

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

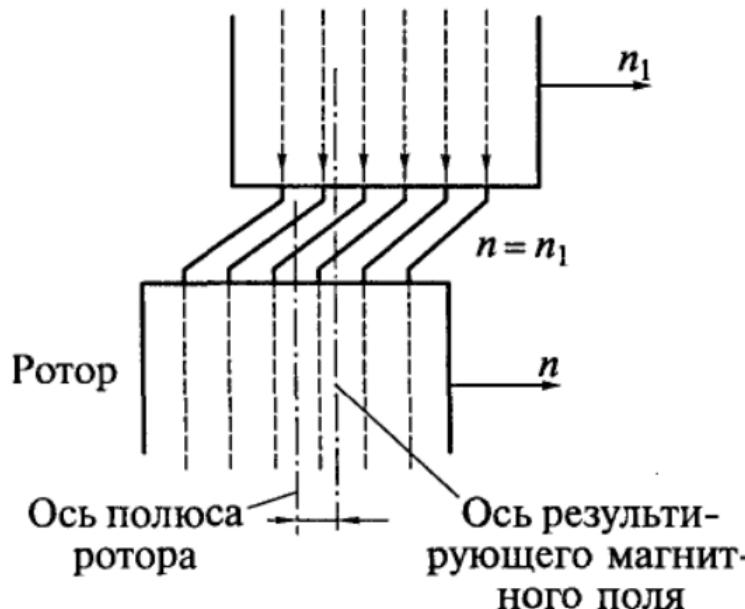
Синхронный двигатель

Синхронный двигатель

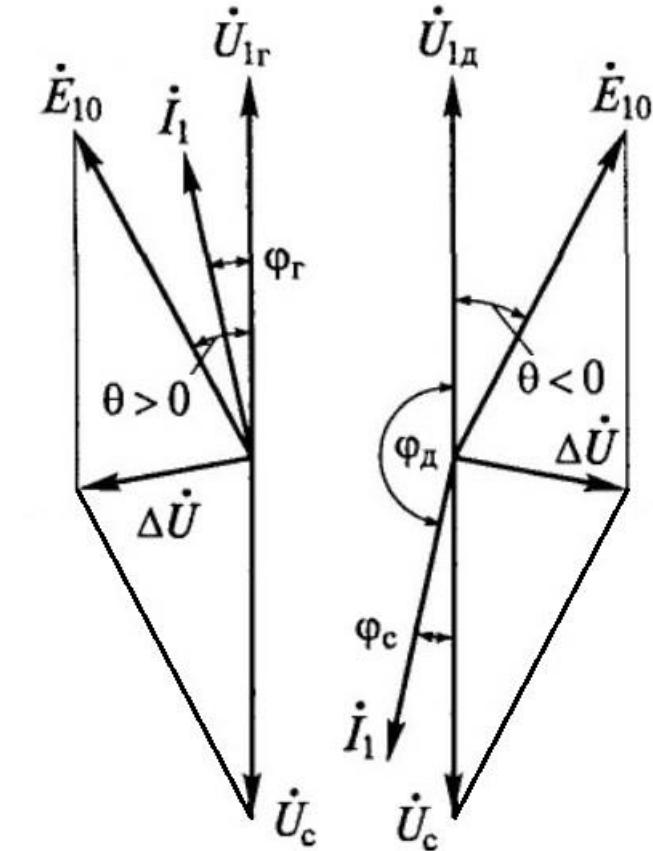
Работа СМ в двигательном режиме

Синхронный двигатель → работа СМ параллельно с сетью

- внешний момент – вращающий (турбина) → мощность СМ $P = mU_{1\Gamma}I_1\cos\varphi_{\Gamma} > 0$ → генератор ($\theta > 0$)
- внешний момент – тормозной (нагрузка) → мощность СМ $P = mU_{1D}I_1\cos\varphi_{\text{д}} < 0$ → 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

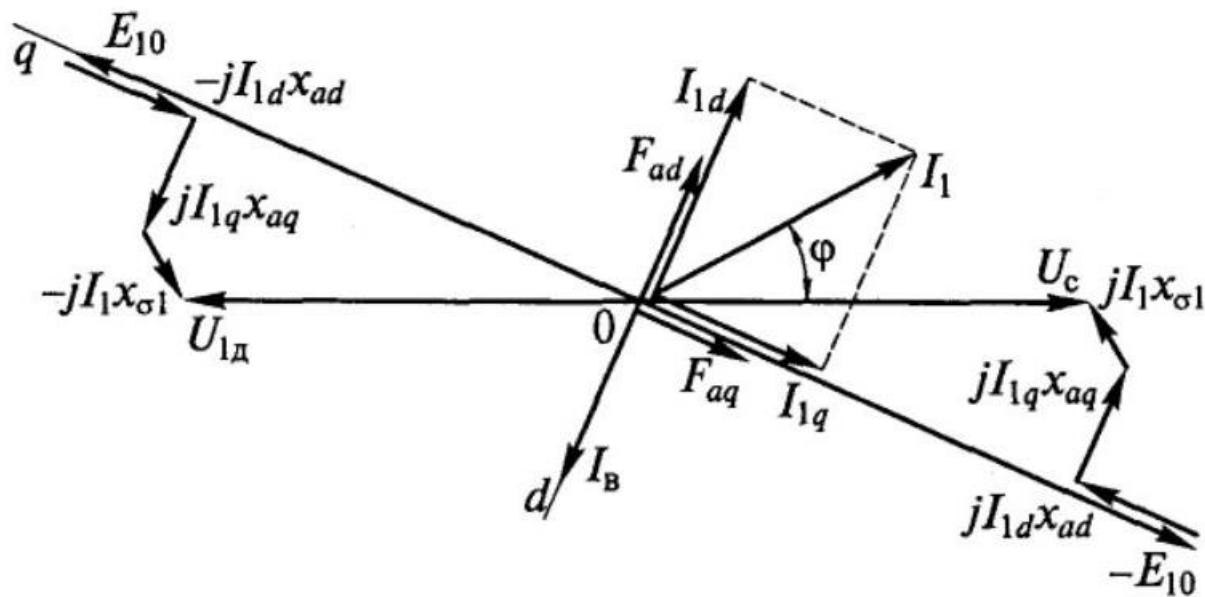
Уравнение напряжений СД с точки зрения двигателя

(полагая $r_a = 0$)

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

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_d)

Синхронный двигатель

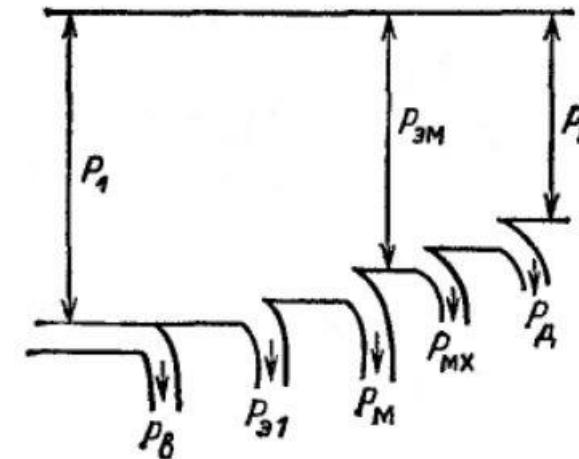
P_1 – электрическая мощность из сети

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

P_b – потери на возбуждение

Электромагнитная мощность СД аналогична генератору, пренебрегая $P_{\text{э}1}$ и P_m . $P_{\text{ЭМ}} = P_1$, тогда

$$P_{\text{ЭМ}} = \frac{mU_1E_{10}}{x_d} \sin \theta + \frac{mU_1^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$



В неянополюсном СД $x_d = x_q = x_c$ и

$$P_{\text{ЭМ}} = \frac{mU_1E_{10}}{x_c} \sin \theta$$

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

Синхронный двигатель

Угловые и U-образные характеристики СД

Электромагнитный момент $M = P_{\mathcal{E}M} / \Omega_1$

$$M = \frac{mU_1E_{10}}{\Omega_1x_d}\sin\theta + \frac{mU_1^2}{2\Omega_1}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\sin2\theta$$

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

Устойчивая часть характеристики от 0 до M_{max}

Номинальный угол нагрузки $\theta_{\text{ном}} = 20\ldots30^\circ$

Кратность максимального момента

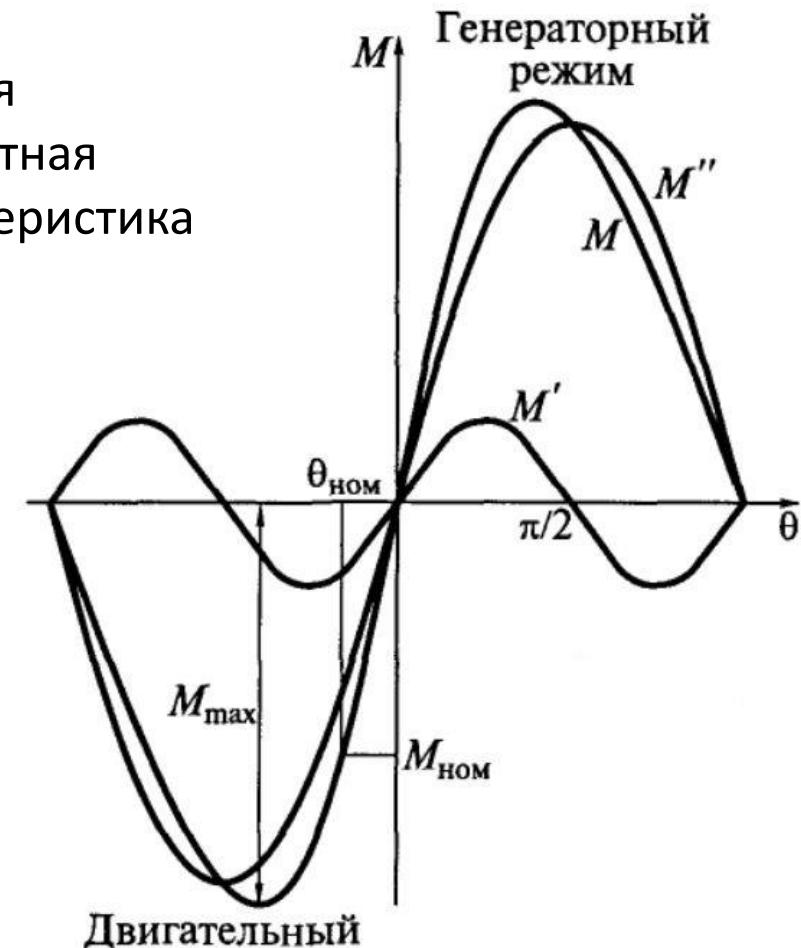
$$k_M = M_{\max} / M_{\text{HOM}}$$

(перегрузочная способность)

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

Явнополюсный СД может работать без возбуждения
– реактивный двигатель

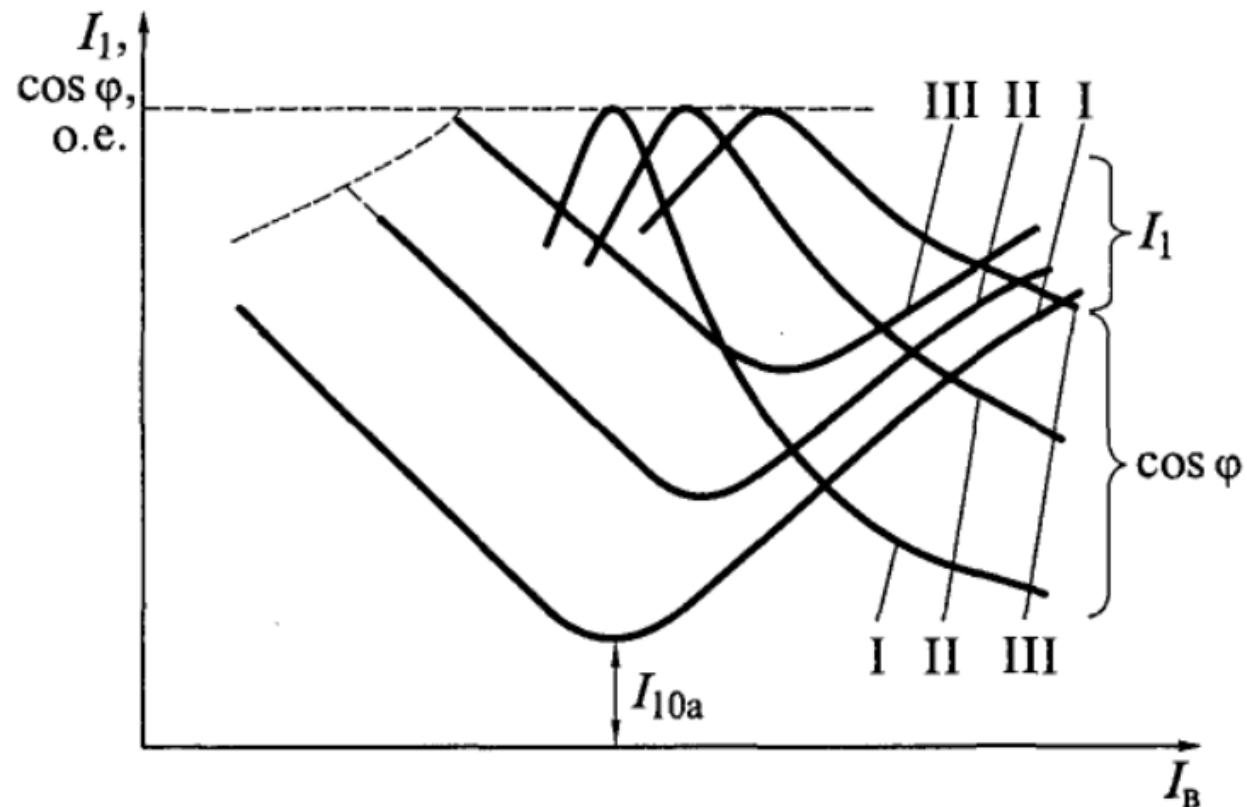
Угловая моментная характеристика



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 $\cos\phi$ в месте включения
- позволяет снизить выработку Q генераторами

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

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

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

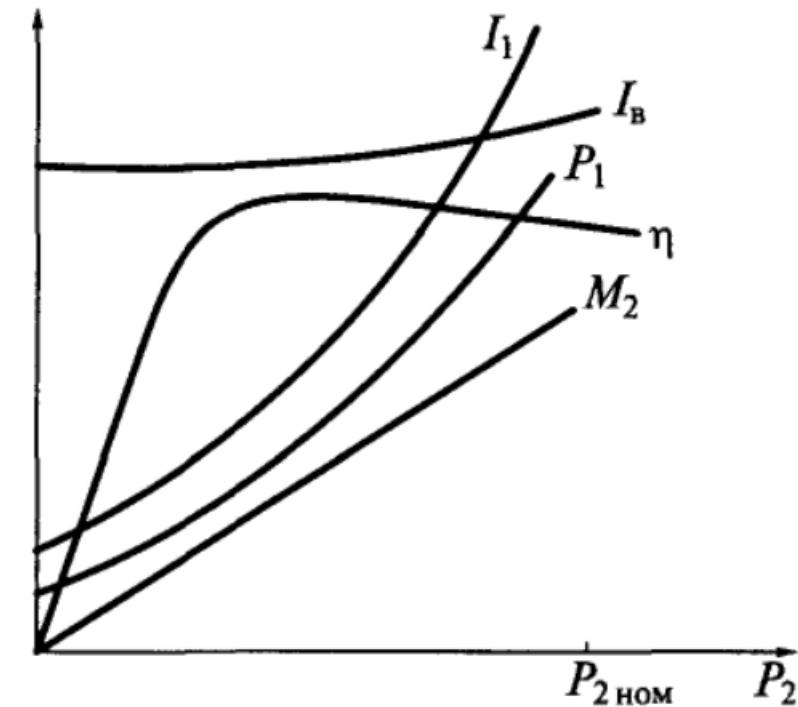
Синхронный двигатель

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 \rightarrow 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_H

Частотный пуск

- преобразователь частоты (f от 0 до f_H)
 - включение СД на малой $f \rightarrow$ малая n_1
 \rightarrow разгон ротора до малой n_1
 - постепенное повышение f до f_H
 \rightarrow постепенный разгон ротора до n_H
- СД все время работает в синхронном режиме

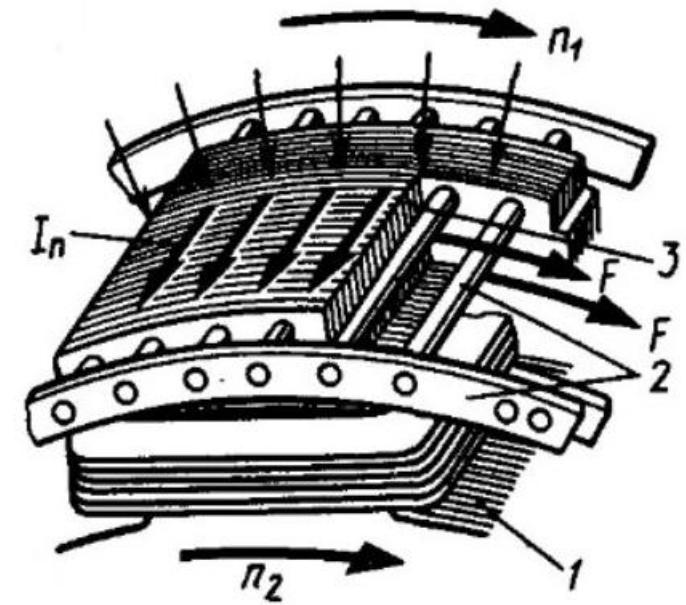
Синхронный двигатель

Способы пуска СД

Асинхронный пуск

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

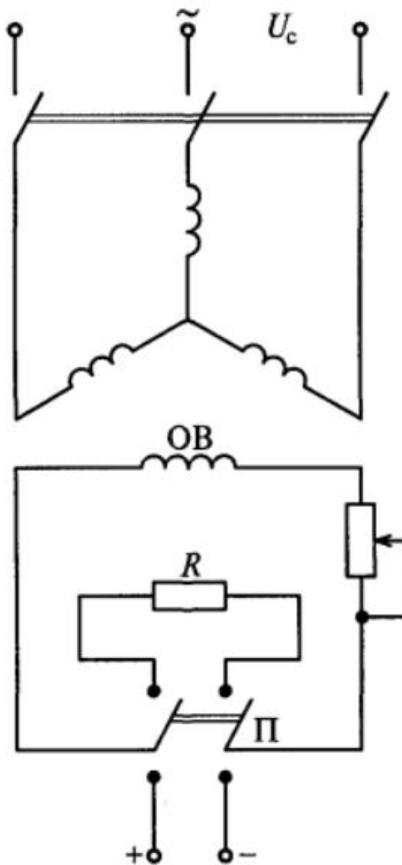
- $I_1 \rightarrow$ вращающееся магнитное поле Φ_1 с n_1
- \rightarrow ЭДС E_2 и ток I_2 в ДО (частотой $f_2 = f_1$)
- $I_2 + \Phi_1 \rightarrow$ момент $M \rightarrow$ разгон ротора
- по мере разгона ротора: уменьшается скорость скольжения ротора относительно поля статора \rightarrow уменьшается $f_2 \rightarrow E_2 \rightarrow I_2 \rightarrow M$
- 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

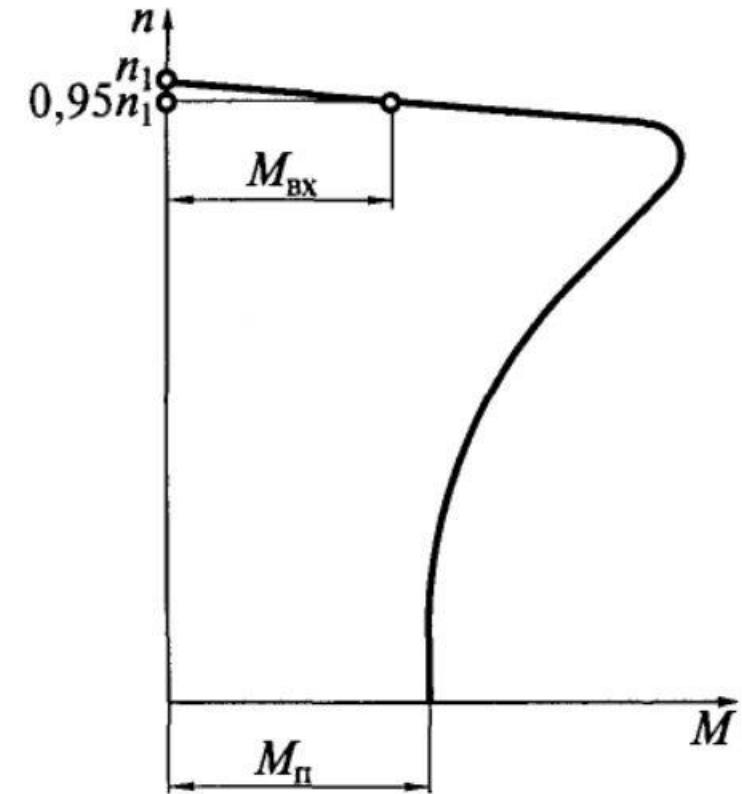
Асинхронный пуск – схема включения обмоток



- ОВ надо отключить, иначе будет генераторный момент (тормозной)
- ОВ нельзя оставить разомкнутой (большая ЭДС \rightarrow пробой изоляции)
- ОВ нельзя закоротить (большой ток \rightarrow 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 $n_{2\text{эл}} = \pm n_c$
- 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 $n_{2\text{эл}} = \pm(n_c - n_2)$

Прямая волна МДС ротора :

- $n_{\text{пр}} = n_2 + n_{2\text{эл}} = n_2 + (n_c - n_2) = n_c \rightarrow$ постоянное взаимодействие с полем статора
→ основной врачающий 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 $M_{2\text{рот}} = 0$)

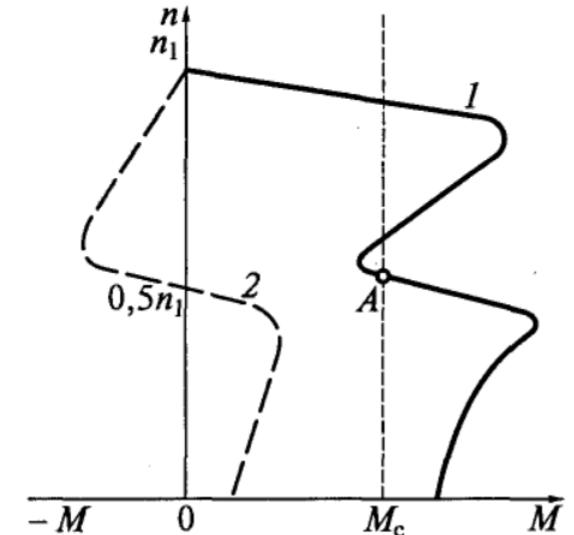
При $n_2 > 0,5n_c$

- $n_{\text{обр}} > 0 \rightarrow M_{2\text{ст}} -$ 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
«застрение» на
полусинхронной скорости

Синхронный компенсатор

Синхронный компенсатор – синхронный двигатель без нагрузки на валу

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

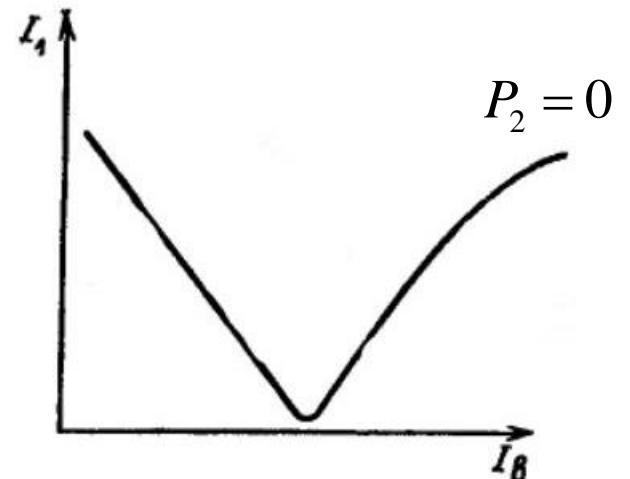
Особенности конструкции

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

$$\begin{aligned} S &= 2,8 \dots 320 \text{ МВА}; \\ U_1 &= 6,3 \dots 20 \text{ кВ}; \\ n_2 &= 750; 1000 \text{ об/мин} \end{aligned}$$

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_B + наведенный I с $2f_1$ от
обратного поля → влияет на возбудитель

Вибрации с $2f_1$: взаимодействие Φ_B с Φ_2
и Φ_1 с Φ от токов с $2f_1$ в роторе

Несимметрия напряжений $U_{1\Phi}$: из-за падения
напряжения в фазах I_2Z_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 Φ_2
(большие стержни ДО – малое Z –
больше ток ДО – сильнее ослабление Φ_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° :

- 1-е гармоники МДС фаз F_{01} сдвинуты на 120° (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_ϕ

но F_{03} и Φ_{03} малы, ЭДС и токи малы ($x_{0*} = 0,02...0,1$),
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

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

α_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 $\pi/2$)

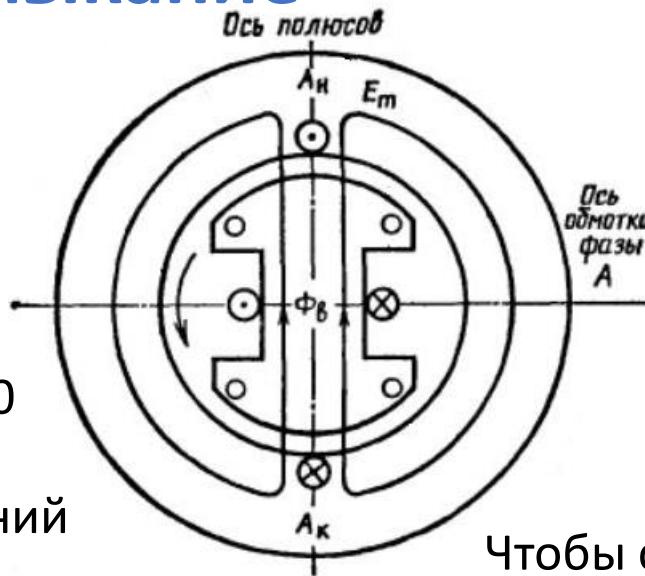
- Φ_b сцеплен с ОВ и ДО
- потокосцепление с фазой A $\Psi_a = 0$

При КЗ уравнение баланса напряжений

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

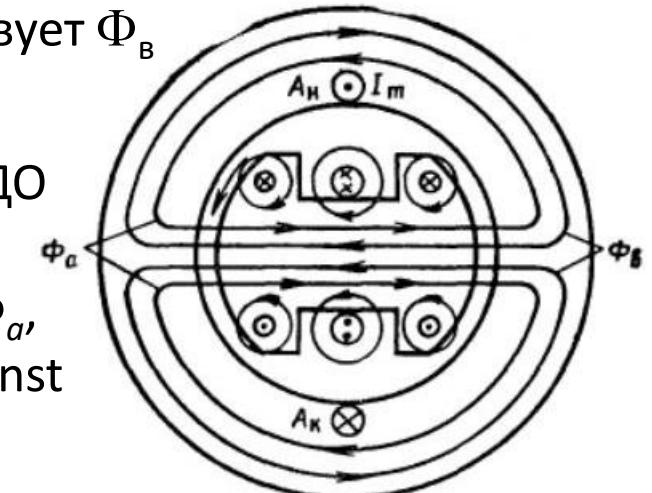
полагая $r = 0$: $\frac{d\Psi}{dt} = 0 \rightarrow \Psi = \text{const}$

После КЗ потокосцепления всех обмоток должны оставаться const



При повороте ротора и Φ_b должно возрастать Ψ_a от 0 до max значения через $\frac{1}{4}$ периода

Чтобы сохранять $\Psi_a = 0$ в фазе A возникает ток i_{ka} , его поток Φ_a противодействует Φ_b



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

Внезапное короткое замыкание

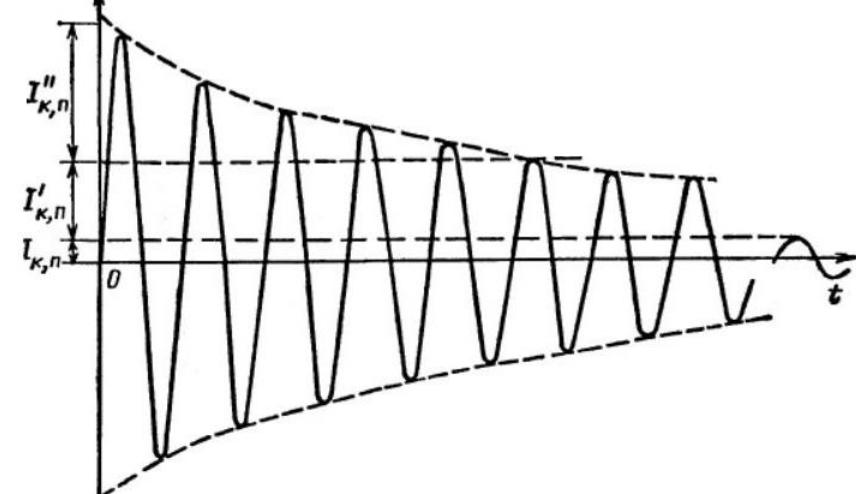
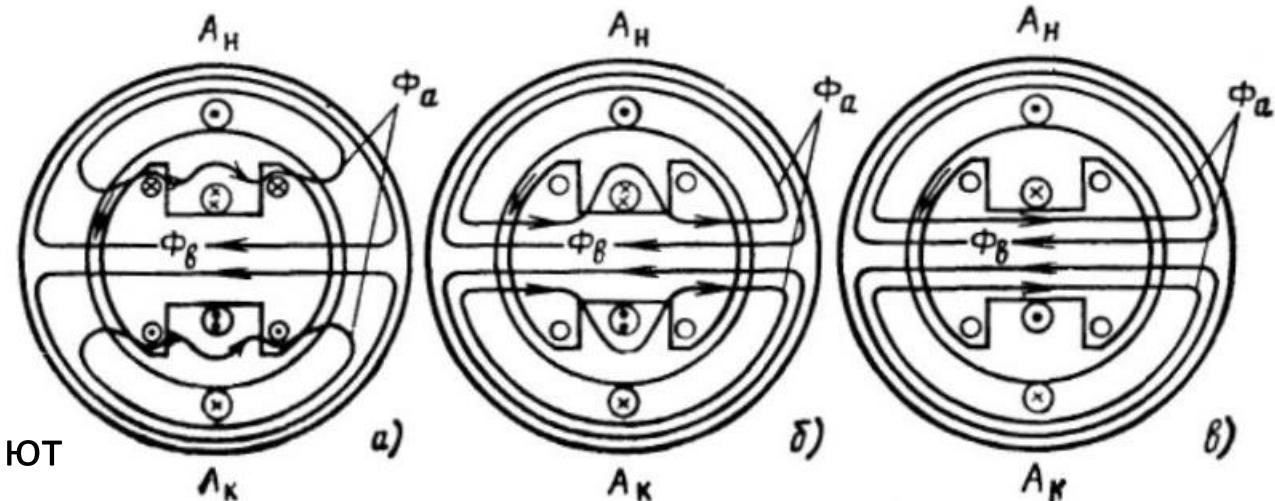
1. КЗ при $\alpha_k = \pi/2$

Наведенные токи ОВ и ДО вытесняют Φ_a из ротора в межполюсное пространство Λ_μ мала \rightarrow для Φ_a нужен больший 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)

Λ_μ для Φ_a возрастает
(возрастает x_a)
 \rightarrow затухает ток i_{ka}



Внезапное короткое замыкание

1. КЗ при $\alpha_k = \pi/2$

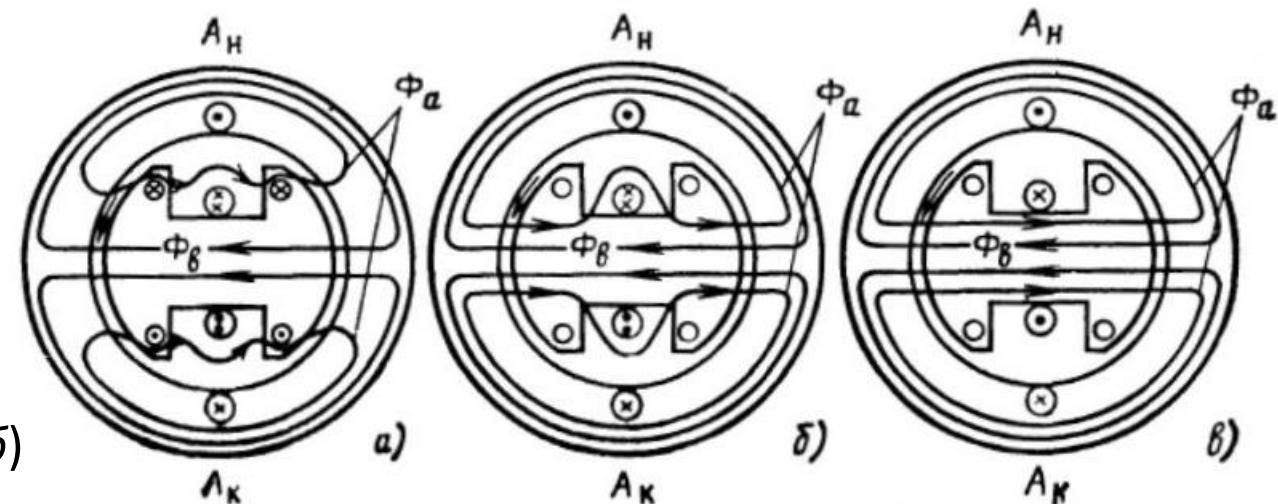
Индуктивное сопротивление фазы x_d определяется маг.проводимостью Λ_μ

- Вначале КЗ Λ_μ минимальна (рис. а) $\rightarrow x''_d$ – сверхпереходное инд. сопр-е
- Затем поле проникает в зону ДО (рис. б) $\rightarrow x'_d$ – переходное инд. сопр-е
- При установившемся КЗ (рис в) $\rightarrow x_d$ – 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 α_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 A $\Psi_a = \Psi_m$

Периодический ток максимален

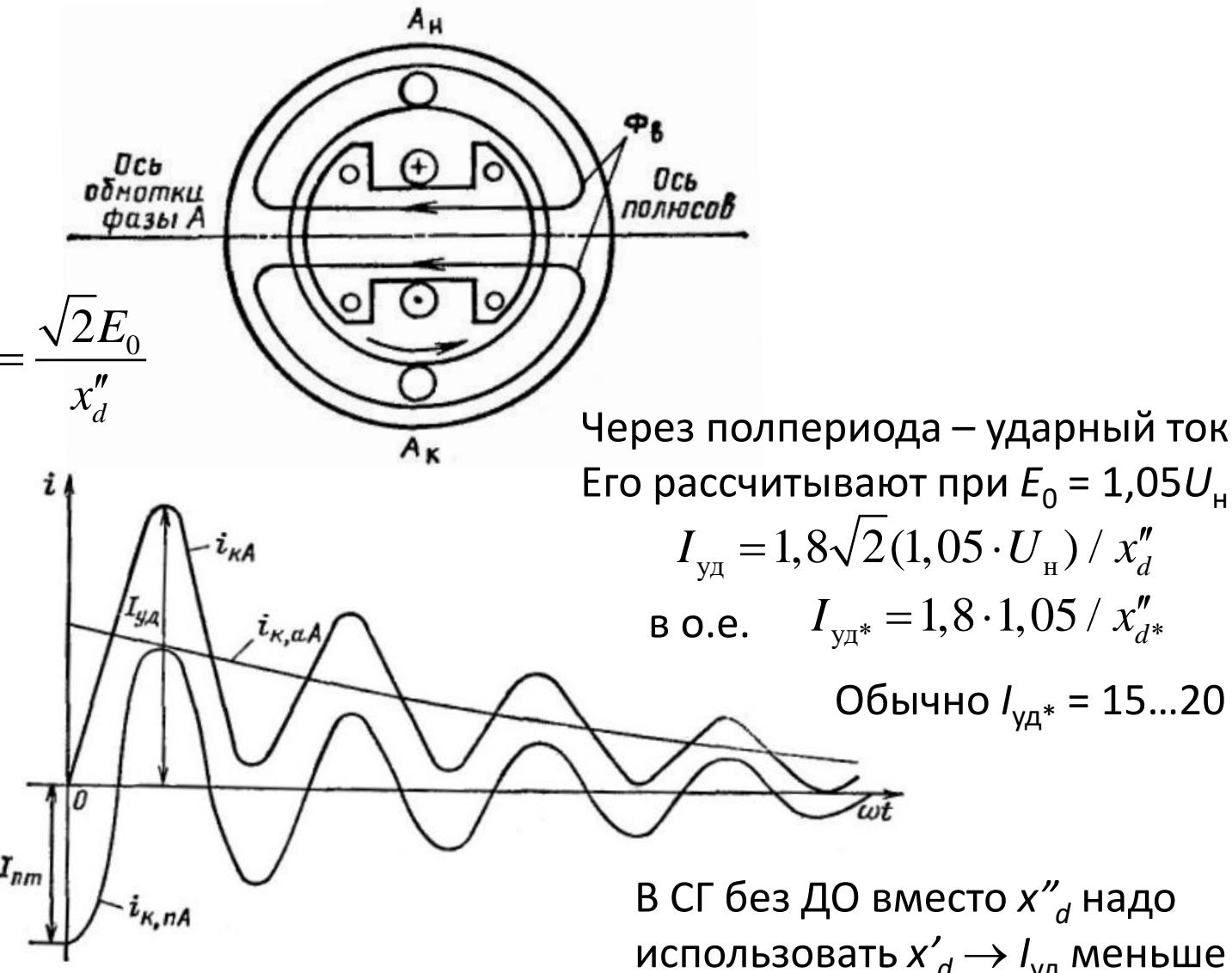
$$i_{k,PA} = I_{\Pi m} = \frac{\sqrt{2}E_0}{x_d''}$$

Апериодический ток равен $-I_{\Pi m}$

Апериодическая составляющая
тока затухает до 0

Периодическая составляющая –
до установившегося тока

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



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 $(5\dots10)M_n$ (периодический затухающий)