

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

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

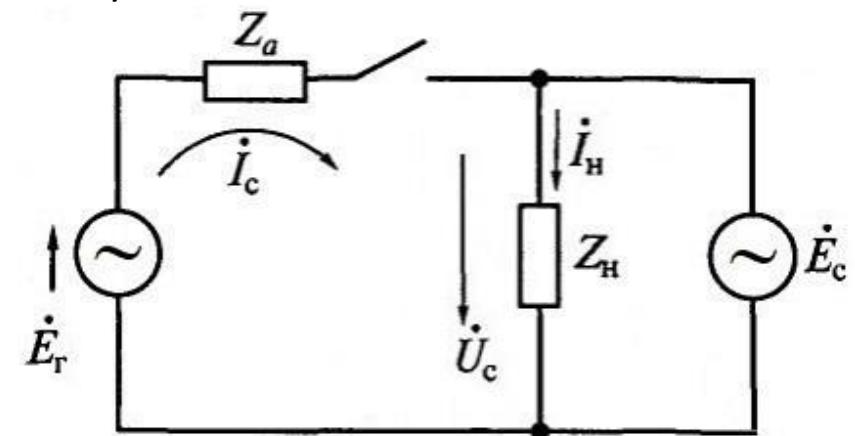
Включение СГ на параллельную работу с сетью – синхронизация

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_g и U_c уравновешивают друг друга
- частоты f_g и f_c равны
- одинаковое чередование фаз СГ и сети

Обеспечение условий синхронизации (синхроноскоп)

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

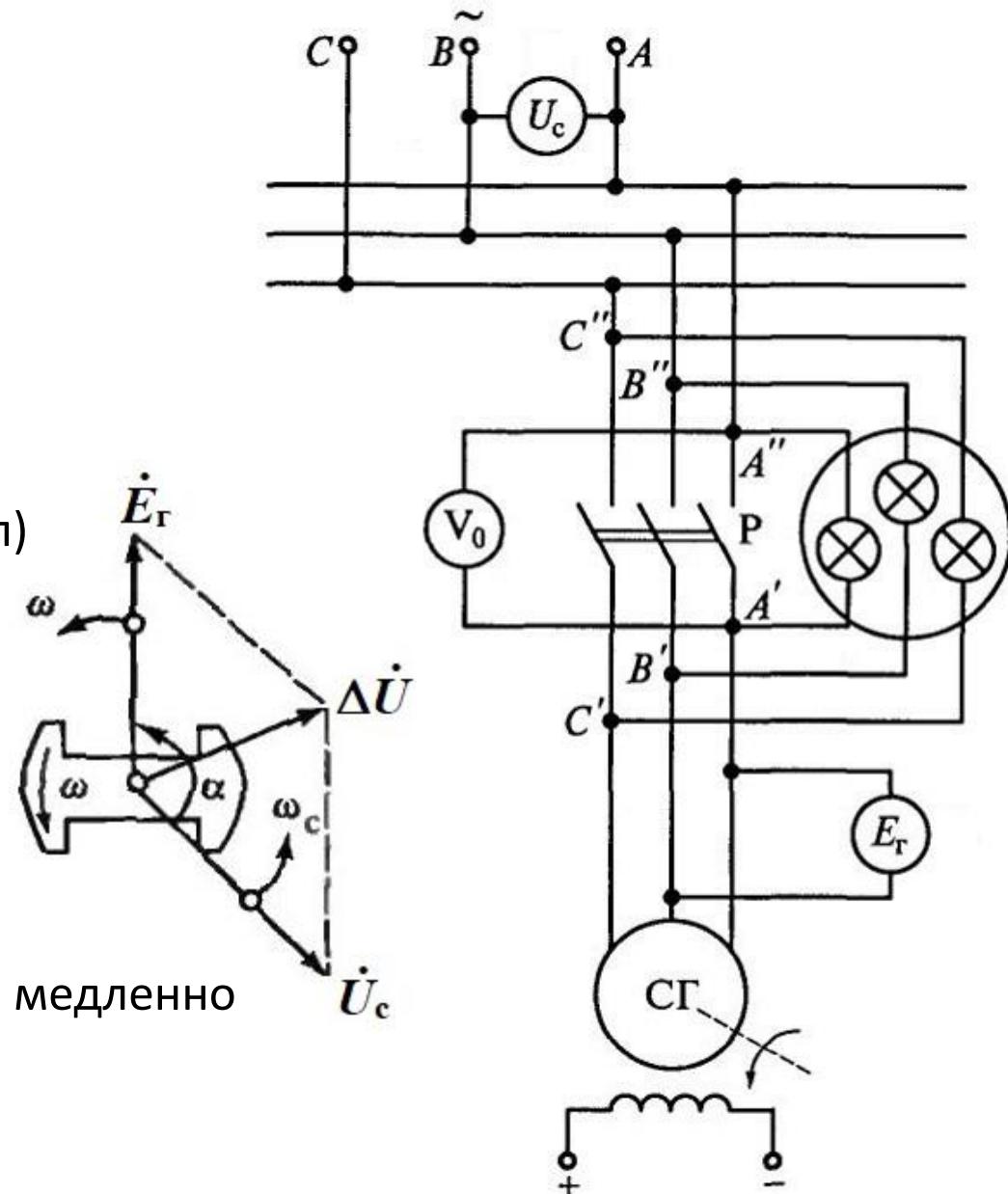
Напряжение на контакторе P $\Delta U = \dot{E}_g + \dot{U}_c$

При $f_g \approx f_c$ относительная ω векторов \dot{E}_g и \dot{U}_c мала
и ΔU 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 $\pm 1\ldots 4\%$ от f_c

Затем включают возбуждение и СГ
втягивается в синхронизм

$$\text{Ток синхронизации} \quad \dot{I}_c = \frac{\Delta \dot{U}}{Z_a} = \frac{\dot{U}_c}{Z_a} \neq 0$$

Бросок тока $I_c \rightarrow$ бросок Φ_a и скачок ЭДС в ОВ
Возможно перенапряжение в ОВ
и пробой изоляции ОВ
 \rightarrow ОВ замыкают на $r_b = (4\ldots 6)r_v$

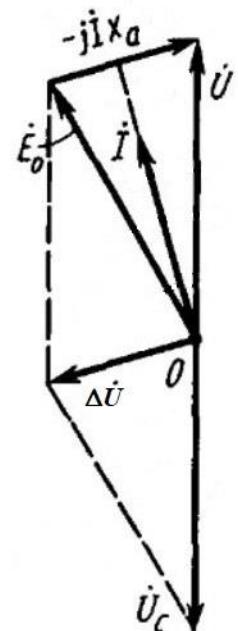
Параллельная работа СГ с сетью

Синхронизирующий момент

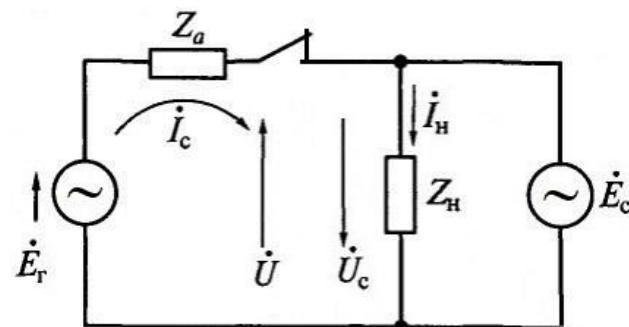
По условиям синхронизации $E_g = U_c$
тогда $\Delta U = 0$ и $I = 0$

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

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



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

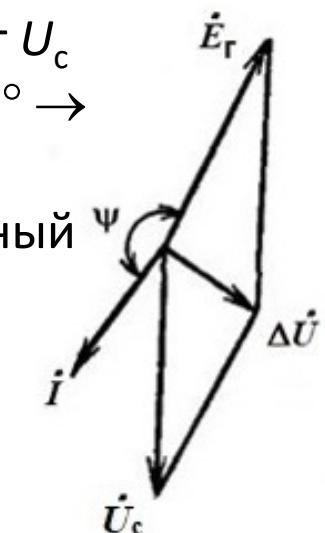
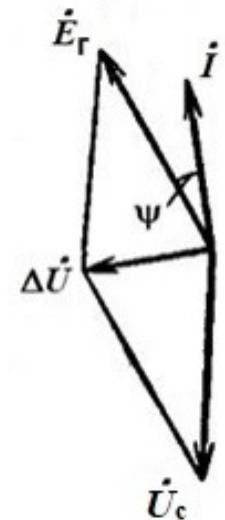


- если n_2 возрастет, E_g догоняет U_c
 $\rightarrow \Delta U \rightarrow$ отстающий $I \rightarrow \psi < 90^\circ \rightarrow$
электромагнитная мощность
генератора $P_{ЭМ} = mE_g / \cos \psi > 0 \rightarrow$
генераторный момент тормозит
ротор

- если n_2 снижается, E_g отстает от U_c
 $\rightarrow \Delta U \rightarrow$ отстающий $I \rightarrow \psi > 90^\circ \rightarrow$
электромагнитная мощность
 $P_{ЭМ} = mE_g / \cos \psi < 0 \rightarrow$ двигательный
момент разгоняет ротор

в результате

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



Параллельная работа СГ с сетью

Регулирование активной мощности

$$\dot{U} = \dot{E}_0$$

Рассмотрим неявнополюсный СГ с $r_a=0$,
синхронизированный с сетью ($\dot{E}_0 = -\dot{U}_c$)

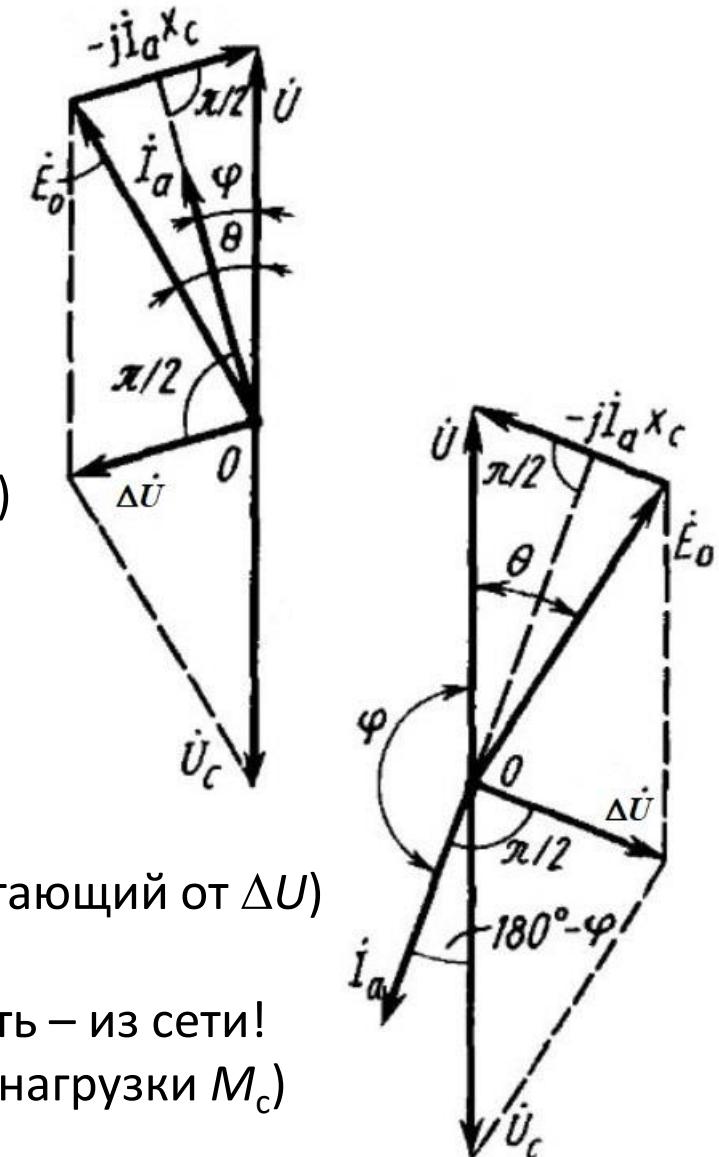
Холостой ход: $I_r = 0$, при этом $M = M_c$, $I_b = I_{b0}$

1. Увеличим момент на валу

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

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

→ генераторный режим: активная мощность – в сеть!
(генераторный M уравновешивает внешний M_{bh})



2. Уменьшим момент на валу

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

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

→ двигательный режим: активная мощность – из сети!
(двигательный M уравновешивает момент нагрузки M_c)

Параллельная работа СГ с сетью

Регулирование реактивной мощности

$$\dot{U} = \dot{E}_0$$

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 ΔU)

Угол $\varphi = 90^\circ \rightarrow$ мощность $P = 0$

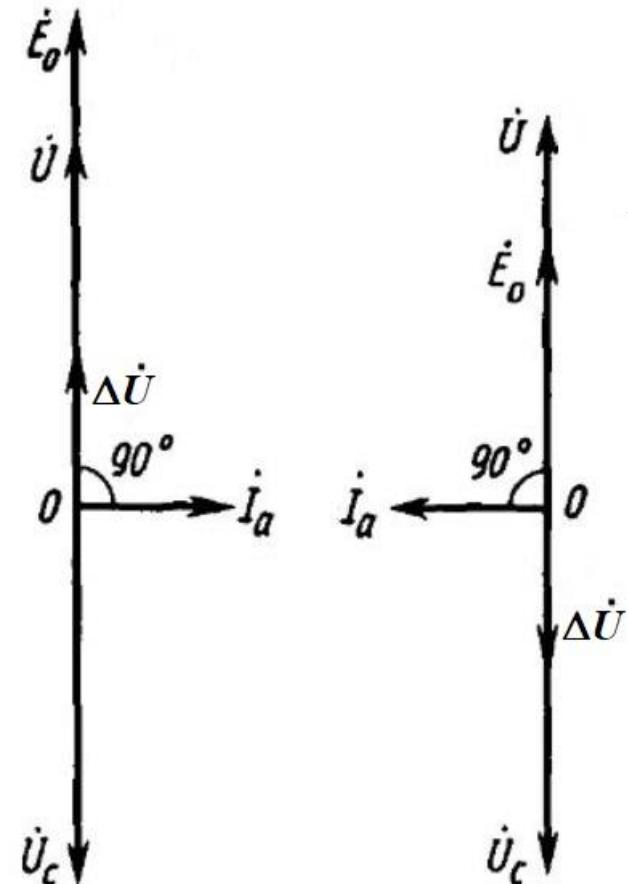
Относительно U_c ток I_a опережающий
→ реактивная мощность – в сеть!
(режим перевозбуждения)

4. Уменьшим ток возбуждения $I_b < I_{b0}$

$E_0 < U \rightarrow \Delta U \rightarrow I_a = \Delta U/jx_c$ (отстающий от ΔU)

Угол $\varphi = 90^\circ \rightarrow$ мощность $P = 0$

Относительно U_c ток I_a отстающий
→ реактивная мощность – из сети!
(режим недовозбуждения)



При $U = \text{const}$
 $\dot{\Phi}_\delta = \dot{\Phi}_b + \dot{\Phi}_a = \text{const}$

Синхронные компенсаторы

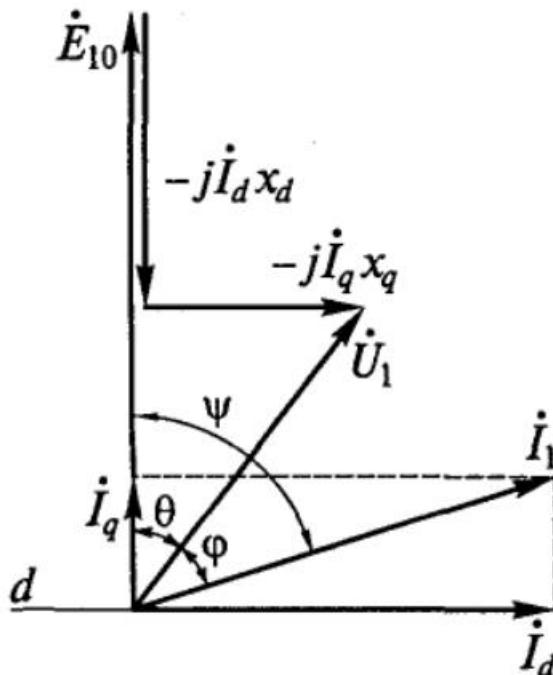
Параллельная работа СГ с сетью

Мощность и момент синхронного генератора

Активная мощность генератора $P = mU_1I_1 \cos\varphi$

Из векторной диаграммы (полагая $r_a=0$): угол $\varphi = \psi - \theta$, тогда $P = mU_1I_1 \cos(\psi - \theta)$

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



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

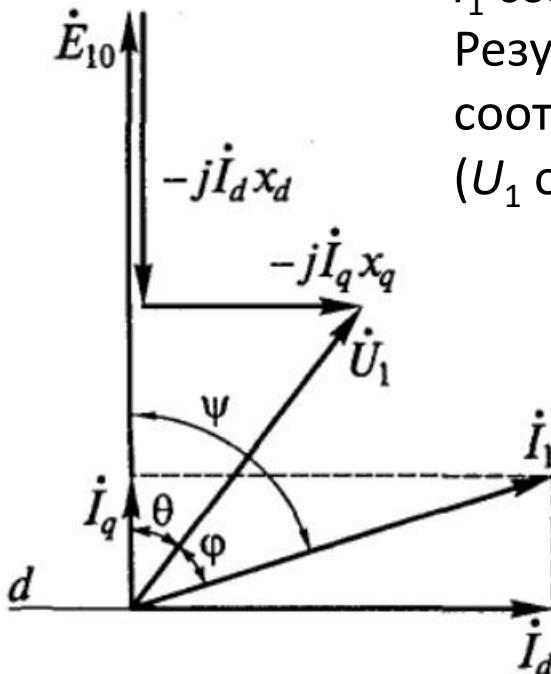
Изменение P определяется изменением угла θ
(угол нагрузки)

Угол θ – угол между векторами E_{10} и U_1

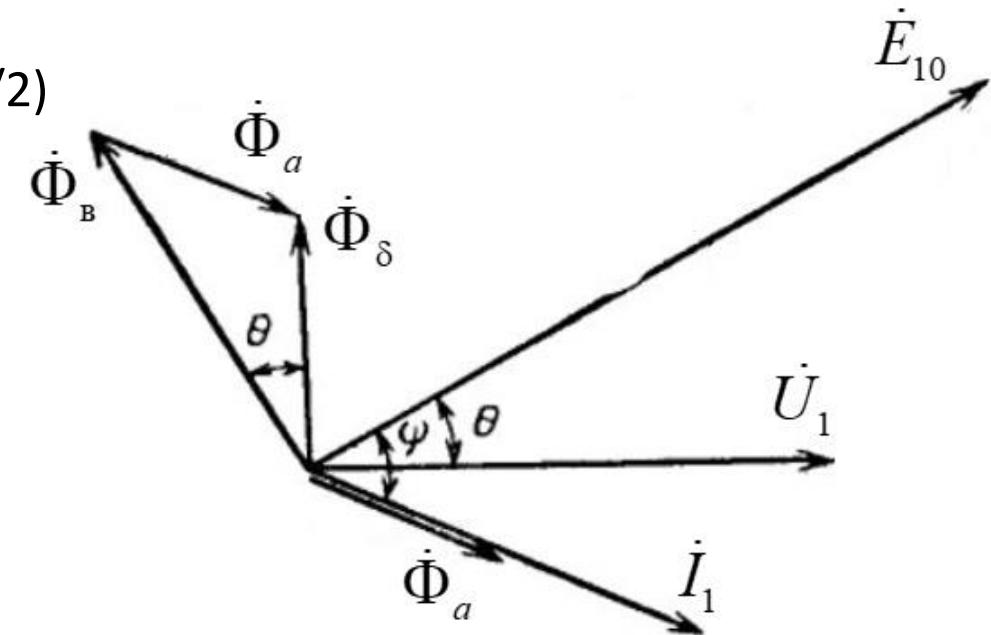
E_{10} наводится потоком $\dot{\Phi}_b$ (отстает на $\pi/2$)

I_1 создает поток якоря $\dot{\Phi}_a$

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 θ – также угол между
осью полюсов (d) и осью результирующего поля Φ_δ

Параллельная работа СГ с сетью

Угол нагрузки

- Генератор: $\theta > 0$

(полюс опережает результирующий Φ_δ)

Внешний момент вращает ротор ($M_{\text{вн}}$ и n)
и «тянет» поле за собой

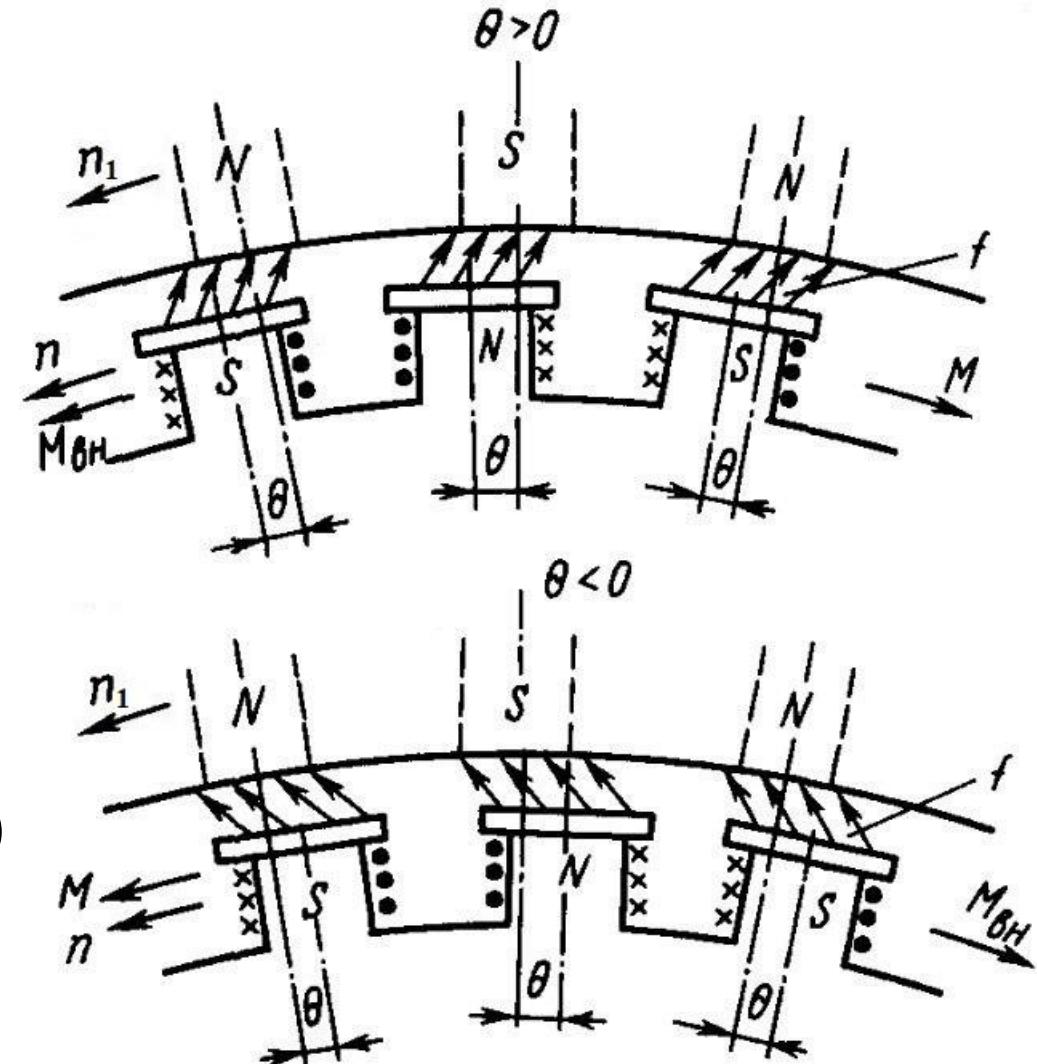
Электромагнитный M – тормозной

- Двигатель: $\theta < 0$

(результирующий Φ_δ 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

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

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

Угловая характеристика активной мощности

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

Угловая характеристика электромагнитного момента

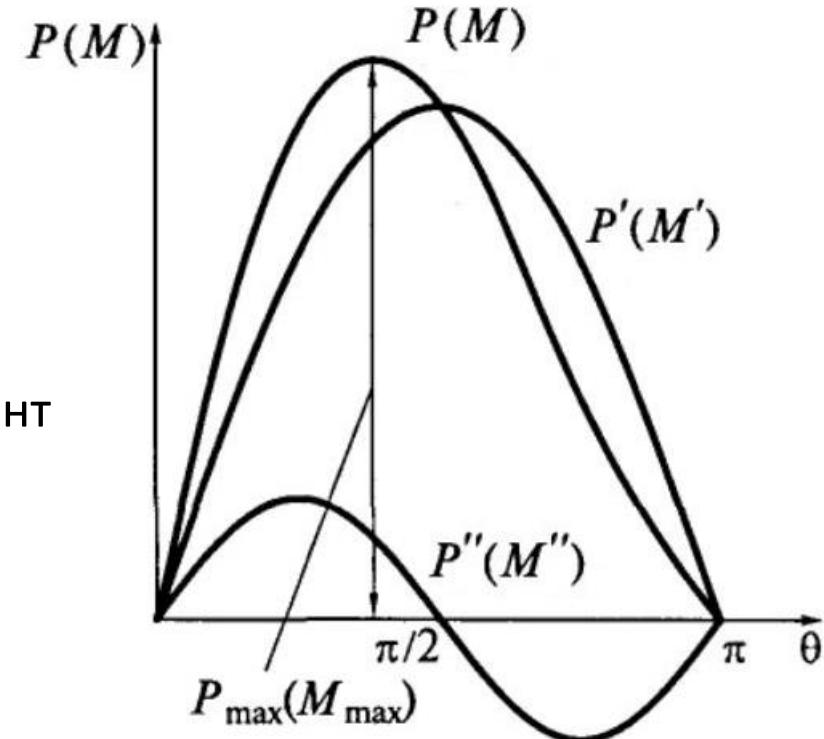
$M = f(\theta)$ при $I_b = \text{Const}$, $U_1 = \text{Const}$, $f = \text{Const}$

- 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)

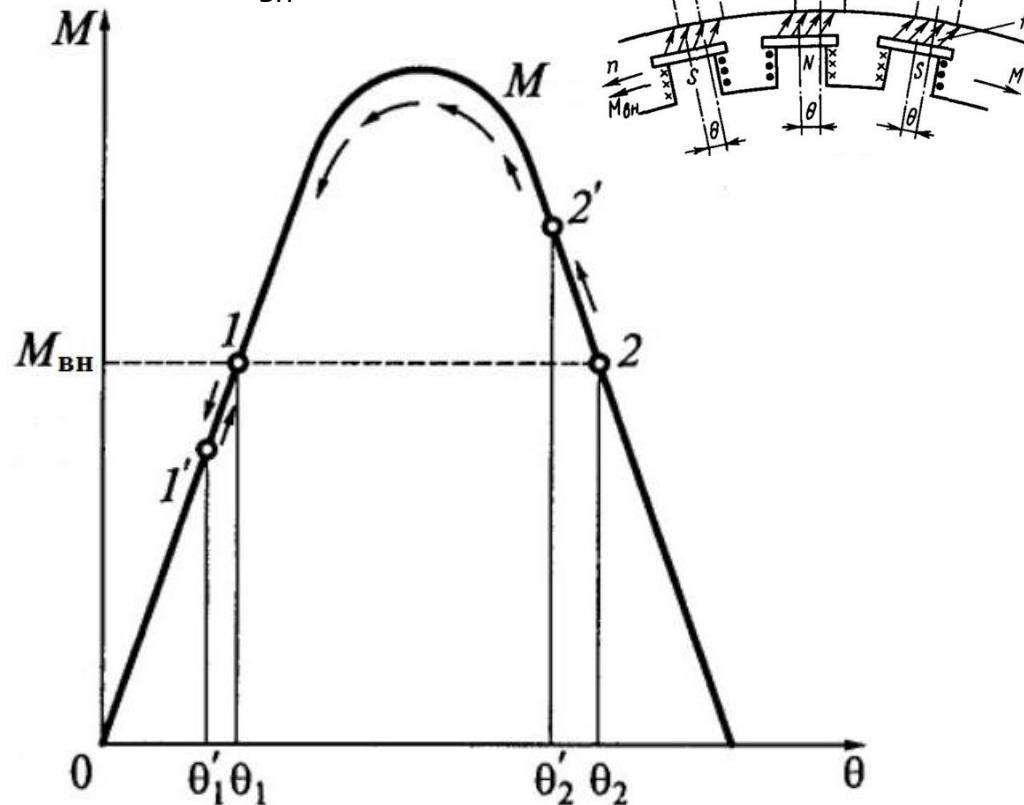
В неянополюсном СГ $x_d = x_q$ и $M'' = 0$



Параллельная работа СГ с сетью

Условия статической устойчивости СГ

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



Равновесие моментов $M = M_{\text{вн}}$ возможно при θ_1 и θ_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 $P_{\text{синх}} = \frac{\partial P}{\partial \theta} = \frac{mU_1E_{10}}{x_d} \cos \theta$

$$M_{\text{синх}} = \frac{\partial M}{\partial \theta} = \frac{mU_1E_{10}}{\Omega_1 x_d} \cos \theta$$

Параллельная работа СГ с сетью

Статическая перегруженность

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

Номинальный угол нагрузки (при P_n и M_n) $\theta_n = 20...35^\circ$

Статическая перегруженность $k_n = \frac{P_{max}}{P_n}$
при U_{1n} и I_{vn}

Статическая перегруженность неявнополюсного СГ

- мощностью до 160 МВА – $k_n > 1,7$
- мощностью более 160 МВА – $k_n > 1,5$

Статическая перегруженность явнополюсного СГ – $k_n > 1,5$

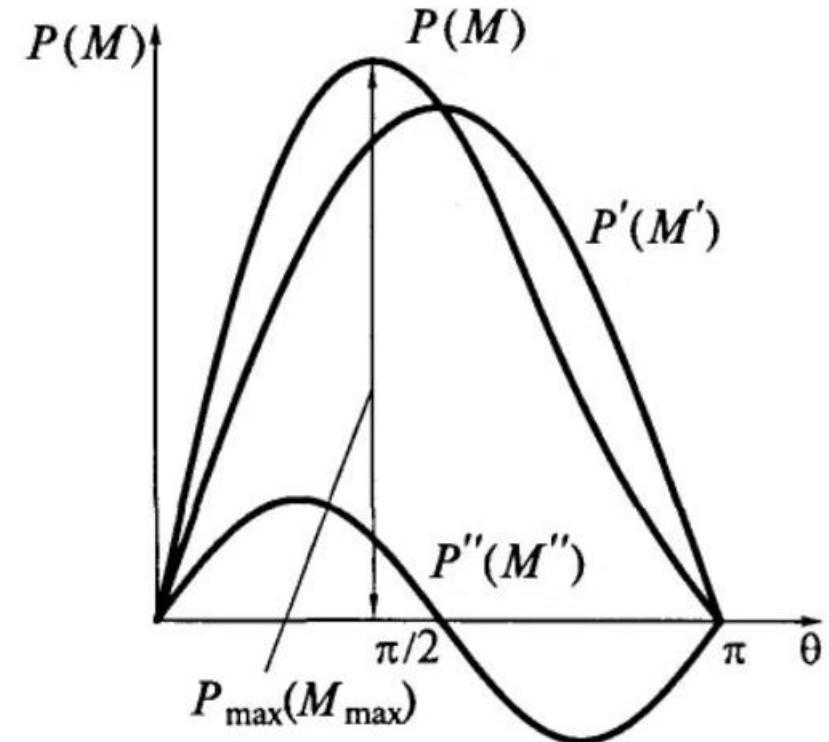
Статическая перегруженность пропорциональна $1/x_d$

В синхронных генераторах снижают x_d
(увеличивают δ сверх технологического минимума)

При превышении M_{max} – выпадение из синхронизма
(доп. потери в ОВ и ДО ротора + пульсирующий момент от I_B)

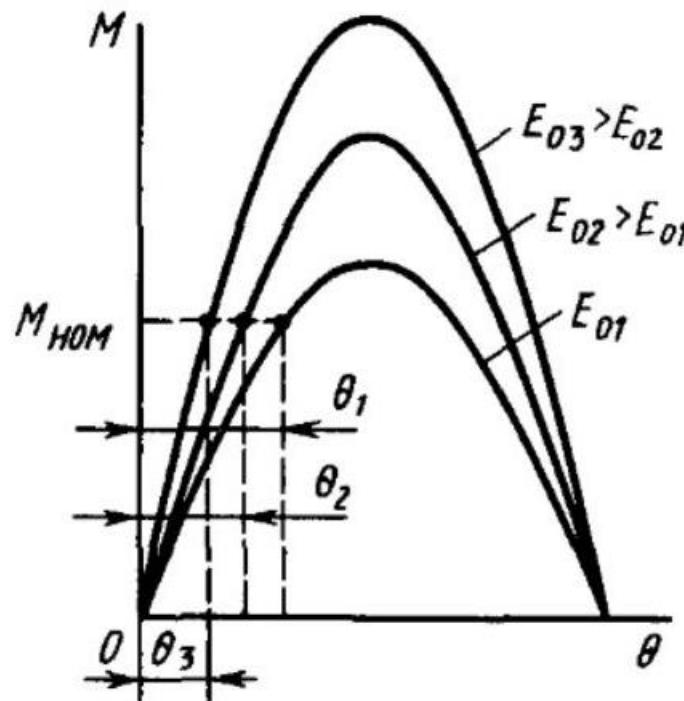
$$P = \frac{mU_1 E_{10}}{x_d} \sin \theta + \frac{mU_1^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

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



Параллельная работа СГ с сетью

Влияние тока возбуждения на устойчивость работы СГ



Увеличение $I_{\text{в}}$

→ увеличение E_{10}

→ увеличение M_{max}

→ увеличение статической перегруженности k_{π}
(и снижение угла нагрузки при том же M)

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

Обычно СГ отдает реактивную мощность Q (перевозб.)
Если надо потреблять $Q \rightarrow$ снижают $I_{\text{в}}$ (недовозб.)
→ возрастает θ и снижается k_{π}
→ 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 $I_{1(1)} \rightarrow E_{10(1)}$

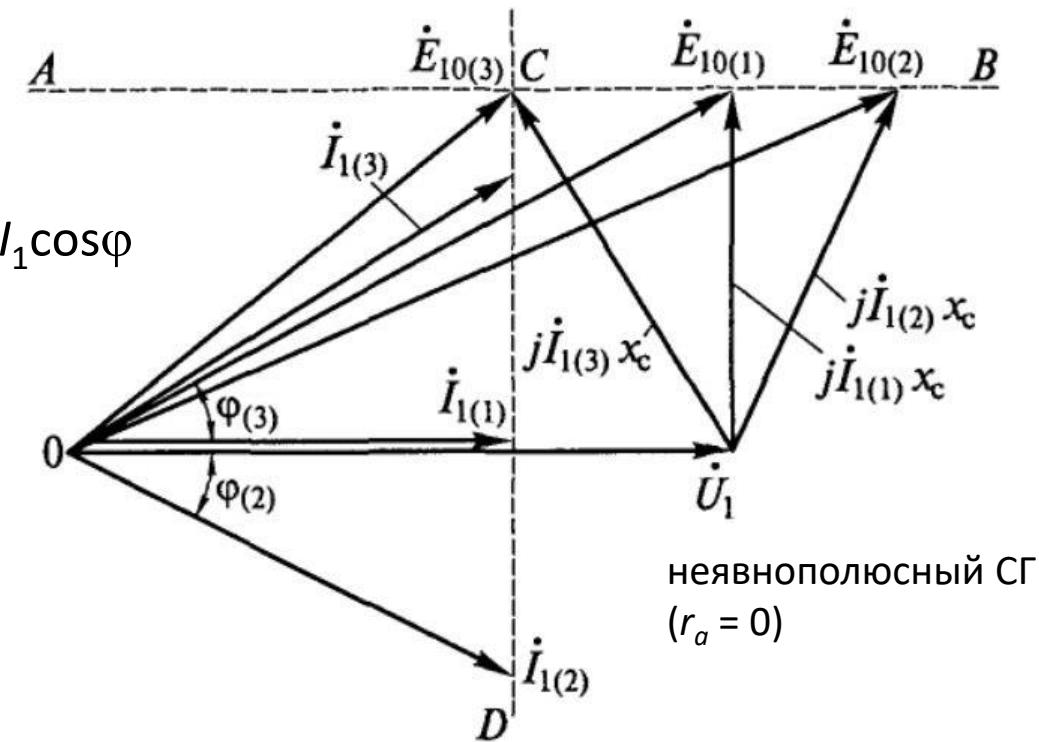
(2) – отстающий ток $I_{1(2)} \rightarrow E_{10(2)} > E_{10(1)} \rightarrow I_{B(2)} > I_{B(1)}$

(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



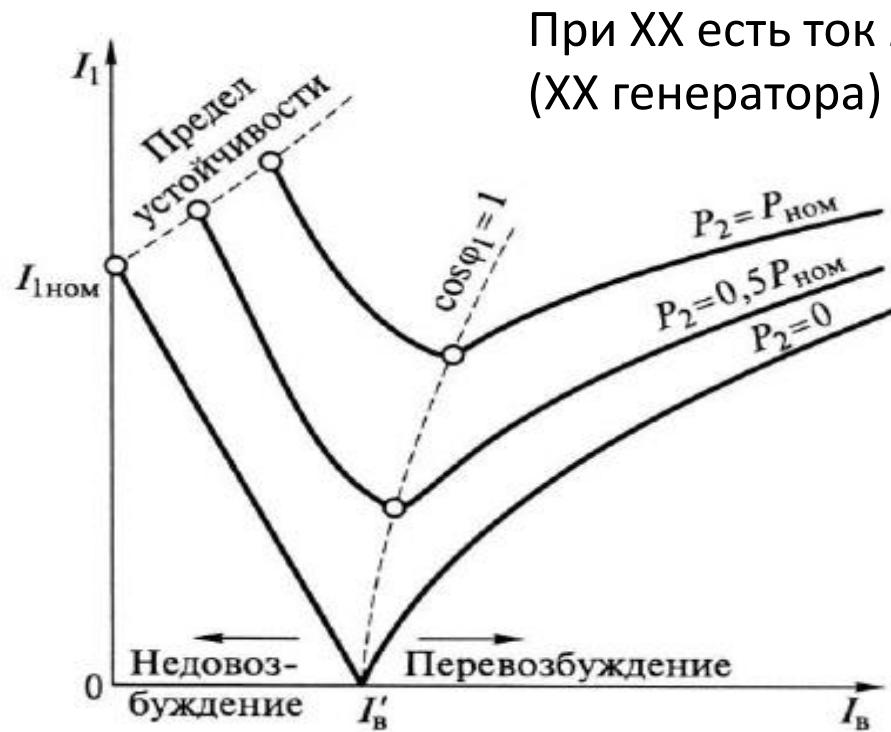
U-образные характеристики:
 $I_1 = f(I_B)$ при $P = \text{const}$,
 $U_1 = \text{const}, f = \text{const}$

Параллельная работа СГ с сетью

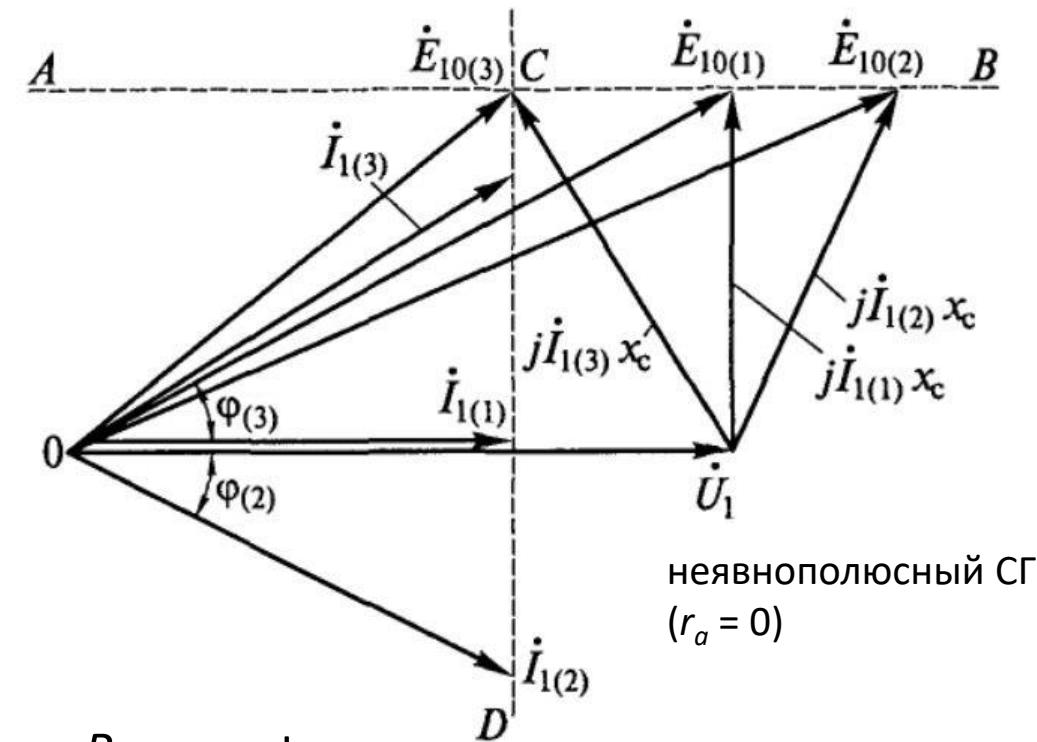
$$\dot{U}_1 = \dot{E}_{10} - j\dot{I}_1 x_c$$

U-образные характеристики

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



При ХХ есть ток I'_B , когда $I_1 = 0$
(ХХ генератора)

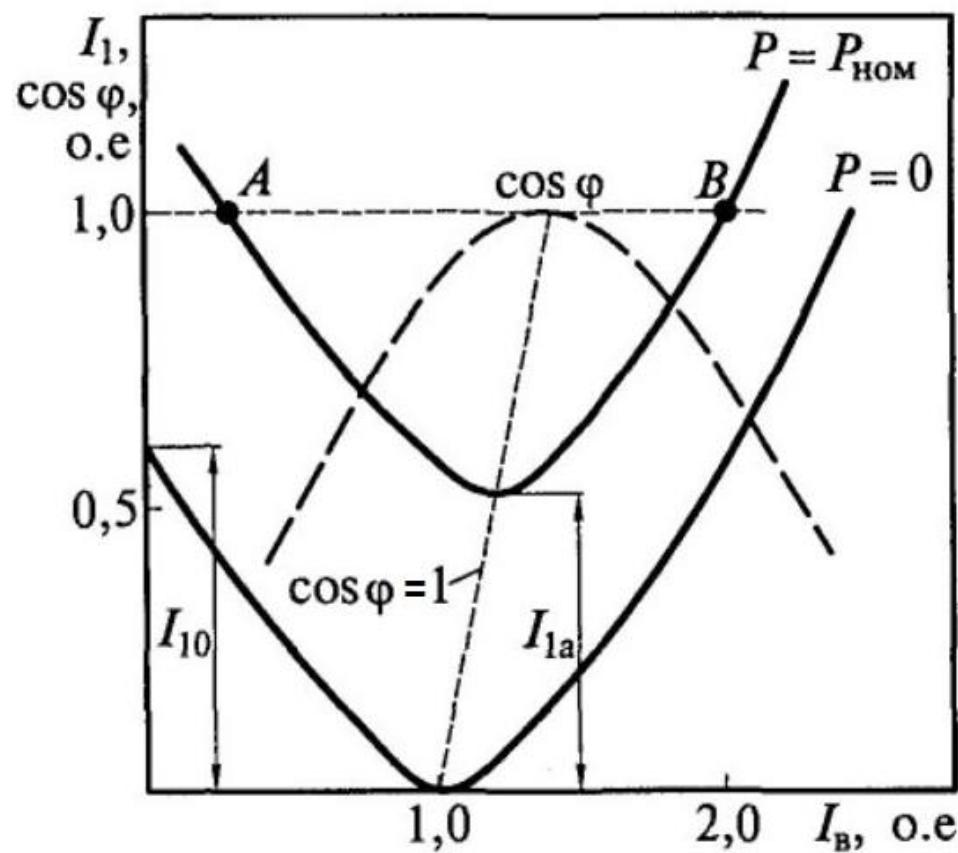


Для каждой х-ки $P_2 = \text{const}$
есть точка $I_{\min} = I_{1a}$ ($\cos\phi = 1$)
Пере- / недовозбуждение \rightarrow увеличение I_1
При малых I_B снижается E_{10} и M_{\max}
 \rightarrow снижается перегруженность (предел устойчивости)

Параллельная работа СГ с сетью

U-образные характеристики

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



Минимум хар-ки при числе активном токе $I_1 = I_{1a}$ ($\cos\varphi=1$)

При увеличении мощности точка мин.тока смещается:

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

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

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

- справа – область перевозбуждения
- слева – область недовозбуждения

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

Номинальный ток $I_1^* = 1$ при $P = P_{\text{н}}$ → точки A и B

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

Параллельная работа СГ с сетью

Качания синхронных машин

Изменение нагрузки генератора →
изменение угла нагрузки с θ_1 на θ_2

При сильных изменениях –
перерегулирование

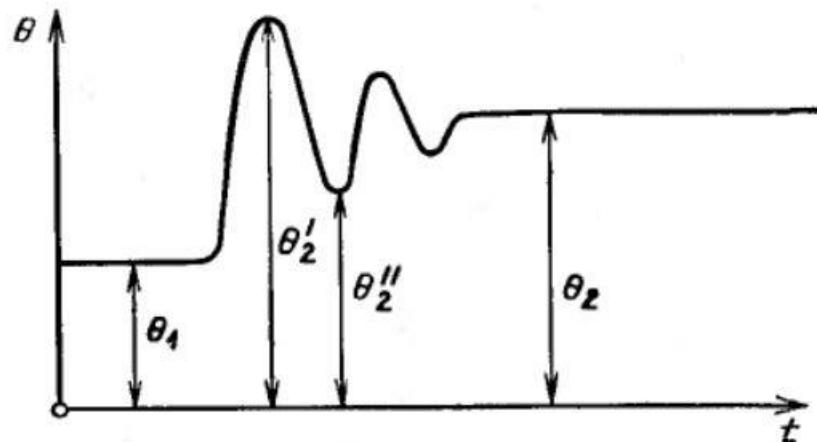
При этом сохраняется синхронное вращение,
но мгновенная скорость изменяется
относительно $\Omega_1 \rightarrow$ в ДО наводятся токи,
демпфирующие изменение скорости

$$\text{Частота собственных колебаний СГ} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{M_{\text{сих}} p}{J}}$$

где $M_{\text{сих}}$ – удельный синхронизирующий момент

p – число пар полюсов

J – момент инерции



Обычно $f_0 = 0,5...2$ Гц

Возможны вынужденные колебания
(поршневой приводной двигатель)
Важно исключить резонанс частот
(маховик на валу для увеличения J)

Параллельная работа СГ с сетью

Выход из синхронизма

Снижение напряжения сети, потеря возбуждения

$\rightarrow P > P_{\max} \rightarrow$ выход из синхронизма, $n_2 > n_1$

→ работа асинхронного генератора

(n возрастает до равновесия моментов)

Генератор вырабатывает активную мощность,
но реактивную потребляет из сети

При включенной ОВ – доп. пульсирующий момент \rightarrow надо отключать ОВ (замыкая на R_d)

При этом в роторе – наведенные токи и доп.потери в КЗ контурах

→ ограничение мощности генератора так, чтобы исключить перегрев

Обычно допустимая мощность ТГ в асинхронном режиме 40...60% от P_n

Длительность такой работы – до 30 мин (при одинаковом уровне потерь)

Затем нужна ресинхронизация

Для ГГ работа в асинхронном режиме недопустима

