

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

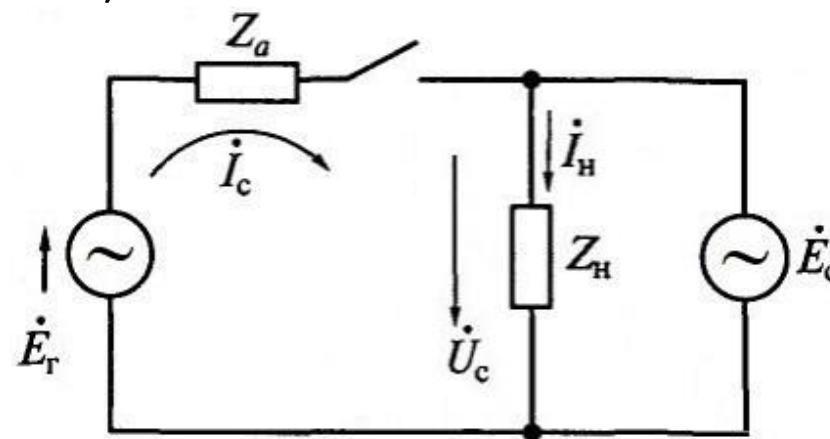
Включение СГ на параллельную работу с сетью – синхронизация

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_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)

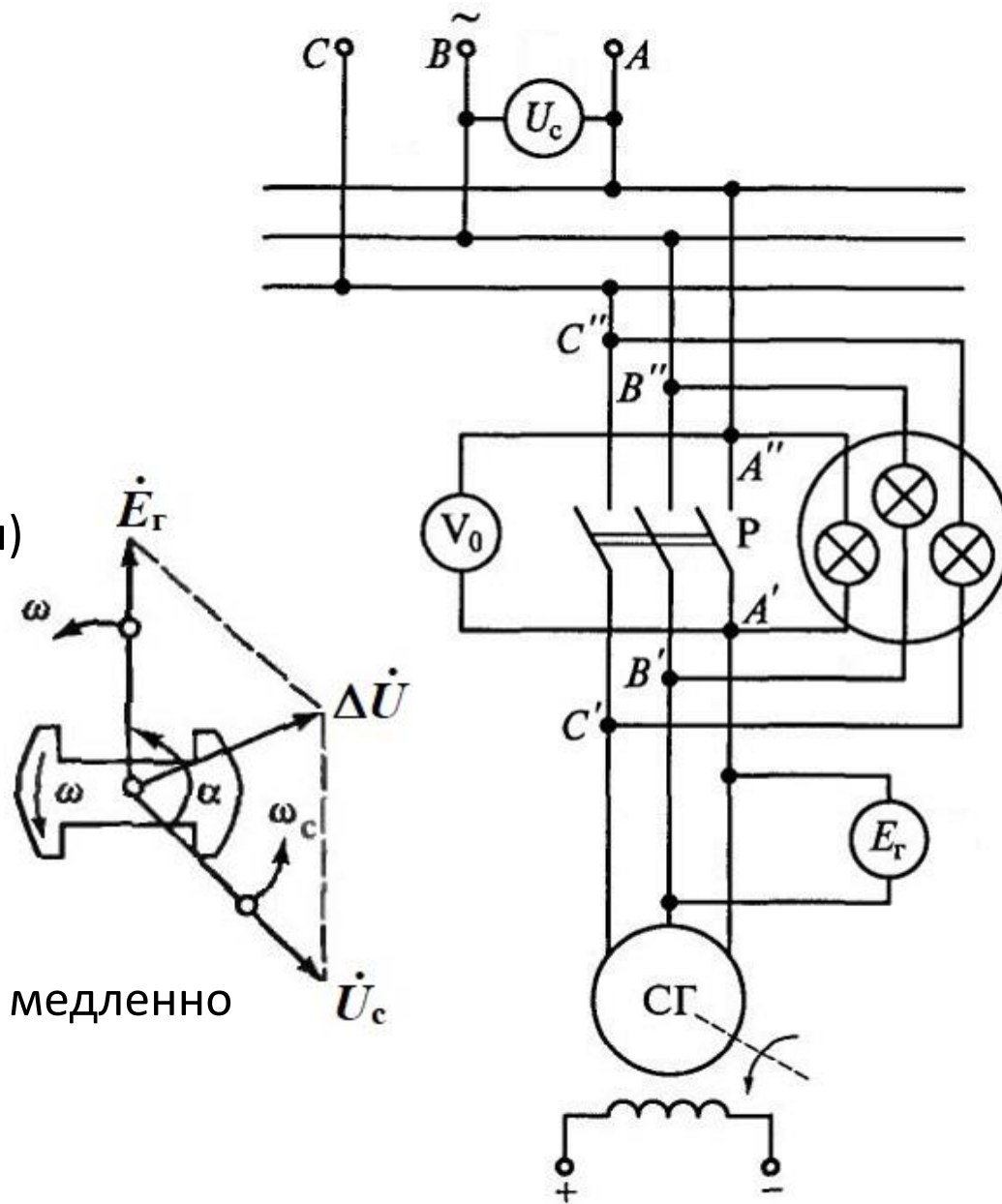
Напряжение на контакторе P $\Delta \dot{U} = \dot{E}_r + \dot{U}_c$

При $f_r \approx f_c$ относительная ω векторов \dot{E}_r 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 $\pm 1...4\%$ от f_c

Затем включают возбуждение и СГ втягивается в синхронизм

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

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 $r_{\bar{6}} = (4...6)r_B$

Параллельная работа СГ с сетью

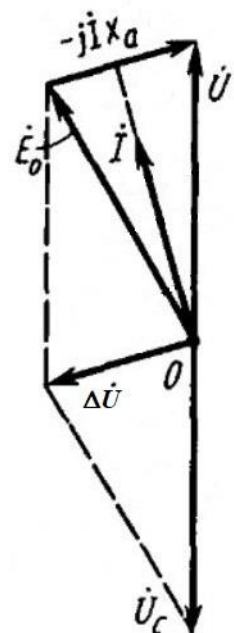
Синхронизирующий момент

По условиям синхронизации $E_r = U_c$

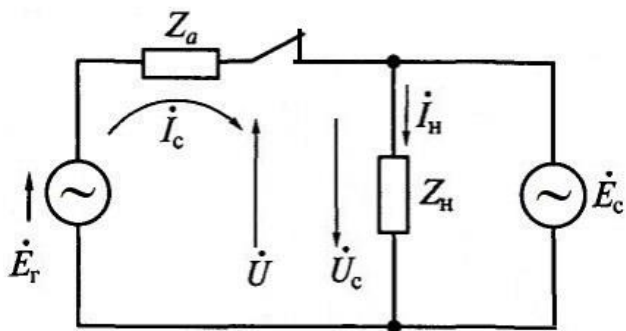
тогда $\Delta U = 0$ и $I = 0$

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 ΔU на $\pi/2$)



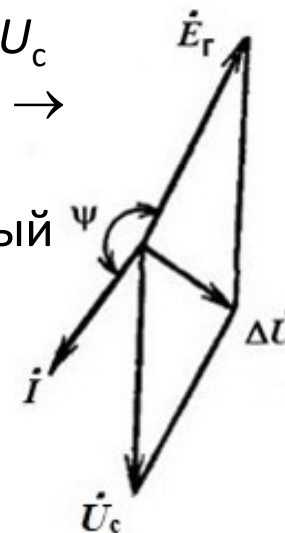
Тогда напряжение на зажимах генератора $\dot{U} = \dot{E}_r - j\dot{I}_c x_a = -\dot{U}_c$
(ток обеспечивает $U = U_c$)



- если n_2 возрастет, E_r догоняет U_c
→ ΔU → отстающий I → $\psi < 90^\circ$ →
электромагнитная мощность генератора $P_{ЭМ} = mE_r I \cos \psi > 0$ →
генераторный момент тормозит ротор



- если n_2 снижается, E_r отстает от U_c
→ ΔU → отстающий I → $\psi > 90^\circ$ →
электромагнитная мощность $P_{ЭМ} = mE_r I \cos \psi < 0$ →
двигательный момент разгоняет ротор

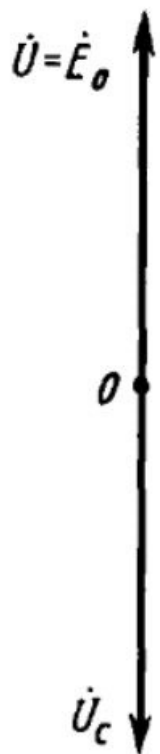


в результате

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

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 ΔU)

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

\rightarrow генераторный режим: активная мощность – в сеть!

(генераторный M уравнивает внешний M_{BH})

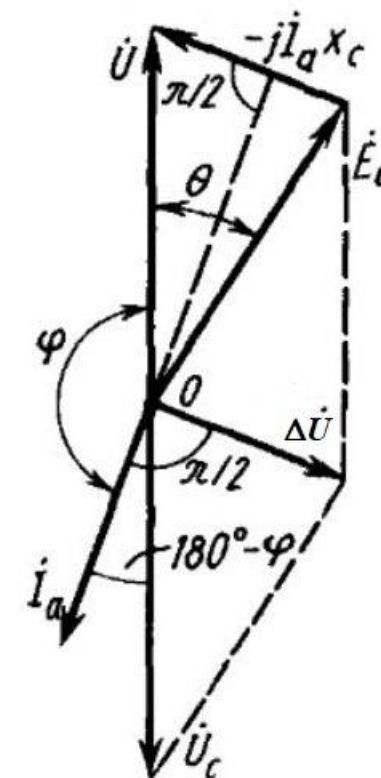
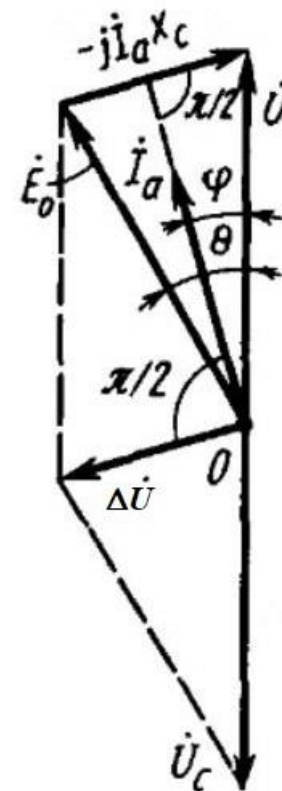
2. Уменьшим момент на валу

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 $P = mUI_a \cos\varphi < 0$

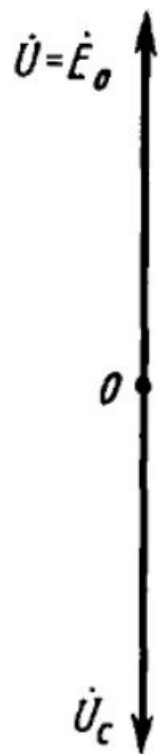
\rightarrow двигательный режим: активная мощность – из сети!

(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 ΔU)

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 $I_B < I_{B0}$

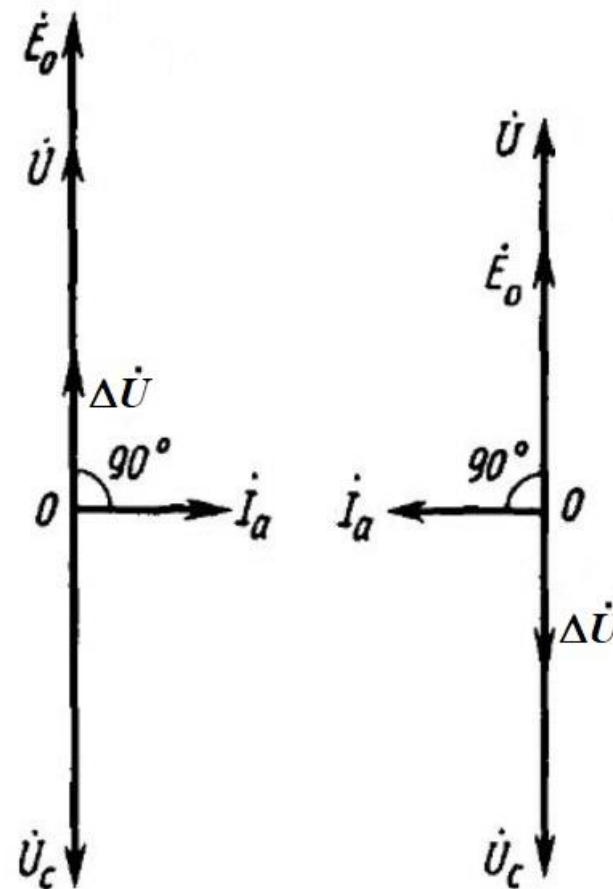
$E_0 < U \rightarrow \Delta U \rightarrow I_a = \Delta U / jx_c$ (отстающий от ΔU)

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

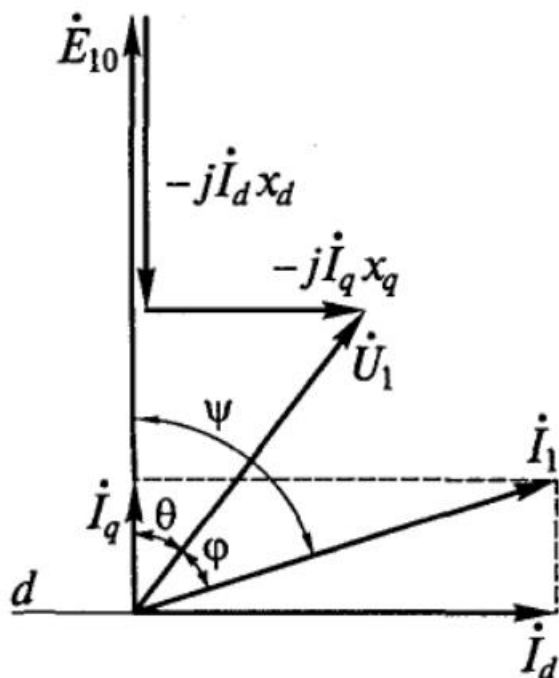
Параллельная работа СГ с сетью

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 θ
(угол нагрузки)

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

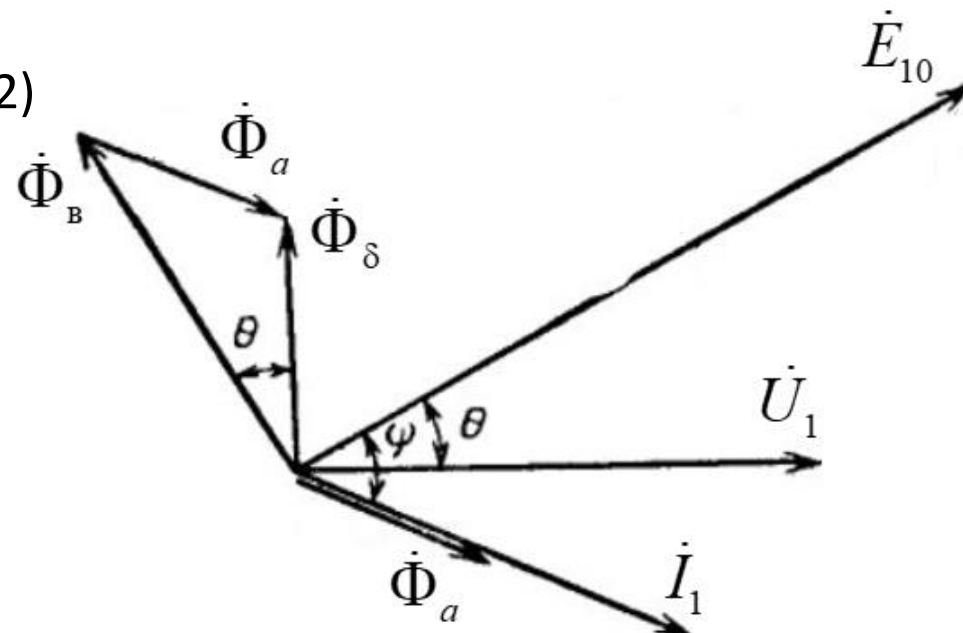
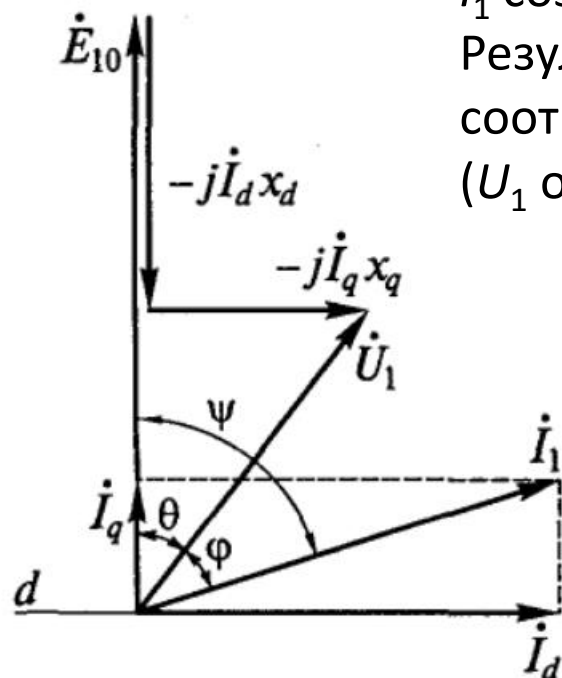
E_{10} наводится потоком Φ_B (отстает на $\pi/2$)

I_1 создает поток якоря Φ_a

Результирующий поток $\Phi_\delta = \Phi_B + \Phi_a$
соответствует полному напряжению U_1

(U_1 отстает на $\pi/2$)

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

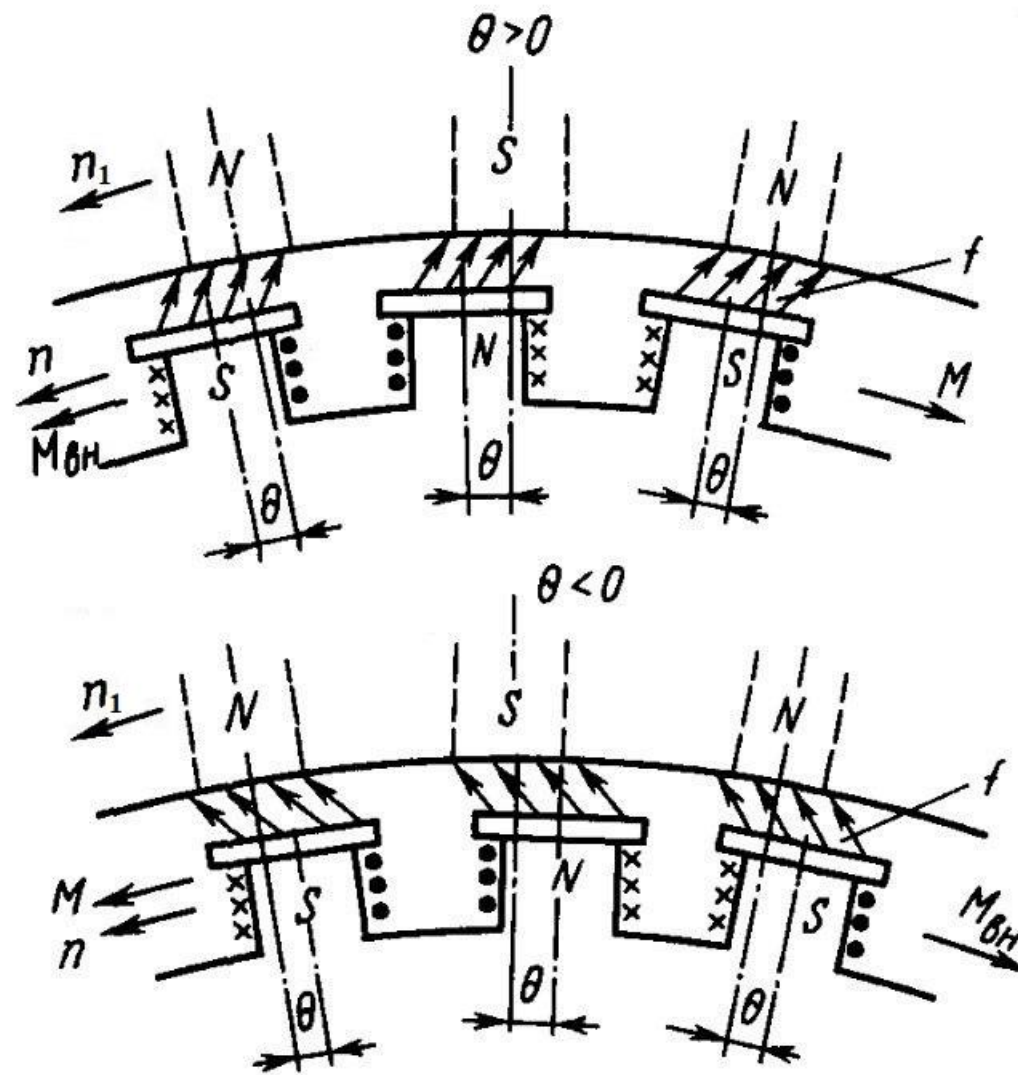


Таким образом, угол θ – также угол между осью полюсов (d) и осью результирующего поля Φ_δ

Параллельная работа СГ с сетью

Угол нагрузки

- Генератор: $\theta > 0$
(полюс опережает результирующий Φ_δ)
Внешний момент вращает ротор ($M_{вн}$ 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

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

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

Угловая характеристика активной мощности

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

Угловая характеристика электромагнитного момента

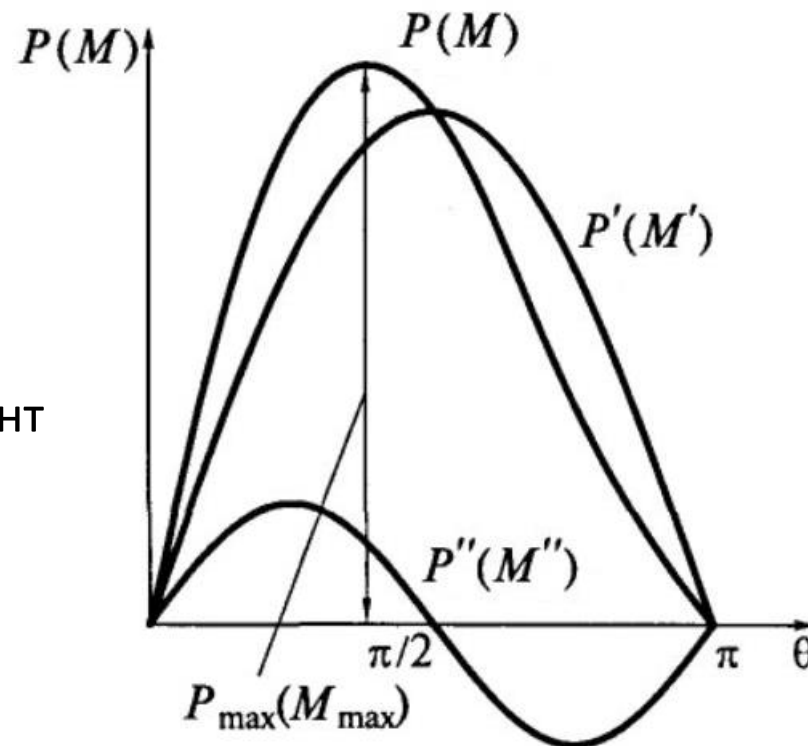
$M = f(\theta)$ при $I_B = \text{Const}$, $U_1 = \text{Const}$, $f = \text{Const}$

- 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)

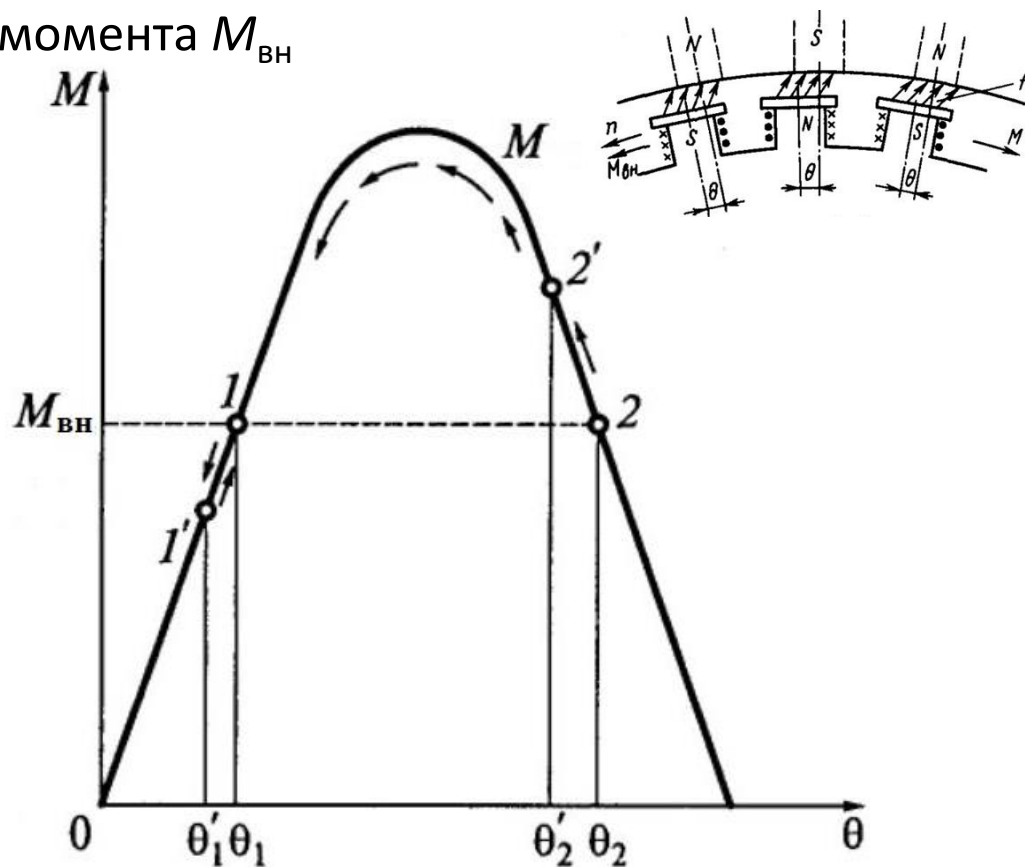
В неявнополюсном СГ $x_d = x_q$ и $M'' = 0$



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

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

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}

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

Статическая перегружаемость неявнополюсного СГ

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

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

Статическая перегружаемость пропорциональна $1/x_d$

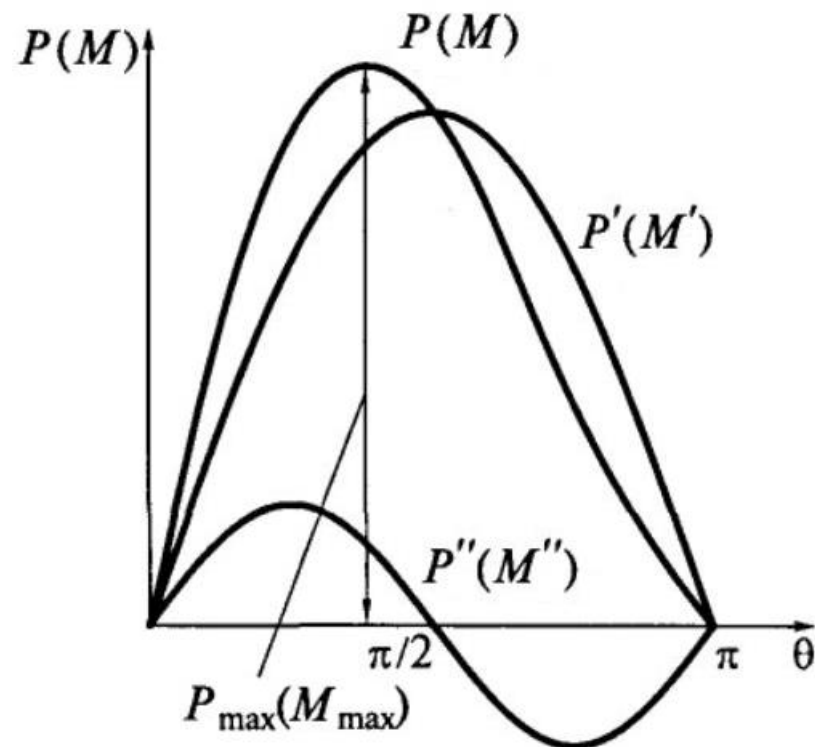
В синхронных генераторах занижают x_d

(увеличивают δ сверх технологического минимума)

При превышении M_{max} – выпадение из синхронизма

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

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



Параллельная работа СГ с сетью

Выход из синхронизма

Превышение M_{\max} или снижение U_1 , снижение или потеря возбуждения $\rightarrow M > M_{\max}$

\rightarrow выход из синхронизма, $n_2 > n_1$ (n возрастает до равновесия моментов)

\rightarrow работа как асинхронного генератора

Асинхронный генератор (с ДО вместо КЗ обмотки ротора)

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

\rightarrow ограничение мощности генератора так, чтобы исключить перегрев

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

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

Затем нужна ресинхронизация

Для ГГ работа в асинхронном режиме недопустима

Параллельная работа СГ с сетью

Влияние тока возбуждения на устойчивость работы СГ

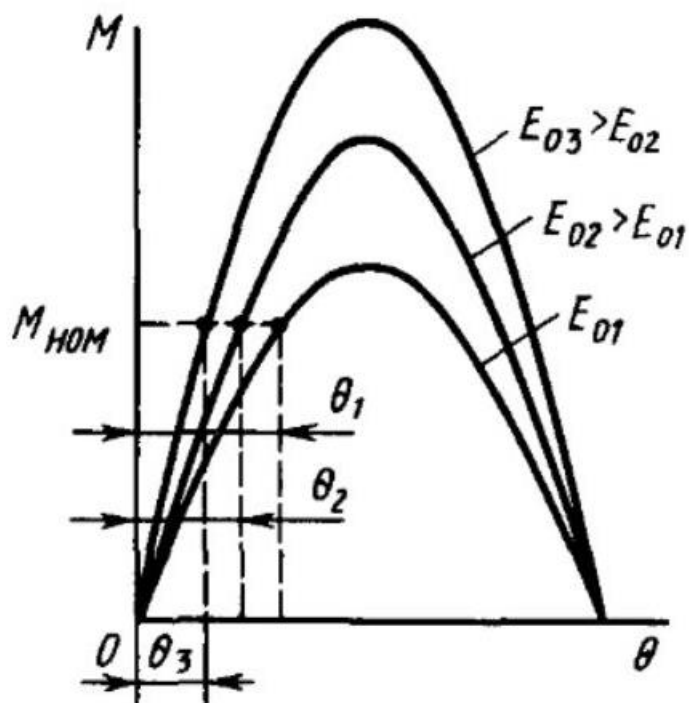
$$M = \frac{mU_1 E_{10}}{\Omega_1 x_d} \sin \theta + \frac{mU_1^2}{2\Omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

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 θ и снижается k_n

→ опасность неустойчивой работы при больших P

Параллельная работа СГ с сетью

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 $I_{1(1)} \rightarrow E_{10(1)}$

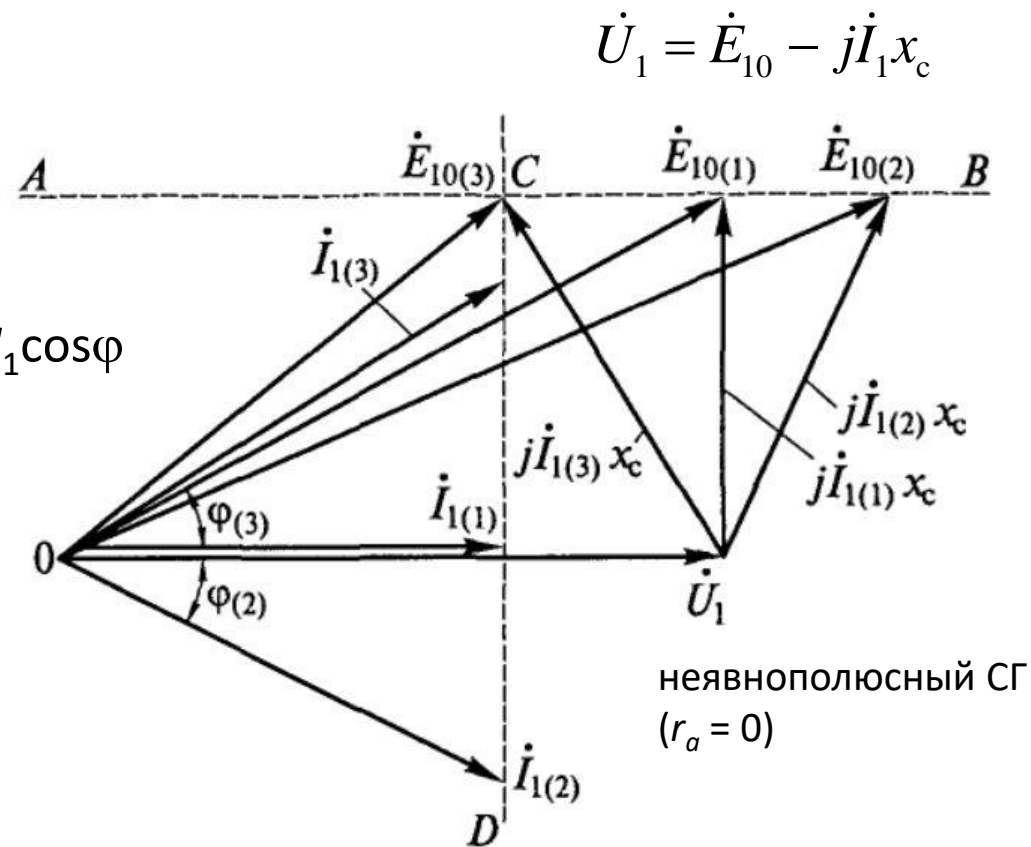
(2) – отстающий ток $I_{1(2)} \rightarrow E_{10(2)} > E_{10(1)} \rightarrow I_{B(2)} > I_{B(1)}$

(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:

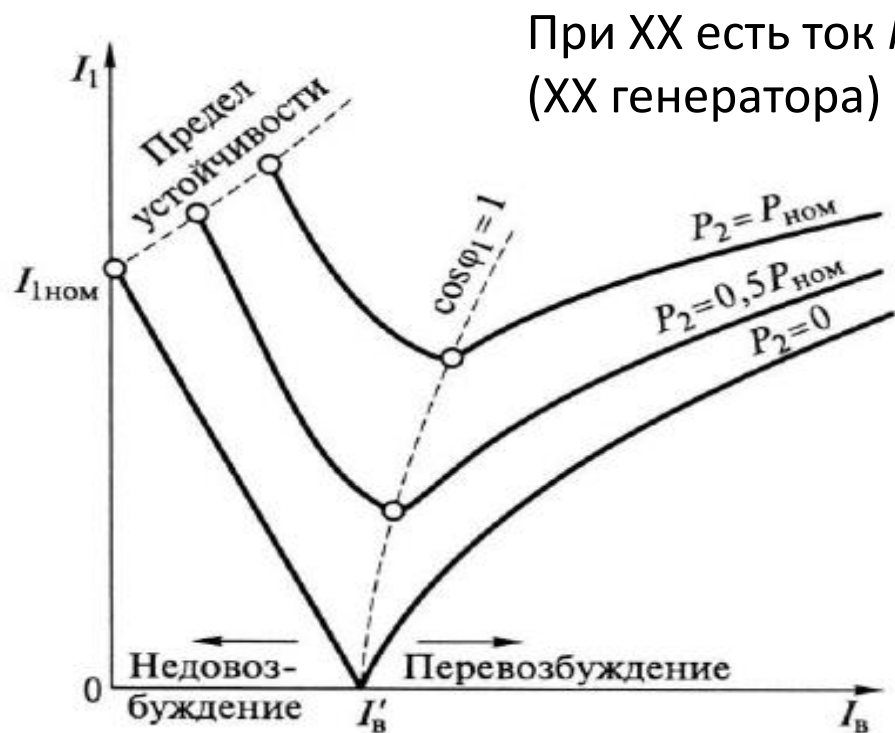
$I_1 = f(I_B)$ при $P = \text{const}$,

$U_1 = \text{const}$, $f = \text{const}$

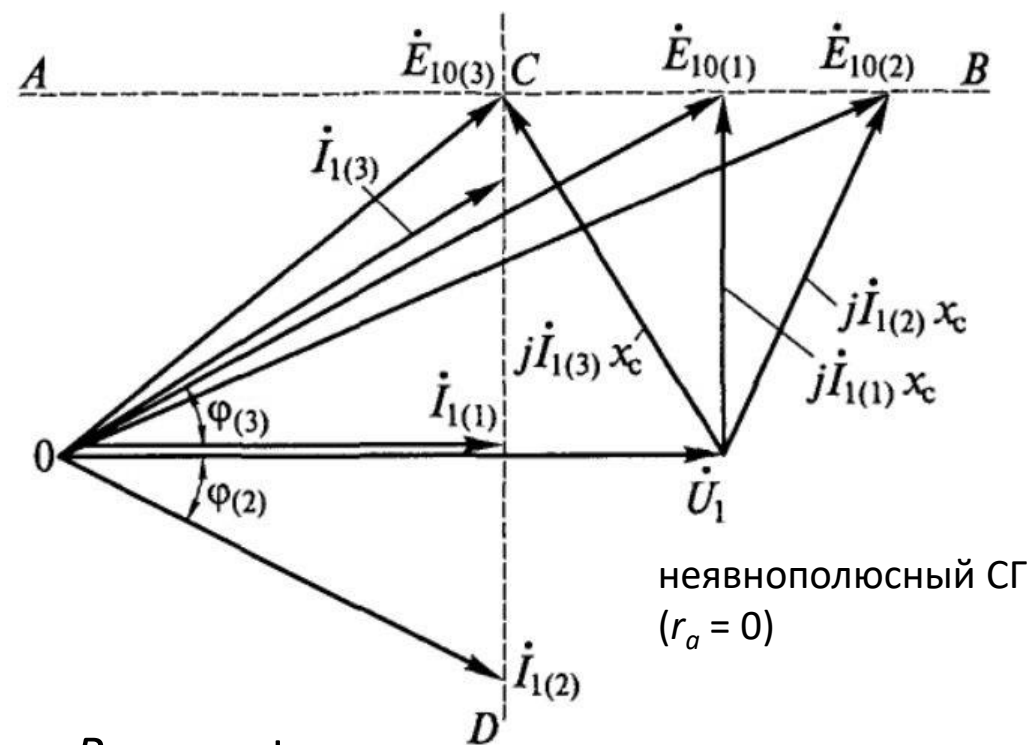
Параллельная работа СГ с сетью

U-образные характеристики

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



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



Для каждой х-ки $P_2 = \text{const}$

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

Пере- / недовозбуждение \rightarrow увеличение I_1

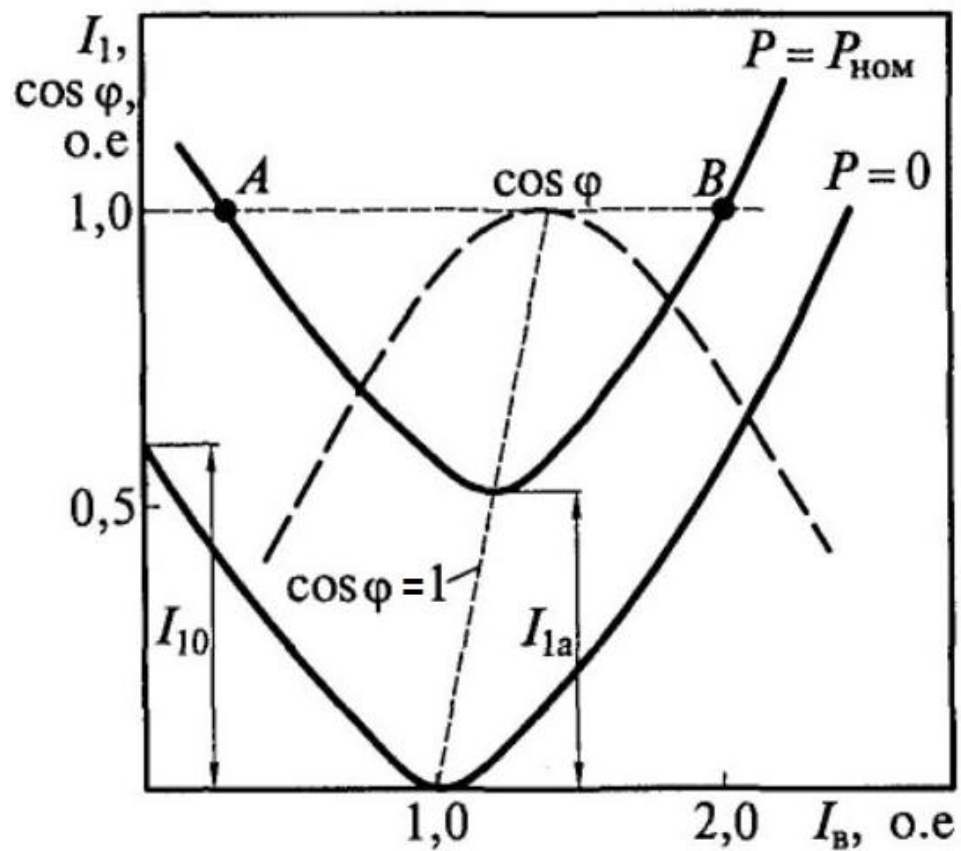
При малых I_B снижается E_{10} и M_{\max}

\rightarrow снижается перегружаемость (предел устойчивости)

Параллельная работа СГ с сетью

U-образные характеристики

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



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

При увеличении мощности 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 $P = P_n \rightarrow$ точки A и B

Расчетная точка B (при перевозбуждении),

т.к. при бoльшем 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

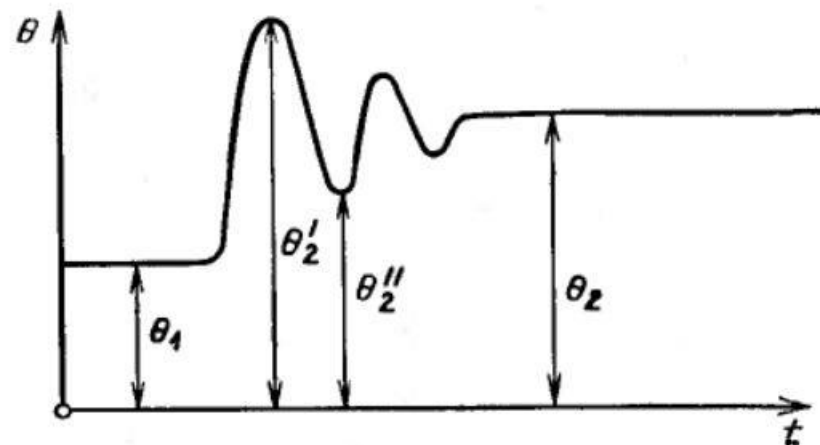
При этом сохраняется синхронное вращение,
но мгновенная скорость изменяется
относительно Ω_1 → в ДО наводятся токи,
демпфирующие изменение скорости

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

где $M_{\text{синх}}$ – 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)