – распределенная ОВ  
пазовые клинья (немагн. металл)  
«большой зубец» – полюс  
лобовые части ОВ – бандажи

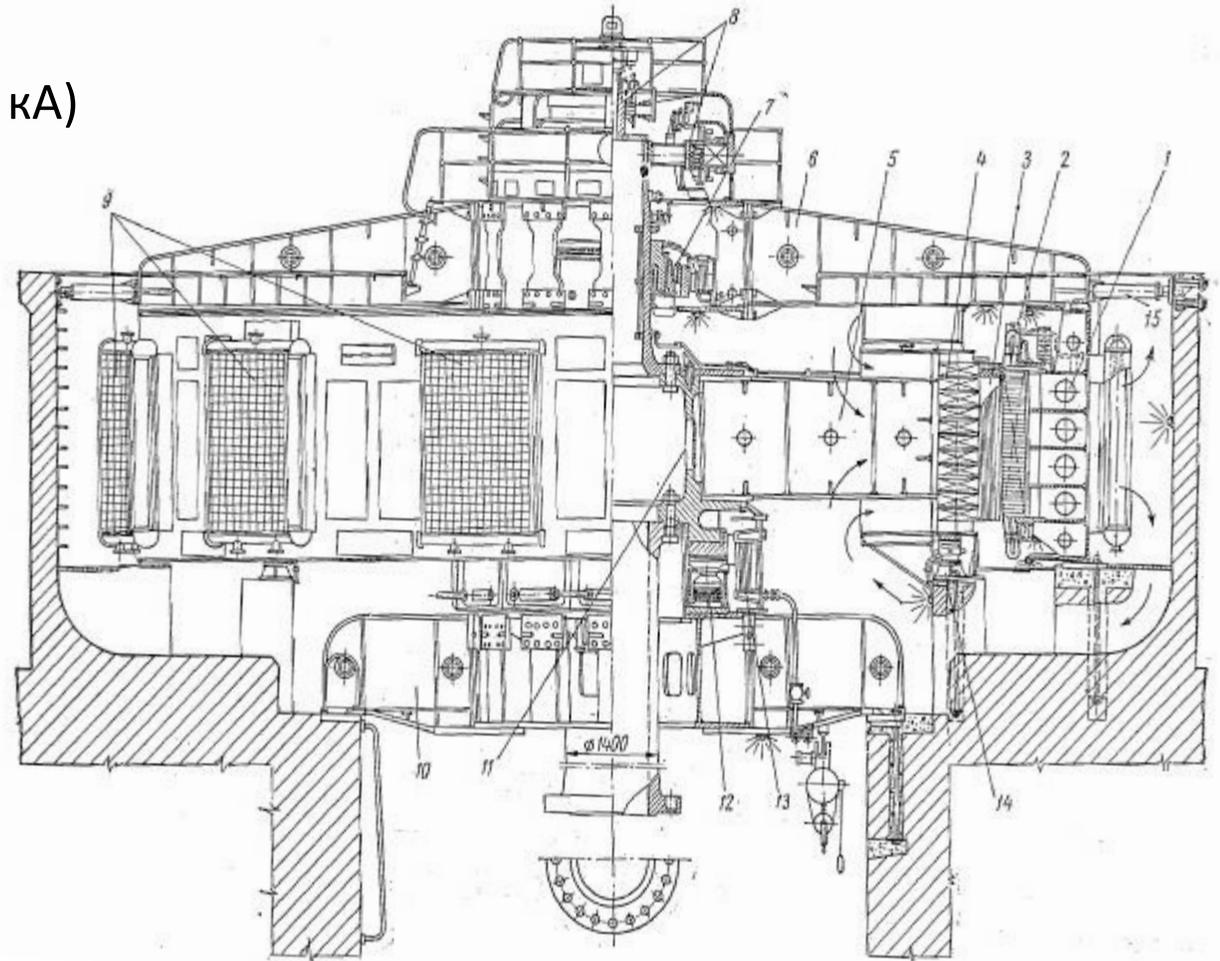
# Системы возбуждения крупных синхронных машин

## Система возбуждения

- постоянный ток для ОВ (до 800 В, до 6...9 кА)
- мощность возбуждения 0,3...3%
- регулирование тока ОВ
- форсировка возбуждения ( $1,8...2 U_{фн}$ )
- гашение магнитного поля

## Электромашинная система возбуждения (8)

- возбудитель – генератор постоянного тока независимого возбуждения
- подвозбудитель – генератор с самовозбуждением для питания ОВ возбудителя



# Системы возбуждения крупных синхронных машин

## Полупроводниковые статические системы возбуждения

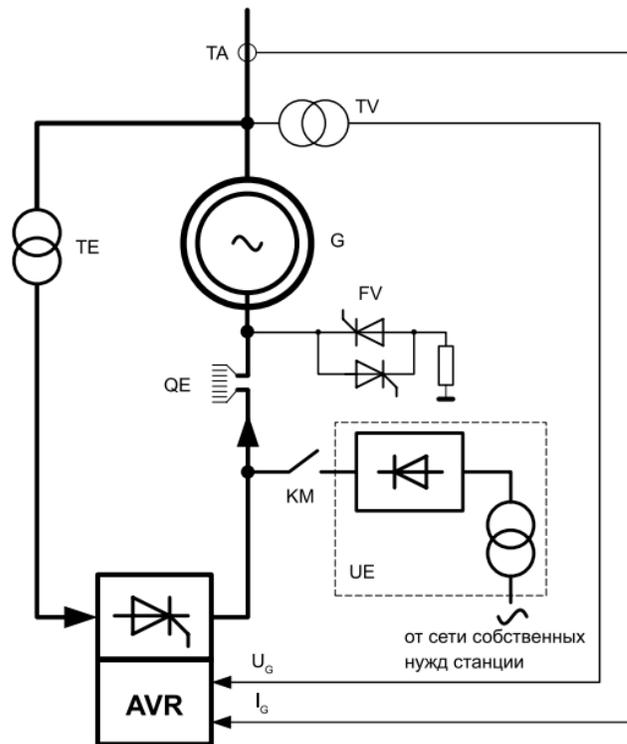
- системы тиристорные самовозбуждения (СТС)
- системы тиристорные независимые (СТН)
- системы бесщеточные диодные (СБД)
- другие (АО «Силовые машины»)

### Функции

- начальное возбуждение
- холостой ход
- включение в сеть методом точной синхронизации или самосинхронизации
- работа в энергосистеме с допустимыми нагрузками и перегрузками
- форсировка возбуждения с заданной кратностью по  $U$  и по  $I$
- разгрузка по реактивной мощности до  $\cos\varphi = 1$
- развозбуждение при нарушениях в энергосистеме
- гашение поля генератора при аварии и при остановке
- электрическое торможение агрегата

# Системы возбуждения крупных синхронных машин

## Системы тиристорные самовозбуждения



- Питание ОВ выпрямленным регулируемым током: напряжение с зажимов генератора через трансформатор и выпрямитель – на ОВ генератора
- AVR – автоматический регулятор возбуждения
- Начальное возбуждение UE – от сети собственных нужд или от батареи (кратковременный импульс  $U$  на ОВ)
- Защита ротора от перенапряжений – тиристорные разрядники FV
- Интенсивное гашение поля – перевод преобразователя в инверторный режим изменением полярности  $U$
- Экстренное снятие возбуждения – автомат гашения поля QE





# Синхронные машины



## 3.2. ХОЛОСТОЙ ХОД СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

# Холостой ход синхронного генератора

Холостой ход:  $n, I_B, I_A = 0$

магнитное поле – только  $\Phi_B$

- основное поле –  $\Phi$  в зазоре и статоре
- поле рассеяния –  $\Phi_{\sigma B}$   
(в ГГ – 30...40% от  $\Phi$ , в ТГ – 4...8%)

$\Phi$  вращающегося индуктора → 3-фазная ЭДС в якоре

Форма напряжения в ОЯ должна быть синусоидальной

Отличие от  $\sin$  – коэффициент искажения синусоидальности  $U_\lambda$

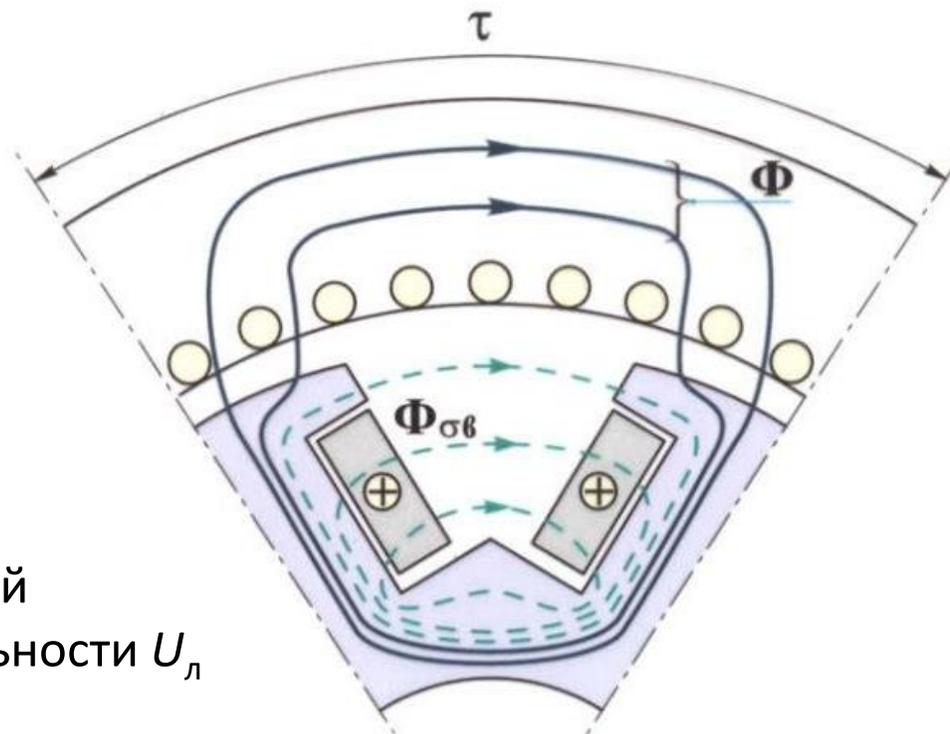
$$K_{\text{и}} = \frac{\sqrt{\sum U_v^2}}{U_H} \cdot 100\%$$

Допустимые искажения:

- в сетях до 1 кВ  $K_{\text{и}} < 8\%$
- в сетях 35 кВ  $K_{\text{и}} < 4\%$

Меры улучшения формы ЭДС в ОЯ известны (Y или  $\Delta$ , укорочение  $y$ )

Но высшие гармоники  $\Phi_f$  создают добавочные потери → надо их уменьшать

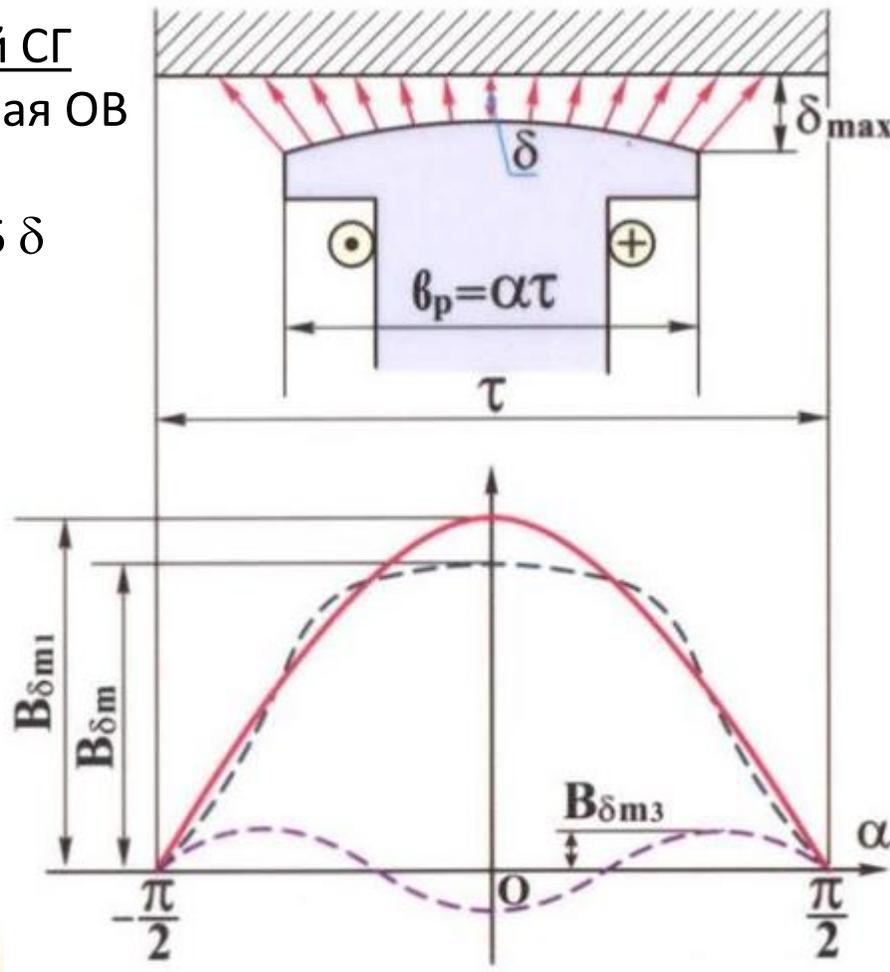


# Холостой ход синхронного генератора

Поток в зазоре определяется МДС и магнитным сопротивлением  $\Phi = F_f / R_{\mu\delta}$

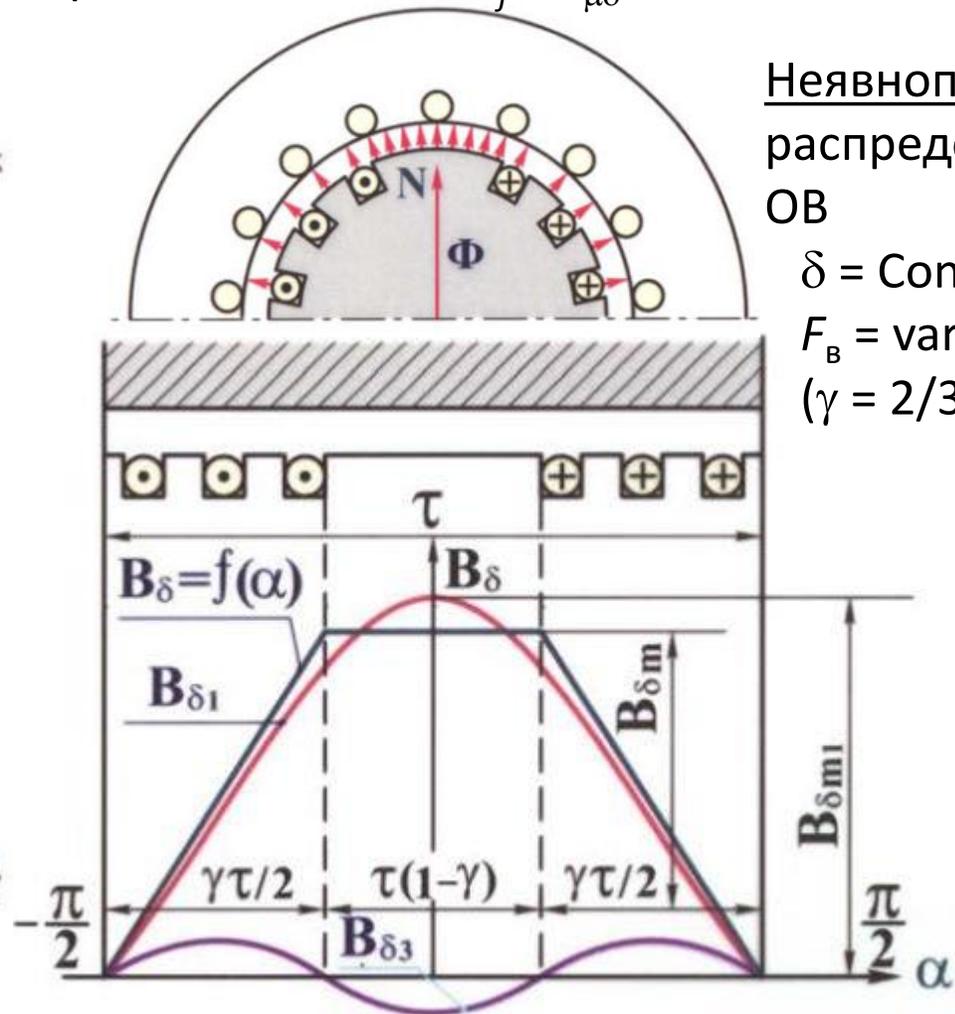
Явнополюсный СГ  
сосредоточенная ОВ

$F_B = \text{const}$   
 $\delta_{\max} = 1,5 \dots 2,5 \delta$



Неявнополюсный  
распределенная  
ОВ

$\delta = \text{Const}$   
 $F_B = \text{var}$   
( $\gamma = 2/3 \tau$ )



# Холостой ход синхронного генератора

Характеристика холостого хода

$$E_1 = f(I_B) \text{ при } n = \text{Const}$$

Остаточная ЭДС 2...3%  $U_H$

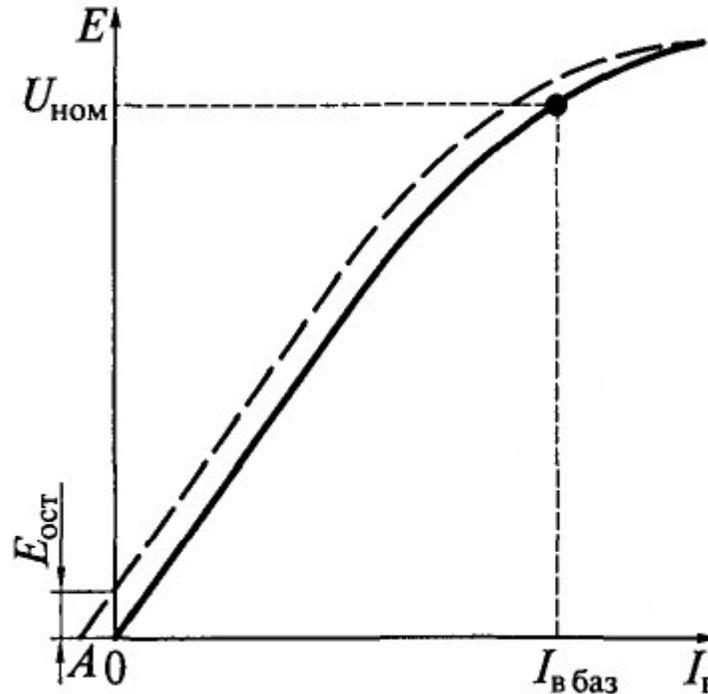
Базовое значение  $I_B$  соотв.  $U_H$

Система относительных единиц

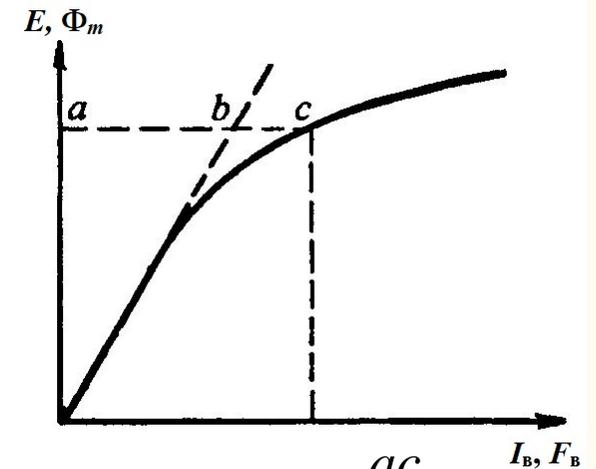
$$E_* = \frac{E}{U_H} \quad I_{B*} = \frac{I_B}{I_{B \text{ баз}}}$$

Нормальные характеристики ХХ

$I_{B*}$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$E_{я*}$	0	0,53	1,0	1,23	1,3	-	-	-
$E_{HЯ*}$	0	0,58	1,0	1,21	1,33	1,4	1,45	1,51



ХХХ эквивалентна характеристике намагничивания  $\Phi_m = f(F_B)$   
 $(E = 4k_B f_1 w_1 k_{ol} \Phi_m, F_B = I_B w_B)$



$$k_{\text{нас}} = \frac{ac}{ab}$$

– коэффициент насыщения магнитной цепи

# Синхронные машины



## 3.3. РАБОТА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ



# Работа синхронного генератора под нагрузкой

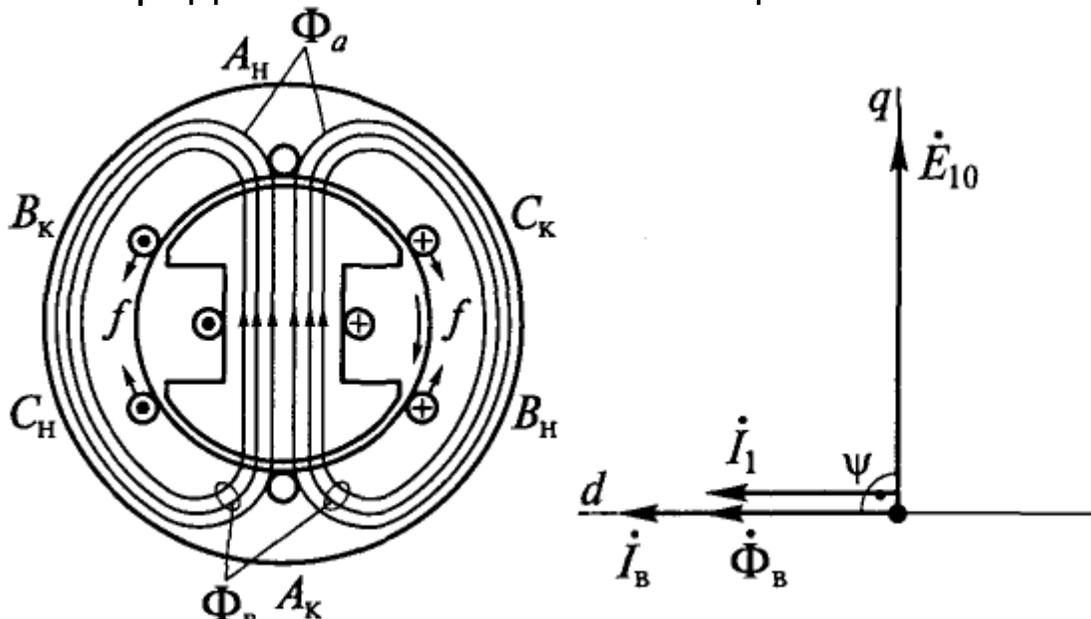
## Реакция якоря

### 2. Емкостная нагрузка ( $I_1$ опережает $E_{10}$ на $\pi/2$ )

$E_{10} \rightarrow$  опережающий  $I_1$

$\rightarrow \Phi_a$  по оси  $d$  в направлении  $\Phi_B$

$\rightarrow$  продольная намагничивающая РЯ



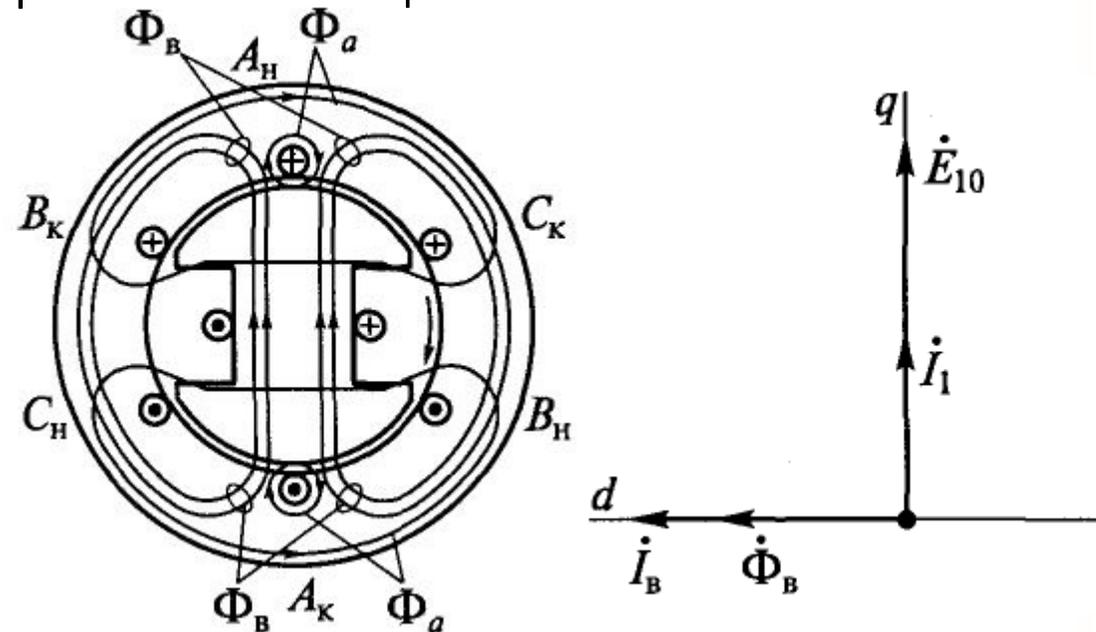
Направления сил под полюсом  
– скомпенсированы ( $M = 0, P_1 = 0$ )

### 3. Активно-емкостная нагрузка ( $I_1$ совпадает с $E_{10}$ )

$I_1$  совпадает с  $E_{10} \rightarrow \Phi_a$  поперечный (по оси  $q$ )

$\rightarrow$  ослабляет  $\Phi_B$  на набегающем крае, усиливает

на сбегающем  $\rightarrow$  при насыщении – поперечная размагничивающая РЯ



Направления сил совпадают с направлением  
вращения ( $M > 0$ , на роторе  $M < 0$ )

# Работа синхронного генератора под нагрузкой

## Реакция якоря

Для неявнополюсного СГ реакция якоря проявляется аналогично

В общем случае для произвольной нагрузки можно разложить  $I_1$  на продольную и поперечную составляющие

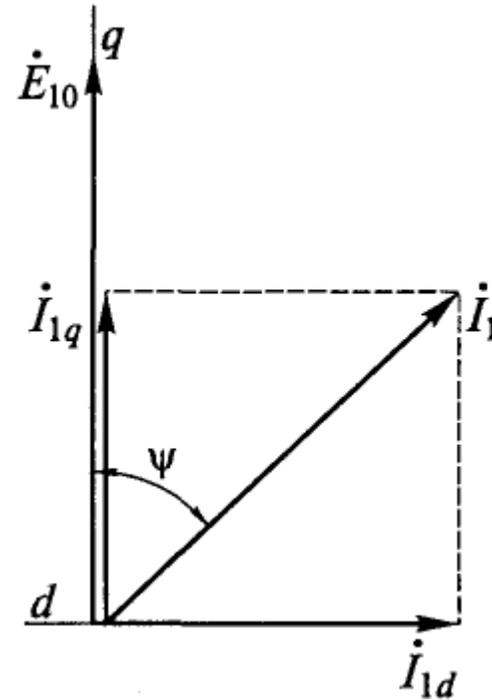
$$I_{1d} = I_1 \sin \psi$$

$$I_{1q} = I_1 \cos \psi$$

$I_{1d}$  (продольный ток якоря) создает продольную РЯ

$I_{1q}$  (поперечный ток якоря) создает поперечную РЯ

При линейной магнитной цепи применяется метод суперпозиции



# Векторная диаграмма неявнополюсного СГ без учета насыщения

Рассматривая потоки статора и ротора  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  независимо легко записать соответствующие ЭДС в ОЯ:

$$\Phi_2 = \Phi_B + \Phi_{в\sigma} \rightarrow E_{10}$$

$$\Phi_1 = \Phi_a + \Phi_{a\sigma} \rightarrow E_a + E_{a\sigma}$$

По 2-з-ну Кирхгофа для фазы якоря  $\dot{E}_{10} + \dot{E}_a + \dot{E}_{a\sigma} = \dot{I}_1 Z_H + \dot{I}_1 r_1$

Поток якоря создается током  $I_1$

и наводит ЭДС, пропорциональные  $I_1$   $\dot{E}_a = -j\dot{I}_1 x_a$   $\dot{E}_{a\sigma} = -j\dot{I}_1 x_{a\sigma}$

Заменив  $I_1 Z_H$  на  $U_1$  запишем уравнение напряжения СГ

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_{10} - j\dot{I}_1 (x_a + x_{a\sigma}) - \dot{I}_1 r_1 = \dot{E}_{10} - j\dot{I}_1 x_c - \dot{I}_1 r_1$$

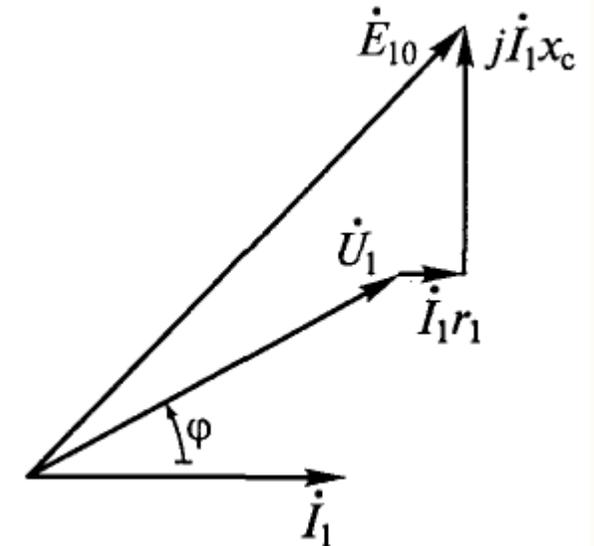
здесь  $x_a$  – индуктивное сопротивление реакции якоря

$x_{a\sigma}$  – индуктивное сопротивление рассеяния ОЯ

$x_c$  – синхронное индуктивное сопротивление ОЯ ( $x_c = x_a + x_{a\sigma}$ )

Для  $E_{10}$  находят  $I_B$  по спрямленной хар-ке ХХ

Векторная диаграмма



значения параметров в о.е.

- $x_{c*} = 1,2 \dots 2,4$
- $x_{a*} = 1,1 \dots 2,3$
- $x_{a\sigma*} = 0,08 \dots 0,15$
- $r_{1*} = 0,002 \dots 0,02$

$$Z_G = \frac{U_{1\phi}}{I_{1\phi}}$$

# Метод двух реакций

Магнитный поток  $\Phi_a = F_a / R_\mu$

Основная часть  $R_\mu$  – воздушный зазор  $\delta$

- в неявнополюсных СГ  $\delta = \text{Const}$   
→  $E_a \sim \Phi_a \sim F_a$  при любой нагрузке и угле  $\psi$
- в явнополюсных СГ ротор несимметричен  
→ при разных нагрузках (углах  $\psi$ )  $R_\mu$  разное,  
т.е.  $\Phi_a = f(F_a, \psi)$  – как считать?

1895 г. Андре Блондель – метод двух реакций

$$\dot{F}_a = \dot{F}_d + \dot{F}_q$$

$F_d$  создается током  $I_d$  и действует только по оси  $d$

$F_q$  создается током  $I_q$  и действует только по оси  $q$

Оси  $d$  и  $q$  вращаются с ротором

→  $R_{\mu d} = \text{Const}$  и  $\Phi_{ad} \sim F_d$ ;  $R_{\mu q} = \text{Const}$  и  $\Phi_{aq} \sim F_q$

$$F_d = F_a \sin \psi \quad F_q = F_a \cos \psi$$

Для учета насыщения при определении  $E_{10}$  по  $F_B$  используют хар-ку ХХ

Удобно ее использовать и для  $E_{ad}$ ,  $E_{aq}$

Но формы МДС  $F_d$ ,  $F_q$  и  $F_B$  разные → они создадут разные гармоники → разные ЭДС  
Необходимо привести действие  $\sin$ -х  $F_d$ ,  $F_q$  к действию прямоугольной  $F_B$

$$F_{ad} = k_d F_d \quad F_{aq} = k_q F_q$$

$k_d$ ,  $k_q$  – коэф-ты реакции якоря по оси  $d$  и  $q$   
Значения коэф-тов зависят от геометрии СМ  
 $\alpha = b_p / \tau$  и  $\delta_{max} / \delta$

По значениям  $F_{ad}$ ,  $F_{aq}$  можно находить ЭДС по характеристике ХХ  $E_0 = f(F_B)$

# Векторная диаграмма явнополюсного СГ без учета насыщения

Согласно методу двух реакций, в зазоре действуют потоки  $\Phi_{в}$ ,  $\Phi_{ad}$  и  $\Phi_{aq}$

По 2-з-ну Кирхгофа для фазы якоря

$$\dot{E}_{10} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{a\sigma} = \dot{U}_1 + \dot{I}_1 r_1$$

Потоки  $\Phi_{ad}$ ,  $\Phi_{aq}$  создаются токами  $I_{1d}$ ,  $I_{1q}$  и наводят ЭДС, пропорциональные соответствующим токам

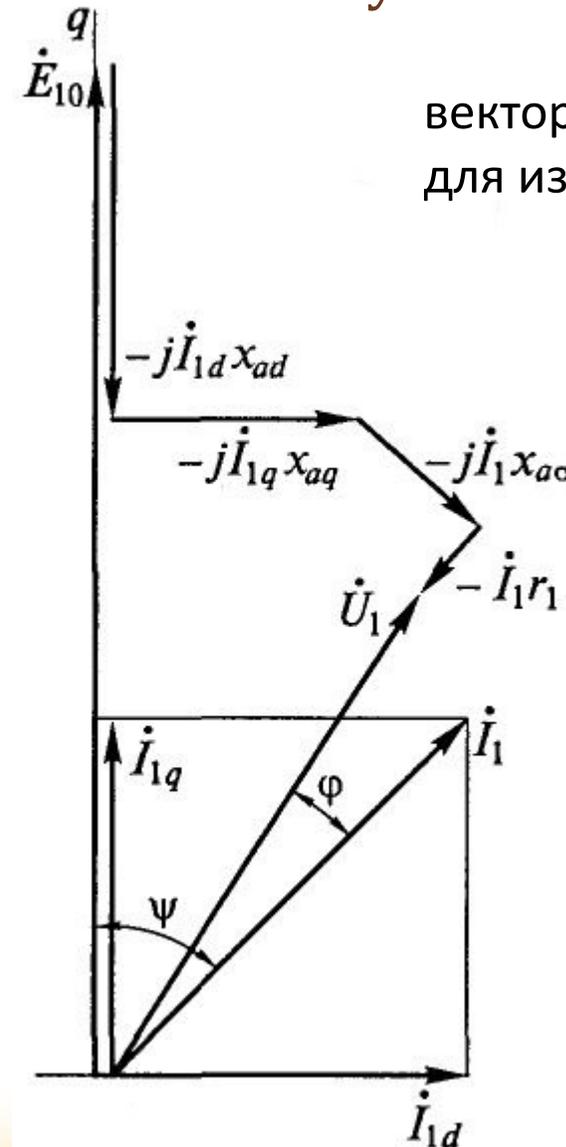
$$\dot{E}_{ad} = -j\dot{I}_{1d}x_{ad} \quad \dot{E}_{aq} = -j\dot{I}_{1q}x_{aq}$$

здесь  $x_{ad}$  – индуктивное сопротивление реакции якоря по продольной оси

$x_{aq}$  – индуктивное сопротивление реакции якоря по поперечной оси

Тогда уравнение напряжения явнополюсного СГ

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_{10} - j\dot{I}_{1d}x_{ad} - j\dot{I}_{1q}x_{aq} - j\dot{I}_1x_{a\sigma} - \dot{I}_1 r_1$$



векторная диаграмма для известных  $E_{10}$ ,  $I_1$  и  $\psi$

$$\dot{I}_1 \rightarrow \dot{I}_{1d} + \dot{I}_{1q}$$

$$\dot{E}_{10} - j\dot{I}_{1d}x_{ad}$$

$$-j\dot{I}_1x_{a\sigma}$$

$$-\dot{I}_1 r_1$$

$$= \dot{U}_1$$

# Векторная диаграмма явнополюсного СГ без учета насыщения

Слагаемое  $I_1 x_{a\sigma}$  тоже удобно выразить через  $I_{1d}, I_{1q}$

$$-j\dot{I}_1 x_{a\sigma} = -j(\dot{I}_{1d} + \dot{I}_{1q})x_{a\sigma}$$

Тогда уравнение  $U$  можно записать проще

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_{10} - j\dot{I}_{1d}(x_{ad} + x_{a\sigma}) - j\dot{I}_{1q}(x_{aq} + x_{a\sigma}) - \dot{I}_1 r_1$$

или 
$$\dot{U}_1 = \dot{E}_{10} - j\dot{I}_{1d}x_d - j\dot{I}_{1q}x_q - \dot{I}_1 r_1$$

здесь  $x_d = x_{ad} + x_{a\sigma}$  – синхронное индуктивное сопротивление ОЯ по продольной оси

$x_q = x_{aq} + x_{a\sigma}$  – синхронное индуктивное сопротивление ОЯ по поперечной оси

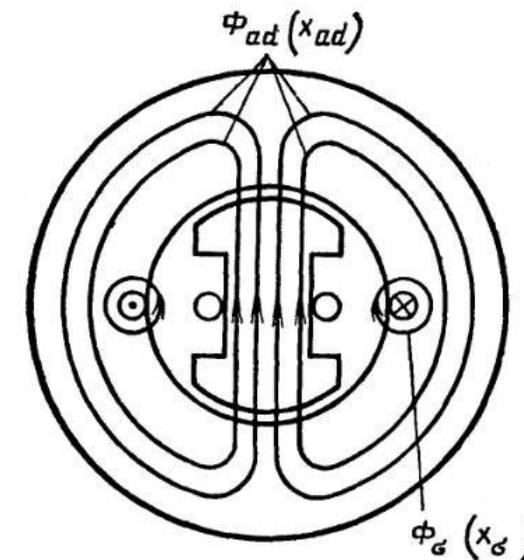
Насыщение стали:

$\Phi_{aq}$  влияет на  $x_{ad}$ , а  $\Phi_{ad}$  влияет на  $x_{aq}$  (слабее)

Приближенная методика – Токарев Б.Ф.

Подробное построение – Иванов-Смоленский А.В.

Индуктивные сопротивления определяются соответствующими потоками

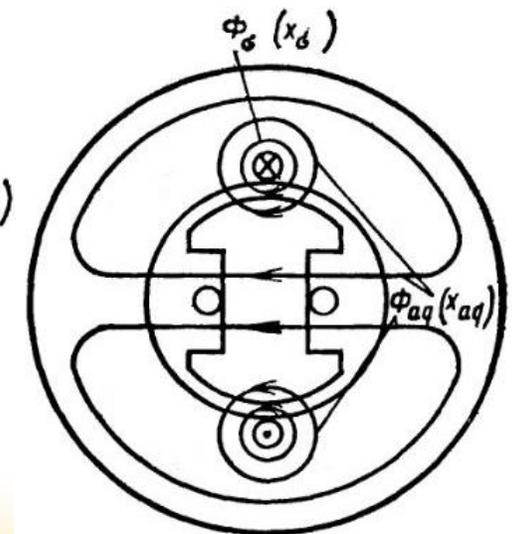


в СМ  $x_d > x_q$ :

- $x_{d*} = 0,6...1,5$
- $x_{q*} = 0,4...0,9$

при этом

- $x_{a\sigma*} = 0,08...0,15$
- $r_{1*} = 0,002...0,02$



# Синхронные машины



## 3.4. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

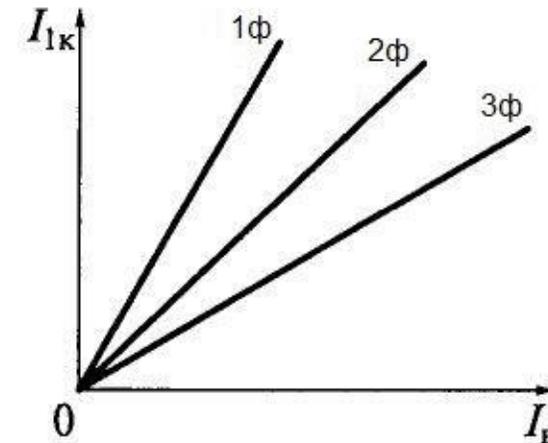
# Характеристики синхронного генератора

Характеристика холостого хода

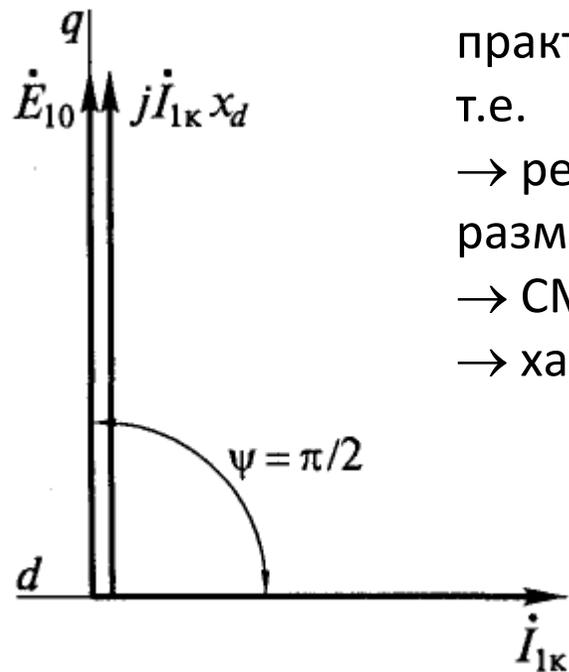
$E_{10} = f(I_B)$  при  $I_1 = 0$  и  $n_2 = n_1 = \text{Const}$  (см. выше)

Характеристика короткого замыкания (3-фазное КЗ)

$I_{1к} = f(I_B)$  при  $n_2 = n_1 = \text{Const}$

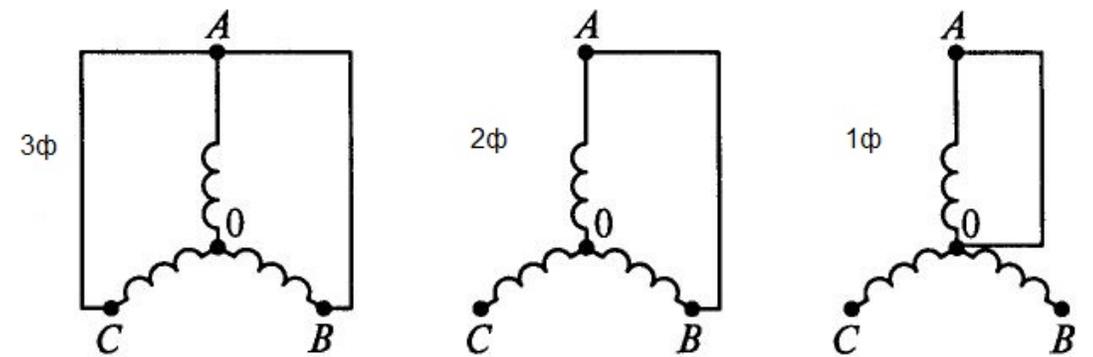


Из-за малого  $r_1$  ток  $I_{1к}$  практически индуктивный, т.е.  $\dot{I}_{1к} = \dot{I}_{1d}$   
 → реакция якоря продольная размагничивающая  
 → СМ ненасыщена  
 → характеристики линейные



Уравнение напряжений (при  $U_1 = 0$  и  $r_1 = 0$ )

$$\dot{E}_{10} = j\dot{I}_{1к}x_d$$



- 3ф КЗ – симметричное
- 2ф КЗ –  $F_{1\Sigma}$  меньше, размагничив.РЯ меньше,  $\Phi_\Sigma$  и  $E_{10}$  больше,  $I_{1к}$  больше
- 1ф КЗ – самое опасное

# Характеристики синхронного генератора

Характеристика холостого хода

$E_{10} = f(I_B)$  при  $I_1 = 0$  и  $n_2 = n_1 = \text{Const}$  (см. выше)

Характеристика короткого замыкания (3-фазное КЗ)

$I_{1к} = f(I_B)$  при  $n_2 = n_1 = \text{Const}$

По хар-кам ХХ и КЗ можно найти  $x_d$  ненасыщенной СМ

$$x_d = \frac{E_{10}}{I_{1к}}$$

ЭДС ХХ ( $=U_{\text{НОМ}}$ ) по спрямленной ХХХ  $\rightarrow I_B$  (A  $\rightarrow$  C)  
 Для этого  $I_B$  по ХКЗ  $\rightarrow I_{1к}$  (C  $\rightarrow$  E)

$$x_d^* = \frac{|AC|}{|EC|}$$

*Отношение короткого замыкания*

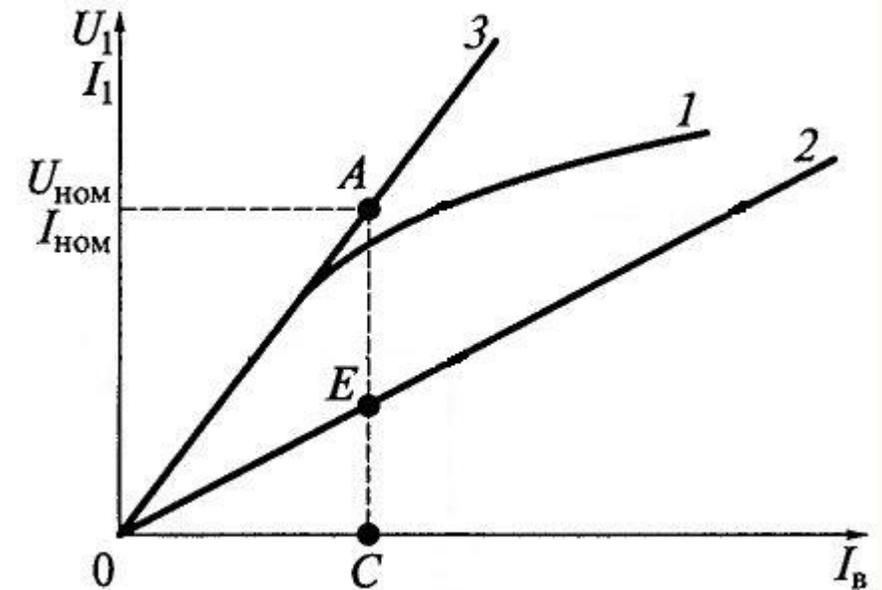
$$\text{ОКЗ} = I_{1к} / I_{1н} = I_{1к}^*$$

при  $I_{B \text{ баз}}$  обеспечивающем  $E_{10} = U_{\text{НОМ}}$

По 3 для  $E_{10} = U_{\text{НОМ}} \rightarrow I_B$  (A  $\rightarrow$  C)  
 Для этого  $I_B$  по ХКЗ  $\rightarrow I_{1к}$  (C  $\rightarrow$  E)  
 В о.е.  $I_{\text{НОМ}} = U_{\text{НОМ}} = 1$  (отрезок AC)

$$\text{ОКЗ} = \frac{|EC|}{|AC|}$$

(ОКЗ  $\sim 1 / x_d^*$ )



- 1 – хар-ка ХХ
- 2 – хар-ка 3ф КЗ
- 3 – спрямленная ХХХ (без насыщения)

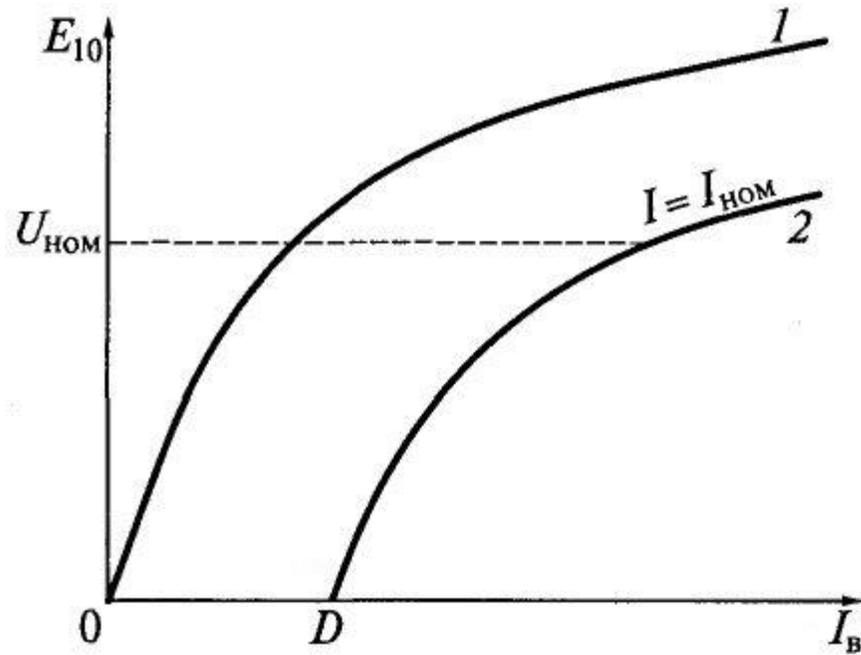
В гидрогенераторах ОКЗ = 1,0...1,4

В турбогенераторах ОКЗ = 0,5...0,7

# Характеристики синхронного генератора

Индукционная нагрузочная характеристика

$U_1 = f(I_B)$  при  $I_1 = \text{const}$ ,  $\cos\varphi = 0$  и  $n_2 = n_1 = \text{const}$   
(нагрузка – реактор с переменной  $L$  и мин.  $r$ )



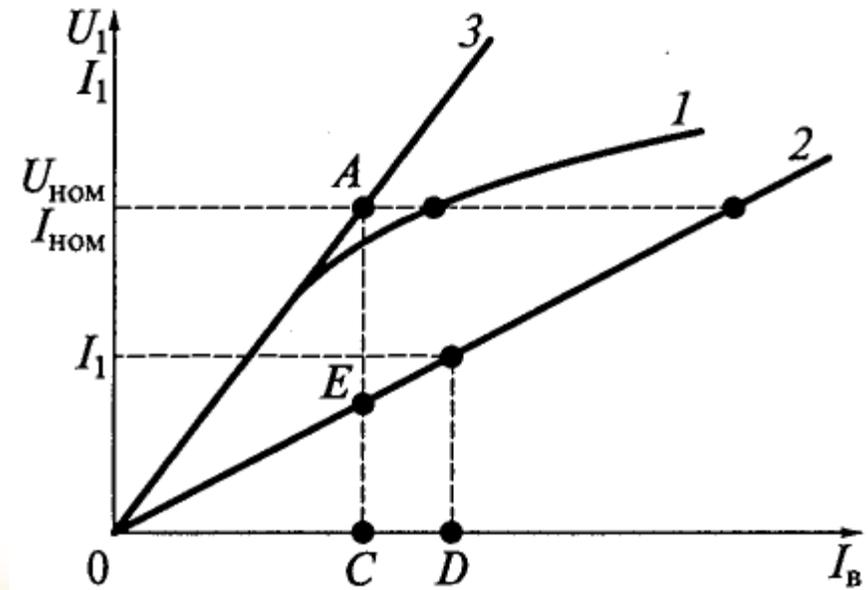
1 – характеристика ХХ  
2 – индукционная нагрузочная характеристика

$U_1 < E_{10}$  при одинаковом  $I_B$

- $\Delta U$  в цепи ОЯ при  $I_1$
- размагничивающая РЯ при инд.  $I_1$

Точка  $D$  недостижима ( $U_1 = 0$  – режим КЗ)  
Ее можно найти по хар-ке КЗ:

т.  $D \rightarrow I_B$ , обеспечивающий  $I_1$  при КЗ



# Характеристики синхронного генератора

## Внешние характеристики

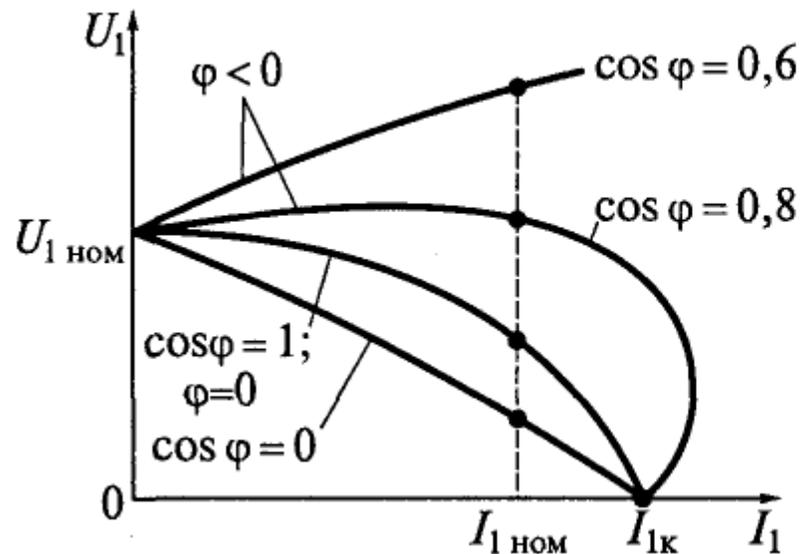
$U_1 = f(I_1)$  при  $I_B = \text{Const}$ ,  $\cos\varphi = \text{Const}$  и  $n_2 = n_1 = \text{Const}$

При *индуктивной* нагрузке ( $\varphi=90^\circ$ ,  $\cos\varphi = 0$ )

- продольная размагничив. РЯ  $\rightarrow$  снижение  $\Phi$  (и  $E_{10}$ )
- падение напряжения  $I_1(r_1 + jx_{a\sigma})$

При *активной* нагрузке ( $\varphi=0^\circ$ ,  $\cos\varphi = 1$ )

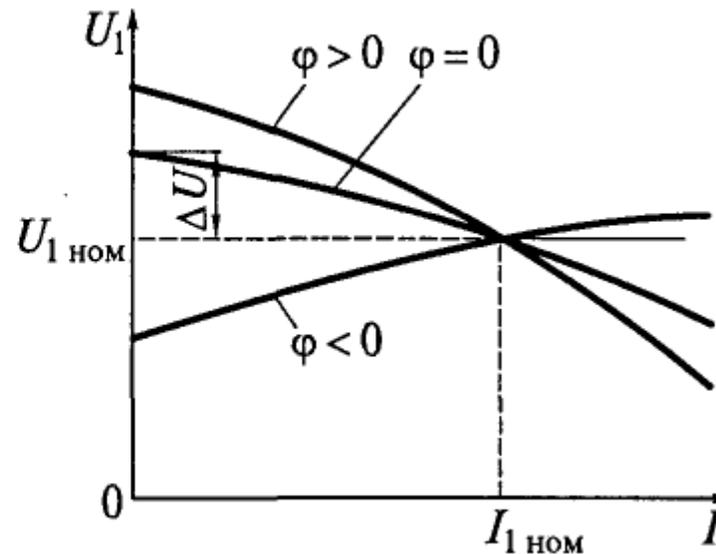
- поперечная размагничивающая РЯ



При увеличении  $I_1$

При *емкостной* нагрузке ( $\varphi=-90^\circ$ ,  $\cos\varphi = 0$ )

- продольная намагничивающая РЯ
- $U_1$  растет, но ограничено насыщением  
При  $x_C = x_{OЯ}$  резонанс напряжений,  $I_1 \text{ max}$



При уменьшении  $I_1$

При КЗ  $U_1 = 0$  и ток  $I_1 = I_{1к}$

Изменение напряжения при сбросе нагрузки

$$\Delta U^* = \frac{\Delta U}{U_H} = \frac{E_{10} - U_H}{U_H}$$

Номинальное  $\Delta U_H$

– при  $\cos\varphi_{\text{ном}}$

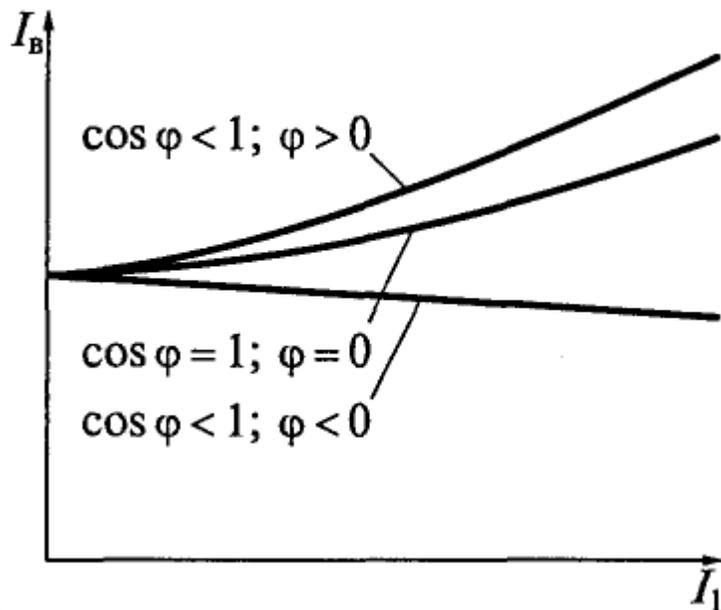
# Характеристики синхронного генератора

## Регулировочные характеристики

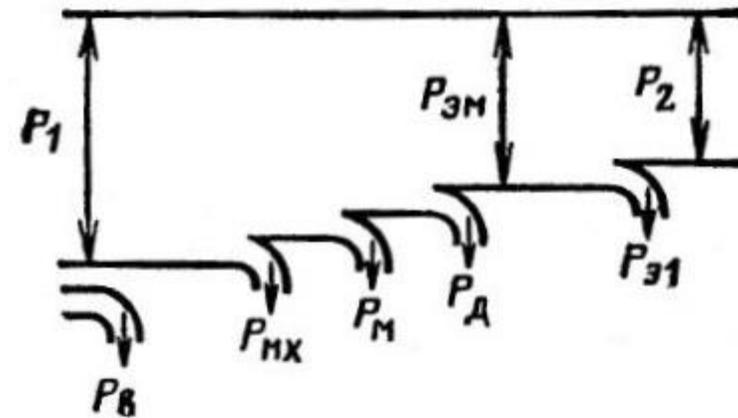
$I_B = f(I_1)$  при  $U_1 = \text{Const}$ ,  $\cos\varphi = \text{Const}$  и  $n_2 = n_1 = \text{Const}$

– обратны внешним характеристикам

- как надо изменять  $I_B$  для поддержания  $U_1$  с изменением  $I_1$  при пост.  $\cos\varphi$



## Энергетическая диаграмма СГ



$P_1$  – мех. мощность на валу генератора

- $P_{\text{мх}}$  – механические потери
- $P_{\text{м}}$  – магнитные потери в стали статора
- $P_{\text{д}}$  – доб. потери в стали статора и ротора
- $P_{\text{эм}}$  – электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм}} = mE_{01}I_1 \cos \psi$$

- $P_{\text{э1}}$  – электрические потери в статоре
  - $P_2$  – выходная электрическая мощность
- $P_{\text{в}}$  – потери на возбуждение

# Синхронные машины



## 3.5. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С СЕТЬЮ

# Параллельная работа СГ с сетью

## Особенности параллельной работы с сетью

Несколько генераторов – электростанция

Эл.станции + ЛЭП +потребители – электроэнергетическая система

- мощность отдельного СГ незначительна по сравнению с мощностью ЭЭС
- его работа не может повлиять на всю сеть
- можно считать  $U_c = \text{Const}$  и  $f_c = \text{Const}$  для любых режимов работы СГ

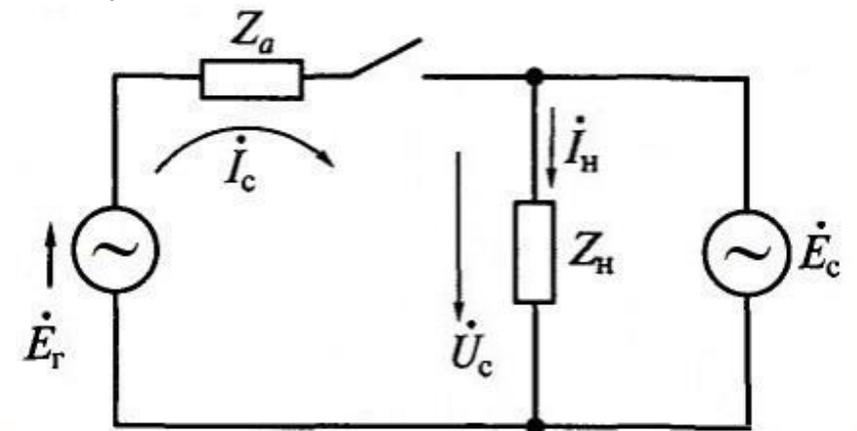
## Включение СГ на параллельную работу с сетью – синхронизация

Основная проблема – броски тока (перех. процесс подключения)

- большие моменты (на ротор и на статор)
- электродинамические силы (на обмотки)

Ток синхронизации при подключении СГ с  $E_r$  и  $Z_a$  к сети с  $U_c$

$$\dot{I}_c = \frac{\Delta \dot{U}}{Z_a} = \frac{\dot{E}_r + \dot{U}_c}{Z_a} \quad \text{Требуется получить } I_c = 0$$



# Параллельная работа СГ с сетью

## Точная синхронизация

Условия синхронизации (получения  $I_c = 0$ )

- ЭДС  $E_r$  и  $U_c$  уравниваются друг друга
- частоты  $f_r$  и  $f_c$  равны
- одинаковое чередование фаз СГ и сети

Обеспечение условий синхронизации (синхроноскоп)

- регулировка  $I_b$  так, чтобы  $E_r = U_c$
- регулировка  $n_2$  так, чтобы  $f_r \approx f_c$
- проверка чередования фаз (3 лампы)

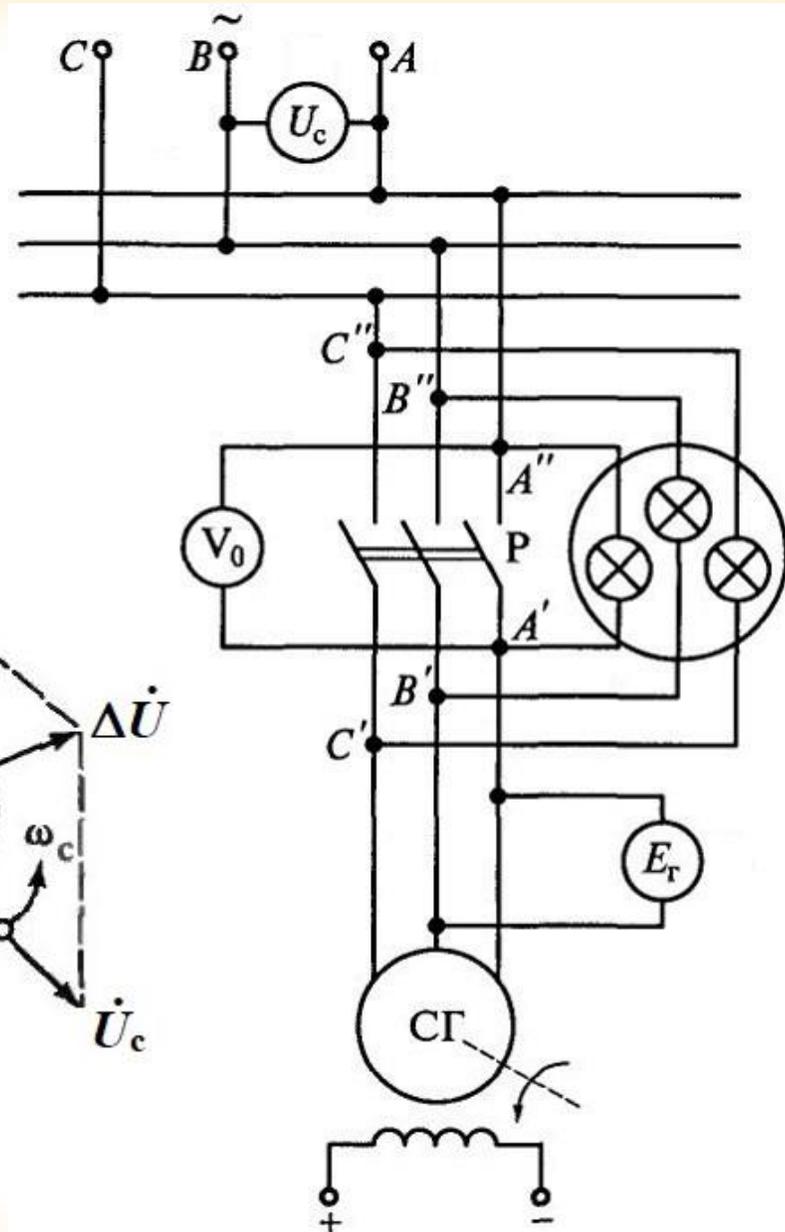
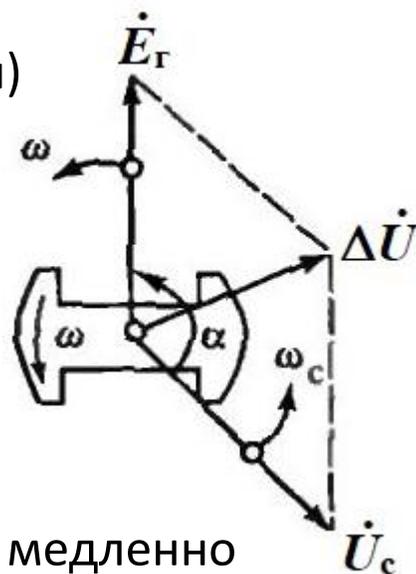
Напряжение на контакторе  $P$   $\Delta \dot{U} = \dot{E}_r + \dot{U}_c$

При  $f_r \approx f_c$  относительная  $\omega$  векторов  $\dot{E}_r$  и  $\dot{U}_c$  мала и  $\Delta U$  изменяется медленно

→ лампы разгораются ( $\Delta U = 2U_c$ ) и потухают ( $\Delta U = 0$ ) медленно

*Включение на потухание*

( $V_0$  точнее контролирует  $\Delta U = 0$ )



# Параллельная работа СГ с сетью

## Самосинхронизация (быстрый способ)

Точная синхронизация – 5...10 мин

В аварийных случаях допускается самосинхронизация (чтобы быстро ввести генератор в работу)

Условия самосинхронизации (получения  $\min I_c$ )

- одинаковое чередование фаз СГ и сети
- примерное равенство частот  $f_r$  и  $f_c$   
(лучше, если  $f_r > f_c$ )

СГ подключают к сети невозбужденным ( $E_r = 0$ ) при частоте  $\pm 1...4\%$  от  $f_c$

Затем включают возбуждение и СГ втягивается в синхронизм

Ток синхронизации 
$$I_c = \frac{\Delta \dot{U}}{Z_a} = \frac{\dot{U}_c}{Z_a} \neq 0$$

Бросок тока  $I_c \rightarrow$  бросок  $\Phi_a$  и скачок ЭДС в ОВ  
Возможно перенапряжение в ОВ

и пробой изоляции ОВ

$\rightarrow$  ОВ замыкают на  $r_6 = (4...6)r_B$

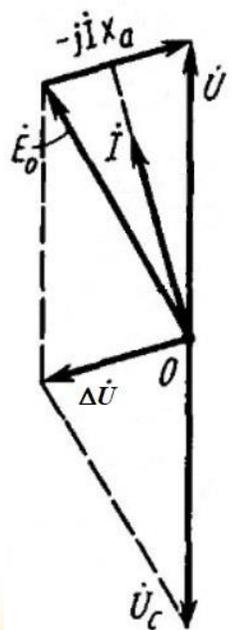
# Параллельная работа СГ с сетью

## Синхронизирующий момент

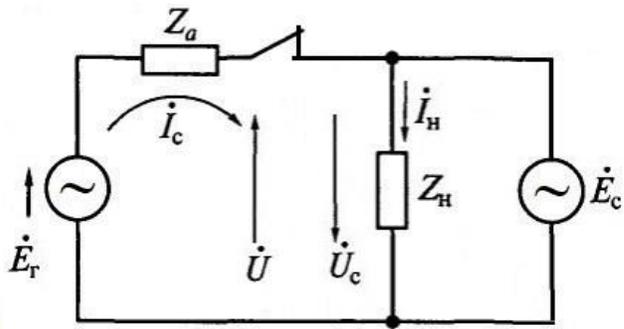
По условиям синхронизации  $E_r = U_c$   
тогда  $\Delta U = 0$  и  $I = 0$

Если направления векторов  $E_r$  и  $U_c$   
точно не выдержаны  $\Delta \dot{U} = \dot{E}_r + \dot{U}_c \neq 0$

Ток генератора (считая  $r_a = 0$ )  $\dot{I} = \Delta \dot{U} / jx_a$   
(ток через  $x_a$  отстает от  $\Delta U$  на  $\pi/2$ )



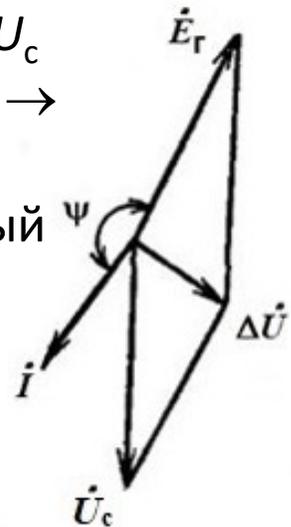
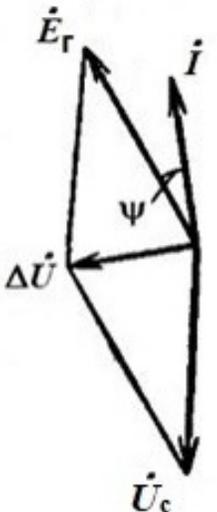
Тогда напряжение на зажимах  
генератора  $\dot{U} = \dot{E}_r - j\dot{I}x_a = -\dot{U}_c$   
(ток обеспечивает  $U = U_c$ )



- если  $n_2$  возрастет,  $E_r$  догоняет  $U_c$   
 $\rightarrow \Delta U \rightarrow$  отстающий  $I \rightarrow \psi < 90^\circ \rightarrow$   
электромагнитная мощность  
генератора  $P_{ЭМ} = mE_r I \cos \psi > 0 \rightarrow$   
генераторный момент тормозит  
ротор
- если  $n_2$  снижается,  $E_r$  отстает от  $U_c$   
 $\rightarrow \Delta U \rightarrow$  отстающий  $I \rightarrow \psi > 90^\circ \rightarrow$   
электромагнитная мощность  
 $P_{ЭМ} = mE_r I \cos \psi < 0 \rightarrow$  двигательный  
момент разгоняет ротор

в результате

$$n_2 = n_1 = \frac{60 f_c}{p} = \text{const}$$



# Параллельная работа СГ с сетью

## Регулирование активной мощности



Рассмотрим неявнополюсный СГ с  $r_a=0$ , синхронизированный с сетью ( $\dot{E}_0 = -\dot{U}_c$ )  
Холостой ход:  $I_r = 0$ , при этом  $M = M_c$ ,  $I_B = I_{B0}$

### 1. Увеличим момент на валу

$E_0$  опережает  $U$  на  $\theta \rightarrow \Delta U \rightarrow I_a = \Delta U / jx_c$  (отстающий от  $\Delta U$ )

Угол  $\varphi < 90^\circ \rightarrow$  мощность  $P = mUI_a \cos\varphi > 0$

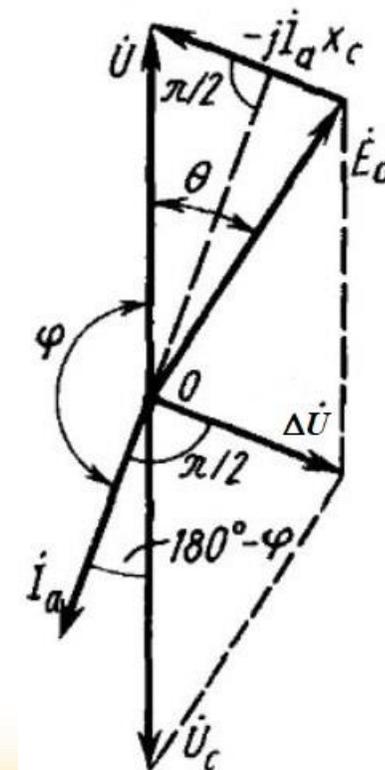
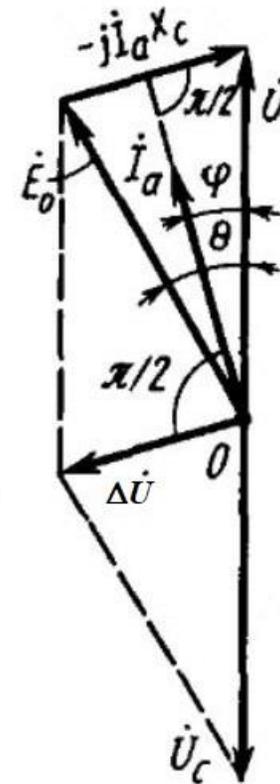
$\rightarrow$  генераторный режим: активная мощность – в сеть!  
(генераторный  $M$  уравнивает внешний  $M_{вн}$ )

### 2. Уменьшим момент на валу

$E_0$  отстает от  $U$  на  $\theta \rightarrow \Delta U \rightarrow I_a = \Delta U / jx_c$  (отстающий от  $\Delta U$ )

Угол  $\varphi > 90^\circ \rightarrow$  мощность  $P = mUI_a \cos\varphi < 0$

$\rightarrow$  двигательный режим: активная мощность – из сети!  
(двигательный  $M$  уравнивает момент нагрузки  $M_c$ )



# Параллельная работа СГ с сетью

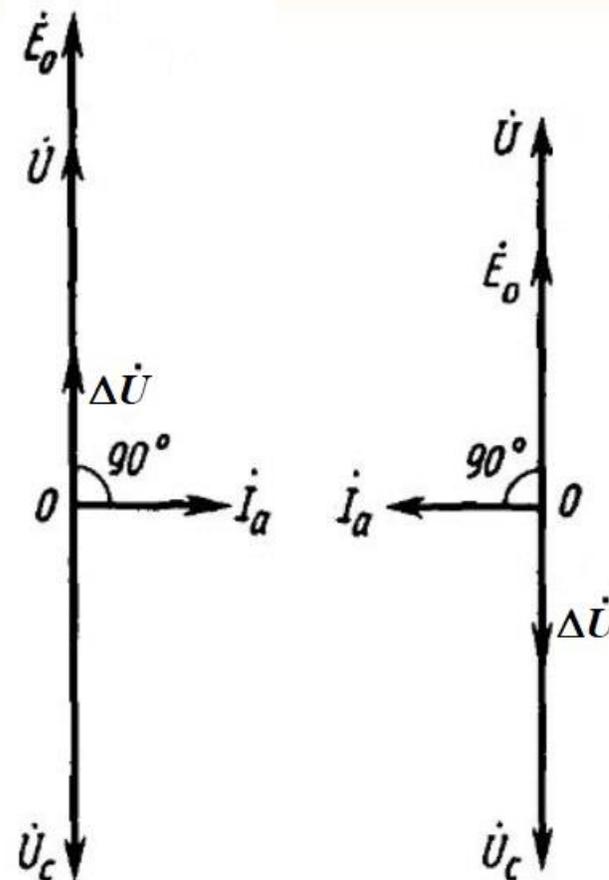
## Регулирование реактивной мощности



Рассмотрим неявнополюсный СГ с  $r_a=0$ , синхронизированный с сетью ( $\dot{E}_0 = -\dot{U}_c$ )  
Холостой ход:  $I_r = 0$ , при этом  $M = M_c$ ,  $I_B = I_{B0}$

3. Увеличим ток возбуждения  $I_B > I_{B0}$   
 $E_0 > U \rightarrow \Delta U \rightarrow I_a = \Delta U / jx_c$  (отстающий от  $\Delta U$ )  
 Угол  $\varphi = 90^\circ \rightarrow$  мощность  $P = 0$   
 Относительно  $U_c$  ток  $I_a$  опережающий  
 $\rightarrow$  реактивная мощность – в сеть!  
 (режим перевозбуждения)

4. Уменьшим ток возбуждения  $I_B < I_{B0}$   
 $E_0 < U \rightarrow \Delta U \rightarrow I_a = \Delta U / jx_c$  (отстающий от  $\Delta U$ )  
 Угол  $\varphi = 90^\circ \rightarrow$  мощность  $P = 0$   
 Относительно  $U_c$  ток  $I_a$  отстающий  
 $\rightarrow$  реактивная мощность – из сети!  
 (режим недовозбуждения)



При  $U = \text{Const}$   
 $\dot{\Phi}_\delta = \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_a = \text{Const}$   
 Синхронные компенсаторы

# Параллельная работа СГ с сетью

## Мощность и момент синхронного генератора

Активная мощность генератора  $P = mU_1 I_1 \cos \varphi$

Из векторной диаграммы (полагая  $r_a=0$ ): угол  $\varphi = \psi - \theta$ , тогда  $P = mU_1 I_1 \cos(\psi - \theta)$

$$P = mU_1 (I_1 \cos \psi \cos \theta + I_1 \sin \psi \sin \theta) = mU_1 (I_q \cos \theta + I_d \sin \theta)$$

Из векторной диаграммы:

проекции уравнения на оси  $d$  и  $q$

$$E_{10} = I_d x_d + U_1 \cos \theta$$

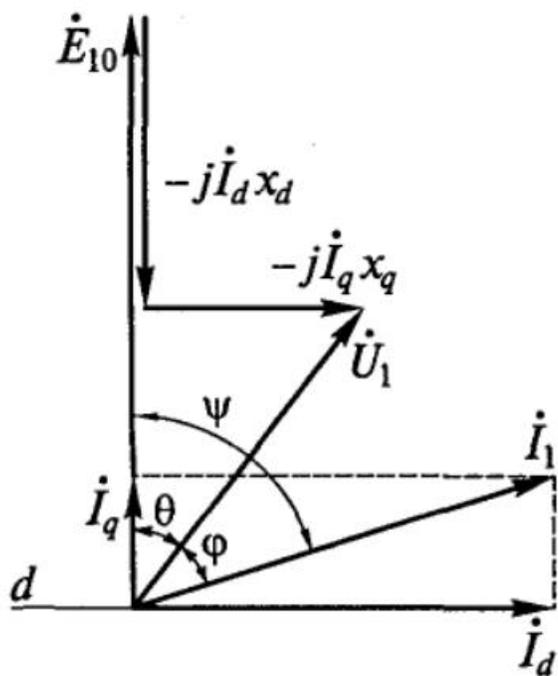
$$I_q x_q = U_1 \sin \theta$$

тогда токи  $I_d = (E_{10} - U_1 \cos \theta) / x_d$ ;  $I_q = U_1 \sin \theta / x_q$

$$P = mU_1 (U_1 \sin \theta \cos \theta / x_q + (E_{10} - U_1 \cos \theta) \sin \theta / x_d)$$

$$P = \frac{mU_1 E_{10}}{x_d} \sin \theta + \frac{mU_1^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

В неявнополюсном СГ  $x_d = x_q = x_c$  и  $P = \frac{mU_1 E_{10}}{x_c} \sin \theta$



# Параллельная работа СГ с сетью

## Угол нагрузки

Изменение  $P$  определяется изменением угла  $\theta$   
(угол нагрузки)

Угол  $\theta$  – угол между векторами  $E_{10}$  и  $U_1$

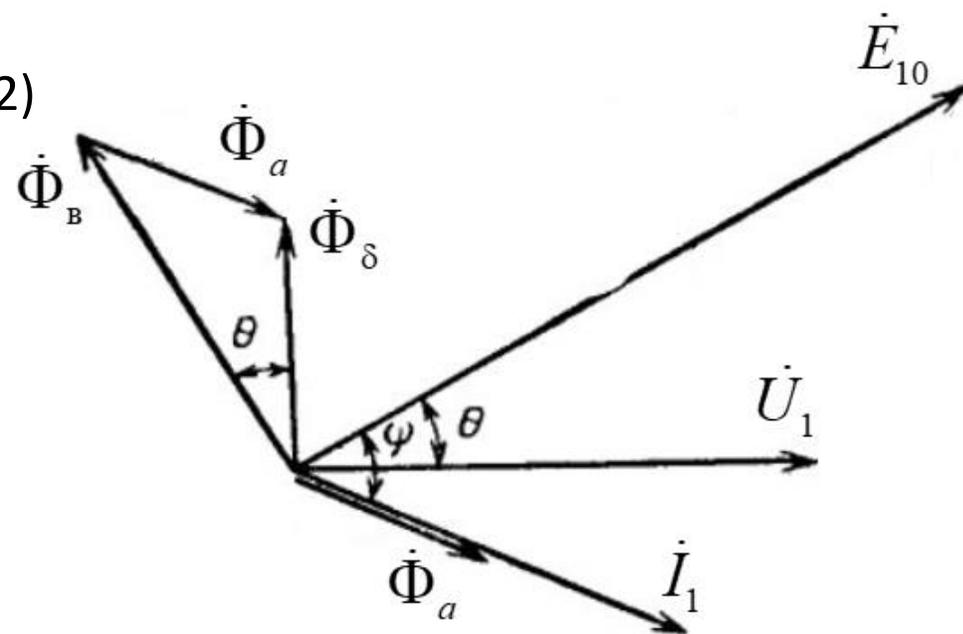
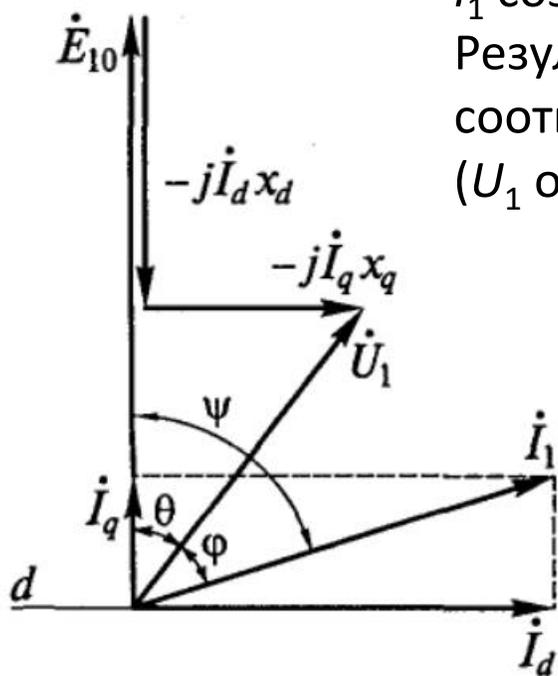
$E_{10}$  наводится потоком  $\Phi_B$  (отстает на  $\pi/2$ )

$I_1$  создает поток якоря  $\Phi_a$

Результирующий поток  $\dot{\Phi}_\delta = \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_a$

соответствует полному напряжению  $U_1$   
( $U_1$  отстает на  $\pi/2$ )

$$P = \frac{mU_1 E_{10}}{x_d} \sin \theta + \frac{mU_1^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

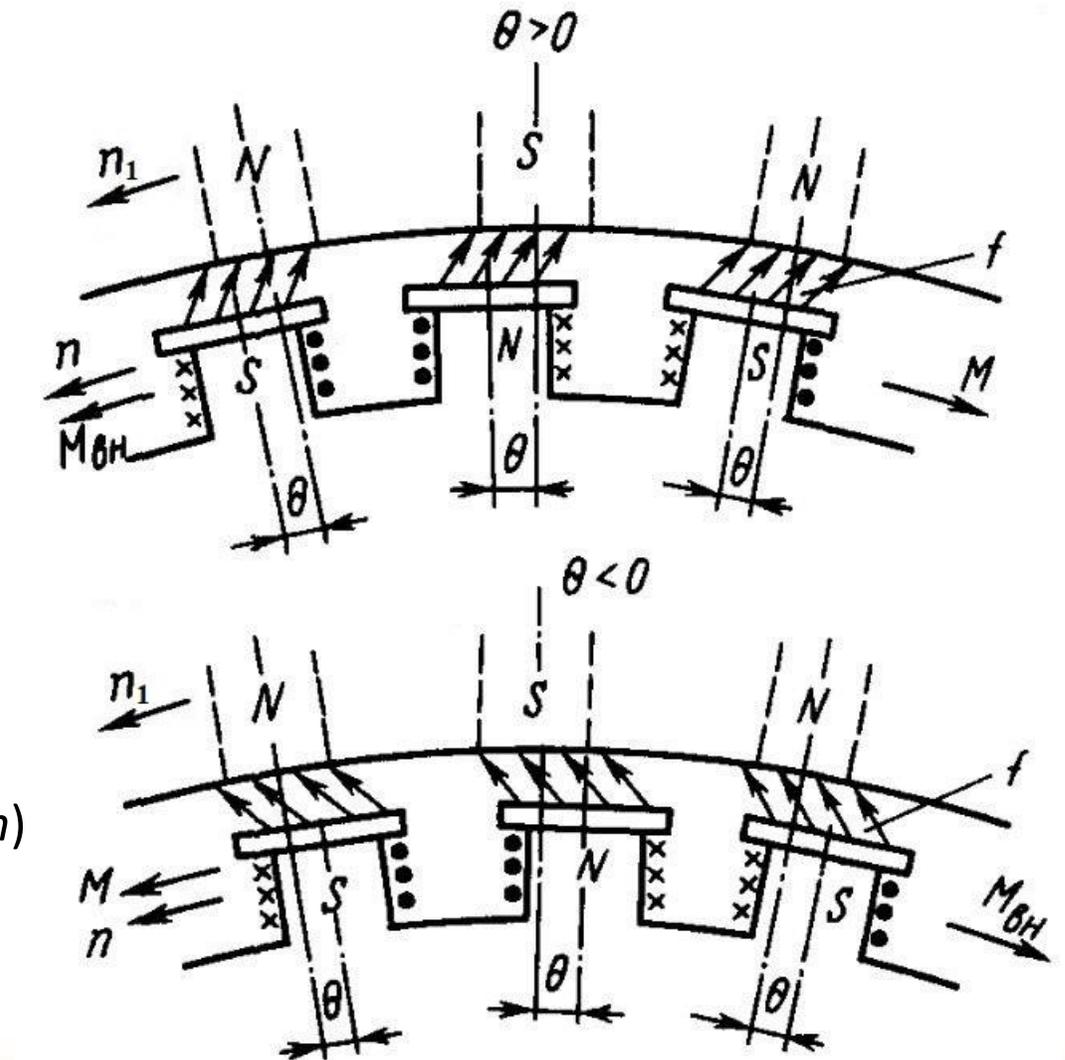


Таким образом, угол  $\theta$  – угол между осью полюсов ( $d$ ) и осью результирующего поля  $\Phi_\delta$

# Параллельная работа СГ с сетью

## Угол нагрузки

- Генератор:  $\theta > 0$   
(полюс опережает результирующий  $\Phi_\delta$ )  
Внешний момент вращает ротор ( $M_{вн}$  и  $n$ )  
и «тянет» поле за собой  
Электромагнитный  $M$  – тормозной
- Двигатель:  $\theta < 0$   
(результирующий  $\Phi_\delta$  опережает полюс)  
Электромагнитный момент вращает ротор ( $M$  и  $n$ )  
и «тянет» ротор за собой  
Внешний  $M$  – тормозной



# Параллельная работа СГ с сетью

## Угловая характеристика СГ

Электромагнитный момент  $M = P_{\text{ЭМ}} / \Omega_1$

где угловая скорость  $\Omega_1 = \omega / p = 2\pi f / p$

Пренебрегая эл. потерями ( $r_a = 0$ ):  $P_{\text{ЭМ}} = P$ , тогда момент

$$P = \frac{mU_1 E_{10}}{x_d} \sin \theta + \frac{mU_1^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

$$M = \frac{mU_1 E_{10}}{\Omega_1 x_d} \sin \theta + \frac{mU_1^2}{2\Omega_1} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

## Угловая характеристика активной мощности

$P = f(\theta)$  при  $I_B = \text{Const}$ ,  $U_1 = \text{Const}$ ,  $f = \text{Const}$

## Угловая характеристика электромагнитного момента

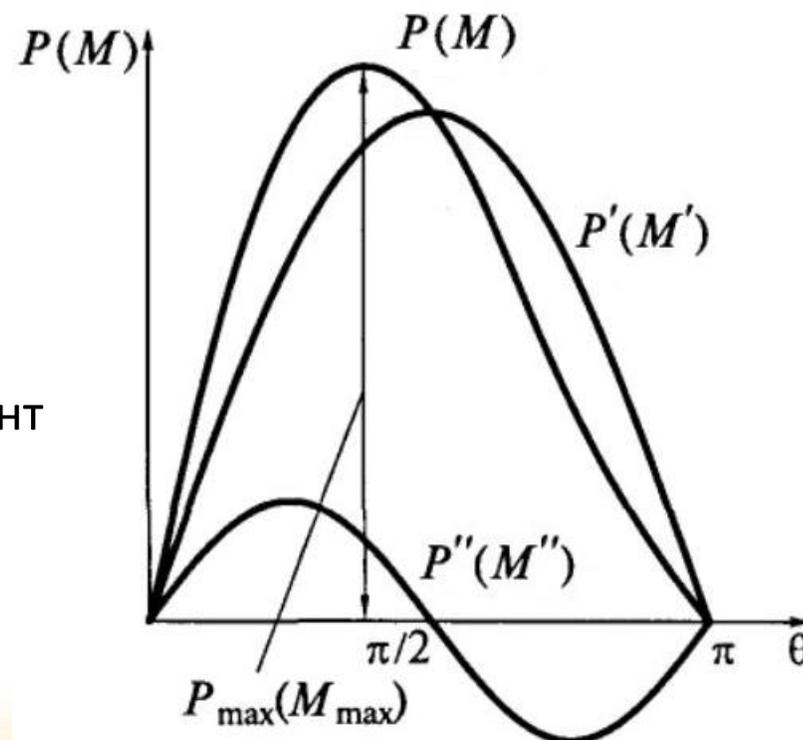
$M = f(\theta)$  при  $I_B = \text{Const}$ ,  $U_1 = \text{Const}$ ,  $f = \text{Const}$

- $M'$  зависит от  $U_1$  и  $E_{10}$  (т.е.  $I_B$ )
- $M''$  не зависит от  $I_B$ , но зависит от  $(x_d - x_q)$  – реактивный момент

При  $I_B = 0$  и  $E_{10} = 0$  поток  $\Phi_\delta = \Phi_a$

→ синхронная реактивная машина (не имеет ОВ)

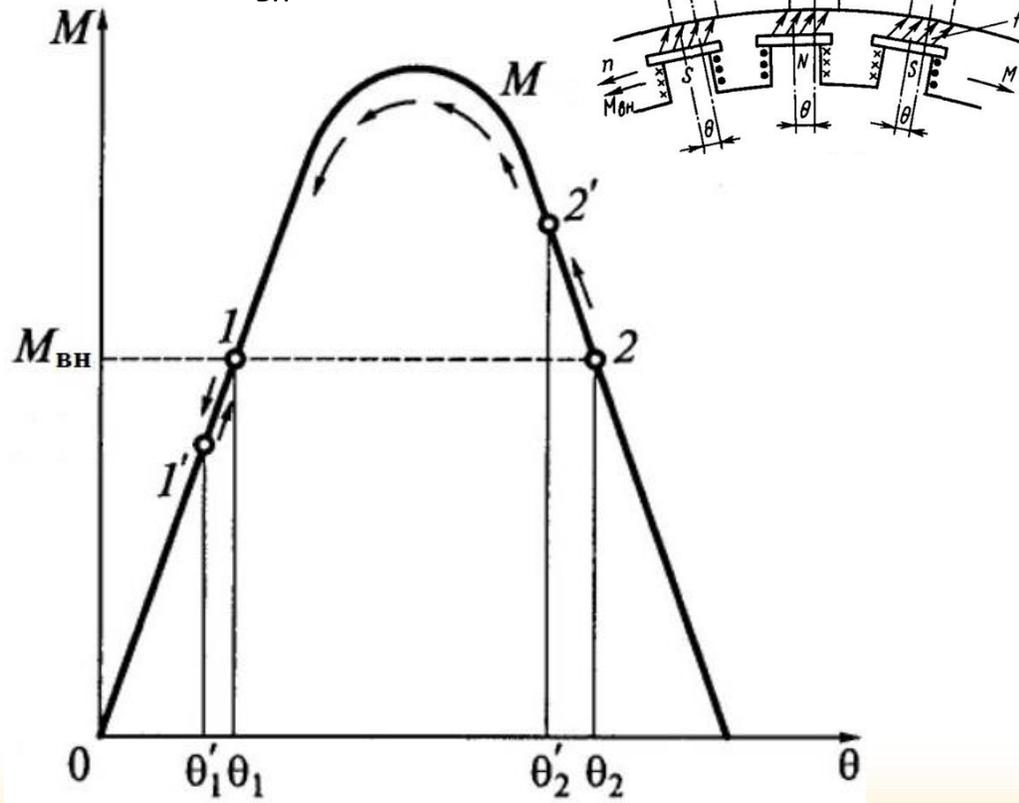
В неявнополюсном СГ  $x_d = x_q$  и  $M'' = 0$



# Параллельная работа СГ с сетью

## Условия статической устойчивости СГ

– способность сохранять синхронное вращение при изменении внешнего момента  $M_{вн}$



Равновесие моментов  $M = M_{вн}$  возможно при  $\theta_1$  и  $\theta_2$   
 Рассмотрим случайные колебания  $\theta_1 \rightarrow \theta'_1$  и  $\theta_2 \rightarrow \theta'_2$

- т. 1 – статически устойчивое равновесие
- т. 2 – статически неустойчивое равновесие

Условия устойчивой работы:  $\frac{\partial M}{\partial \theta} > 0$      $\frac{\partial P}{\partial \theta} > 0$

Устойчивая часть характеристики: от 0 до  $M_{max}$

Удельная синхронизирующая мощность (момент)  
 – способность СГ удерживаться в синхронизме  $f(\theta)$

для неявнополюсного СГ  $P_{\text{синх}} = \frac{\partial P}{\partial \theta} = \frac{mU_1 E_{10}}{x_d} \cos \theta$

$$M_{\text{синх}} = \frac{\partial M}{\partial \theta} = \frac{mU_1 E_{10}}{\Omega_1 x_d} \cos \theta$$

# Параллельная работа СГ с сетью

## Статическая перегружаемость

Максимальный угол нагрузки (при  $P_{max}$  и  $M_{max}$ )  $\theta < 90^\circ$

Номинальный угол нагрузки (при  $P_H$  и  $M_H$ )  $\theta_H = 20...35^\circ$

Статическая перегружаемость при  $U_{1H}$  и  $I_{BH}$

$$k_{II} = \frac{P_{max}}{P_H}$$

Статическая перегружаемость неявнополюсного СГ

- мощностью до 160 МВА –  $k_{II} > 1,7$
- мощностью более 160 МВА –  $k_{II} > 1,5$

Статическая перегружаемость явнополюсного СГ –  $k_{II} > 1,5$

Статическая перегружаемость пропорциональна  $1/x_d$

В синхронных генераторах занижают  $x_d$

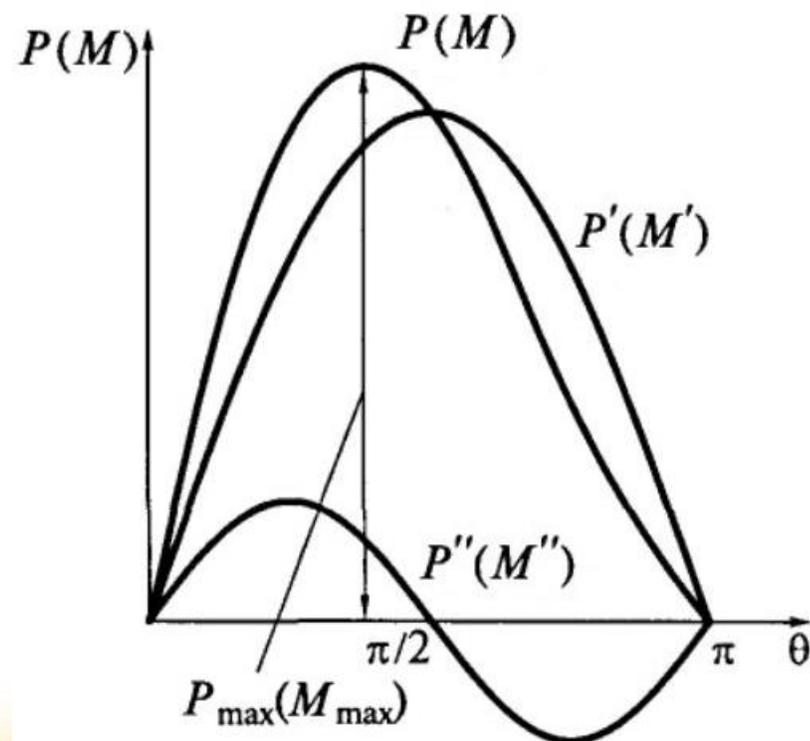
(увеличивают  $\delta$  сверх технологического минимума)

При превышении  $M_{max}$  – выпадение из синхронизма

(доп.потери в ОВ и ДО ротора + пульсирующий момент от  $I_B$ )

$$P = \frac{mU_1 E_{10}}{x_d} \sin \theta + \frac{mU_1^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

$$M = \frac{mU_1 E_{10}}{\Omega_1 x_d} \sin \theta + \frac{mU_1^2}{2\Omega_1} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

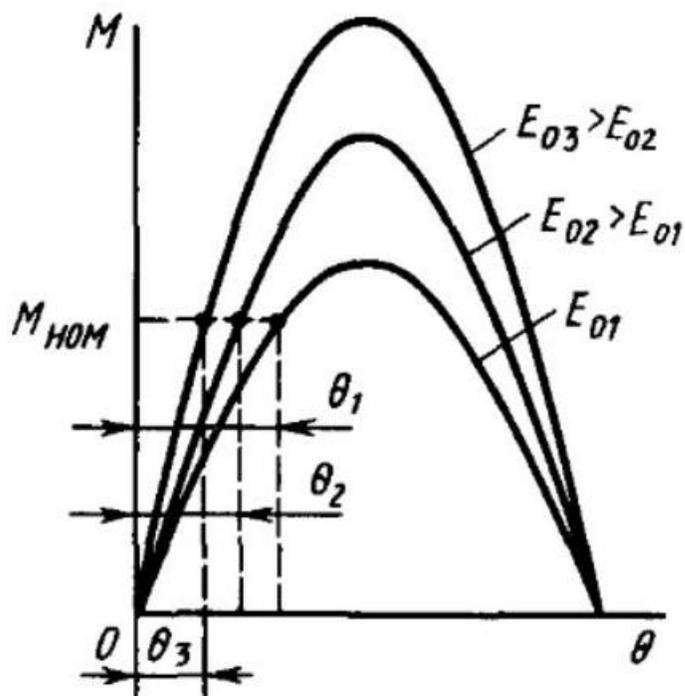


# Параллельная работа СГ с сетью

## Влияние тока возбуждения на устойчивость работы СГ

$$M = \frac{mU_1 E_{10}}{\Omega_1 x_d} \sin \theta + \frac{mU_1^2}{2\Omega_1} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

- Увеличение  $I_B$
- увеличение  $E_{10}$
- увеличение  $M_{max}$
- увеличение статической перегружаемости  $k_n$   
(и снижение угла нагрузки при том же  $M$ )



- Обычно СГ отдает реактивную мощность  $Q$  (перевозб.)
- Если надо потреблять  $Q$  → снижают  $I_B$  (недовозб.)
- возрастает  $\theta$  и снижается  $k_n$
- опасность неустойчивой работы при больших  $P$

# Параллельная работа СГ с сетью

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_{10} - j\dot{I}_1 x_c$$

## U-образные характеристики

Реактивная мощность определяется  $I_B$   
при любой нагрузке  $P$

Рассмотрим 3 режима работы СГ с одинаковой  $P = mU_1 I_1 \cos\varphi$

Во всех случаях  $I_{1a} = I_1 \cos\varphi = \text{Const}$  (и  $P = \text{Const}$ )

Кроме того,  $P = P_{\text{ЭМ}} = \frac{mU_1 E_{10}}{x_c} \sin\theta = \text{Const}$

т.е.  $E_{10} \sin\theta = \text{Const}$  (все ЭДС – на прямой  $AB$ )

(1) – активный ток  $I_{1(1)} \rightarrow E_{10(1)}$

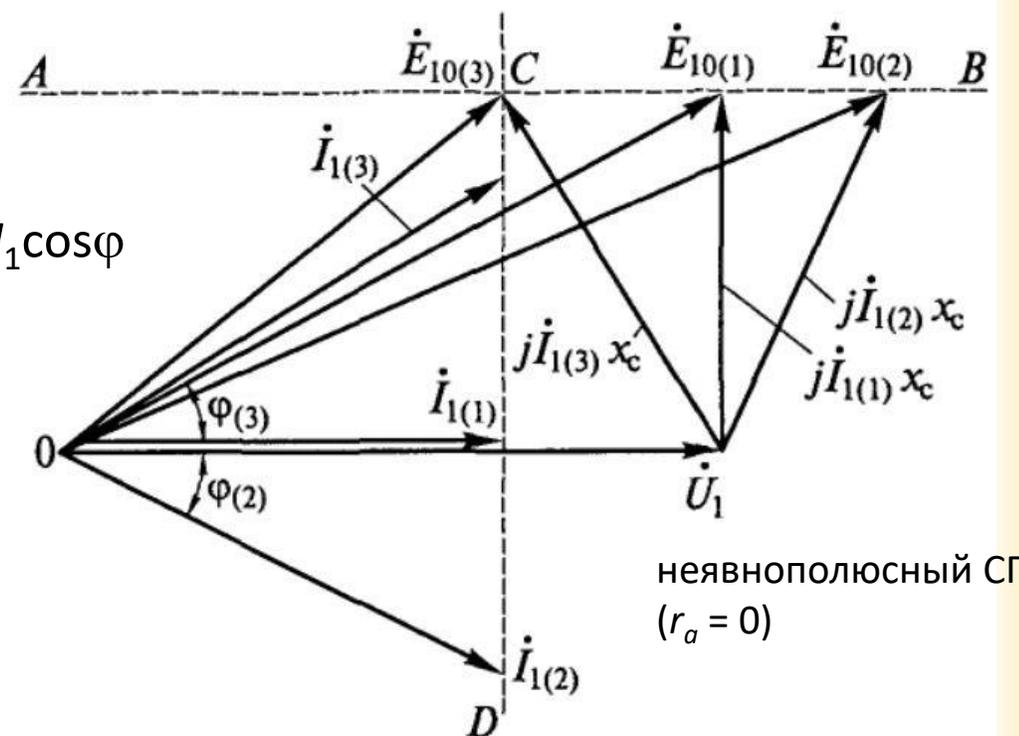
(2) – отстающий ток  $I_{1(2)} \rightarrow E_{10(2)} > E_{10(1)} \rightarrow I_{B(2)} > I_{B(1)}$

(3) – опережающий ток  $I_{1(3)} \rightarrow E_{10(3)} < E_{10(1)} \rightarrow I_{B(3)} < I_{B(1)}$

При активном токе ( $\cos\varphi=1$ )  $I_1 = I_{1a}$  – минимален

При увеличении  $I_B$  (перевозбуждение)  $I_1 > I_{1a}$  – отстающий

При уменьшении  $I_B$  (недовозбуждение)  $I_1 > I_{1a}$  – опережающий



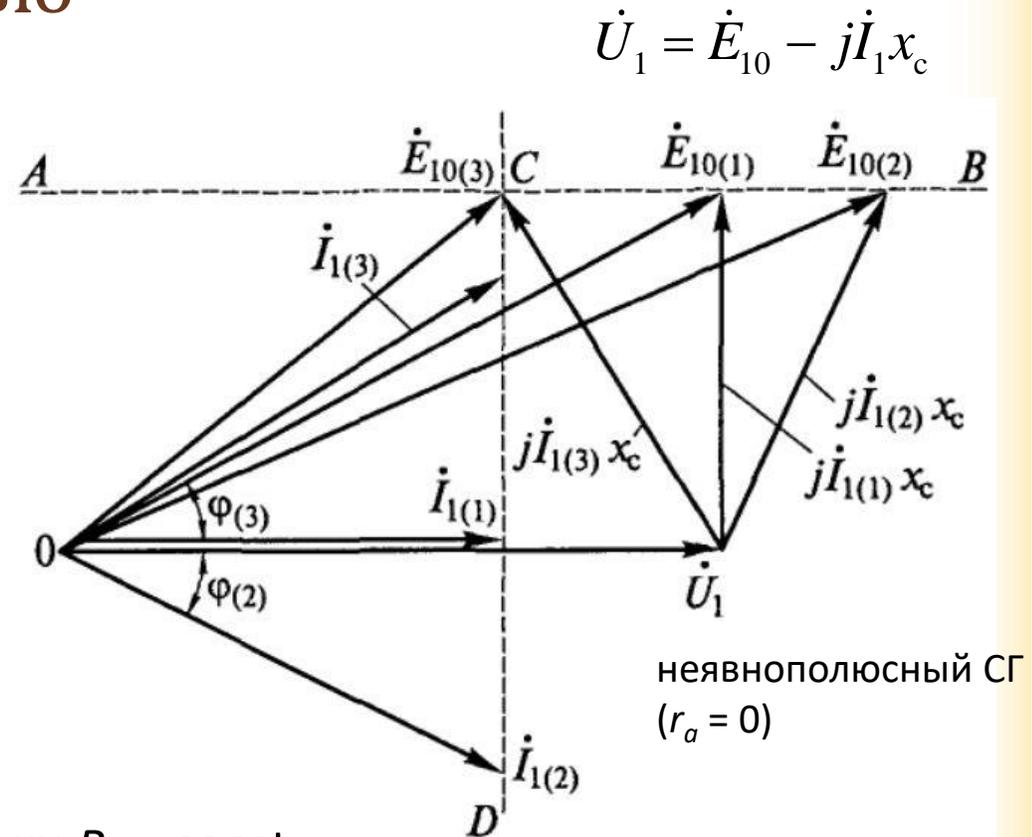
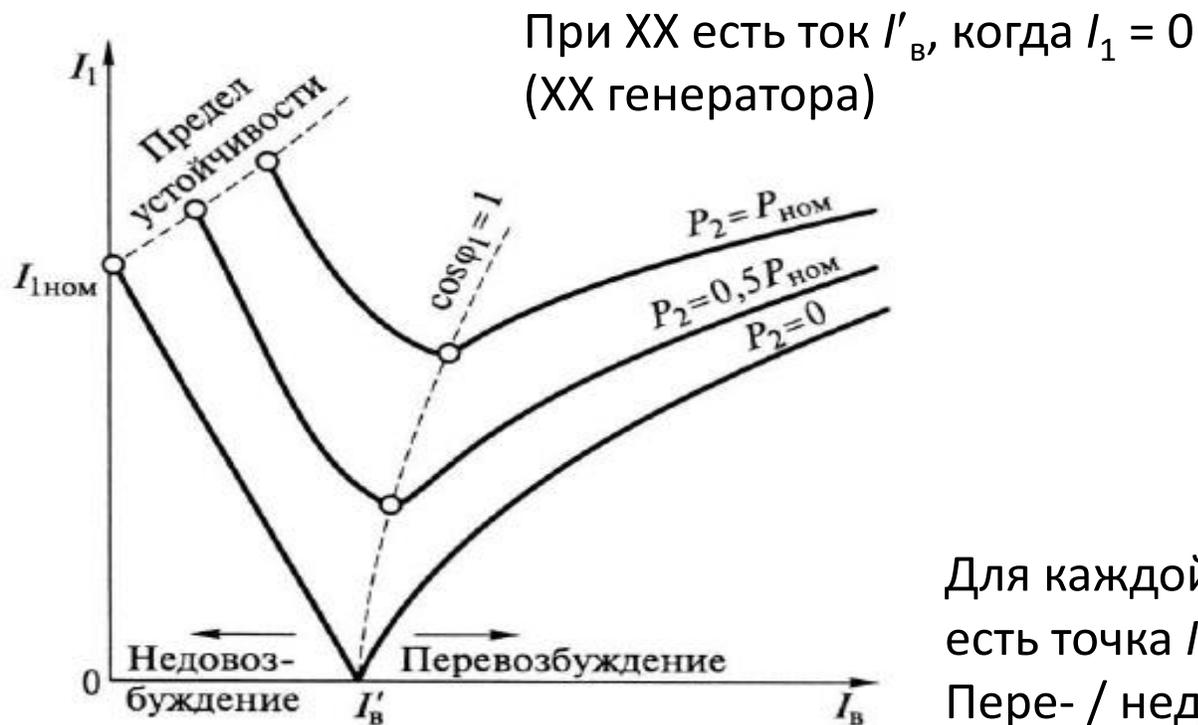
невнополюсный СГ  
( $r_a = 0$ )

U-образные характеристики:  
 $I_1 = f(I_B)$  при  $P = \text{Const}$ ,  
 $U_1 = \text{Const}$ ,  $f = \text{Const}$

# Параллельная работа СГ с сетью

## U-образные характеристики

$I_1 = f(I_B)$  при  $P = \text{const}$ ,  $U_1 = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$



Для каждой х-ки  $P_2 = \text{const}$

есть точка  $I_{\min} = I_{1a}$  ( $\cos \varphi = 1$ )

Пере- / недовозбуждение  $\rightarrow$  увеличение  $I_1$

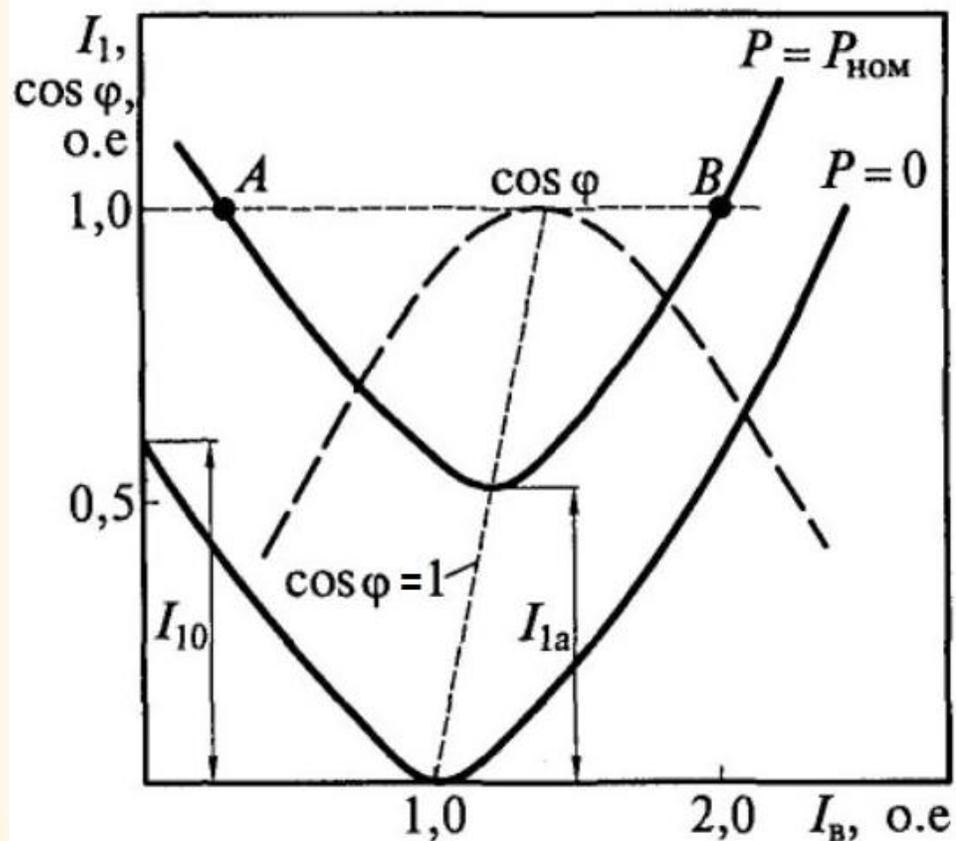
При малых  $I_B$  снижается  $E_{10}$  и  $M_{\max}$

$\rightarrow$  снижается перегружаемость (предел устойчивости)

# Параллельная работа СГ с сетью

## U-образные характеристики

$I_1 = f(I_B)$  при  $P = \text{Const}$ ,  $U_1 = \text{Const}$ ,  $f = \text{Const}$



Минимум хар-ки при число активном токе  $I_1 = I_{1a}$  ( $\cos\varphi=1$ )  
При увеличении мощности т.минимума тока смещается:

- реакция якоря для  $I_{1a}$  – поперечная размагничивающая
- для компенсации РЯ надо увеличивать  $I_B$

Линия  $\cos\varphi = 1$  – регулировочная характеристика:

$I_B = I_1$  при  $\cos\varphi = \text{Const}$ ,  $U_1 = \text{Const}$ ,  $f = \text{Const}$

- справа – область перевозбуждения
- слева – область недовозбуждения

Пунктирная линия – зависимость  $\cos\varphi = f(I_B)$

Номинальный ток  $I_1^* = 1$  при  $P = P_n \rightarrow$  точки  $A$  и  $B$

Расчетная точка  $B$  (при перевозбуждении),  
т.к. при бóльшем  $I_B$  больше потери в роторе (и нагрев)

# Синхронные машины



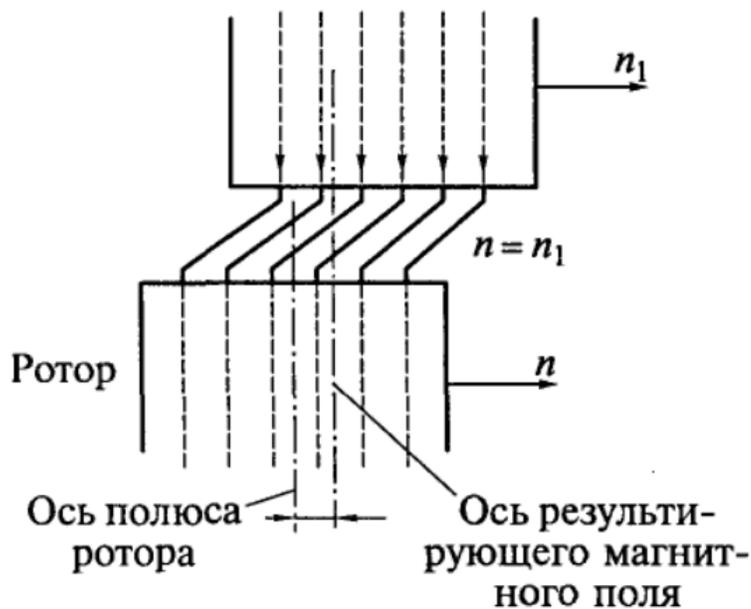
## 3.6. СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

# Синхронный двигатель

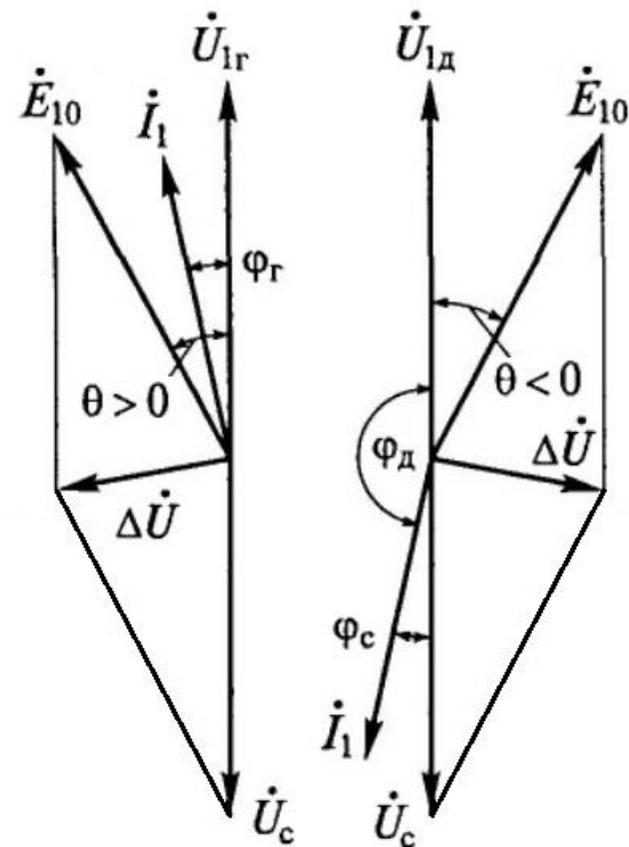
## Работа СМ в двигательном режиме

Синхронный двигатель → работа СМ параллельно с сетью

- внешний момент – вращающий (турбина) → мощность СМ  $P = mU_{1r}I_1 \cos\varphi_r > 0$  → генератор ( $\theta > 0$ )
- внешний момент – тормозной (нагрузка) → мощность СМ  $P = mU_{1d}I_1 \cos\varphi_d < 0$  → двигатель ( $\theta < 0$ )



Момент – от взаимодействия синхронно вращающихся полей статора и ротора



В двигательном режиме принято использовать угол  $\varphi_c = \pi - \varphi_d$

Относительно сети мощность двигателя (потребляемая СД из сети)

$$P_1 = mU_{1c}I_1 \cos\varphi_c > 0$$

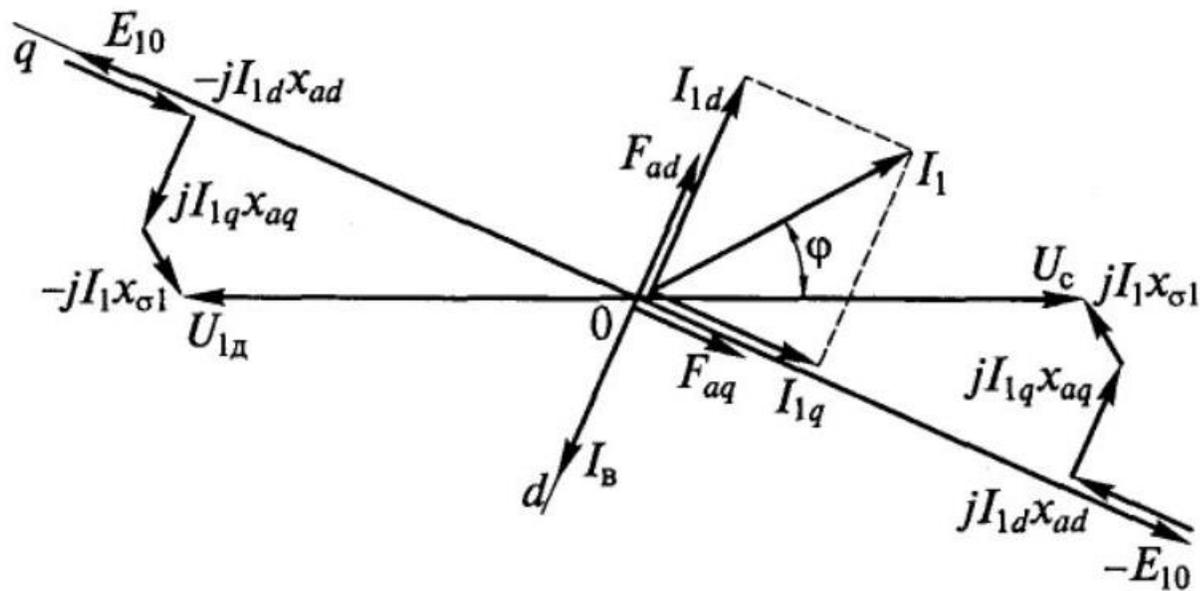
# Синхронный двигатель

## Работа СМ в двигательном режиме

Уравнение напряжений СД с точки зрения двигателя  
(полагая  $r_a = 0$ ) 
$$\dot{U}_д = \dot{E}_{10} - j\dot{I}_{1d}x_{ad} - j\dot{I}_{1q}x_{aq} - j\dot{I}_1x_{\sigma 1}$$

Уравнение напряжений СД с точки зрения сети

$$\dot{U}_c = -\dot{E}_{10} + j\dot{I}_{1d}x_{ad} + j\dot{I}_{1q}x_{aq} + j\dot{I}_1x_{\sigma 1}$$



Реакция якоря: поперечная и продольная размагничивающая при опережающем токе (ток  $I_1$  опережающий относительно  $U_c$ , но отстающий относительно  $U_д$ )

# Синхронный двигатель

## Энергетическая диаграмма СД

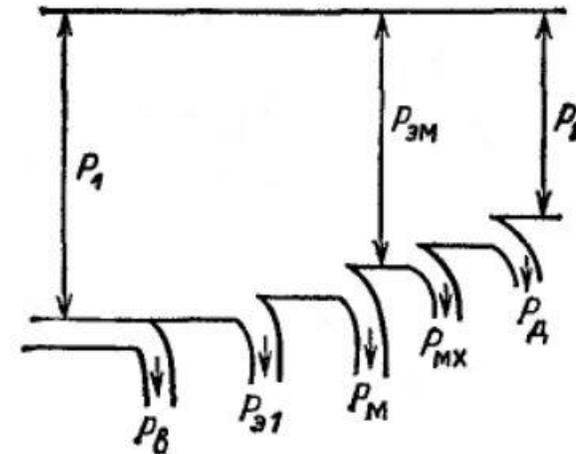
$P_1$  – электрическая мощность из сети

- $P_{\text{э1}}$  – электр.потери в обмотке якоря
- $P_{\text{м}}$  – магнитные потери в стали статора
- $P_{\text{эм}}$  – электромагнитная мощность
- $P_{\text{мх}}$  – механические потери
- $P_{\text{д}}$  – добавочные потери в стали статора и ротора
- $P_2$  – выходная механическая мощность

$P_{\text{в}}$  – потери на возбуждение

Электромагнитная мощность СД аналогична генератору пренебрегая  $P_{\text{э1}}$  и  $P_{\text{м}}$   $P_{\text{эм}} = P_1$ , тогда

$$P_{\text{эм}} = \frac{mU_1 E_{10}}{x_d} \sin \theta + \frac{mU_1^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$



В неявнополюсном СД  $x_d = x_q = x_c$  и

$$P_{\text{эм}} = \frac{mU_1 E_{10}}{x_c} \sin \theta$$

При этом  $\theta < 0$  (направление мощности)

# Синхронный двигатель

## Угловые и U-образные характеристики СД

Электромагнитный момент  $M = P_{ЭМ} / \Omega_1$

$$M = \frac{mU_1 E_{10}}{\Omega_1 x_d} \sin \theta + \frac{mU_1^2}{2\Omega_1} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

Из-за  $\theta < 0$  момент СД отрицательный

Устойчивая часть характеристики от 0 до  $M_{max}$

Номинальный угол нагрузки  $\theta_{ном} = 20...30^\circ$

Кратность максимального момента

$$k_M = M_{max} / M_{ном}$$

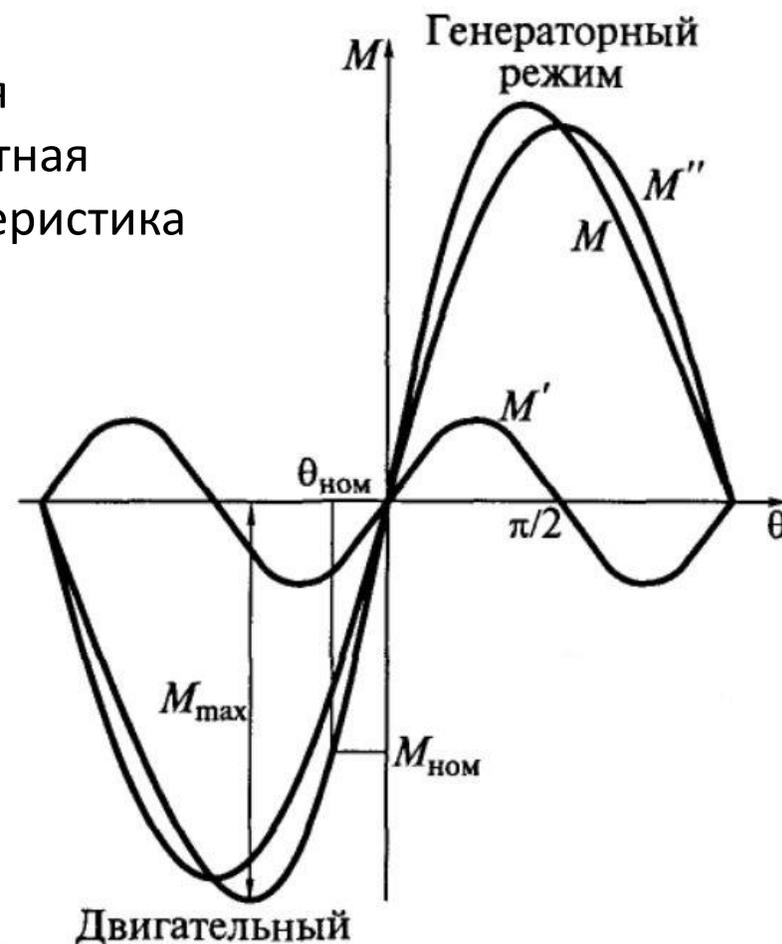
(перегрузочная способность)

Для СД кратность максимального момента  $k_M > 1,65$

Явнополюсный СД может работать без возбуждения

– реактивный двигатель

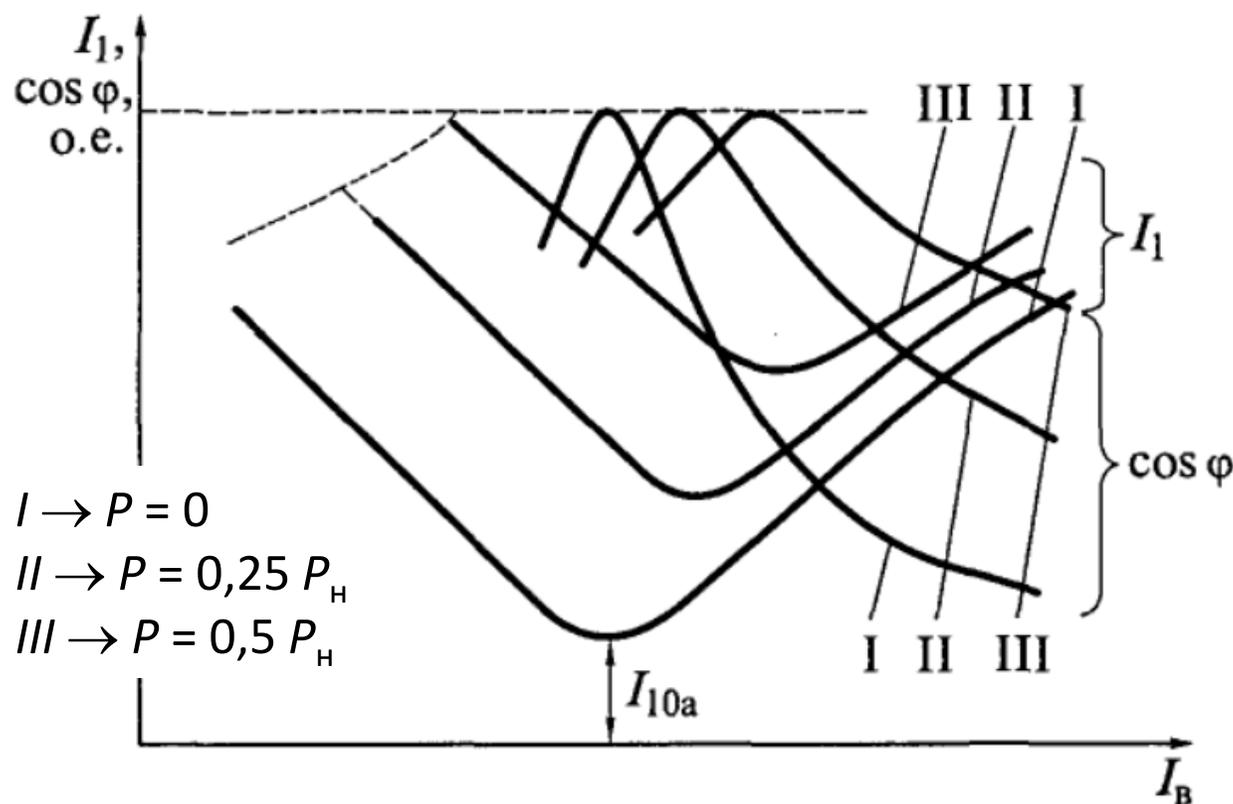
Угловая  
моментная  
характеристика



# Синхронный двигатель

## Угловые и U-образные характеристики СД

Построение U-образных характеристик аналогично генератору



При опережающем токе СД перевозбужден  
→ СД отдает реактивную мощность в сеть

- повышает  $M_{max}$  двигателя
- повышает  $\cos \varphi$  в месте включения
- позволяет снизить выработку  $Q$  генераторами

Уменьшение  $I_B$  снижает перегрузочную способность → предел уменьшения  $I_B$  (предел статической устойчивости)

Зависимости  $\cos \varphi = f(I_B)$ : при изменении нагрузки ( $P$ ) можно обеспечить  $\cos \varphi = \text{Const}$

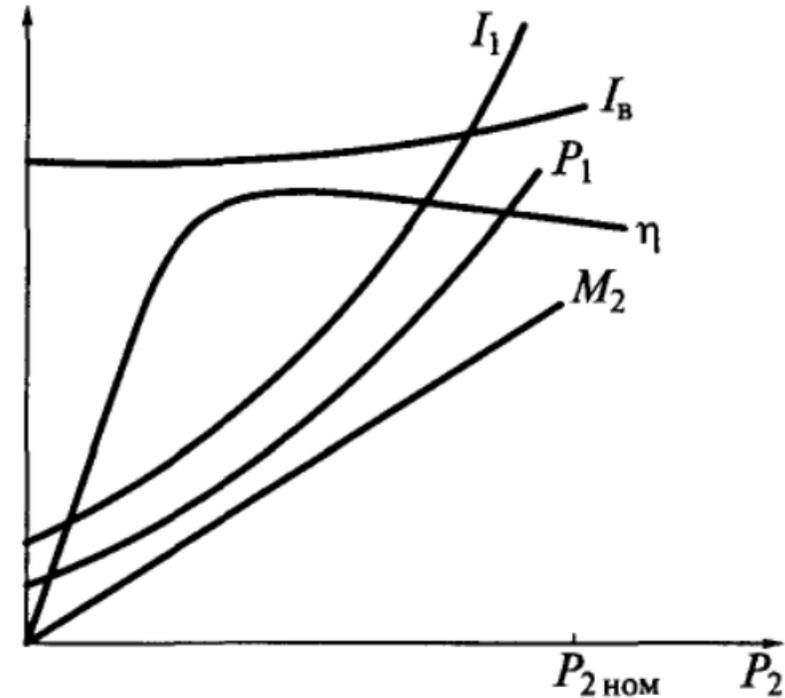
На холостом ходу минимальный  $I_1 = I_{10a}$  (активная составляющая тока ХХ – покрытие потерь)

# Синхронный двигатель

## Рабочие характеристики СД

– зависимости от полезной (мех.) мощности  $P_2$   
Строятся либо при  $I_B = \text{Const}$ , либо при  $\cos\varphi = \text{Const}$

- нагрузочный момент  $M_2 = P_2 / \Omega_2$
- ток возбуждения  $I_B$  надо увеличивать для поддержания  $\cos\varphi = \text{Const}$
- на ХХ  $I_1 = I_{10}$  ( $P_1 = P_{10}$ )
- с ростом  $P_2$  растут и потери  $\rightarrow$  растет  $P_1$  и  $I_1$
- кривая КПД аналогична трансформатору



Рабочие характеристики СД при  $\cos\varphi = \text{Const}$

# Синхронный двигатель

## Способы пуска СД

Прямой пуск – невозможен

- подключение ОЯ к сети → вращающееся поле  $n_1 = 60f/p$  почти мгновенно
- ротор должен разогнаться за полпериода
- иначе момент сменит знак (направление)
- большой  $J$  не позволяет разогнаться

## Пуск с помощью разгонного двигателя

- разгон СД с включенной ОВ
- включение на параллельную работу с сетью
- отсоединение разгонного двигателя (переход в двигательный режим)

Мощность разгонного двигателя 10...20% от  $P_n$

Необходимо разогнать ротор до  $n_2$  близко к  $n_1$   
Тогда – втягивание в синхронизм

## Частотный пуск

- преобразователь частоты ( $f$  от 0 до  $f_n$ )
  - включение СД на малой  $f$  → малая  $n_1$   
→ разгон ротора до малой  $n_1$
  - постепенное повышение  $f$  до  $f_n$   
→ постепенный разгон ротора до  $n_n$
- СД все время работает в синхронном режиме

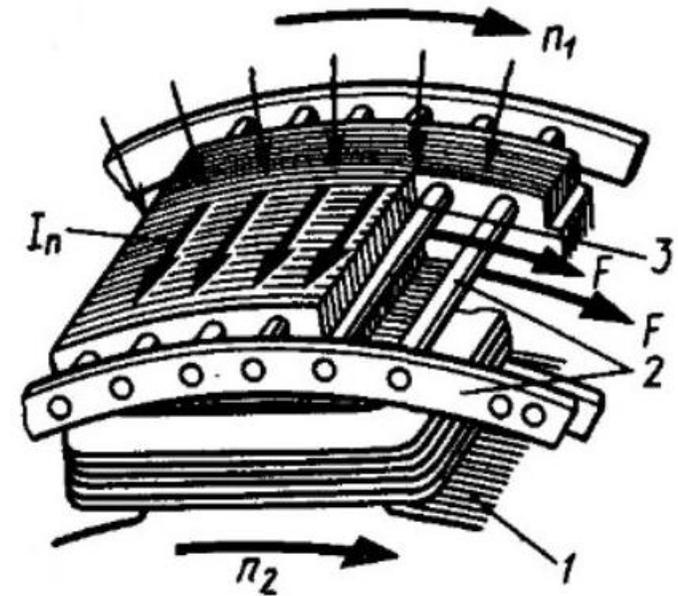
# Синхронный двигатель

## Способы пуска СД

### Асинхронный пуск

пусковая обмотка на роторе – продольно-поперечная ДО с увеличенным сечением стержней

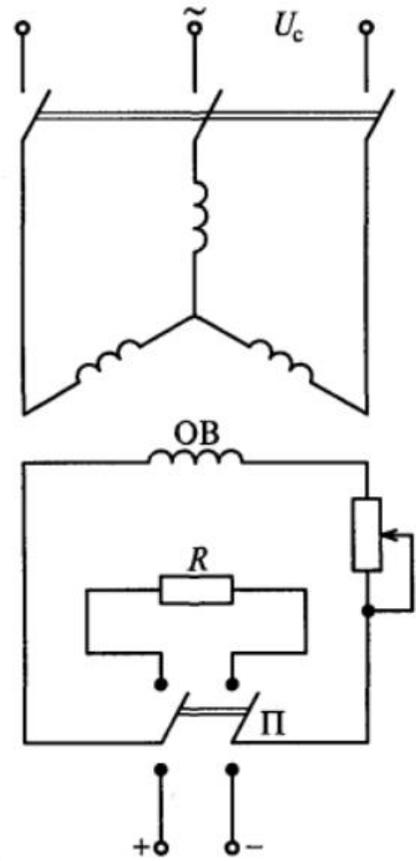
- $I_1 \rightarrow$  вращающееся магнитное поле  $\Phi_1$  с  $n_1$
- $\rightarrow$  ЭДС  $E_2$  и ток  $I_2$  в ДО (частотой  $f_2 = f_1$ )
- $I_2 + \Phi_1 \rightarrow$  момент  $M \rightarrow$  разгон ротора
- по мере разгона ротора: уменьшается скорость скольжения ротора относительно поля статора  
 $\rightarrow$  уменьшается  $f_2 \rightarrow E_2 \rightarrow I_2 \rightarrow M$
- установившаяся скорость  $n_2$  при  $M = M_c$
- если  $n_2$  близко к  $n_1$  – втягивание в синхронизм
  - реактивный момент
  - синхронный момент от поля ОВ



# Синхронный двигатель

## Способы пуска СД

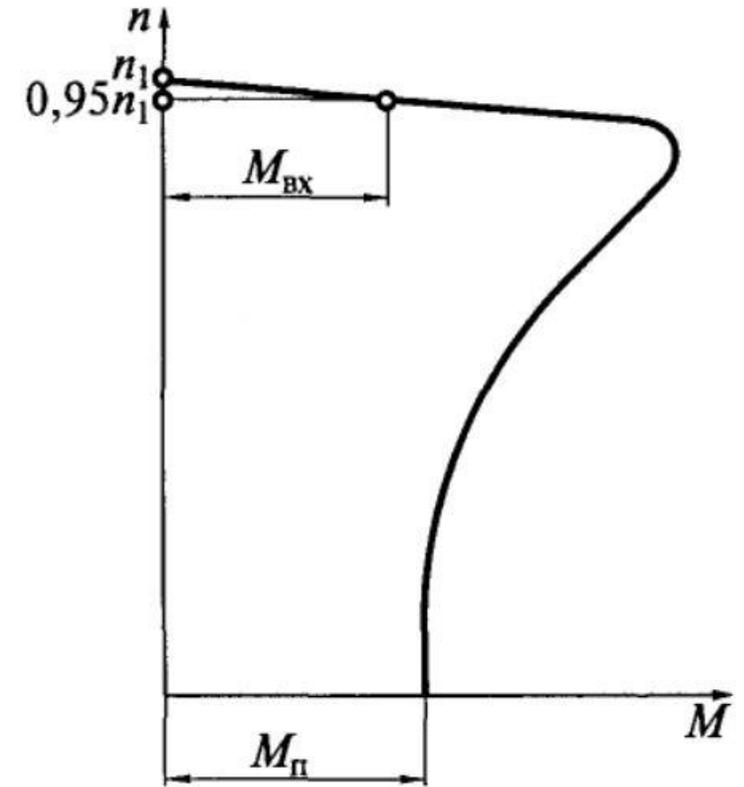
Асинхронный пуск – схема включения обмоток



- ОВ надо отключить, иначе будет генераторный момент (тормозной)
- ОВ нельзя оставить разомкнутой (большая ЭДС → пробой изоляции)
- ОВ нельзя замкнуть (большой ток → провал в кривой момента)
- надо замыкать ОВ на  $R = (5...10) r_B$

Пусковые свойства:

- пусковой ток
- пусковой момент
- момент входа [в синхронизм]



механическая характеристика асинхронного пуска

# Синхронный двигатель

## Способы пуска СД

Асинхронный пуск – влияние однофазного контура ротора (ОВ)

МДС замкнутой обмотки возбуждения:

- при пуске ( $n_2=0$ ) скорость поля статора относительно ОВ –  $n_c$   
→ ЭДС и ток в ОВ с частотой сети  $f_1$  → пульсирующая МДС ОВ  
→ прямая и обратная волна МДС ротора с  $n_{2эл} = \pm n_c$
- по мере разгона ( $n_2$ ) скорость поля статора относительно ротора снижается ( $n_c - n_2$ ) → снижается частота пульсаций МДС ОВ → прямая и обратная волна МДС ротора с  $n_{2эл} = \pm(n_c - n_2)$

Прямая волна МДС ротора :

- $n_{пр} = n_2 + n_{2эл} = n_2 + (n_c - n_2) = n_c$  → постоянное взаимодействие с полем статора  
→ основной вращающий момент (разгон ротора)

# Синхронный двигатель

## Способы пуска СД

Асинхронный пуск – влияние однофазного контура ротора (ОВ)

Обратная волна МДС ротора :

$n_{\text{обр}} = n_2 - n_{2\text{эл}} = n_2 - (n_c - n_2) = 2n_2 - n_c \rightarrow$  обратное поле ротора  
 $\rightarrow$  ЭДС и токи в ОЯ статора  $\rightarrow$  момент на статоре  $M_{2\text{ст}}$ ,  
направленный в сторону обратного поля ротора (а  $M_{2\text{рот}}$  наоборот)

При  $n_2 = 0$  и  $n_2 < 0,5n_c$

- $n_{\text{обр}} < 0 \rightarrow M_{2\text{ст}}$  – против вращения ротора, а  $M_{2\text{рот}}$  – по вращению ротора (помогает)

При  $n_2 = 0,5n_c$

- $n_{\text{обр}} = 0 \rightarrow$  момент на статоре  $M_{2\text{ст}} = 0$  (и  $M_{2\text{рот}} = 0$ )

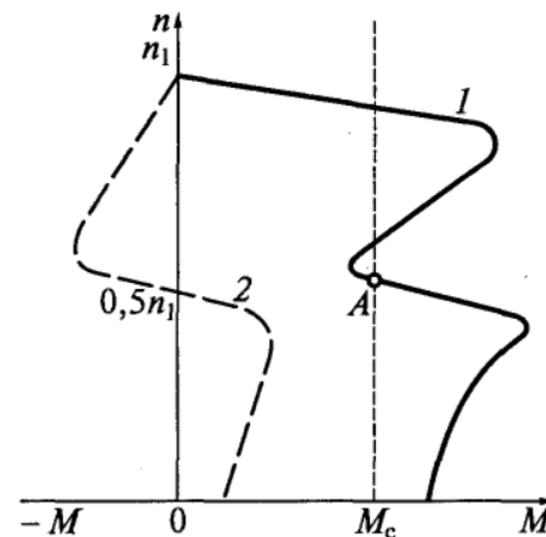
При  $n_2 > 0,5n_c$

- $n_{\text{обр}} > 0 \rightarrow M_{2\text{ст}}$  – по вращению ротора, а  $M_{2\text{рот}}$  – против (тормозит)

При  $n_2 = n_c$

- в ОВ нет ЭДС и токов  $\rightarrow$  момент на статоре  $M_{2\text{ст}} = 0$

Искажение  
механической характеристики



Провал в кривой момента  
 $\rightarrow$  вторая устойчивая часть  
мех.характеристики  $\rightarrow$   
«застревание» на  
полусинхронной скорости

# Синхронный компенсатор

**Синхронный компенсатор** – синхронный двигатель без нагрузки на валу

- регулирование  $\cos\varphi$  возле потребителей (регулирование  $I_B$ )
- компенсация реактивного тока длинной линии (ЛЭП)
- стабилизация  $U_c$  (поддержание  $E_{10} = U_{c\text{ ном}}$ )

Особенности конструкции

- тонкий вал (нет мех.нагрузки)
- нет выходного конца вала → герметичный корпус (водородное охлаждение)
- не требуется перегрузочная способность  
→ снижение  $M_{max}$  за счет меньшего  $\delta$   
→ снижение  $F_2$  и  $I_B$  → снижение потерь на ОВ и габаритов

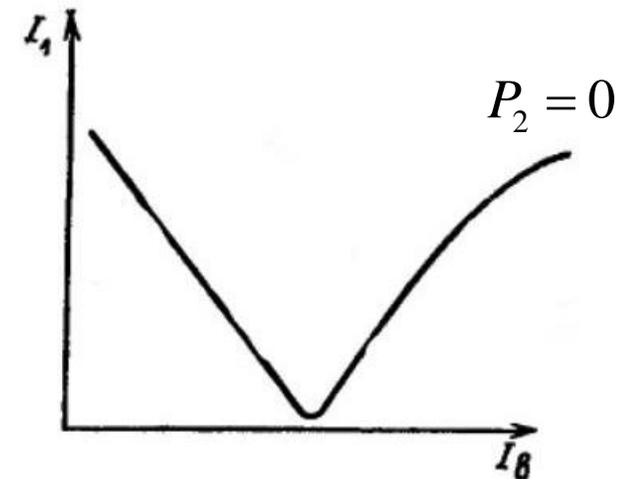
$$S = 2,8...320 \text{ МВА};$$

$$U_1 = 6,3...20 \text{ кВ};$$

$$n_2 = 750; 1000 \text{ об/мин}$$

Основная характеристика

– U-образная характеристика при  $P_2 = 0$



недовозбуждение / перевозбуждение

# Синхронные машины



## 3.7. НЕСИММЕТРИЧНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ И ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИНХРОННОМ ГЕНЕРАТОРЕ

# Влияние токов обратной последовательности

Несимметричная нагрузка в 3фазной сети

→ несимметричный режим работы СГ

Метод симметричных составляющих:

прямая, обратная и нулевая последовательность

Прямая последовательность – поле статора синхронно с вращением ротора ( $n_1 = n_2$ )

Обратная последовательность – поле статора вращается против ротора ( $n_1 = -2n_2$ )

Потери в роторе: ОВ + массивные части ротора (турбогенератор) – надо снижать мощность СГ

Пульсации тока ОВ:  $I_{\text{в}}$  + наведенный  $I$  с  $2f_1$  от обратного поля → влияет на возбудитель

Вибрации с  $2f_1$ : взаимодействие  $\Phi_{\text{в}}$  с  $\Phi_2$  и  $\Phi_1$  с  $\Phi$  от токов с  $2f_1$  в роторе

Несимметрия напряжений  $U_{1\phi}$ : из-за падения напряжения в фазах  $I_2 Z_2$  ( $x_{2*} = 0,3...0,8$ )

Действие демпферной обмотки:

- токи в КЗ обмотке → ослабление  $\Phi_2$  (большие стержни ДО – малое  $Z$  – больше ток ДО – сильнее ослабление  $\Phi_2$ )
- в результате  $x_{2*} = 0,15...0,35$
- в турбогенераторе массивный ротор вместо ДО:  $x_{2*} = 0,12...0,25$

# Влияние токов нулевой последовательности

Токи нулевой последовательности совпадают по фазе во всех обмотках, сдвинутых на  $120^\circ$ :

- 1-е гармоники МДС фаз  $F_{01}$  сдвинуты на  $120^\circ$  (симметричная звезда)  $\rightarrow$  сумма  $F_{01} = 0$
- 3 гармоники МДС фаз  $F_{03}$  совпадают

$$F_{0A3} = F_{03} \sin \omega t \cos \left( 3 \frac{\pi x}{\tau} \right)$$

$$F_{0B3} = F_{03} \sin \omega t \cos \left( 3 \left( \frac{\pi x}{\tau} - \frac{2\pi}{3} \right) \right) = F_{03} \sin \omega t \cos \left( 3 \frac{\pi x}{\tau} \right)$$

$$F_{0C3} = F_{03} \sin \omega t \cos \left( 3 \left( \frac{\pi x}{\tau} - \frac{4\pi}{3} \right) \right) = F_{03} \sin \omega t \cos \left( 3 \frac{\pi x}{\tau} \right)$$

– пульсирующее поле  $\rightarrow$  ЭДС и токи в ОВ и ДО  
 $\Phi_{03}$  мало, ЭДС и токи малы ( $x_{0*} = 0,02 \dots 0,1$ )

Падение напряжения  $I_0 Z_0 = U_0 \rightarrow$  несимметрия  $U_\phi$

# Несимметричные короткие замыкания

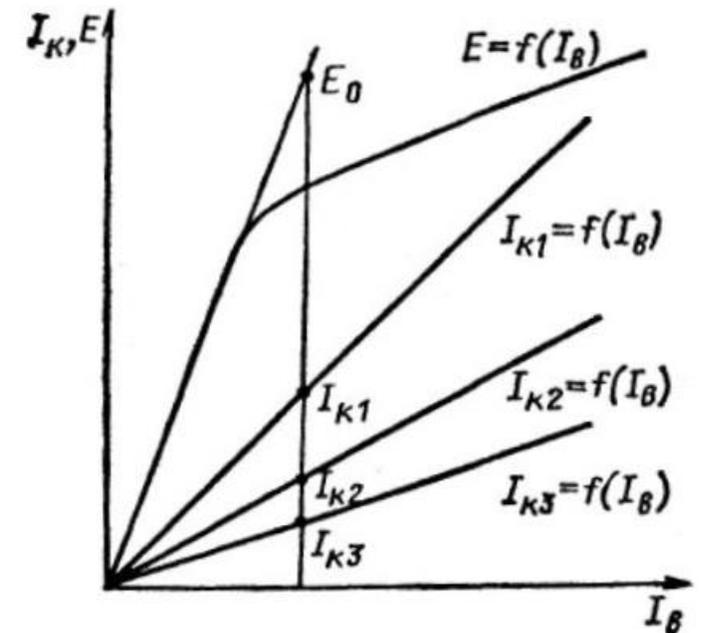
Установившиеся токи КЗ можно анализировать с помощью метода симметричных составляющих

- для 3-фазного КЗ 
$$I_{к3} = \frac{E_0}{x_d}$$
- для 2-фазного КЗ 
$$I_{к2} = \frac{\sqrt{3}E_0}{x_d + x_2}$$
- для 1-фазного КЗ 
$$I_{к1} = \frac{3E_0}{x_d + x_2 + x_0}$$

Токи КЗ индуктивные → продольная размагничивающая РЯ (ненасыщенная магн.цепь, линейные хар-ки)

Но только токи прямой последовательности создают продольную размагничивающую РЯ:

- при 3-фазном КЗ:  $I_{пр} = I_{к3ф}$
  - при 2-фазном КЗ:  $I_{пр} = I_{к2ф}/\sqrt{3}$
  - при 1-фазном КЗ:  $I_{пр} = I_{к1ф}/3$
- для одинакового  $I_B$  1-фазное КЗ опаснее



По характеристикам КЗ можно найти сопротивления  $x_2$  и  $x_0$

# Внезапное короткое замыкание

Переходный процесс при внезапном КЗ → броски токов  
→ большие электродинамические силы

Сложности анализа переходных процессов в СГ:

- электрическая несимметрия
- магнитная несимметрия
- взаимное перемещение обмоток статора и ОВ

Рассмотрим процессы только качественно

На ХХ ЭДС фазы  $e = E_m \sin(\omega t + \alpha_k)$

$\alpha_k$  – фаза ЭДС в момент КЗ  
(влияет на свободную составляющую тока  
при переходном процессе)

Допущения:

- холостой ход СГ до КЗ
- рассмотрим 3-фазное КЗ
- $n_2$  остается постоянной
- $r$  пренебрегаем

# Внезапное короткое замыкание

## 1. КЗ при $\alpha_k = \pi/2$

При этом ЭДС фазы  $e = E_m$   
(ось  $d$  опережает ось фазы на  $\pi/2$ )

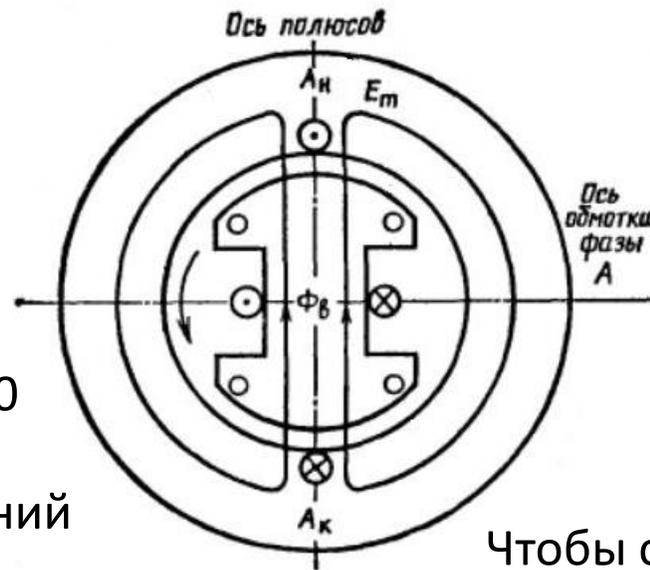
- $\Phi_B$  сцеплен с ОВ и ДО
- потокосцепление с фазой А  $\Psi_a = 0$

При КЗ уравнение баланса напряжений

$$0 = e - ir \quad \text{или} \quad -\frac{d\Psi}{dt} = ir$$

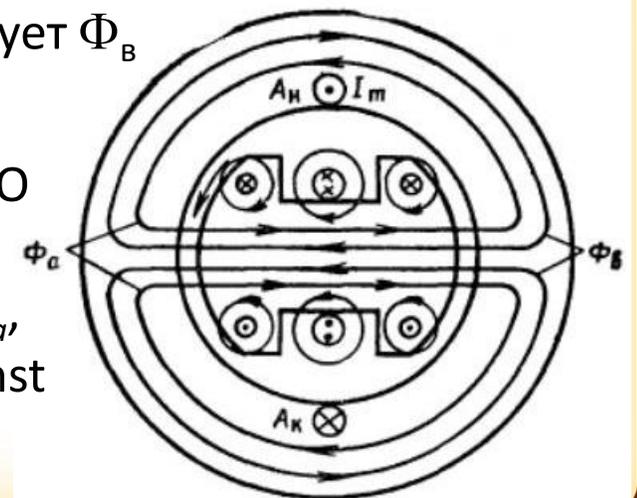
полагая  $r = 0$ :  $\frac{d\Psi}{dt} = 0 \rightarrow \Psi = \text{Const}$

После КЗ потокосцепления всех обмоток должны оставаться Const



При повороте ротора и  $\Phi_B$  должно возрасти  $\Psi_a$  от 0 до  $\text{max}$  значения через  $1/4$  периода

Чтобы сохранять  $\Psi_a = 0$  в фазе А возникает ток  $i_{ka}$ , его поток  $\Phi_a$  противодействует  $\Phi_B$



$\Phi_a$  наведет ЭДС в ОВ и ДО  
→ токи в ОВ и ДО,  
противодействующие  $\Phi_a$ ,  
чтобы сохранить  $\Psi = \text{Const}$

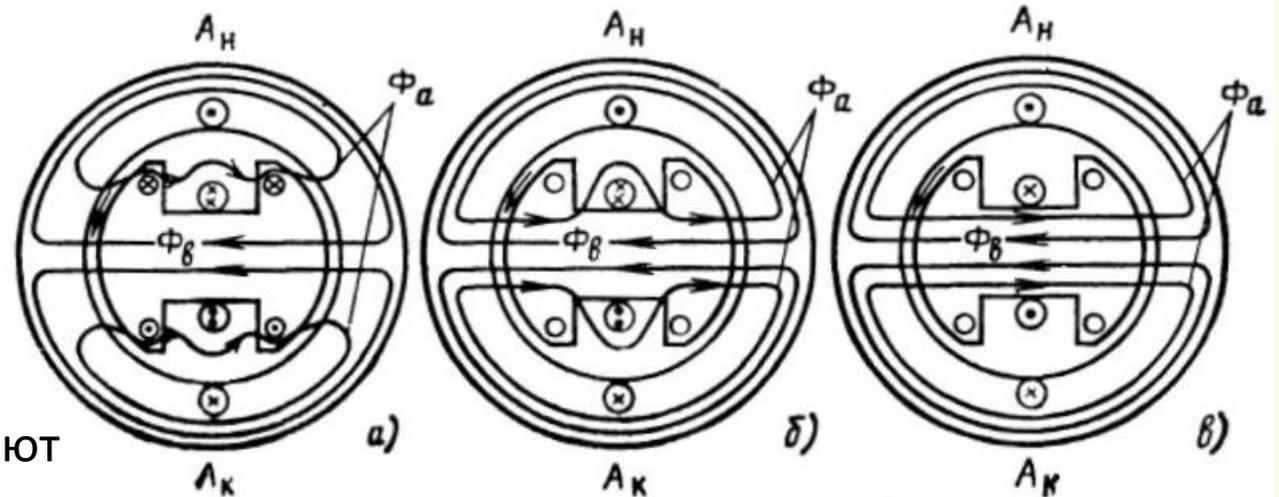
# Внезапное короткое замыкание

## 1. КЗ при $\alpha_k = \pi/2$

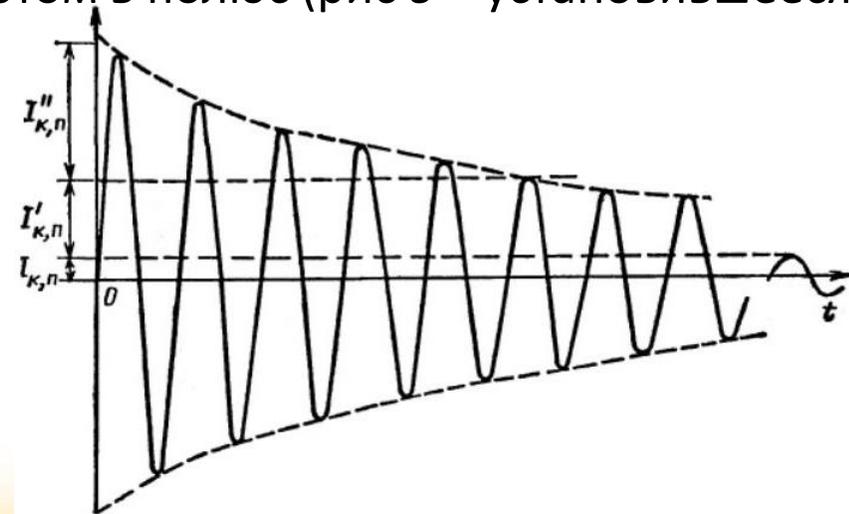
Наведенные токи ОВ и ДО вытеснят  $\Phi_a$  из ротора в межполюсное пространство  $\Lambda_\mu$  мала  $\rightarrow$  для  $\Phi_a$  нужен бóльший ток  $i_a$  (больше, чем в установившемся КЗ)

Наведенные токи затухают (пост. времени  $T = L/r$ )

$\rightarrow \Phi_a$  проникает в зону ДО (рис б), потом в полюс (рис в – установившееся КЗ)



$\Lambda_\mu$  для  $\Phi_a$  возрастает (возрастает  $x_a$ )  
 $\rightarrow$  затухает ток  $i_{ka}$



# Внезапное короткое замыкание

## 1. КЗ при $\alpha_k = \pi/2$

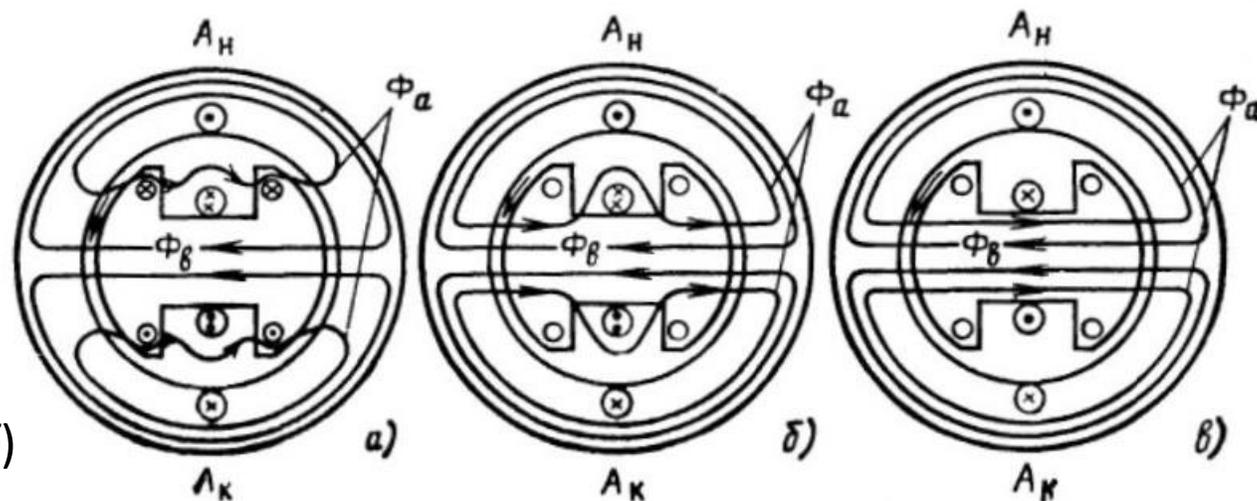
Индуктивное сопротивление фазы  $x_d$  определяется маг. проводимостью  $\Lambda_\mu$

- Вначале КЗ  $\Lambda_\mu$  минимальна (рис. а)  
→  $x''_d$  – сверхпереходное инд. сопр-е
- Затем поле проникает в зону ДО (рис. б)  
→  $x'_d$  – переходное инд. сопр-е
- При установившемся КЗ (рис в)  
→  $x_d$  – индуктивное сопр-е ОЯ

При наличии продольно-поперечной ДО также рассматривают  $x''_q$

При  $\alpha_k = \pi/2$  есть только периодическая составляющая тока

При других  $\alpha_k$  появляется апериодическая (свободная) составляющая



Параметры сверхпереходного и переходного режимов в о.е.

- $x''_d = 0,12...0,3$
- $x'_d = 0,15...0,5$
- $x''_q = 0,12...0,35$

# Внезапное короткое замыкание

## 2. КЗ при $\alpha_k = 0$

При этом ЭДС фазы  $e = 0$ ,  
потокосцепление с фазой А  $\Psi_a = \Psi_m$

Периодический ток максимален

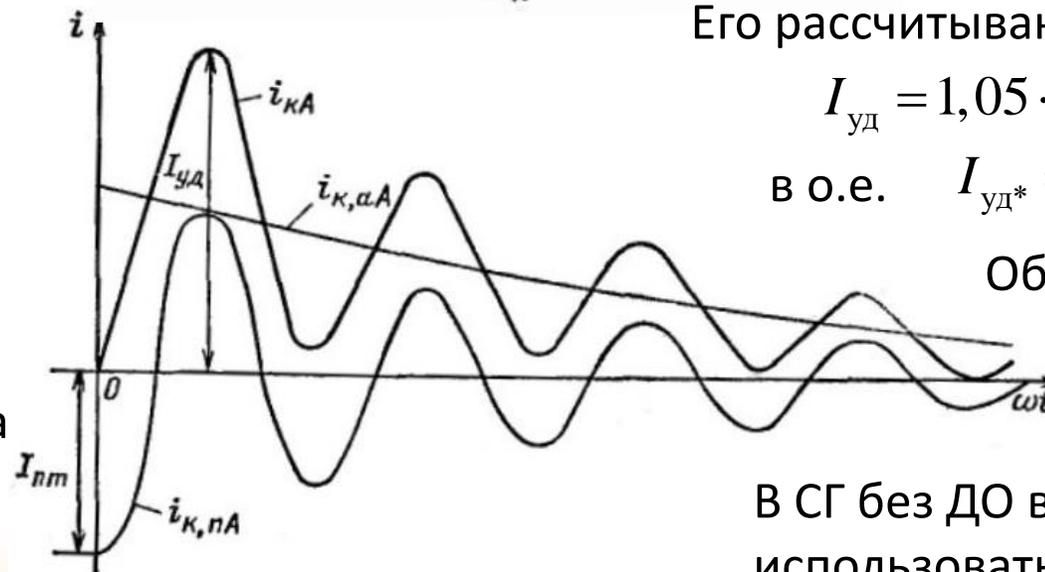
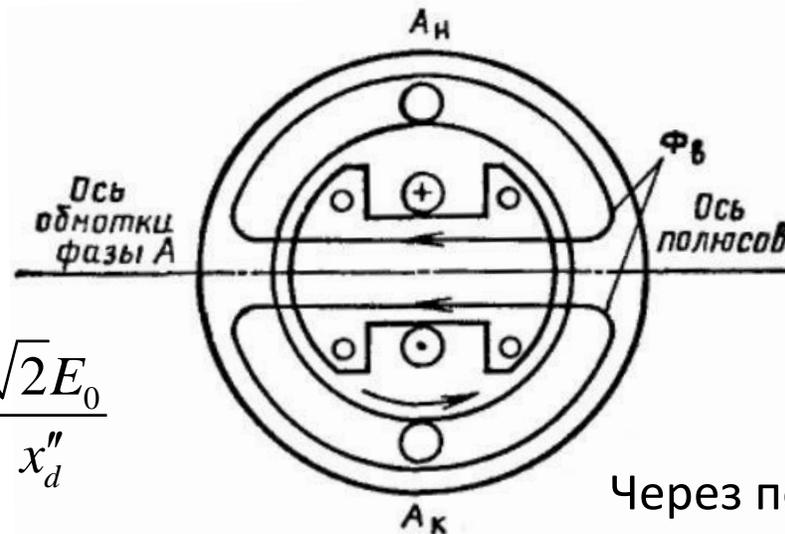
$$i_{к,ПА} = I_{Пm} = \frac{\sqrt{2}E_0}{x_d''}$$

Апериодический ток равен  $-I_{Пm}$

Апериодическая составляющая  
тока затухает до 0

Периодическая составляющая —  
до установившегося тока

В явнополюсных СГ  
апериодическая составляющая тока  
дополнительно пульсирует с  $2f_1$



Через полпериода – ударный ток  
Его рассчитывают при  $E_0 = 1,05U_H$

$$I_{уд} = 1,05 \cdot 1,8 \sqrt{2} U_H / x_d''$$

в о.е.  $I_{уд}^* = 1,05 \cdot 1,8 / x_d''^*$

Обычно  $I_{уд}^* = 15...20$

В СГ без ДО вместо  $x_d''$  надо  
использовать  $x_d' \rightarrow I_{уд}$  меньше

# Внезапное короткое замыкание

## Действие токов КЗ

КЗ краткосрочно → перегрев СГ не грозит

Большие токи – большие силы ( $\sim i^2$ )

- отгиб лобовых частей обмоток к сердечнику
- силы между катушками разных фаз

→ повреждение изоляции → пробой  
(нужно надежное крепление)

Моменты на статоре / роторе

- периодическая составляющая тока – индуктивная  
→ момент не создает
- апериодическая составляющая тока статора + токи ротора  
→ момент  $(5...10)M_n$  (периодический затухающий)

# Синхронные машины



## 3.8. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ СПЕЦИАЛЬНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

# Синхронные реактивные двигатели

Момент синхронной машины

$$M = \frac{mU_1 E_{10}}{\Omega_1 x_d} \sin \theta + \frac{mU_1^2}{2\Omega_1} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta = M_\varepsilon + M_{dq}$$

- $M_\varepsilon$  зависит от потока возбуждения и  $x_d$
- $M_{dq}$  зависит только от разницы  $(x_d - x_q)$

Синхронный реактивный двигатель

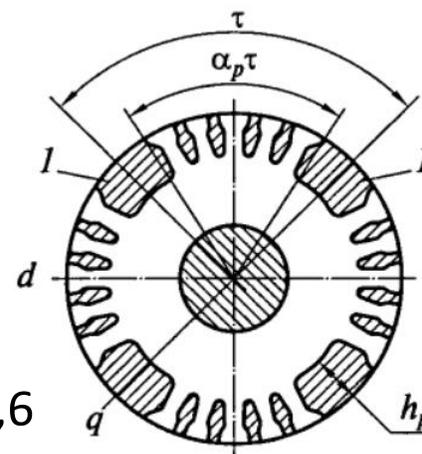
- явнополюсный ротор
- отсутствие ОВ (и скользящих контактов)
- простая и надежная конструкция ротора

Ферромагнитное тело в магнитном поле

- стремится в положение с  $\min W_{\text{м.поля}}$   
( $\max \Lambda_\delta \rightarrow \min \delta$ )
- полюса ротора следуют за полем статора

Обычно СРД используют асинхронный пуск  
→ КЗ обмотка в пазах ротора,  
зубцы сгруппированы в полюсы

Коэф-т полюсного перекрытия  $\alpha_p = b_p / \tau = 0,5 \dots 0,6$   
Высота полюса (зубца)  $h_p / \delta = 10 \dots 12$



Перегрузочная способность  
 $k_M = 1,2 \dots 1,5$   
Кратность пускового тока  
 $k_{\text{пi}} = 5 \dots 7$   
Обычно  $P_{\text{СРД}}$  около 40% от  $P_{\text{АД}}$   
в тех же габаритах

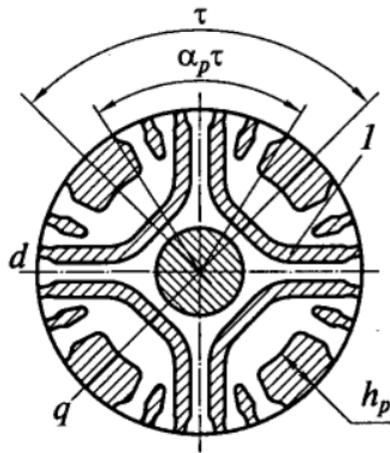
# Синхронные реактивные двигатели

Для увеличения момента → увеличение разницы ( $x_d - x_q$ )

Несимметричная КЗ обмотка ротора → ухудшение пусковых свойств  
(провал в кривой момента до  $M_{\min}$ )

Требуется оптимизация зубцовой зоны

- Ротор с доп.внутренними пазами



- Секционированный ротор

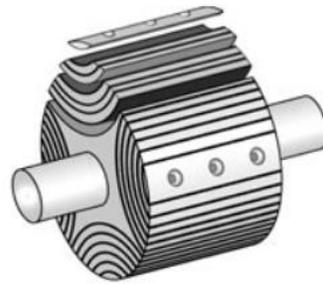
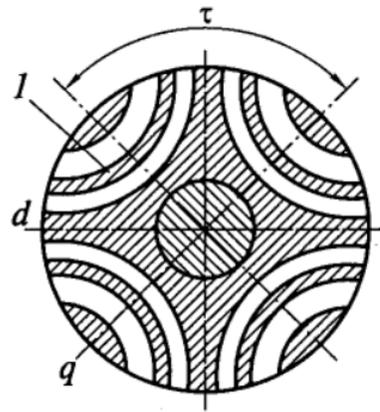


ABB: SynRM (IE4)

+ электронный регулятор (ПЧ)

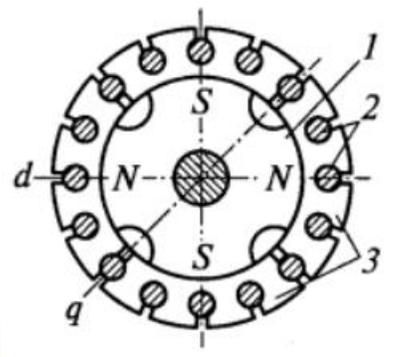
# Синхронные машины с постоянными магнитами

Возбуждение от ПМ вместо ОВ

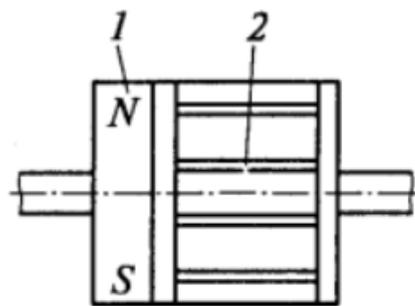
- упрощение конструкции ротора
- отсутствие скользящих контактов (повышение надежности)
- отсутствие потерь на возбуждение и трение щеток (повышение КПД)
- не требуется источник постоянного тока
  - высокая стоимость магнитов
  - невозможность регулирования потока

ПМ широко распространены в микродвигателях (СДПМ с асинхронным пуском)

Радиальная конструкция

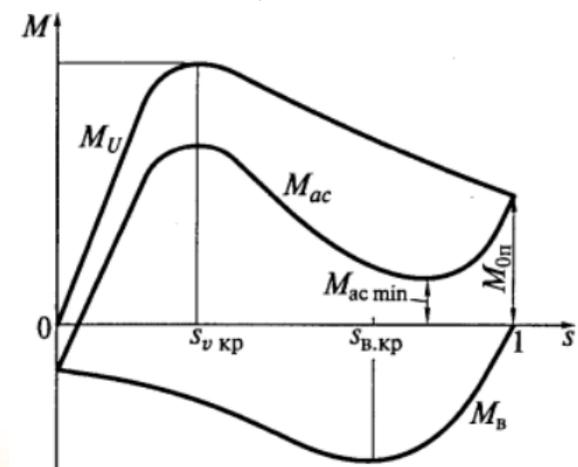


Аксиальная конструкция



Поток ПМ при пуске создает генераторный момент (тормозной) → требуется ограничивать степень возбужденности

$$\varepsilon = \frac{E_{10}}{U_1}$$



---

ДАЛЕЕ – АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ