

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

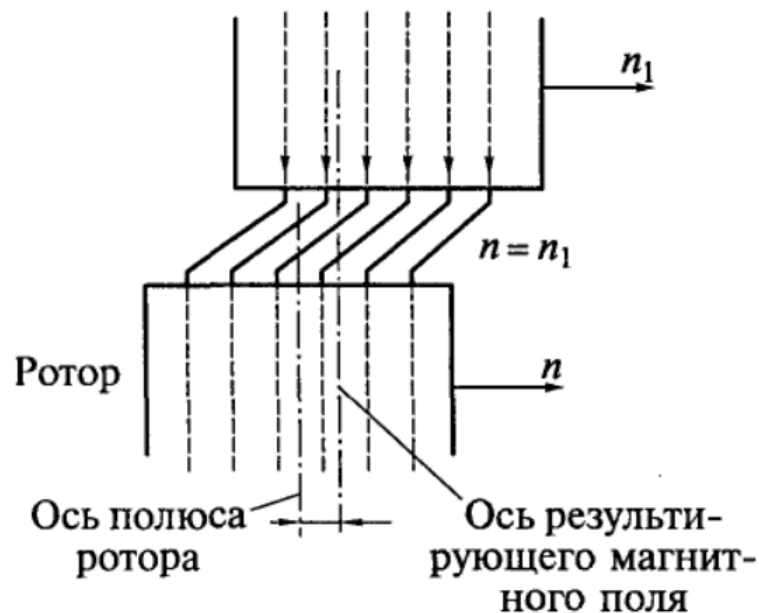
Синхронный двигатель

# Синхронный двигатель

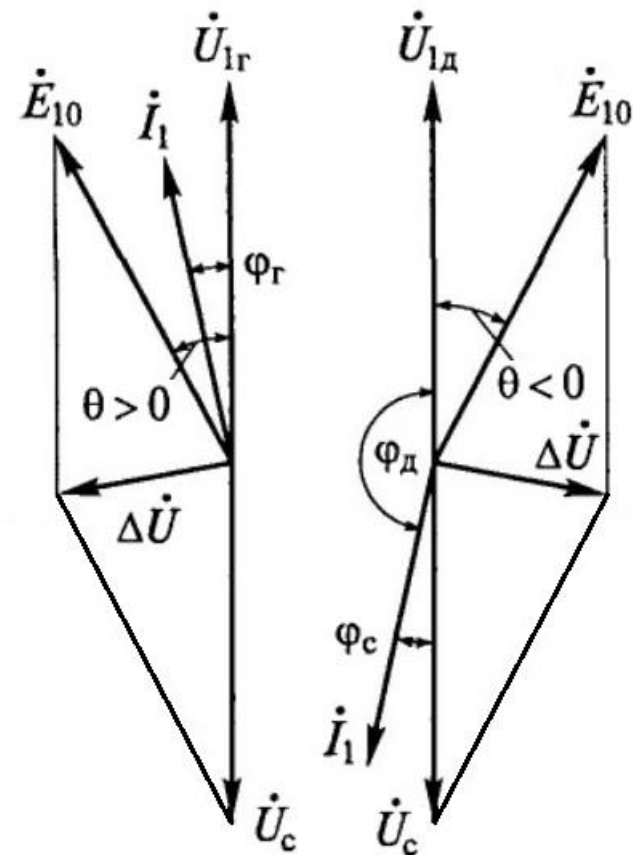
## Работа СМ в двигательном режиме

Синхронный двигатель → работа СМ параллельно с сетью

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

$$P_1 = mU_{1с}I_1\cos\varphi_c > 0$$

# Синхронный двигатель

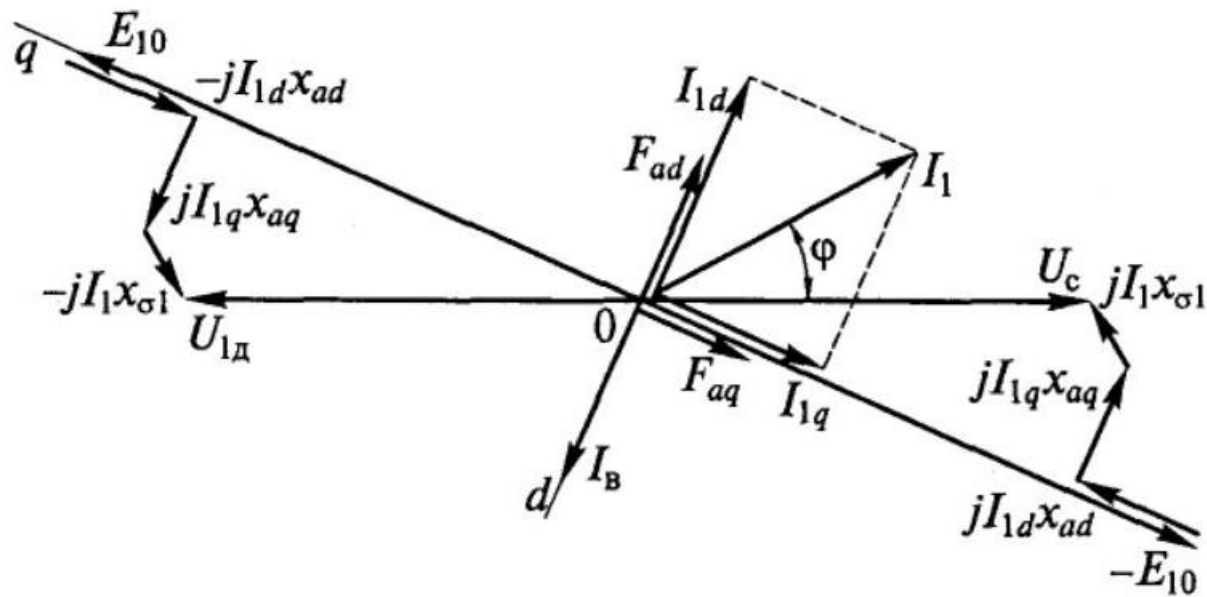
## Работа СМ в двигательном режиме

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

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



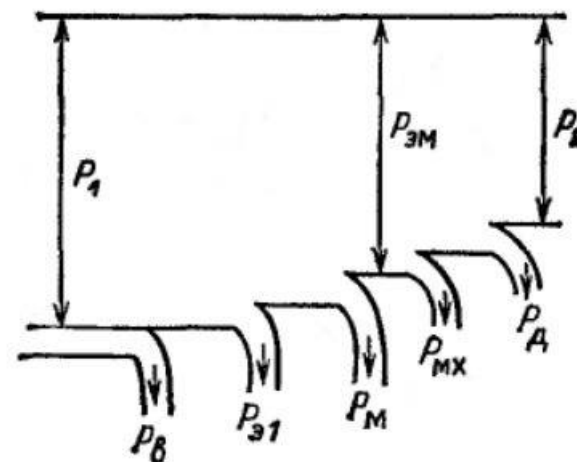
Реакция якоря: поперечная и продольная размагничивающая при опережающем токе (ток  $I_1$  опережающий относительно  $U_c$ , но отстающий относительно  $U_d$ )

# Синхронный двигатель

$P_1$  – электрическая мощность из сети

- $P_{\varepsilon 1}$  – электр.потери в обмотке якоря
- $P_m$  – магнитные потери в стали статора
- $P_{\varepsilon M}$  – электромагнитная мощность
- $P_{mx}$  – механические потери
- $P_d$  – добавочные потери в стали статора и ротора
- $P_2$  – выходная механическая мощность

$P_v$  – потери на возбуждение



Электромагнитная мощность СД аналогична генератору пренебрегая  $P_{\varepsilon 1}$  и  $P_m$   $P_{\varepsilon M} = P_1$ , тогда

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

В неявнополюсном СД  $x_d = x_q = x_c$  и

$$P_{\varepsilon M} = \frac{mU_1 E_{10}}{x_c} \sin \theta$$

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

# Синхронный двигатель

## Угловые и U-образные характеристики СД

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

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

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

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

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

Кратность максимального момента

$$k_M = M_{\text{max}} / M_{\text{ном}}$$

(перегрузочная способность)

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

Явнополюсный СД может работать без возбуждения  
– реактивный двигатель

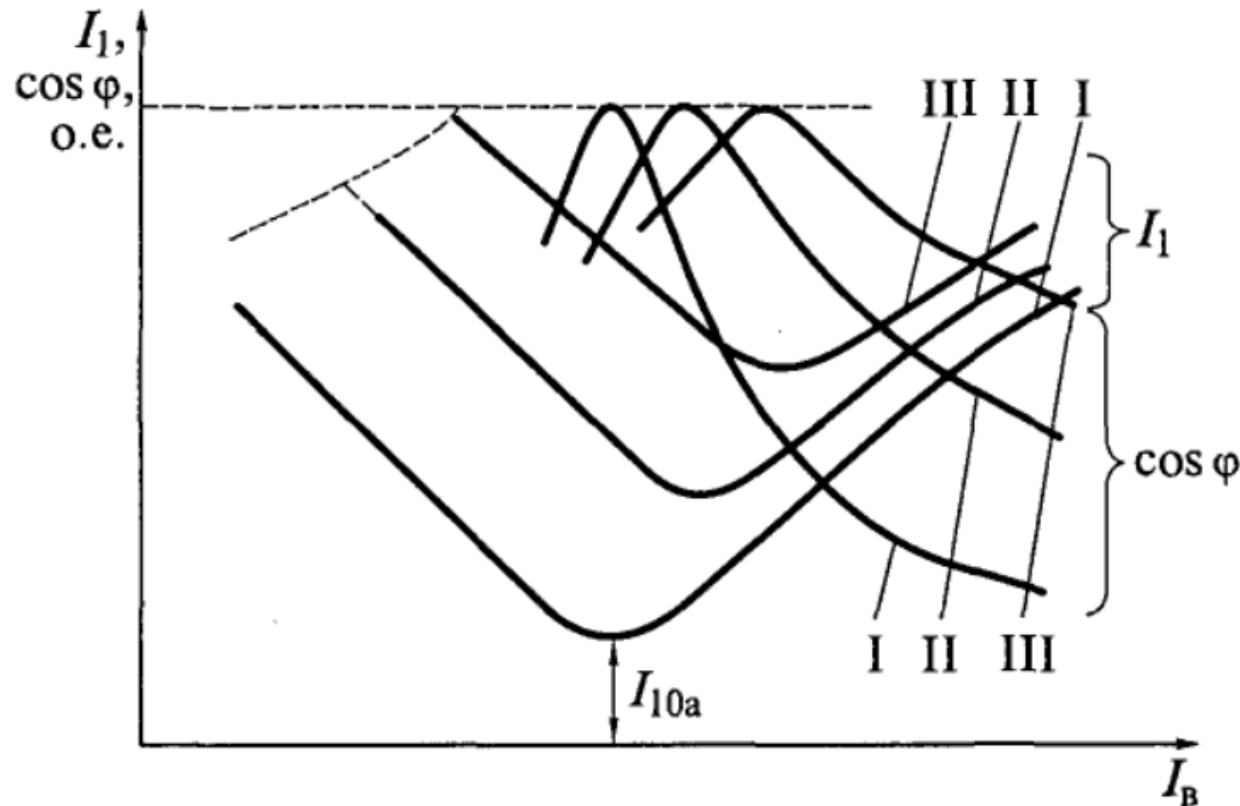
Угловая  
моментная  
характеристика



# 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  $\cos \varphi = \text{const}$

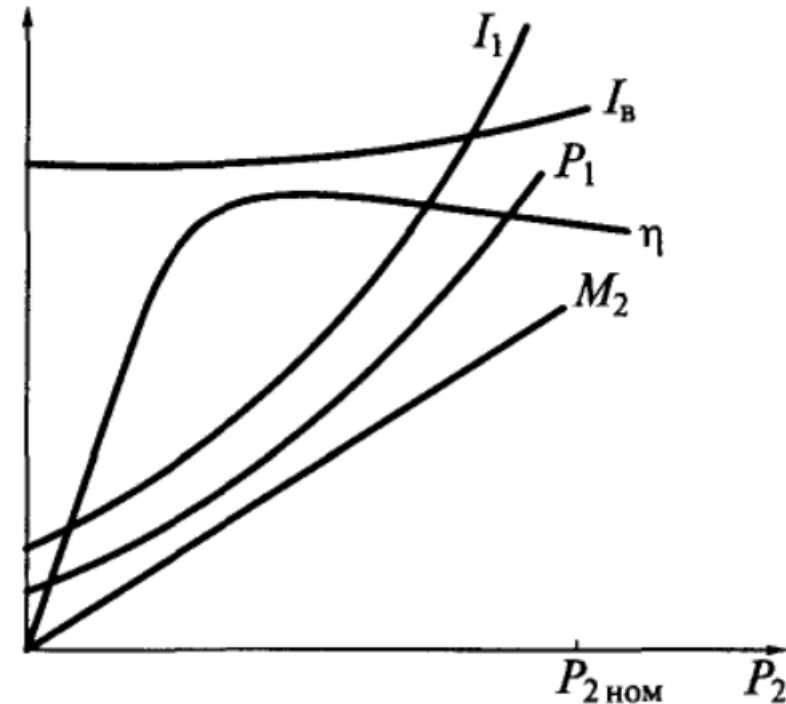
На холостом ходу минимальный  $I_1 = I_{10a}$  (активная составляющая тока ХХ – покрытие потерь)

# Синхронный двигатель

## Рабочие характеристики СД

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

- нагрузочный момент  $M_2 = P_2 / \Omega_2$
- ток возбуждения  $I_{\text{в}}$  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

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

## 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  $P_n$

## 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



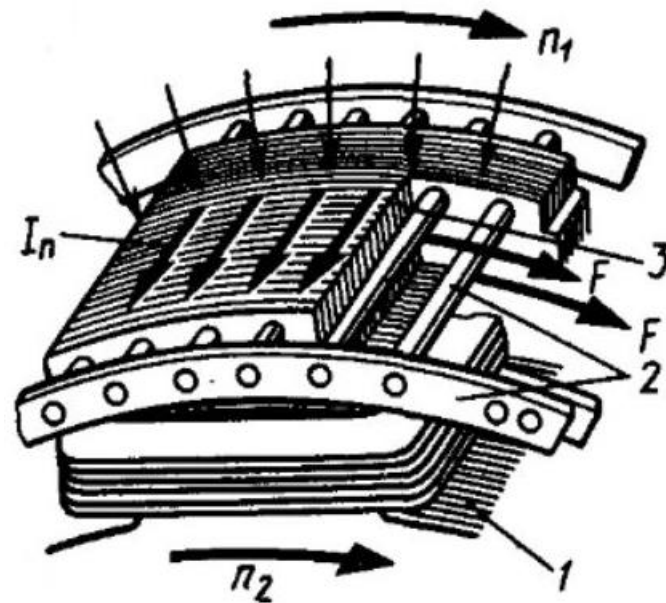
# Синхронный двигатель

## Способы пуска СД

### Асинхронный пуск

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

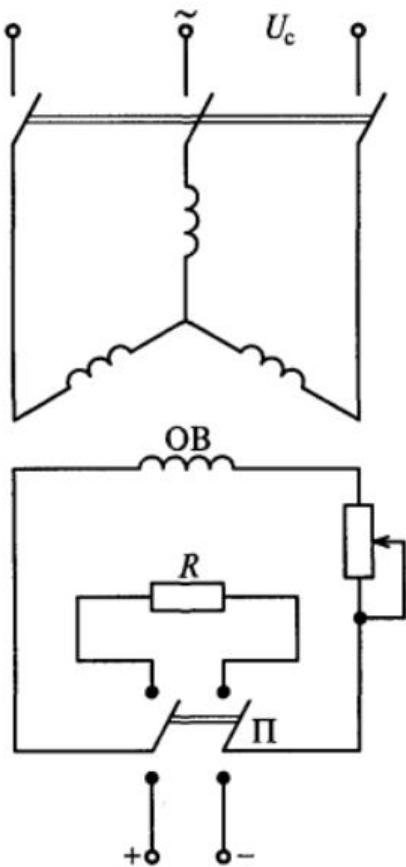
- $I_1 \rightarrow$  вращающееся магнитное поле  $\Phi_1$  с  $n_1$
- $\rightarrow$  ЭДС  $E_2$  и ток  $I_2$  в ДО (частотой  $f_2 = f_1$ )
- $I_2 + \Phi_1 \rightarrow$  момент  $M \rightarrow$  разгон ротора
- по мере разгона ротора: уменьшается скорость скольжения ротора относительно поля статора  $\rightarrow$  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

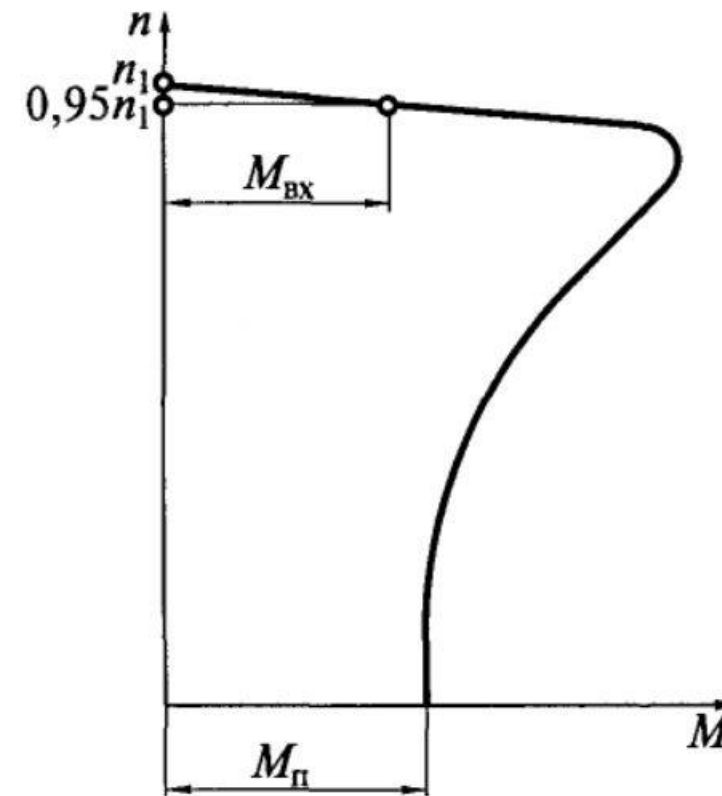
Асинхронный пуск – схема включения обмоток



- 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  $M_{2\text{рот}} = 0$ )

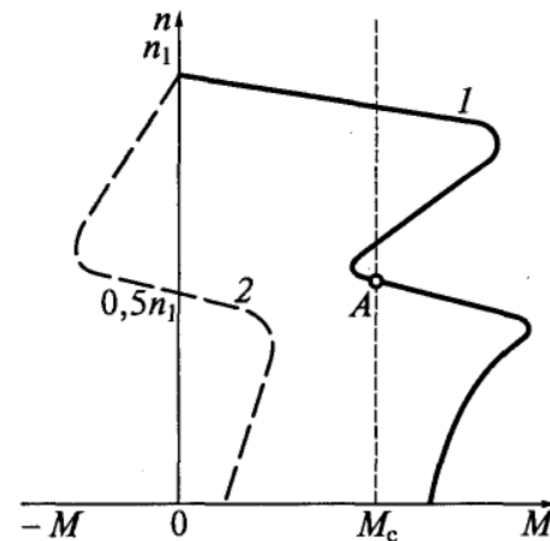
При  $n_2 > 0,5n_c$

- $n_{\text{обр}} > 0 \rightarrow M_{2\text{ст}}$  – 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  $\rightarrow$   
«застывание» 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

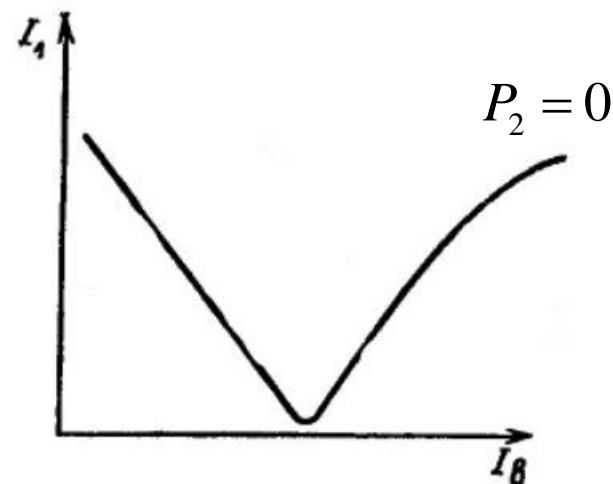
$S = 2,8...320 \text{ МВА};$

$U_1 = 6,3...20 \text{ кВ};$

$n_2 = 750; 1000 \text{ об/мин}$

Основная характеристика

– U-образная характеристика при  $P_2 = 0$



недовозбуждение / перевозбуждение

# СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Несимметричные режимы и  
переходные процессы в СГ

# Влияние токов обратной последовательности

Несимметричная нагрузка в 3фазной сети

→ несимметричный режим работы СГ

Метод симметричных составляющих:

прямая, обратная и нулевая  
последовательность

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  $I_2 Z_2$  ( $x_{2*} = 0,3...0,8$ )

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

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;

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

но  $F_{03}$  и  $\Phi_{03}$  малы, ЭДС и токи малы ( $x_{0*} = 0,02 \dots 0,1$ ), влияние  $F_0$  незначительно



# 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

Допущения:

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

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)

# Внезапное короткое замыкание

## 1. КЗ при $\alpha_k = \pi/2$

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

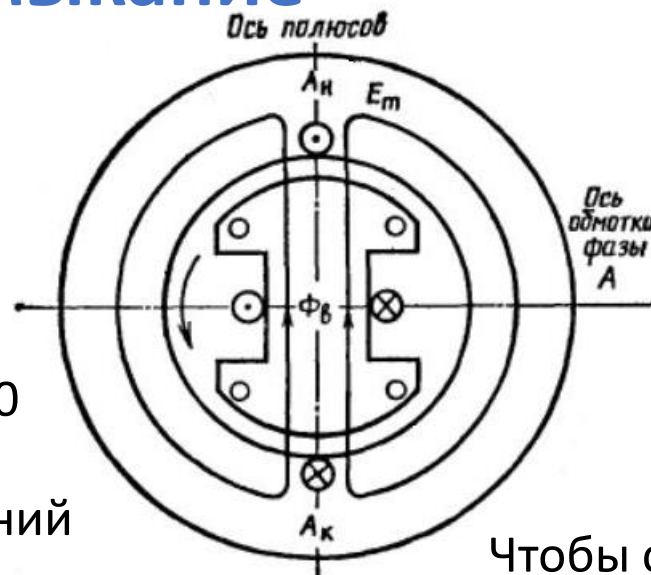
- $\Phi_B$  сцеплен с ОВ и ДО
- потокосцепление с фазой А  $\Psi_a = 0$

При КЗ уравнение баланса напряжений

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

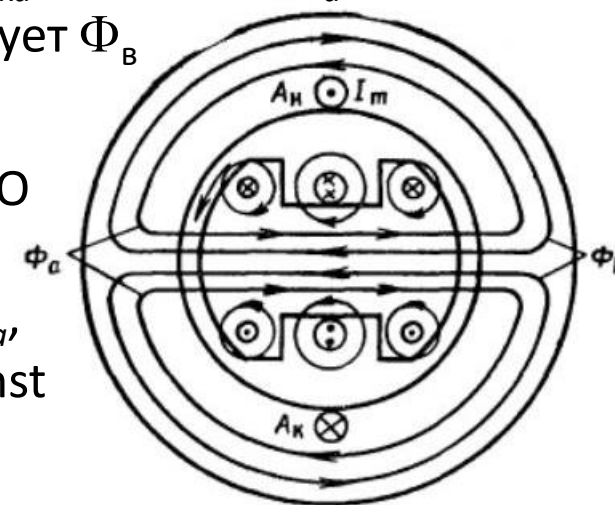
полагая  $r = 0$ :  $\frac{d\Psi}{dt} = 0 \rightarrow \Psi = \text{const}$

После КЗ потокосцепления всех обмоток должны оставаться const



При повороте ротора и  $\Phi_B$  должно возрасть  $\Psi_a$  от 0 до  $\text{max}$  значения через  $\frac{1}{4}$  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  
 $\rightarrow$  токи в ОВ и ДО,  
противодействующие  $\Phi_a$ ,  
чтобы сохранить  $\Psi = \text{Const}$

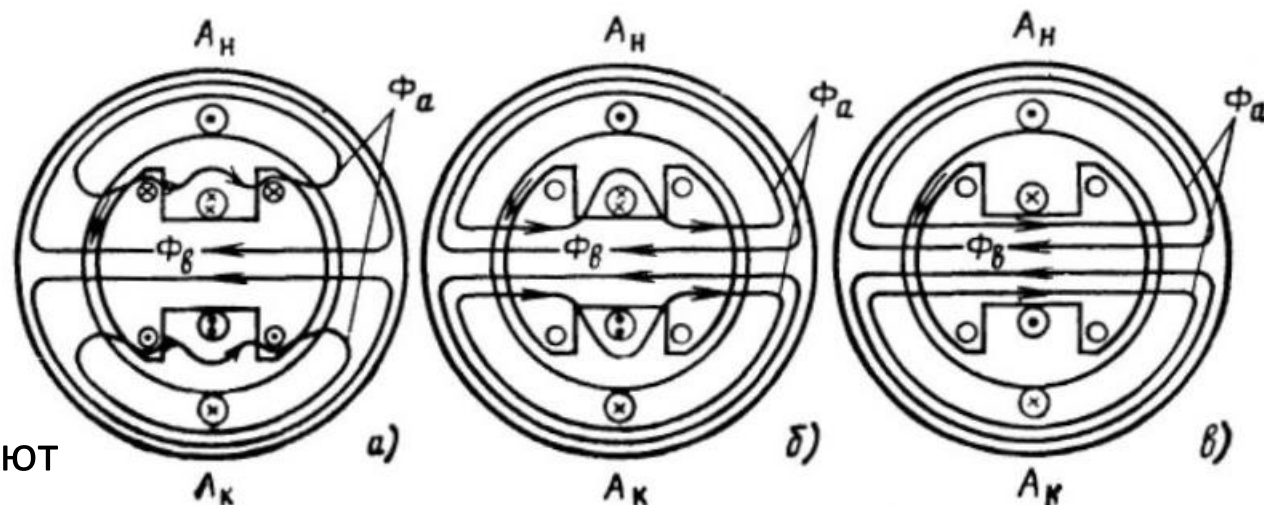
# Внезапное короткое замыкание

## 1. КЗ при $\alpha_K = \pi/2$

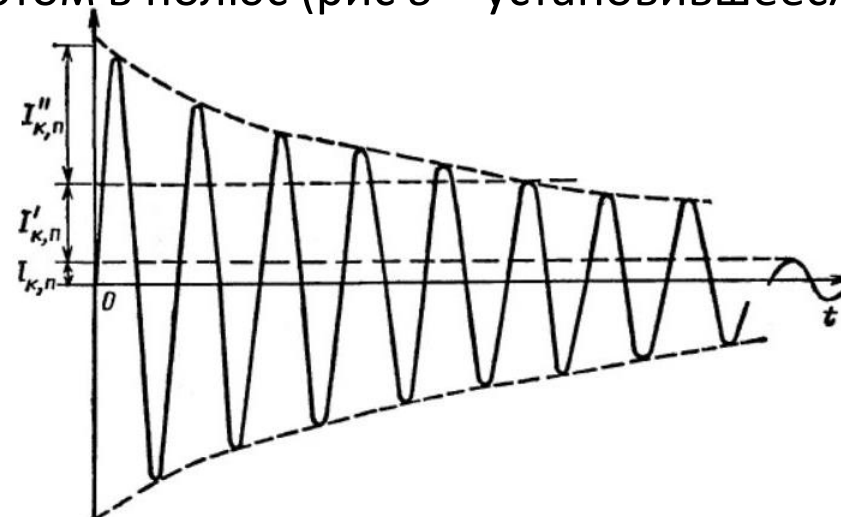
Наведенные токи ОВ и ДО вытеснят  $\Phi_a$  из ротора в межполюсное пространство  
 $\Lambda_\mu$  мала  $\rightarrow$  для  $\Phi_a$  нужен бо́льший ток  $i_a$  (больше, чем в установившемся КЗ)

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 $\alpha_k = \pi/2$

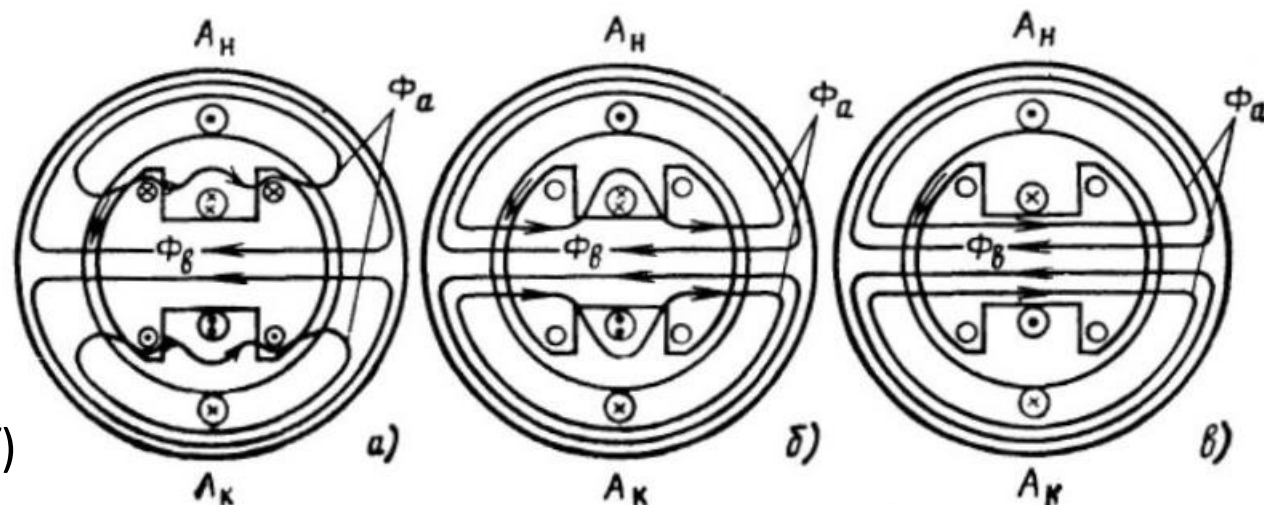
Индуктивное сопротивление фазы  $x_d$  определяется маг.проводимостью  $\Lambda_\mu$

- 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

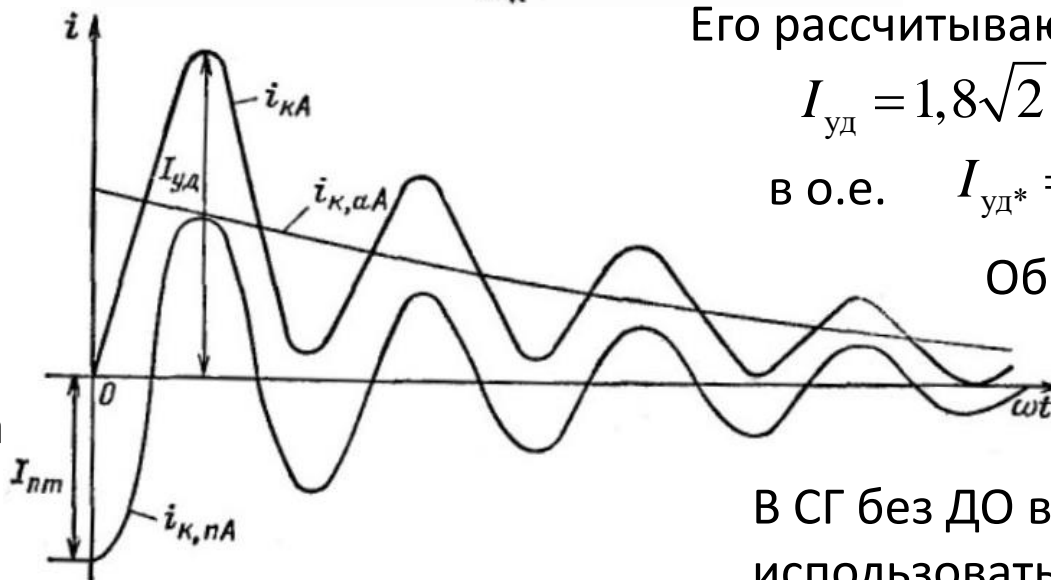
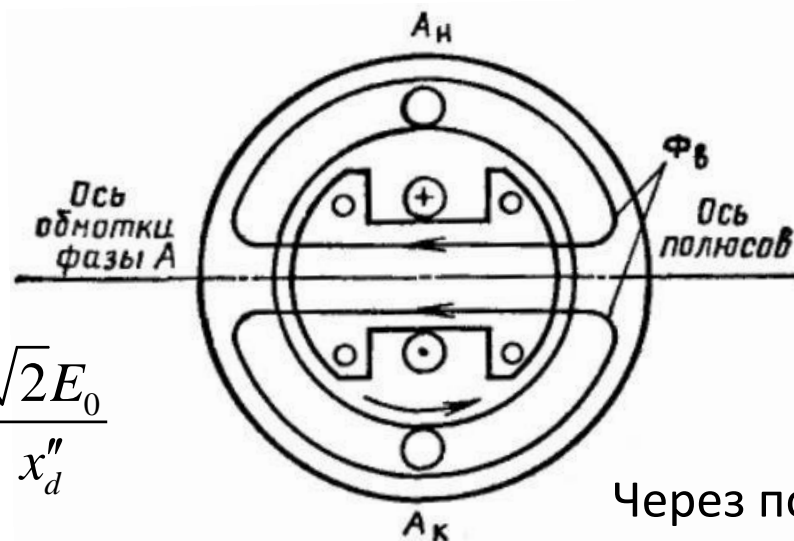
$$i_{k, \text{ПА}} = I_{\text{Пм}} = \frac{\sqrt{2}E_0}{x_d''}$$

Апериодический ток равен  $-I_{\text{Пм}}$

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  $E_0 = 1,05U_n$

$$I_{\text{уд}} = 1,8\sqrt{2}(1,05 \cdot U_n) / x_d''$$

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

Обычно  $I_{\text{уд}}^* = 15...20$

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