

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Холостой ход синхронного
генератора

Холостой ход синхронного генератора

Холостой ход: $n, I_B, I_A = 0$

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 → 3-фазная ЭДС в якоре

Форма напряжения в ОЯ должна быть синусоидальной

Отличие от \sin – коэффициент искажения синусоидальности U_d

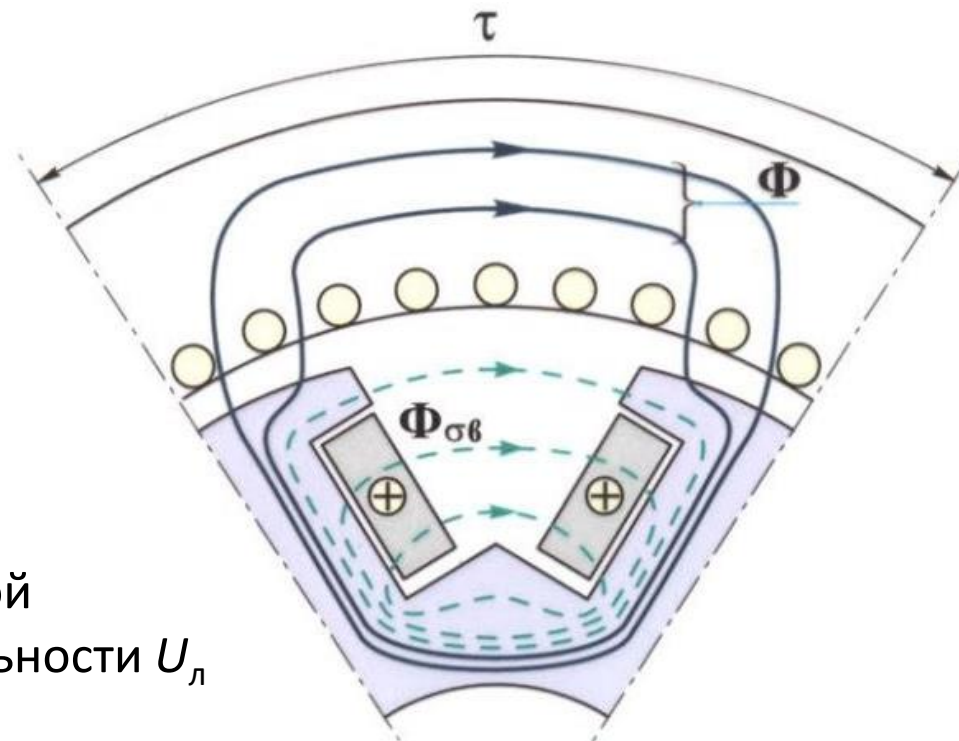
$$K_{\text{и}} = \frac{\sqrt{\sum U_v^2}}{U_H} \cdot 100\%$$

Допустимые искажения:

- в сетях до 1 кВ $K_{\text{и}} < 8\%$
- в сетях 35 кВ $K_{\text{и}} < 4\%$

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

Но высшие гармоники Φ_f создают добавочные потери → надо их уменьшать



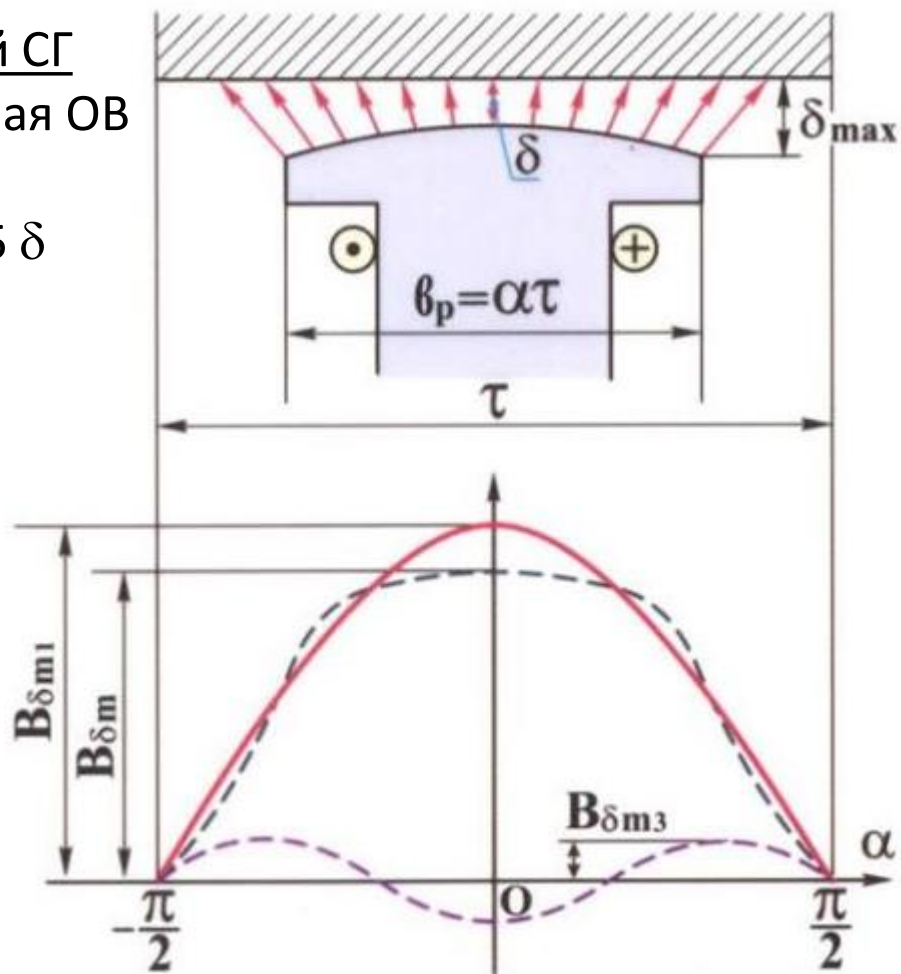
Холостой ход синхронного генератора

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

Явнополюсный СГ
сосредоточенная ОВ

$$F_B = \text{const}$$

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

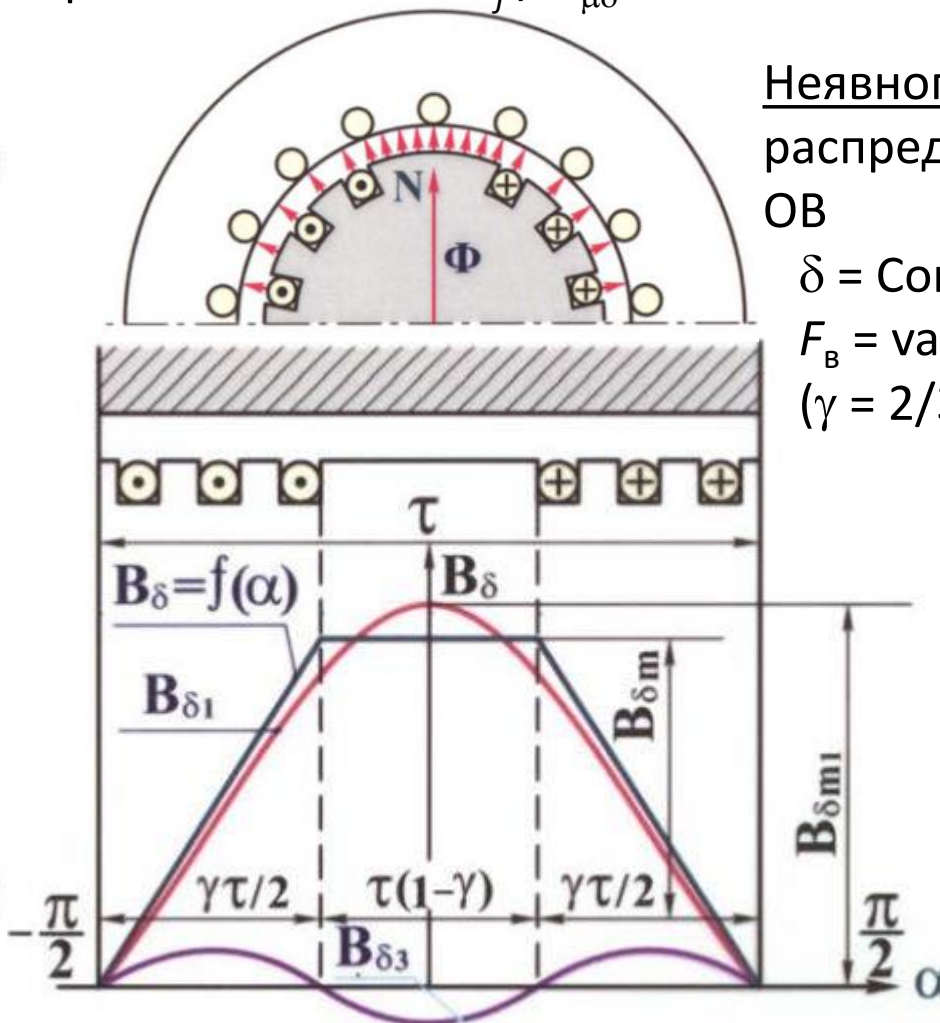


Неявнополюсный
распределенная
ОВ

$$\delta = \text{Const}$$

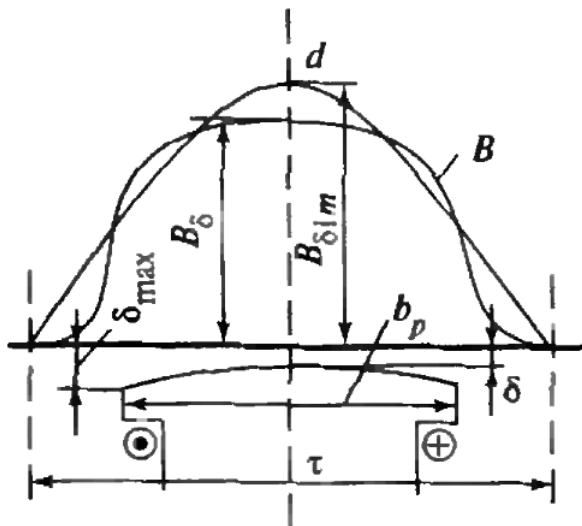
$$F_B = \text{var}$$

$$(\gamma = 2/3 \tau)$$



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 $B_{\delta cp}$ – 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

где $B_{\delta d1}$ – действ. значение основной гармонической индукции

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

Холостой ход синхронного генератора

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

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

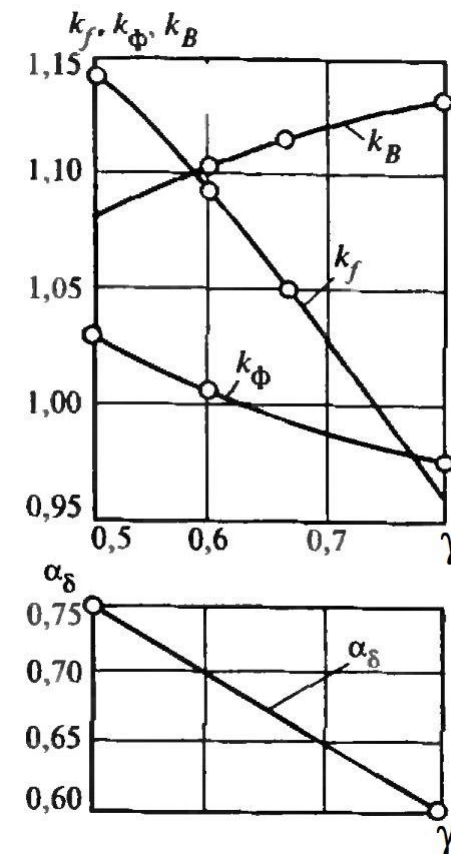
При $\delta = \text{const}$ и индукции, пропорциональной МДС, можно записать:

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

При трапецеидальной форме МДС

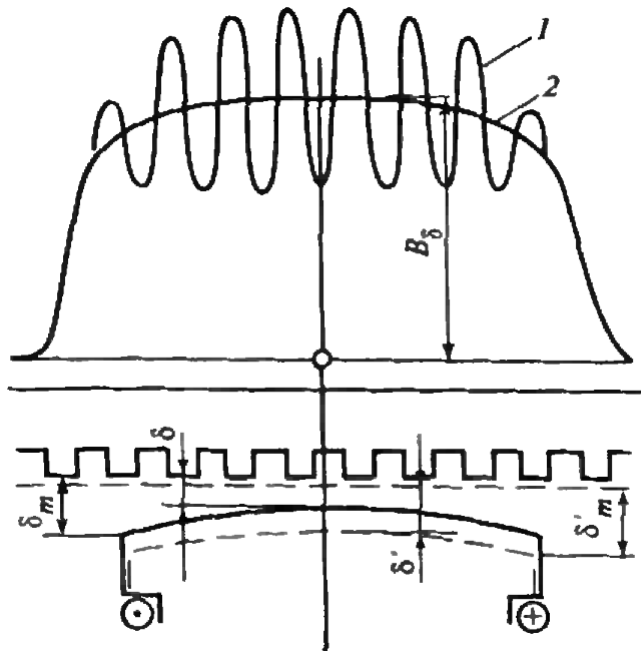
$$\alpha_\delta = \frac{B_{\delta \text{cp}}}{B_\delta} = \frac{F_{f \text{cp}}}{F_{fm}} = 1 - 0,5\gamma$$

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

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

$$\text{при } b_{\pi} > \delta \quad \gamma \approx \frac{\left(\frac{b_{\pi}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{\pi}}{\delta}} \quad \text{иначе } \gamma = \frac{4}{\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{a}} \arctg \frac{1}{\sqrt{a}} - \ln \sqrt{1 + \frac{1}{a}} \right) \quad \text{где } a = \left(\frac{2\delta}{b_{\pi}} \right)^2$$

Холостой ход синхронного генератора

Характеристика холостого хода

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

Остаточная ЭДС 2...3% U_H

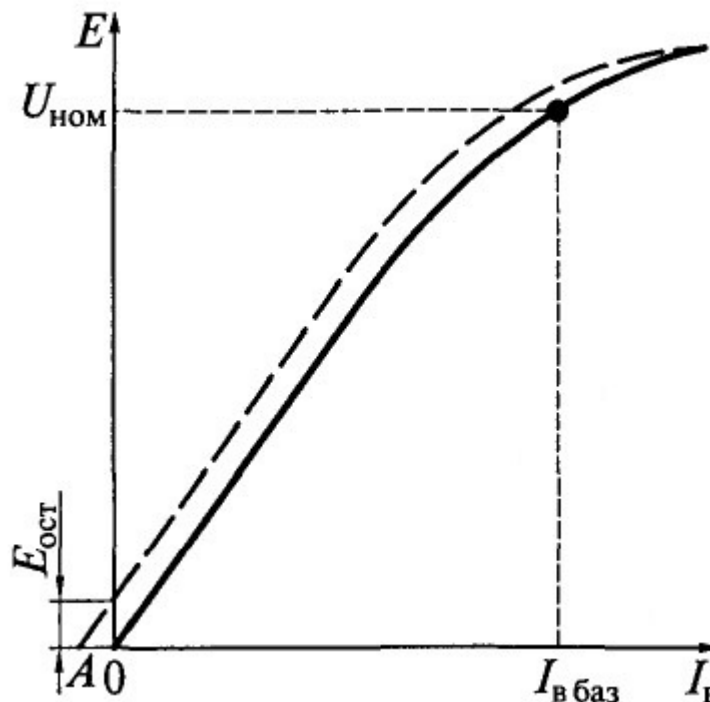
Базовое значение I_B соотв. U_H

Система относительных единиц

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

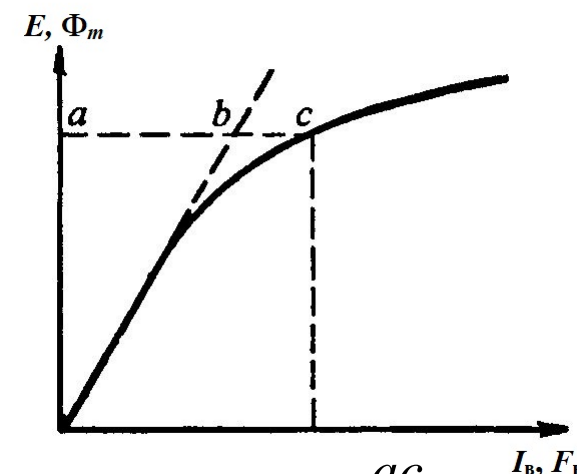
Нормальные характеристики ХХ

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



ХХХ эквивалентна характеристике намагничивания $\Phi_m = f(F_B)$

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



$$k_{\text{нас}} = \frac{ac}{ab}$$

– коэффициент насыщения магнитной цепи

Холостой ход синхронного генератора

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

- задаемся E (обычно $0,5U_H$, $1,0U_H$, $1,08U_H$, $1,2U_H$, $1,3U_H$)
- 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

$$F_\delta + F_{z1} + F_{a1} + F_m + F_{a2} = F_B = I_B w_B$$

Наибольшее падение магн.напряжения – в зазоре где индукция на оси полюса

$$F_\delta = \frac{1}{\mu_0} B_\delta \delta'$$

$$B_\delta = \Phi_m / \alpha_\delta \tau l_\delta$$

Падения магн.напряжения в стальных участках

$$F_x = H_x l_x$$

Напряженность H_x по кривой $B(H)$ для индукции

$$B_x = \Phi_x / S_x$$

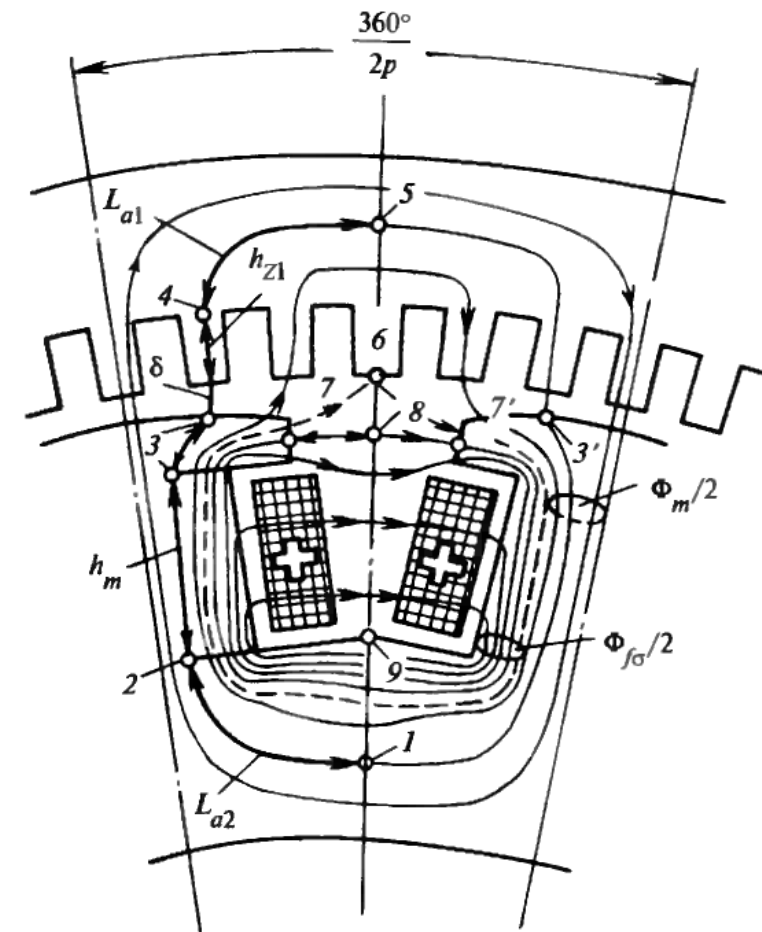
Значение потока $\Phi_x \rightarrow \Phi_m$ или $\Phi_m + \Phi_{\sigma B}$

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 \rightarrow характер РЯ

Направление Φ_B – по направлению I_B (ось d)

Направление E_{10} – отстает от Φ_B 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 $+\pi/2$

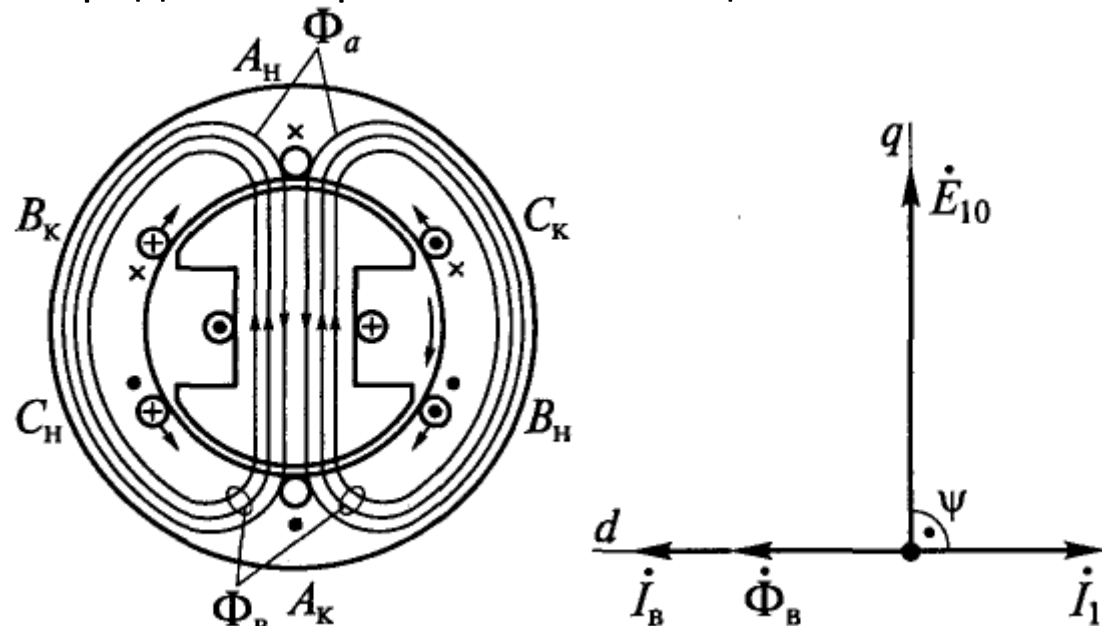
1. Индуктивная нагрузка (I_1 отстает от E_{10} на $\pi/2$)

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

\rightarrow отстающий I_1 (знаки в проводниках)

$\rightarrow \Phi_a$ по оси d против Φ_B

\rightarrow продольная размагничивающая РЯ



Направления сил под полюсом

– скомпенсированы ($M = 0, P_1 = 0$)

Работа синхронного генератора под нагрузкой

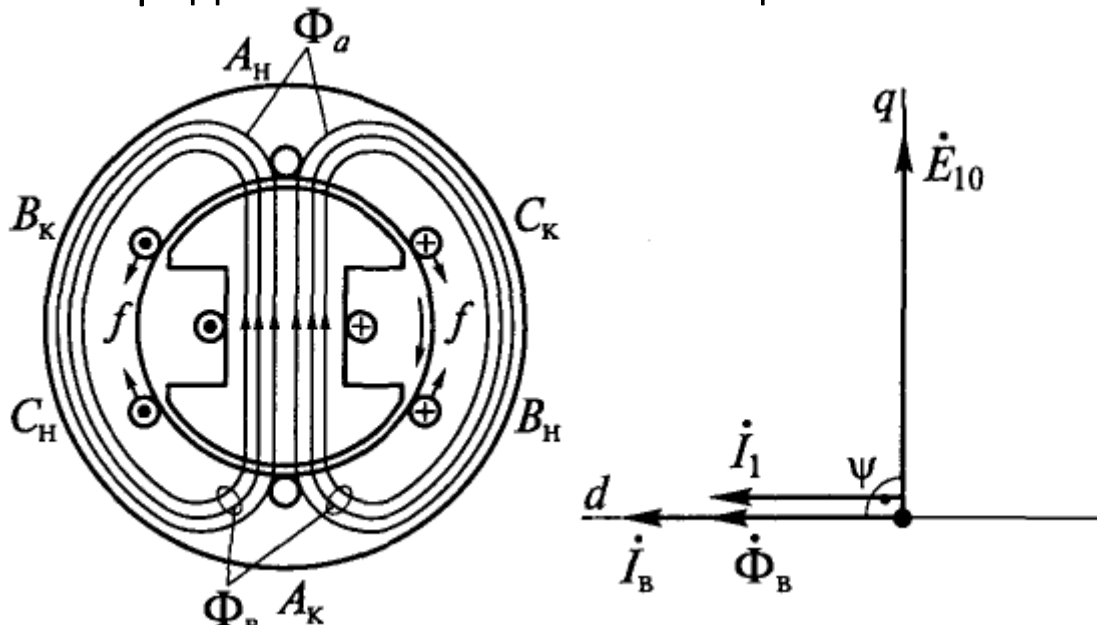
Реакция якоря

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

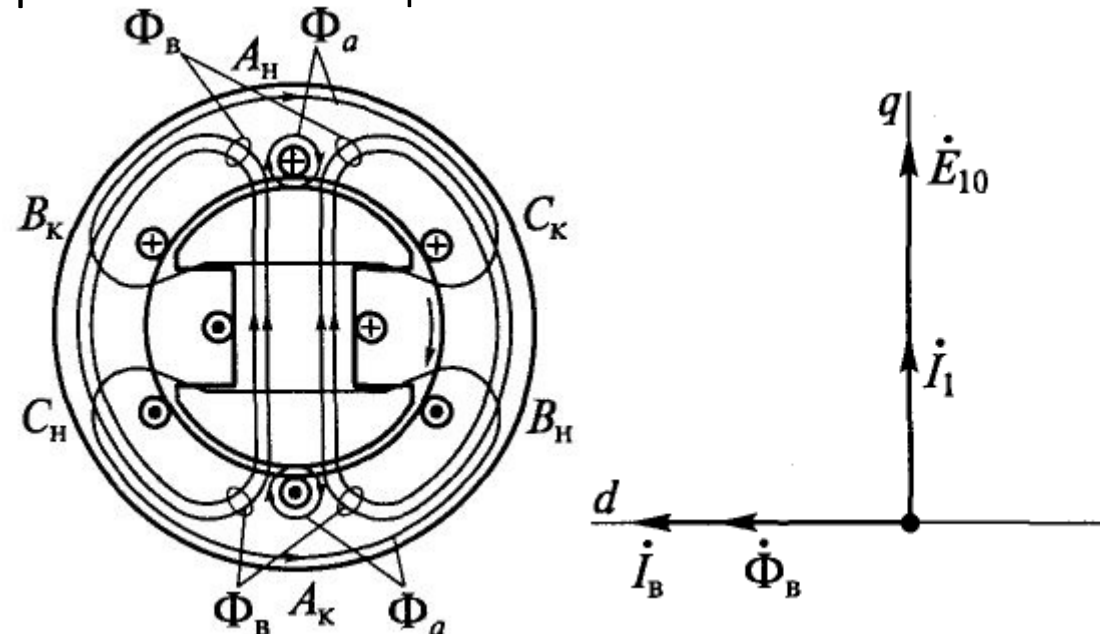


Направления сил под полюсом
– скомпенсированы ($M = 0, P_1 = 0$)

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

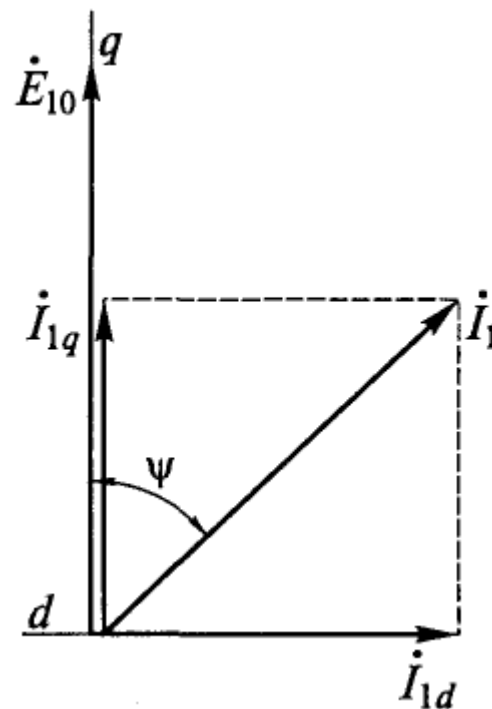
$$I_{1d} = I_1 \sin \psi$$

$$I_{1q} = I_1 \cos \psi$$

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:

$$\Phi_2 = \Phi_{\text{в}} + \Phi_{\text{в}\sigma} \rightarrow E_{10}$$

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

По 2-з-ну Кирхгофа для фазы якоря $\dot{E}_{10} + \dot{E}_a + \dot{E}_{a\sigma} = \dot{I}_1 Z_{\text{н}} + \dot{I}_1 r_1$

Поток якоря создается током I_1

и наводит ЭДС, пропорциональные I_1 $\dot{E}_a = -j\dot{I}_1 x_a$ $\dot{E}_{a\sigma} = -j\dot{I}_1 x_{\sigma}$

Заменив $I_1 Z_{\text{н}}$ на U_1 запишем уравнение напряжения СГ

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

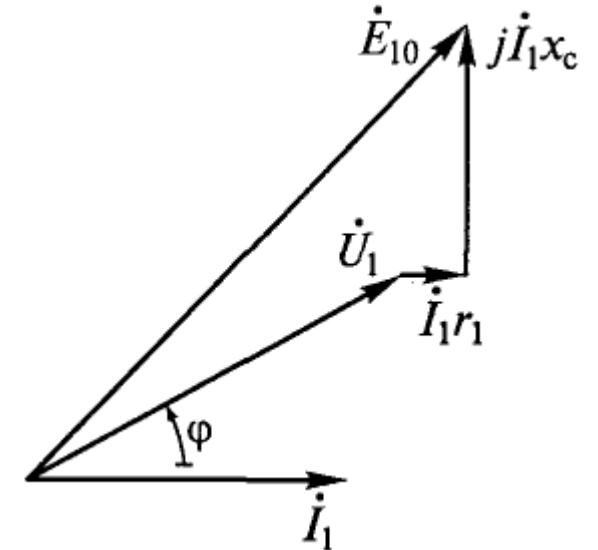
здесь x_a – индуктивное сопротивление реакции якоря

$x_{a\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния ОЯ

x_c – синхронное индуктивное сопротивление ОЯ ($x_c = x_a + x_{a\sigma}$)

Для E_{10} находят $I_{\text{в}}$ по спрямленной хар-ке ХХ

Векторная диаграмма



значения параметров в о.е.

- $x_{c*} = 1,2 \dots 2,4$
- $x_{a*} = 1,1 \dots 2,3$
- $x_{a\sigma*} = 0,08 \dots 0,15$
- $r_{1*} = 0,002 \dots 0,02$

$$Z_{\sigma} = \frac{U_{1\phi}}{I_{1\phi}}$$

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 вращаются 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 -х 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

$\alpha = b_p / \tau$ 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 $\Phi_{в}$, 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

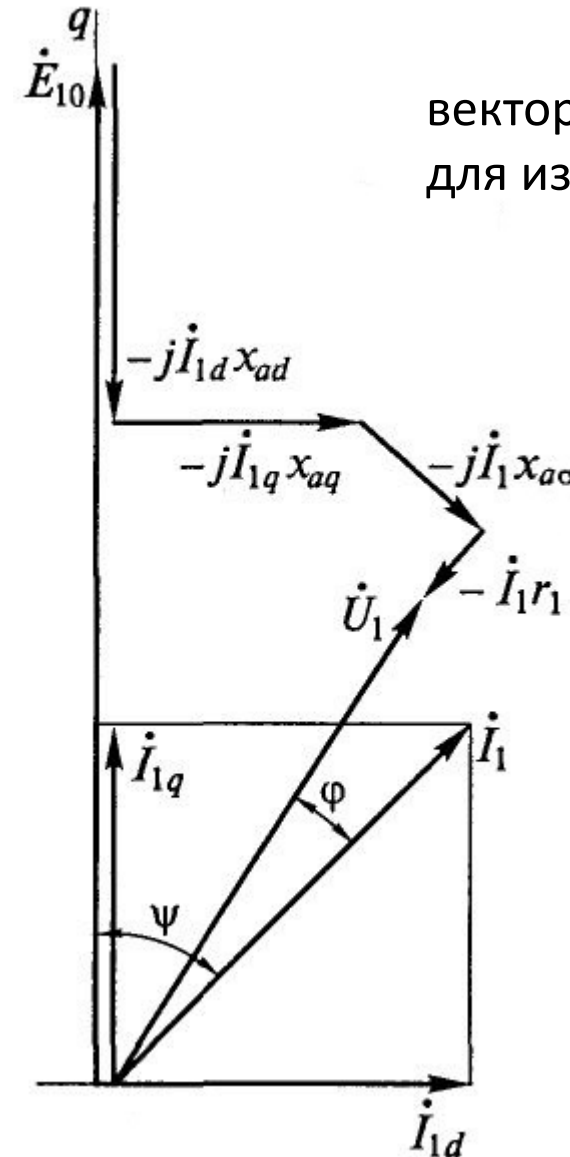
$$\dot{E}_{ad} = -j\dot{I}_{1d}x_{ad} \quad \dot{E}_{aq} = -j\dot{I}_{1q}x_{aq}$$

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

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

Тогда уравнение напряжения явнополюсного СГ

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



векторная диаграмма для известных E_{10} , I_1 и ψ

$$\dot{I}_1 \rightarrow \dot{I}_{1d} + \dot{I}_{1q}$$

$$\dot{E}_{10} - j\dot{I}_{1d}x_{ad}$$

$$-j\dot{I}_1x_{a\sigma}$$

$$-\dot{I}_1 r_1$$

$$= \dot{U}_1$$

Напряжение явнополюсного СГ

Слагаемое $I_1 x_{a\sigma}$ тоже удобно выразить через I_{1d}, I_{1q}

$$-j\dot{I}_1 x_{a\sigma} = -j(\dot{I}_{1d} + \dot{I}_{1q})x_{a\sigma}$$

Тогда уравнение U можно записать проще

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

или
$$\dot{U}_1 = \dot{E}_{10} - j\dot{I}_{1d}x_d - j\dot{I}_{1q}x_q - \dot{I}_1 r_1$$

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

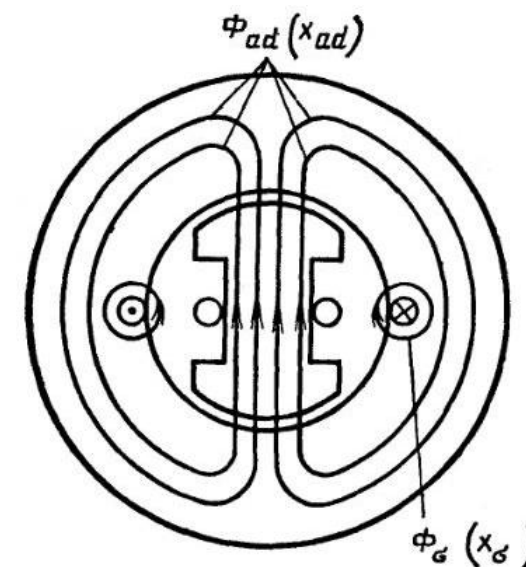
Насыщение стали:

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

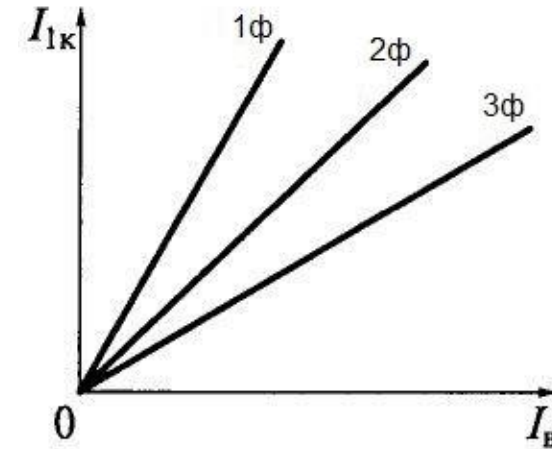
Характеристики синхронного генератора

Характеристика холостого хода

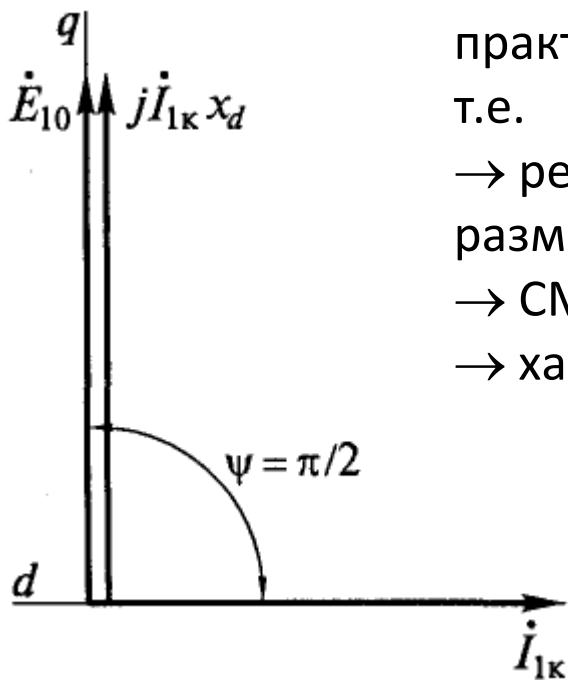
$$E_{10} = f(I_B) \text{ при } I_1 = 0 \text{ и } n_2 = n_1 = \text{const} \text{ (см. выше)}$$

Характеристика короткого замыкания (3-фазное КЗ)

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

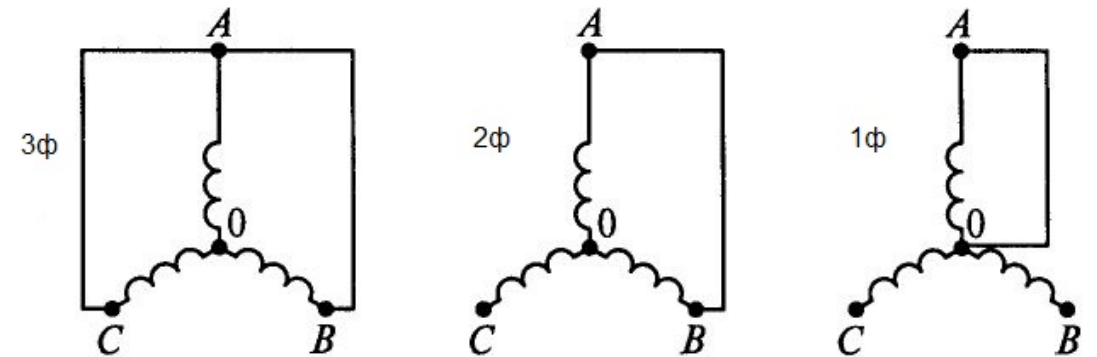


Из-за малого r_1 ток $I_{1к}$ практически индуктивный, т.е. $\dot{I}_{1к} = \dot{I}_{1d}$
 → реакция якоря продольная размагничивающая
 → СМ ненасыщена
 → характеристики линейные



Уравнение напряжений (при $U_1 = 0$ и $r_1 = 0$)

$$\dot{E}_{10} = j\dot{I}_{1к}x_d$$



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

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

По хар-кам ХХ и КЗ можно найти x_d ненасыщенной СМ

$$x_d = \frac{E_{10}}{I_{1к}}$$

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

$$\text{ОКЗ} = I_{1к} / I_{1н} = I_{1к*}$$

при $I_{B \text{ баз}}$ обеспечивающем $E_{10} = U_{\text{НОМ}}$

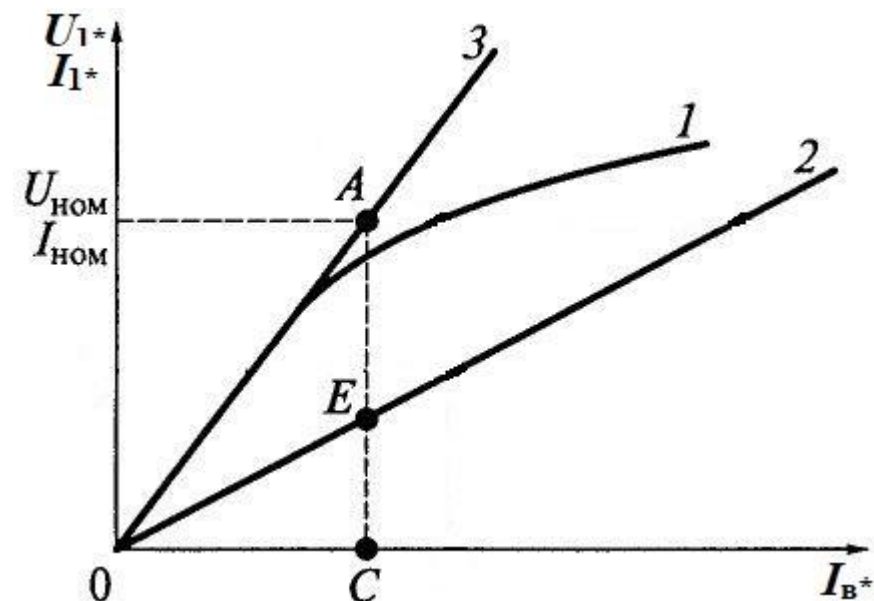
По 3 для $E_{10} = U_{\text{НОМ}} \rightarrow I_B$ (A \rightarrow C)

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

В о.е. $I_{\text{НОМ}} = U_{\text{НОМ}} = 1$ (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)

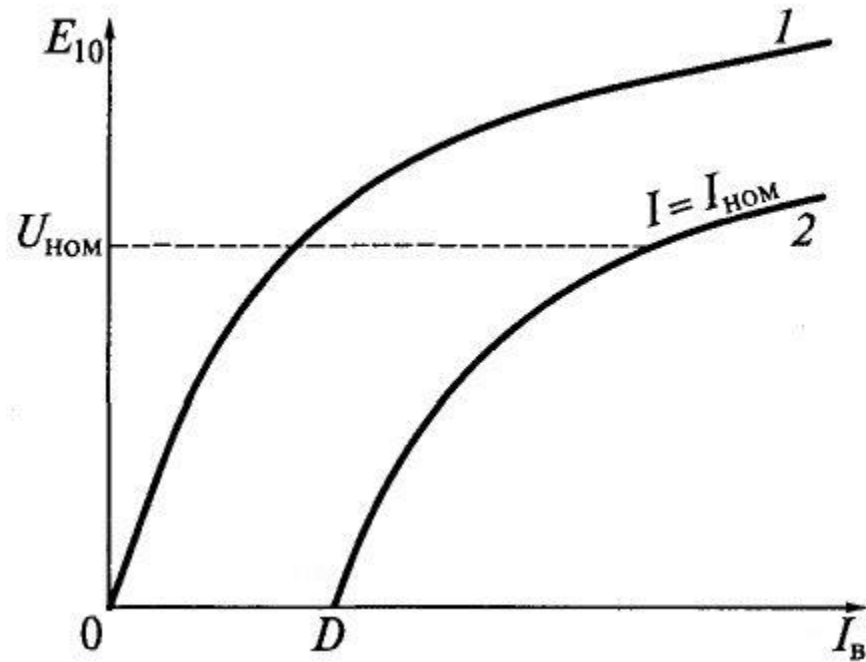
В гидрогенераторах ОКЗ = 1,0...1,4

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

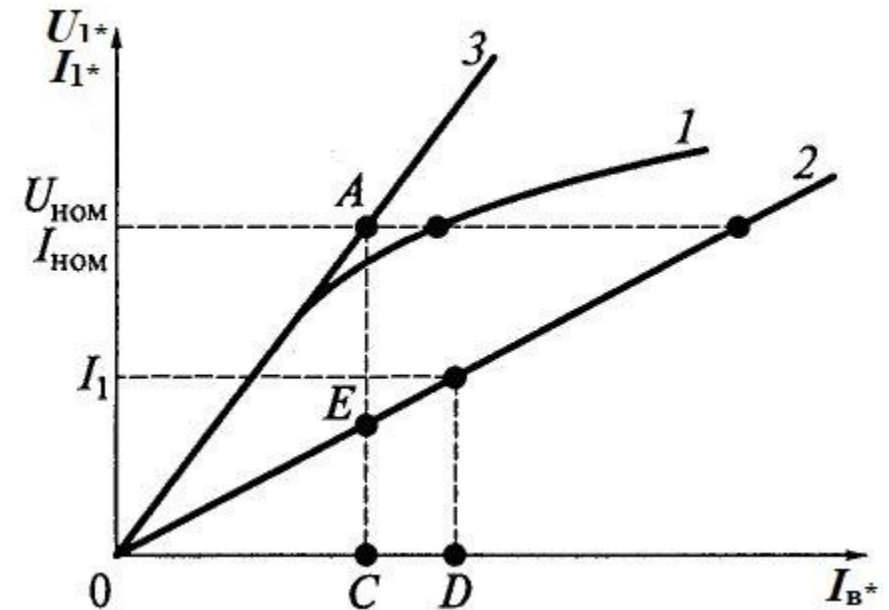
$U_1 < E_{10}$ при одинаковом I_B

- 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. $D \rightarrow I_B$, 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 $n_2 = n_1 = \text{const}$

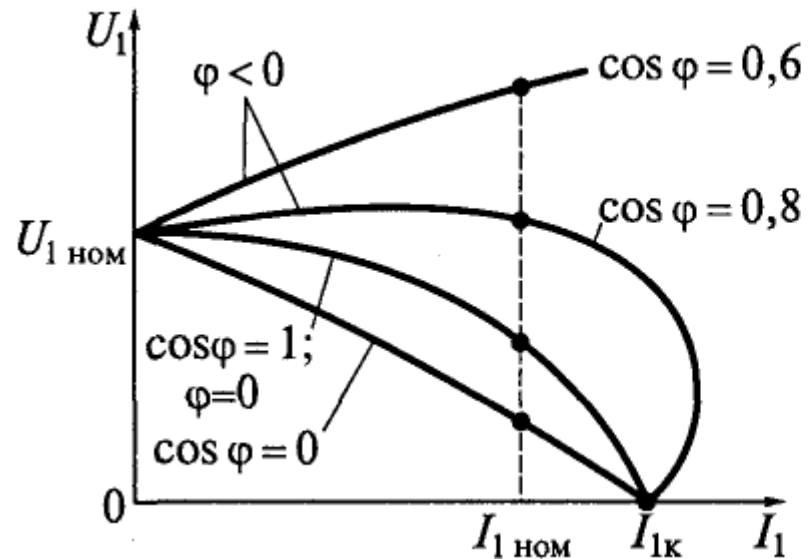
При *индуктивной* нагрузке ($\varphi=90^\circ$, $\cos\varphi = 0$)

- продольная размагничив. РЯ → снижение Φ (и ЭДС)

- падение напряжения $I_1(r_1 + jx_{ac})$

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

- поперечная размагничивающая РЯ



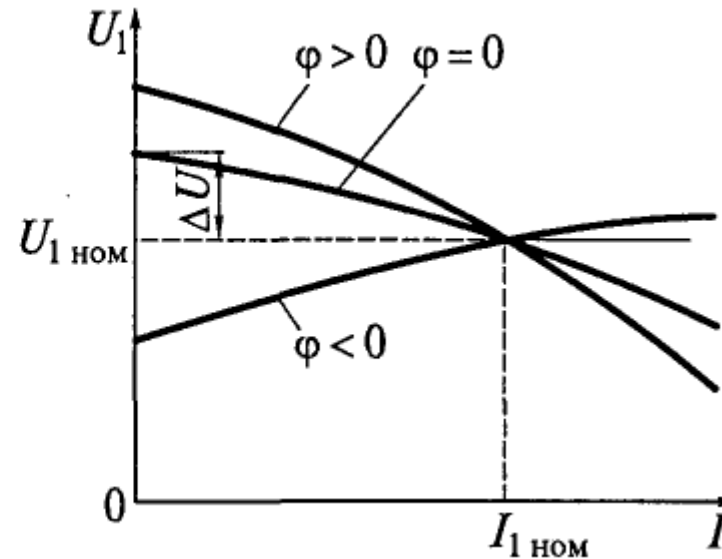
При увеличении I_1

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

- продольная намагничивающая РЯ

U_1 растет, но ограничено насыщением

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



При уменьшении I_1

При КЗ $U_1 = 0$ и ток $I_1 = I_{1к}$

Изменение напряжения при сбросе нагрузки

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

Номинальное ΔU_H

– при $\cos\varphi_{\text{ном}}$

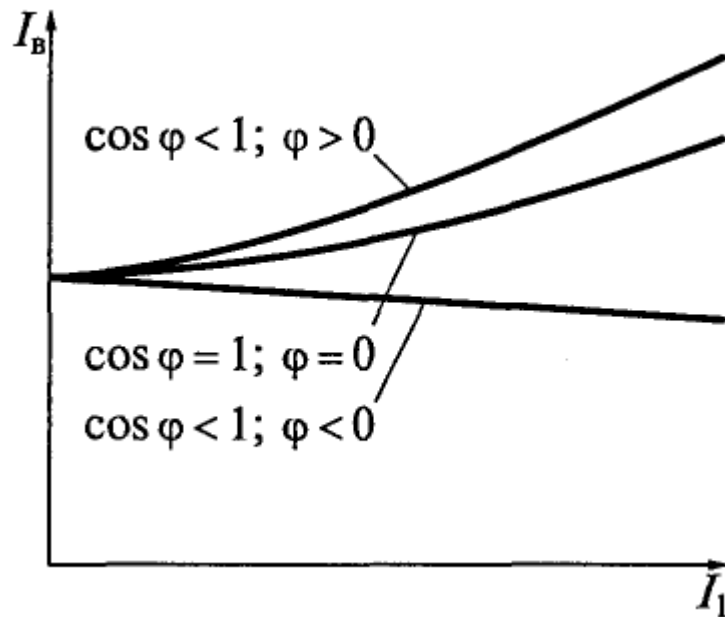
Характеристики синхронного генератора

Регулировочные характеристики

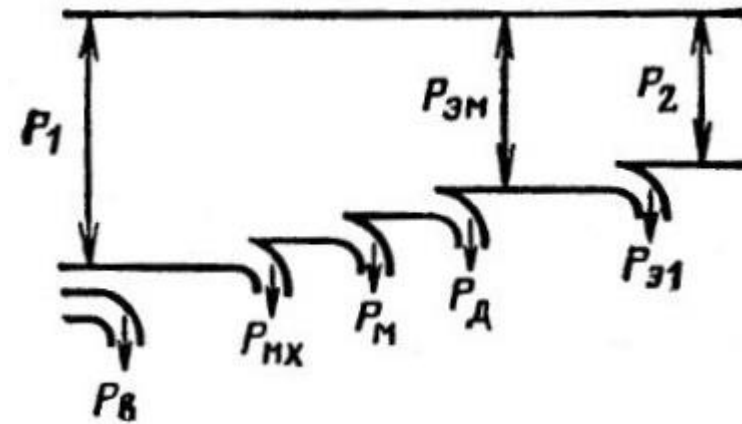
$I_B = f(I_1)$ при $U_1 = \text{Const}$, $\cos\varphi = \text{Const}$ и $n_2 = n_1 = \text{Const}$

– обратны внешним характеристикам

- как надо изменять I_B для поддержания U_1 с изменением I_1 при пост. $\cos\varphi$



Энергетическая диаграмма СГ



P_1 – мех. мощность на валу генератора

- $P_{мх}$ – механические потери
- $P_{м}$ – магнитные потери в стали статора
- $P_{д}$ – доб. потери в стали статора и ротора
- $P_{эм}$ – электромагнитная мощность

$$P_{эм} = mE_{01}I_1 \cos\psi$$

- $P_{э1}$ – электрические потери в статоре
- P_2 – выходная электрическая мощность

P_B – потери на возбуждение