

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Холостой ход синхронного
генератора

Холостой ход синхронного генератора

Холостой ход: $n, I_B, I_y = 0$

магнитное поле – только Φ_B

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

Φ вращающегося индуктора \rightarrow 3-фазная ЭДС в якоре

Форма напряжения в ОЯ должна быть синусоидальной

Отличие от \sin – коэффициент искажения синусоидальности U_L

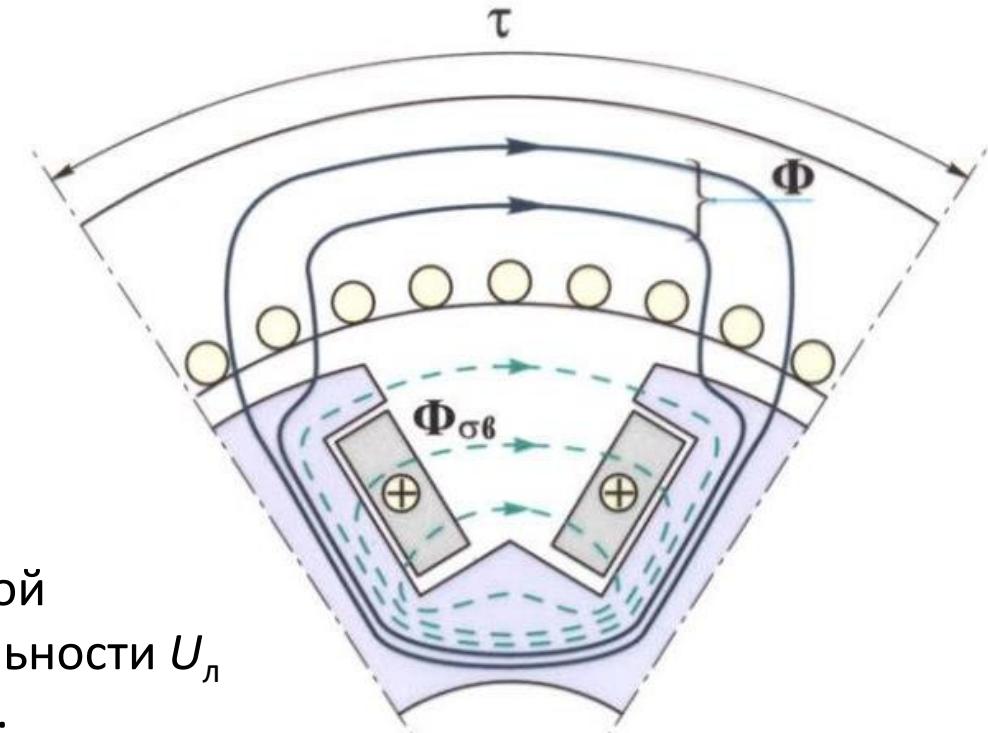
$$K_i = \frac{\sqrt{\sum U_v^2}}{U_h} \cdot 100\%$$

Допустимые искажения:

- в сетях до 1 кВ $K_i < 8\%$
- в сетях 35 кВ $K_i < 4\%$

Меры улучшения формы ЭДС в ОЯ известны (Y или Δ , укорочение y)

Но высшие гармоники Φ_f создают добавочные потери \rightarrow надо их уменьшать



Холостой ход синхронного генератора

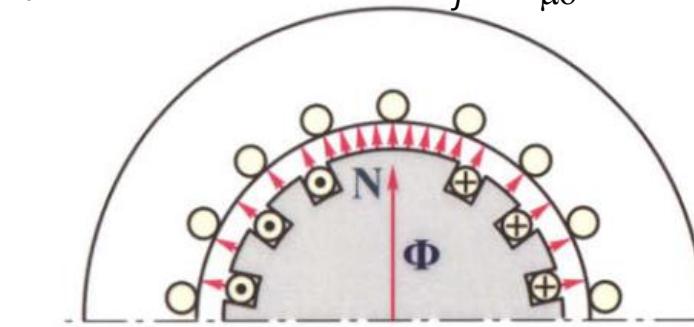
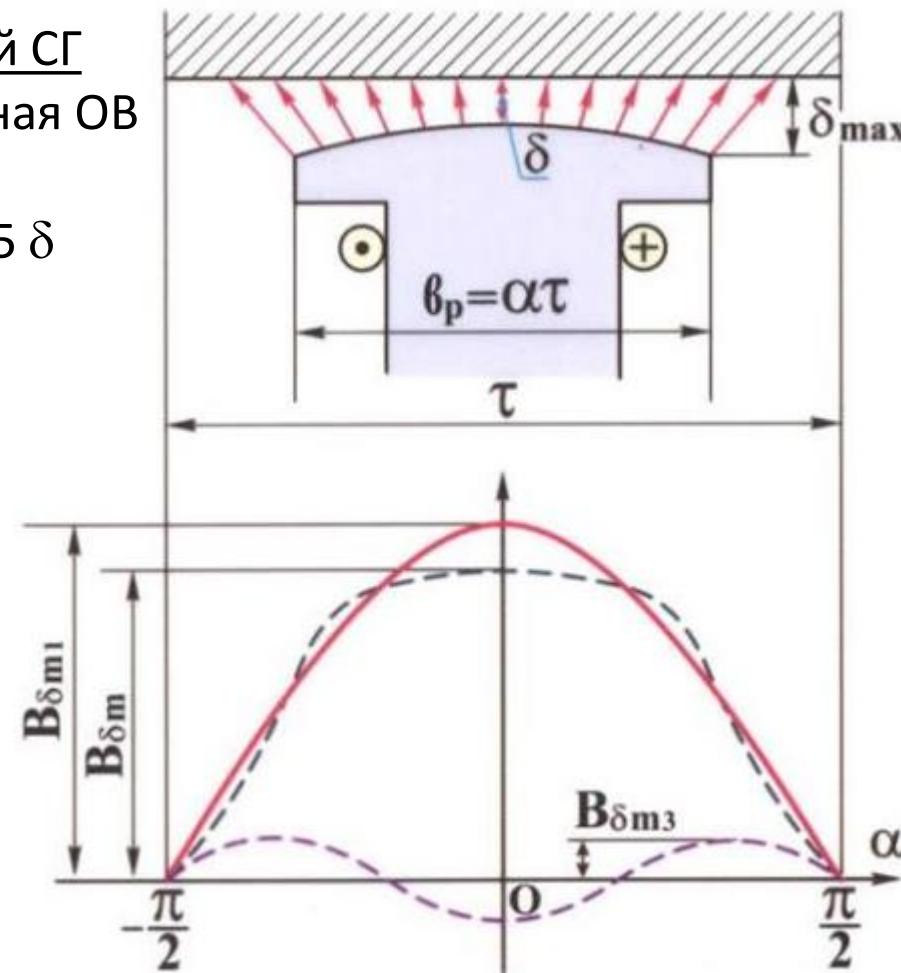
Поток в зазоре определяется МДС и магнитным сопротивлением $\Phi = F_f / R_{\mu\delta}$

Явнополюсный СГ

сосредоточенная ОВ

$$F_B = \text{const}$$

$$\delta_{max} = 1,5...2,5 \delta$$

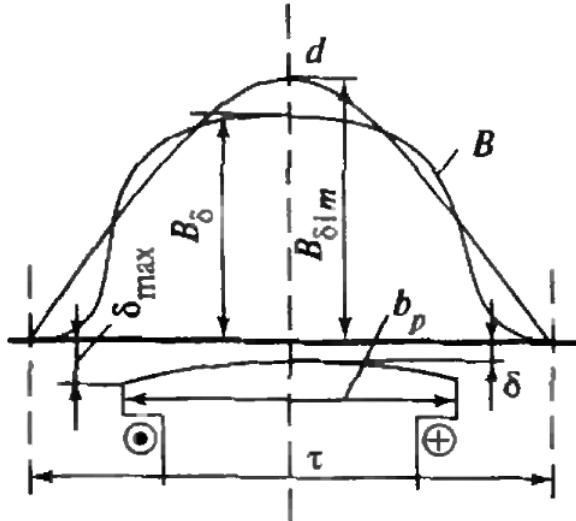


Неявнополюсный
распределенная
ОВ

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

Холостой ход синхронного генератора

Форма поля возбуждения характеризуется системой коэффициентов $k_f, k_\Phi, \alpha_\delta, k_B$



Коэффициент формы поля возбуждения

$$k_f = \frac{B_{\delta 1m}}{B_\delta}$$

где B_δ – рад.составляющая индукции на оси полюса

Коэффициент потока возбуждения

$$k_\Phi = \frac{\Phi_m}{\Phi_{1m}}$$

где Φ_{1m} – поток по 1 гармонике, Φ_m – полный поток

$$\Phi_{1m} = \frac{2}{\pi} \tau l_\delta B_{\delta 1m}$$

$$\Phi_m = \tau l_\delta B_{\delta cp} = \alpha_\delta \tau l_\delta B_\delta$$

Расчетный коэффициент полюсного перекрытия

$$\alpha_\delta = \frac{\Phi_m}{\tau l_\delta B_\delta} = \frac{B_{\delta cp}}{B_\delta}$$

где B_{cp} – средняя индукция в зазоре

$$B_{\delta cp} = \frac{\Phi_m}{\tau l_\delta}; B_\delta = \frac{B_{\delta 1m}}{k_f} = \frac{\pi \Phi_m}{2 \tau l_\delta k_\Phi k_f} \quad \text{тогда} \quad \alpha_\delta = \frac{B_{\delta cp}}{B_\delta} = \frac{2}{\pi} k_\Phi k_f$$

Коэффициент формы ЭДС

$$k_B = \frac{B_{\delta d1}}{B_{\delta cp}} = \frac{B_{\delta 1m} / \sqrt{2}}{B_{\delta cp}} = \frac{\pi \Phi_m}{2 \sqrt{2} k_\Phi \tau l_\delta} \Bigg/ \frac{\Phi_m}{\tau l_\delta} = \frac{\pi}{2 \sqrt{2} k_\Phi}$$

где $B_{\delta d1}$ – действ.значение

основной гармонической индукции

Холостой ход синхронного генератора

Форма поля возбуждения характеризуется системой коэффициентов k_f , k_Φ , α_δ , k_B

В неявнополюсной машине без учета насыщения коэффициенты зависят только от γ – относительной длины обмоточной части τ

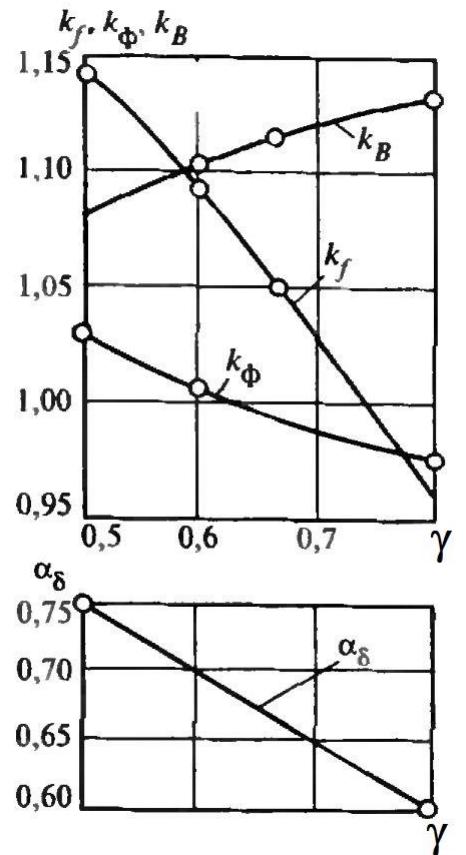
При $\delta = \text{const}$ и индукции, пропорциональной МДС, можно записать:

$$k_f = \frac{B_{\delta 1m}}{B_\delta} = \frac{F_{f1m}}{F_{fm}} = \frac{\frac{4}{\pi} k_{pf} F_{fm}}{\frac{4}{\pi} k_{pf}} = \frac{4}{\pi} k_{pf} = \frac{4}{\pi} \left(\frac{\sin \frac{\gamma\pi}{2}}{\frac{\gamma\pi}{2}} \right) = \frac{8 \sin \frac{\gamma\pi}{2}}{\pi^2 \gamma}$$

При трапециoidalной форме МДС

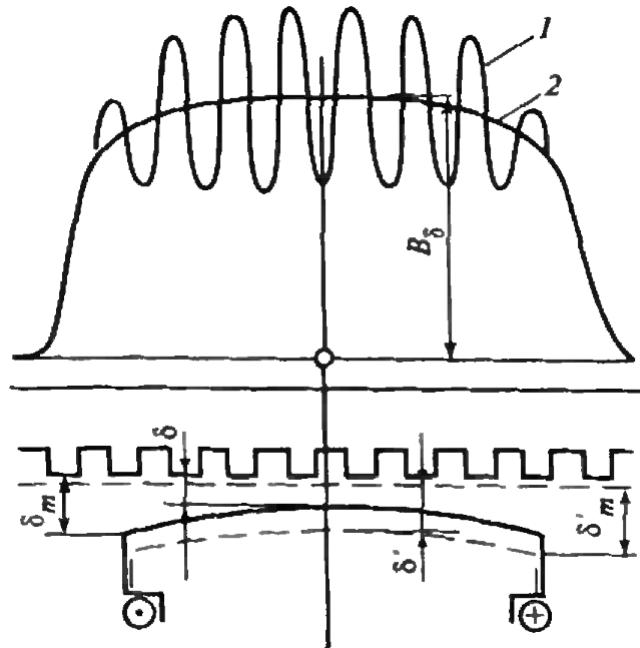
$$\alpha_\delta = \frac{B_{\delta cp}}{B_\delta} = \frac{F_{fcp}}{F_{fm}} = 1 - 0,5\gamma$$

Остальное можно выразить через них



Холостой ход синхронного генератора

Влияние насыщения стали и зубчатости сердечников на форму поля возбуждения можно учесть с помощью увеличения величины зазора (при сохранении индукции)



Реальные зазоры δ и δ_m заменяют на эквивалентные зазоры

$$\delta' = \delta k_\delta k_{za} \quad \delta'_m = \delta_m k_{\delta m} k_{zam}$$

k_{za}, k_{zam} учитывают насыщение

$k_\delta, k_{\delta m}$ (коэффициент Картера) учитывают зубчатость

$k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2}$ здесь $k_{\delta 1}$ учитывает влияние пазов статора,
 $k_{\delta 2}$ учитывает влияние пазов ДО на роторе

$$k_{\delta 1} = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma_1 \delta} \quad k_{\delta 2} = \frac{t_{z2}}{t_{z2} - \gamma_2 \delta} \quad (k_{\delta m} \text{ аналогично} \\ \text{ для значения } \delta_m \text{ вместо } \delta)$$

$$\text{при } b_\pi > \delta \quad \gamma \approx \frac{\left(\frac{b_\pi}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_\pi}{\delta}}$$

$$\text{иначе} \quad \gamma = \frac{4}{\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{a}} \operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{a}} - \ln \sqrt{1 + \frac{1}{a}} \right) \quad \text{где} \quad a = \left(\frac{2\delta}{b_\pi} \right)^2$$

Холостой ход синхронного генератора

Характеристика холостого хода

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

Остаточная ЭДС 2...3% U_H

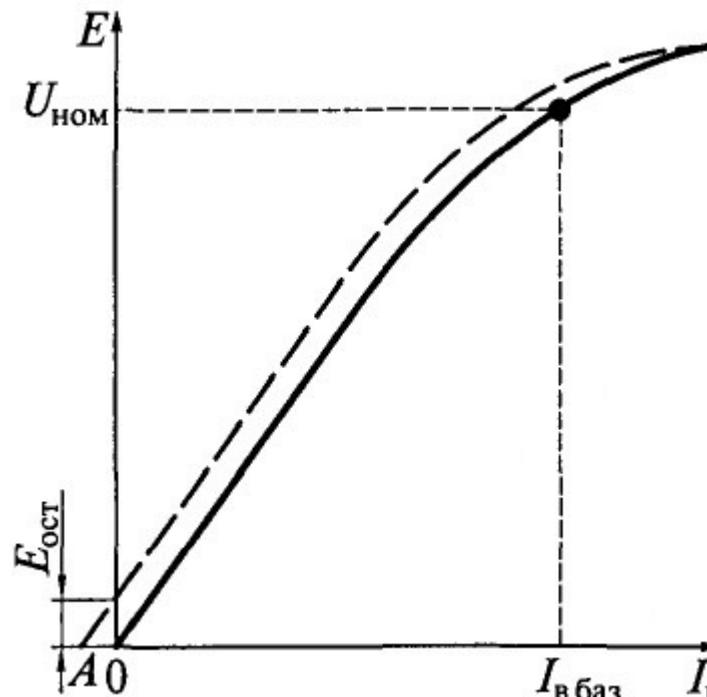
Базовое значение I_B соотв. U_H

Система относительных единиц

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

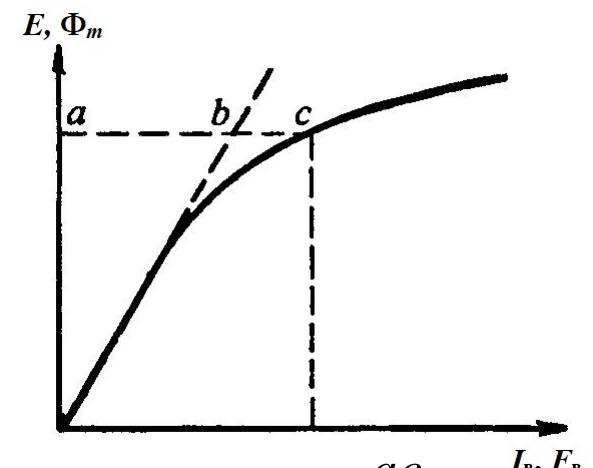
Нормальные характеристики ХХ

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	-	-	-
$E_{ня*}$	0	0,58	1,0	1,21	1,33	1,4	1,45	1,51



XXX эквивалентна
характеристике

намагничивания $\Phi_m = f(F_B)$
 $(E = 4k_B f_1 w_1 k_{o1} \Phi_m, F_B = I_B w_B)$



$$k_{\text{нас}} = \frac{ac}{ab}$$

– коэффициент
насыщения
магнитной цепи

Холостой ход синхронного генератора

Коэффициенты k_f , k_Φ , α_δ , k_B позволяют провести расчет магнитной цепи и построить XXX

- задаемся E (обычно $0,5U_n$, $1,0U_n$, $1,08U_n$, $1,2U_n$, $1,3U_n$)
- находим необходимый поток $\Phi_m = E / (4k_B f_1 w_1 k_{o1})$
- рассчитываем требуемую МДС и ток ОВ

Расчет магнитной цепи – на основе закона полного тока
для средней магнитной линии 1-2-3-4-5

$$F_\delta + F_{z1} + F_{a1} + F_m + F_{a2} = F_v = I_v w_v$$

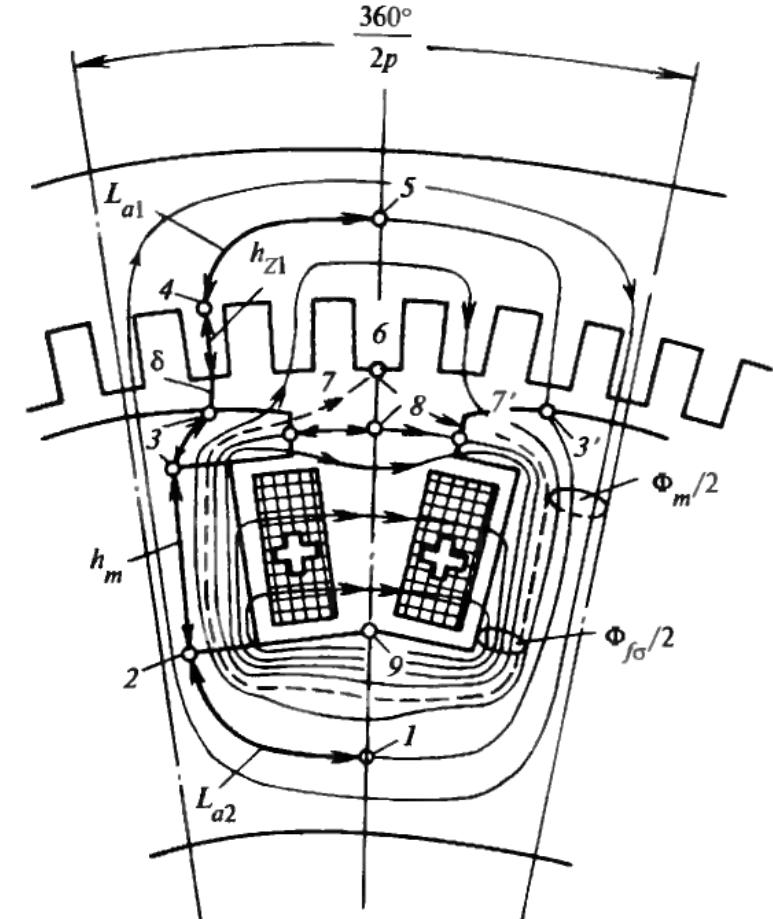
Наибольшее падение магн.напряжения – в зазоре $F_\delta = \frac{1}{\mu_0} B_\delta \delta'$
где индукция на оси полюса $B_\delta = \Phi_m / \alpha_\delta \tau l_\delta$

Падения магн.напряжения в стальных участках $F_x = H_x l_x$

Напряженность H_x по кривой $B(H)$ для индукции $B_x = \Phi_x / S_x$

Значение потока $\Phi_x \rightarrow \Phi_m$ или $\Phi_m + \Phi_{\sigma v}$

Итерационно находят коэф-т насыщения $k_{za} = (F_\delta + F_{z1} + F_{a1}) / F_\delta$
который влияет на эквивалентный зазор $\delta' = \delta k_\delta k_{za}$



СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Работа синхронного генератора
под нагрузкой

Работа синхронного генератора под нагрузкой

Реакция якоря

При нагрузке $E \rightarrow I_1 \rightarrow F_1 \rightarrow \Phi_a$

Влияние МДС якоря на поле возбуждения
– «реакция якоря»

Характер нагрузки → характер РЯ

Направление Φ_a – по направлению I_b (ось d)

Направление E_{10} – отстает от Φ_a на $\pi/2$ (ось q)

Направление Φ_a – по направлению I_1

Угол ψ между I_1 и E_{10} определяется
характером нагрузки

Диапазон ψ от $-\pi/2$ до $+\pi/2$

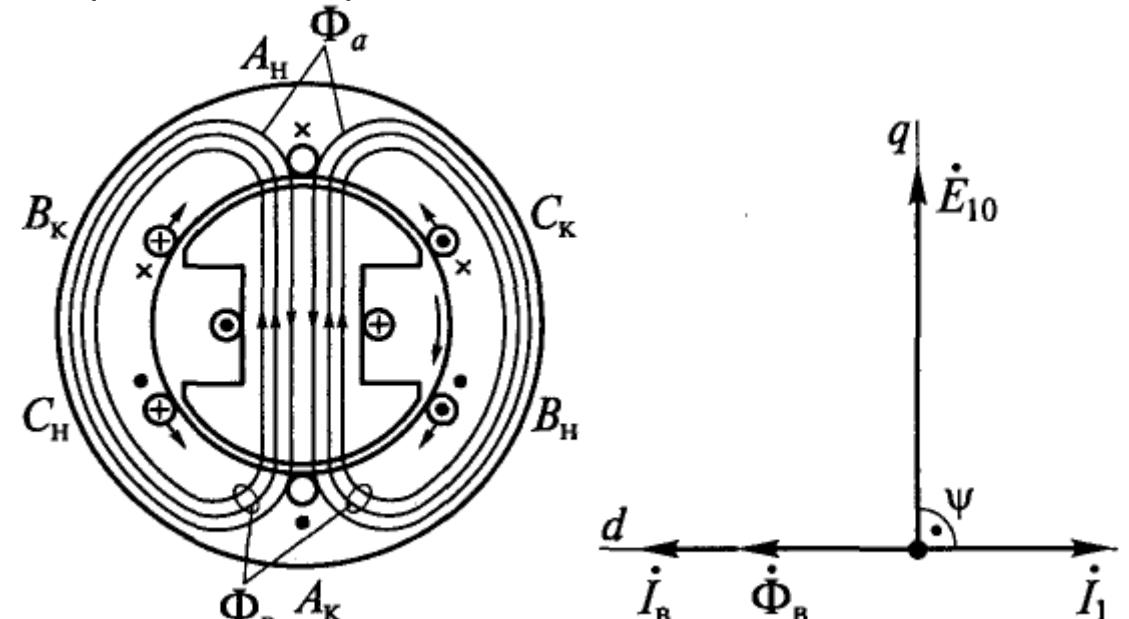
1. Индуктивная нагрузка (I_1 отстает от E_{10} на $\pi/2$)

$\Phi_b \rightarrow E_{10}$ (знаки возле проводников)

→ отстающий I_1 (знаки в проводниках)

→ Φ_a по оси d против Φ_b

→ продольная размагничивающая РЯ



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

Работа синхронного генератора под нагрузкой

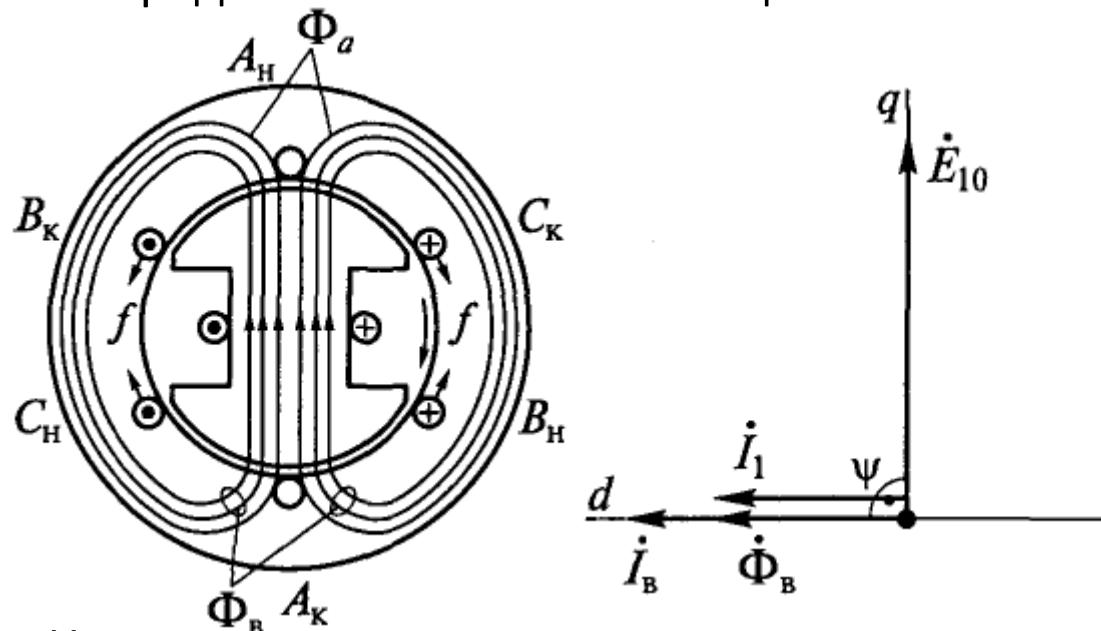
Реакция якоря

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 Φ_b

\rightarrow продольная намагничивающая РЯ

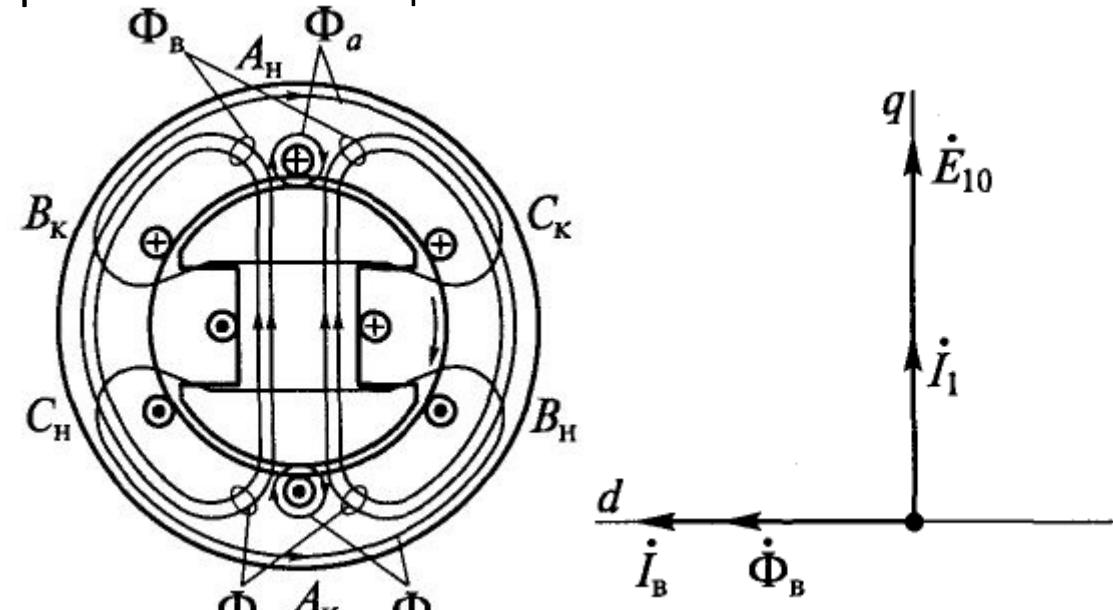


Направления сил под полюсом
– скомпенсированы ($M = 0, P_1 = 0$)

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 Φ_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

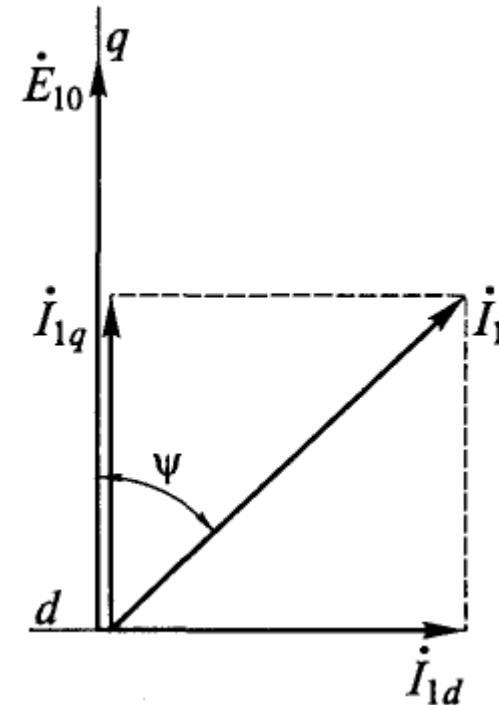
Реакция якоря

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

Напряжение неявнополюсного СГ

Рассматривая потоки статора и ротора Φ_1 и Φ_2 независимо
легко записать соответствующие ЭДС в ОЯ:

$$\Phi_2 = \Phi_b + \Phi_{b\sigma} \rightarrow E_{10}$$

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

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

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

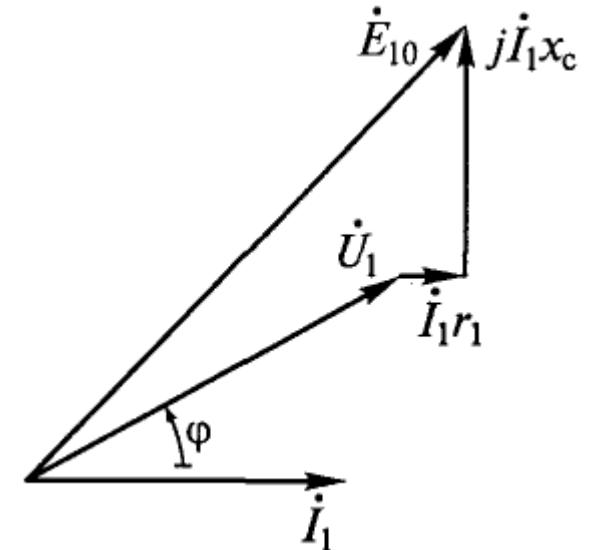
здесь x_a – индуктивное сопротивление реакции якоря

$x_{a\sigma}$ – 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.

- $x_c^* = 1,2 \dots 2,4$ $Z_6 = \frac{U_{1\Phi}}{I_{1\Phi}}$
- $x_a^* = 1,1 \dots 2,3$
- $x_{a\sigma}^* = 0,08 \dots 0,15$
- $r_1^* = 0,002 \dots 0,02$

Метод двух реакций

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

Основная часть R_μ – воздушный зазор δ

- в неявнополюсных СГ $\delta = \text{Const}$
→ $E_a \sim \Phi_a \sim F_a$ при любой нагрузке и угле ψ
- в явнополюсных СГ ротор несимметричен
→ при разных нагрузках (углах ψ) R_μ 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 врачаются 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 $\sin \psi$ 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
 $\alpha = b_n / \tau$ и δ_{max} / δ

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

Напряжение явнополюсного СГ

Согласно методу двух реакций, в зазоре действуют потоки Φ_b , Φ_{ad} и Φ_{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 Φ_{ad} , Φ_{aq} создаются токами I_{1d} , I_{1q} и наводят ЭДС, пропорциональные соответствующим токам

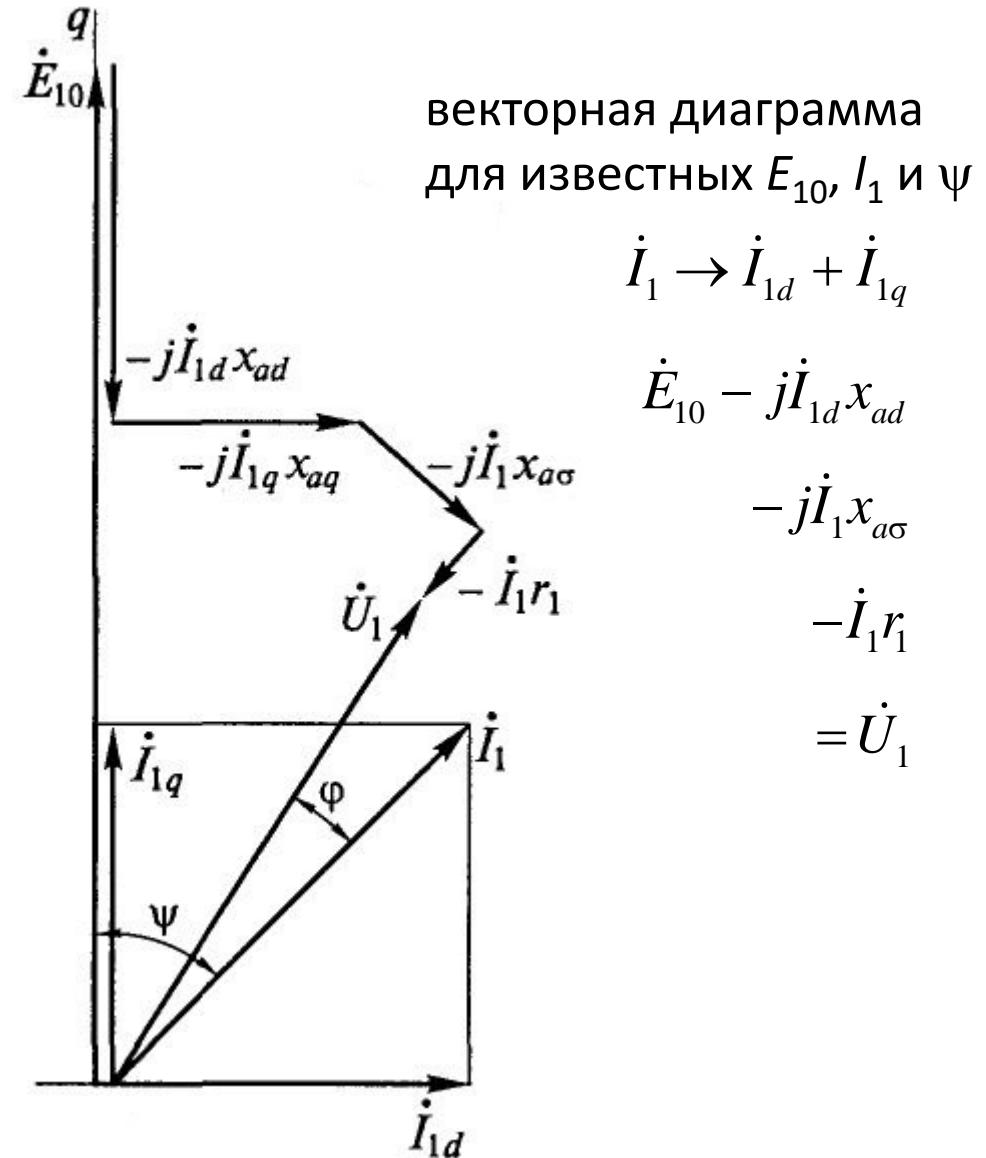
$$\dot{E}_{ad} = -j\dot{I}_{1d}x_{ad} \quad \dot{E}_{aq} = -j\dot{I}_{1q}x_{aq}$$

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

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

Тогда уравнение напряжения явнополюсного СГ

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



Напряжение явнополюсного СГ

Слагаемое $I_1x_{a\sigma}$ тоже удобно выразить через I_{1d} , I_{1q}

$$-j\dot{I}_1x_{a\sigma} = -j(\dot{I}_{1d} + \dot{I}_{1q})x_{a\sigma}$$

Тогда уравнение U можно записать проще

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_{10} - j\dot{I}_{1d}(x_{ad} + x_{a\sigma}) - j\dot{I}_{1q}(x_{aq} + x_{a\sigma}) - \dot{I}_1r_1$$

или $\dot{U}_1 = \dot{E}_{10} - j\dot{I}_{1d}x_d - j\dot{I}_{1q}x_q - \dot{I}_1r_1$

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

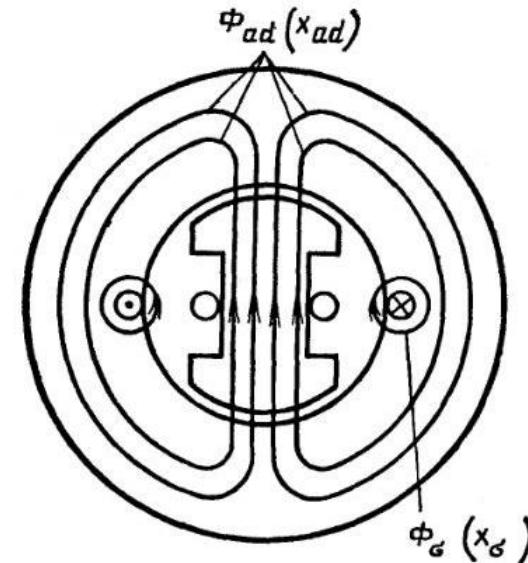
Насыщение стали:

Φ_{aq} влияет на x_{ad} , а Φ_{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

Характеристики синхронного генератора

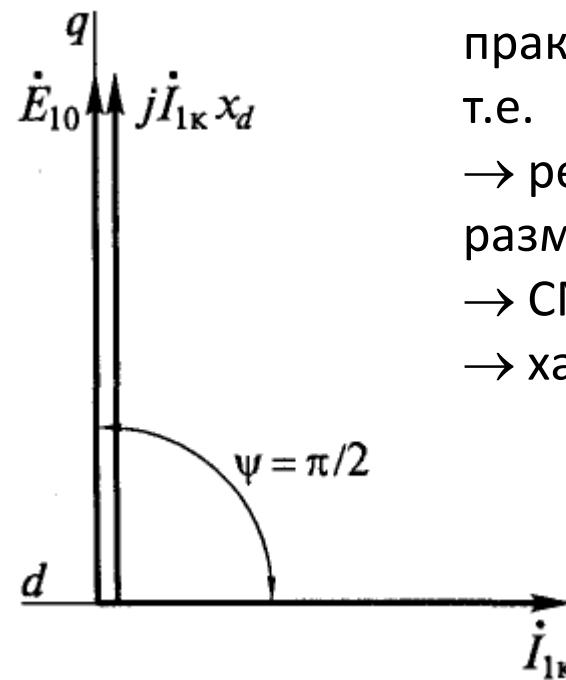
Характеристики синхронного генератора

Характеристика холостого хода

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

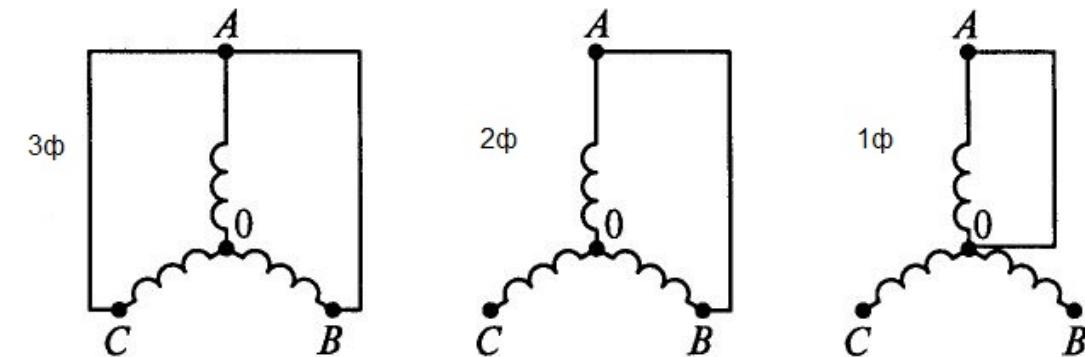
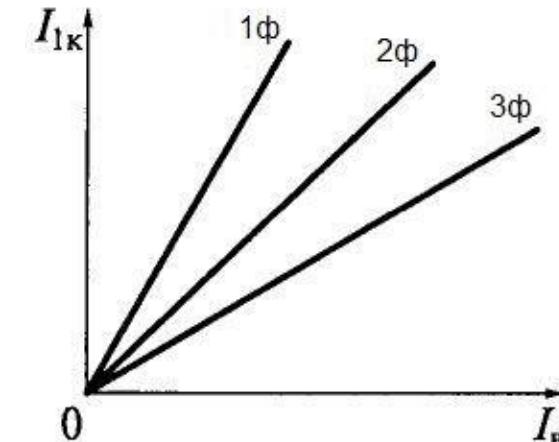
Характеристика короткого замыкания (3-фазное КЗ)

$I_{1\kappa} = f(I_B)$ при $n_2 = n_1 = \text{const}$



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

Уравнение напряжений
(при $U_1 = 0$ и $r_1 = 0$)
 $\dot{E}_{10} = jI_{1\kappa}x_d$



- 3ф КЗ – симметричное
- 2ф КЗ – $F_{1\Sigma}$ меньше, размагнич.РЯ меньше, Φ_Σ и E_{10} больше, $I_{1\kappa}$ 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)

$I_{1K} = f(I_B)$ при $n_2 = n_1 = \text{const}$

По хар-кам ХХ и КЗ можно найти

x_d ненасыщенной СМ

$$x_d = \frac{E_{10}}{I_{1K}}$$

ЭДС ХХ ($=U_{\text{ном}}$) по спрямленной ХХХ $\rightarrow I_B$ ($A \rightarrow C$)

Для этого I_B по ХКЗ $\rightarrow I_K$ ($C \rightarrow E$)

$$x_{d^*} = \frac{|AC|}{|EC|}$$

Отношение короткого замыкания

$$\text{ОКЗ} = I_{1K} / I_{1H} = I_{1K^*}$$

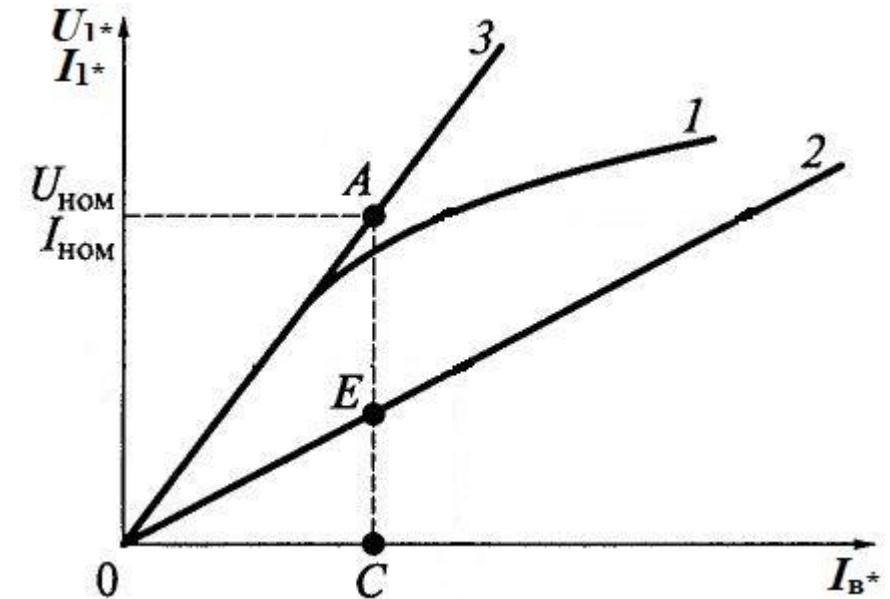
при I_B баз обеспечивающем $E_{10} = U_{\text{ном}}$

По 3 для $E_{10} = U_{\text{ном}}$ $\rightarrow I_B$ ($A \rightarrow C$)

Для этого I_B по ХКЗ $\rightarrow I_K$ ($C \rightarrow E$)

В о.е. $I_{1H} = U_{\text{ном}} = 1$ (отрезок AC)

$$\text{ОКЗ} = \frac{|EC|}{|AC|} \\ (\text{ОКЗ} \sim 1 / x_{d^*})$$



1 – характеристика ХХ

2 – характеристика 3ф КЗ

3 – спрямленная ХХХ (без насыщения)

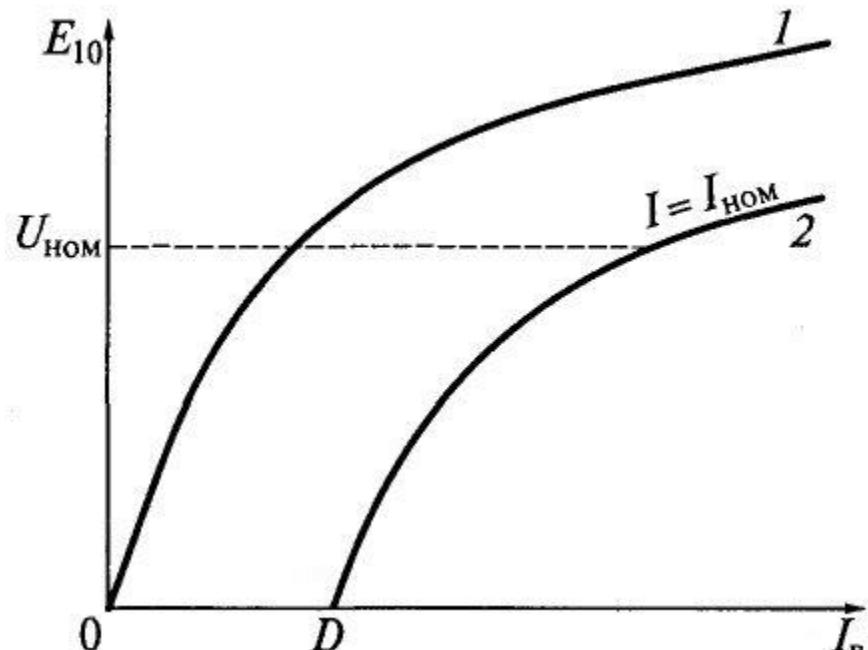
В гидрогенераторах ОКЗ = 1,0...1,4

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

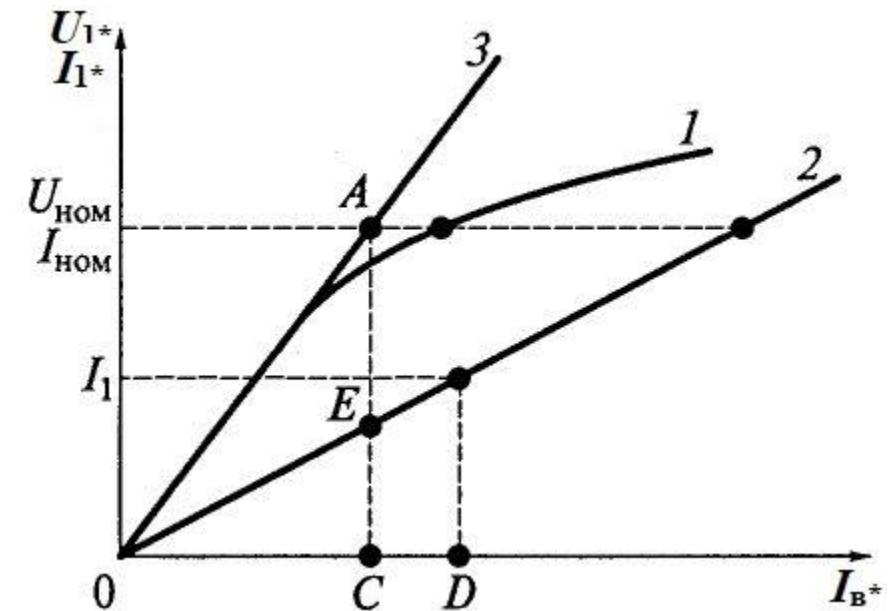
$U_1 < E_{10}$ при одинаковом I_B

- ΔU 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.Д $\rightarrow I_B$, обеспечивающий I_1 при КЗ



Характеристики синхронного генератора

Внешние характеристики

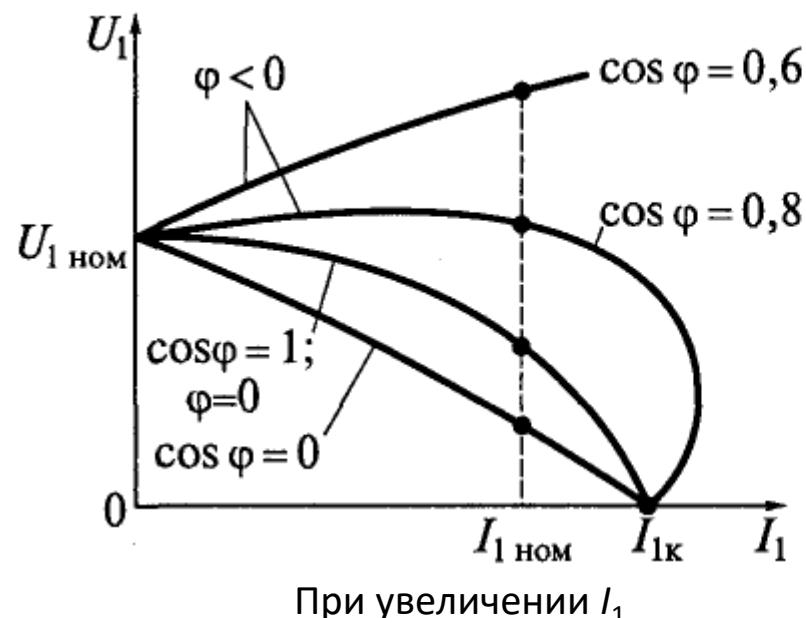
$U_1 = f(I_1)$ при $I_B = \text{const}$, $\cos\varphi = \text{const}$ и $n_2 = n_1 = \text{const}$

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

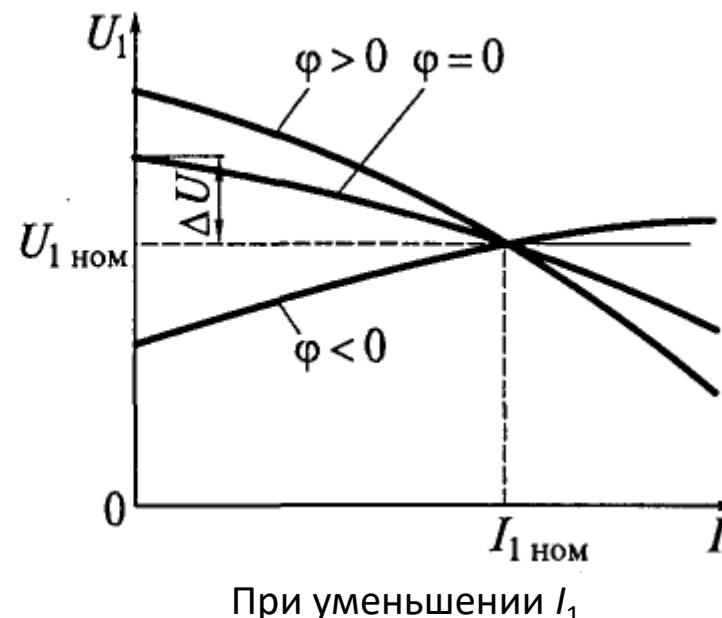
- продольная размагнич. РЯ → снижение Φ (и ЭДС)
- падение напряжения $I_1(r_1+jx_{a\sigma})$

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

- поперечная размагничивающая РЯ



При увеличении I_1



При уменьшении I_1

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

- продольная намагничивающая РЯ

U_1 растет, но ограничено насыщением

При $x_C = x_{0\text{я}}$ резонанс напряжений, $I_1 \text{ max}$

При КЗ $U_1 = 0$ и ток $I_1 = I_{1\text{K}}$

Изменение напряжения
при сбросе нагрузки

$$\Delta U_* = \frac{\Delta U}{U_{\text{н}}} = \frac{E_{10} - U_{\text{н}}}{U_{\text{н}}}$$

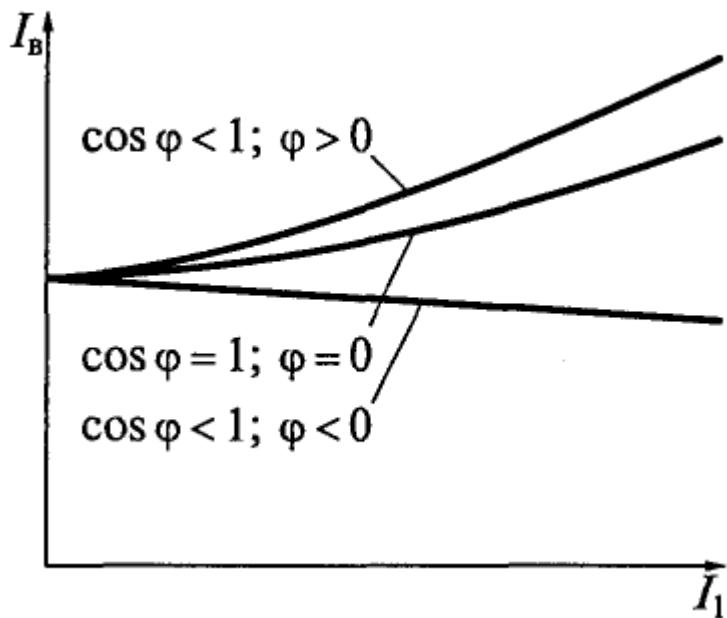
Номинальное $\Delta U_{\text{н}}$
— при $\cos\varphi_{\text{ном}}$

Характеристики синхронного генератора

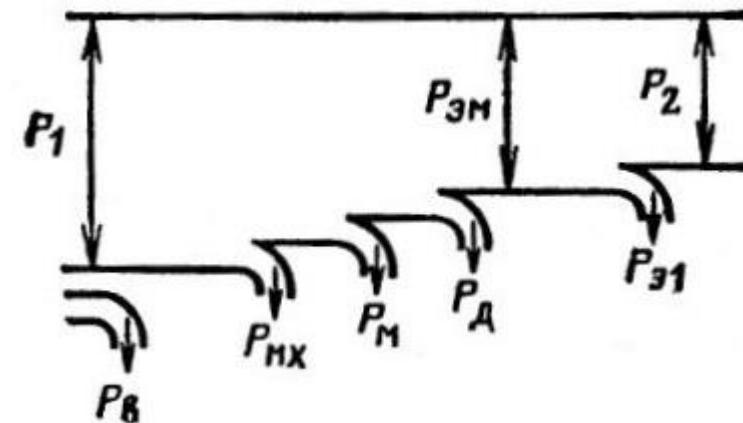
Регулировочные характеристики

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

- обратны внешним характеристикам
- как надо изменять I_B для поддержания U_1 с изменением I_1 при пост. $\cos\phi$



Энергетическая диаграмма СГ



P_1 – мех. мощность на валу генератора

- $P_{\text{мх}}$ – механические потери
 - P_M – магнитные потери в стали статора
 - P_d – 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_B – потери на возбуждение