



# ТРИФАЗНІ СИНХРОННІ МАШИНИ

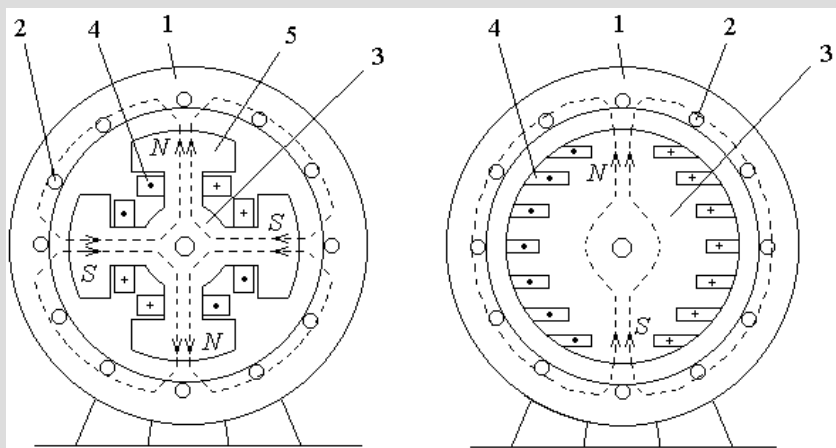
*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*

Синхронні машини використовують в якості генераторів, двигунів та компенсаторів змінного струму.

Синхронною (з грецької «одночасною») називають електричну машину змінного струму, ротор якої має частоту обертання магнітного поля статора. Останню називають синхронною

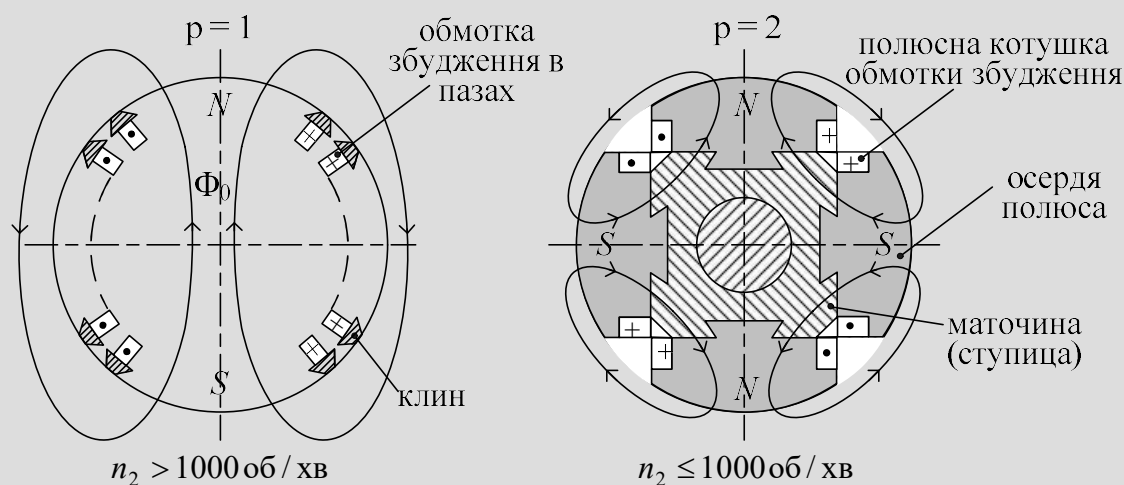
$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} \quad p - \text{число пар полюсів статора}$$

При частоті  $f=50$  Гц синхронна частота обертання визначається числом пар полюсів машини  $n_0 = \frac{3000}{p}$

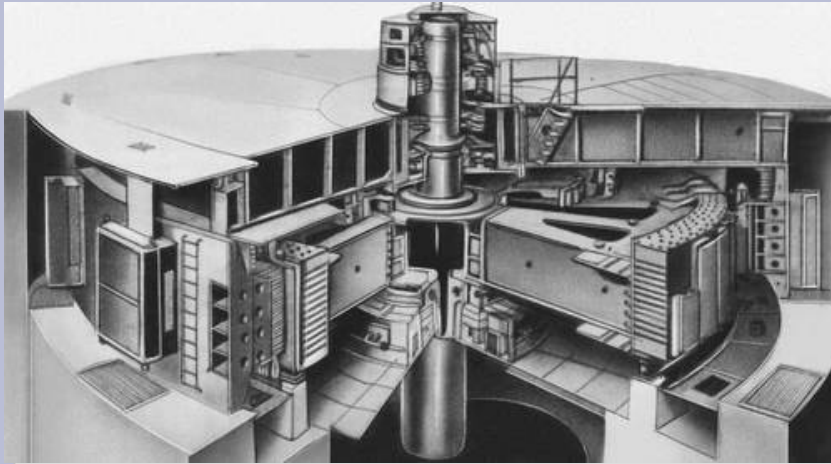


Конструктивна схема явнополюсної (а) та неявнополюсної (б) синхронної машини:

- 1 – сталеве осердя статора;
- 2 – трифазна обмотка;
- 3 – корпус ротора;
- 4 – обмотка збудження; – полюси ротора



По способу збудження обмотки ротора синхронні машини бувають незалежного збудження та з самозбудженням



Вигляд гідрогенератора з розрізом (а) та турбогенератора (б)

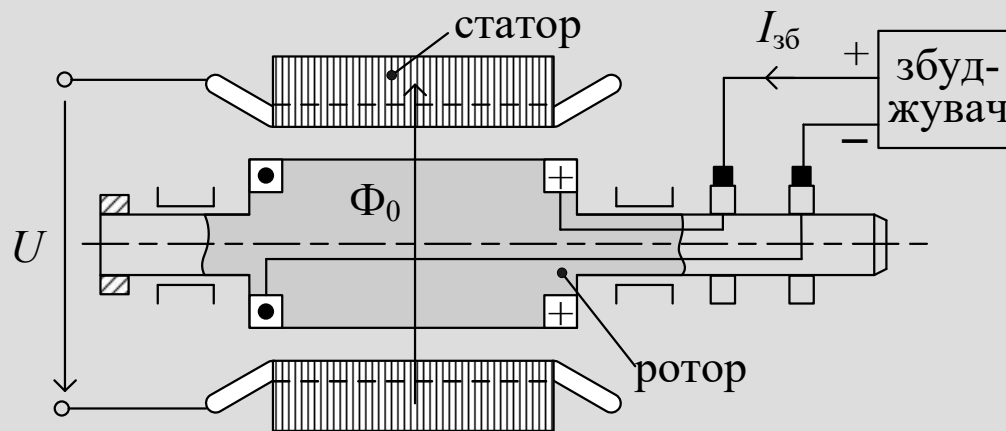
## Принцип дії синхронного генератора

Діюче значення ЕРС однієї фази обмотки статора  $E = 4,44w \cdot f \cdot \Phi_m k_{обм1}$

Частота постійна  $f = \frac{p \cdot n}{60}$        $E = 4,44w \cdot \frac{p \cdot n}{60} \cdot \Phi_m k_{обм1}$        $E = c_E \cdot n \cdot \Phi_m$

$$c_E = 4,44 \frac{p}{60} w \cdot k_{обм1}$$

У синхронного генератора швидкість  $n=const$



Діапазон потужностей синхронних електричних машин дуже широкий: від кількох ват (мікромашини) до тисячі й більше МВт (турбогенератори, гідрогенератори, надпотужні двигуни). У залежності від числа обертів ротори великих синхронних електричних машин бувають двох видів:

- неявнополюсні, якщо  $n_2 > 1000$  об/хв;  
явнополюсні, якщо  $n_2 \leq 1000$

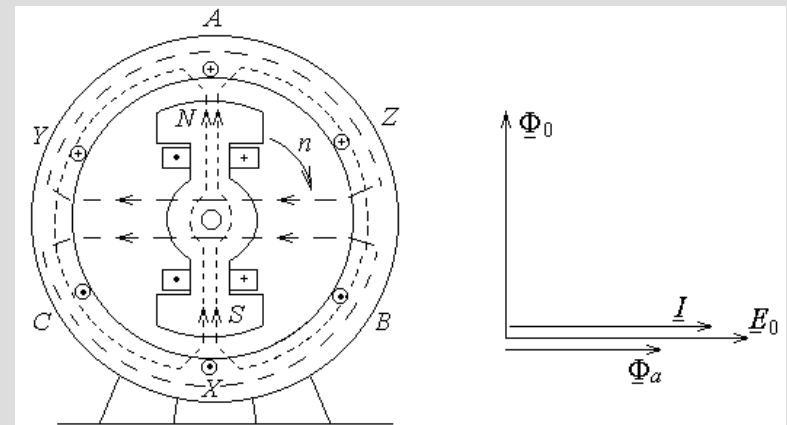
## Реакція якоря у синхронному генераторі

Під реакцією якоря розуміють дію магнітного поля статора на основне магнітне поле машини. У синхронного генератора реакція якоря залежить не тільки від величини струму статора, але й від характеру навантаження

Розглянемо три граничні випадки реакції якоря:

**Активне навантаження.** При активному навантаженні з опором  $R$  струм в кожній фазі статора будуть співпадати по фазі з її ЕРС ( $\Psi = 0^\circ$ )

Вісь поля, утвореного статором, перпендикулярна до осі поля полюсів ротора (поздовжнього поля), поле статора називають поперечним

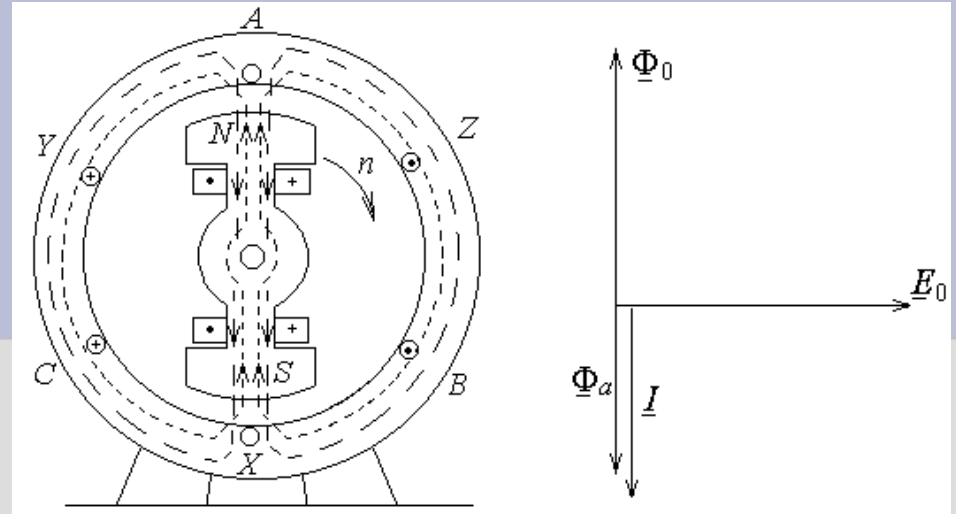


поперечна реакція якоря

## Індуктивне навантаження

При чисто індуктивному навантаженні генератора струм у фазній обмотці статора А-Х відстає за фазою від ЕРС на чверть періоду ( $\Psi=90^\circ$ )

Поле якоря діє вздовж основного поля ротора, його називають повздовжньо-розмагнічувальним

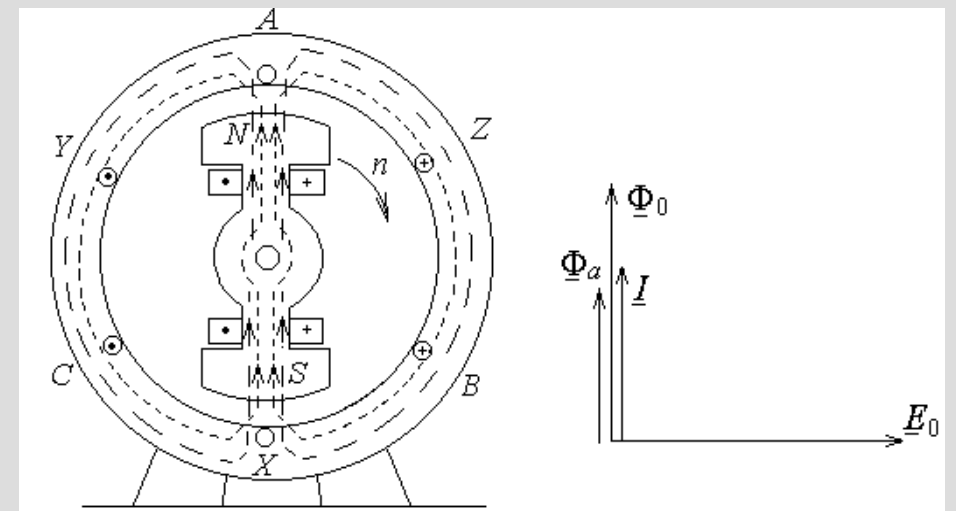


## Ємнісне навантаження

При чисто ємнісному навантаженні ЕРС  $E$  буде та ж сама, а струм  $I$  в фазі А-Х випереджатиме  $E$  на  $90^\circ$  ( $\Psi= - 90^\circ$ )

При ємнісному навантаженні поле статора називають повздовжньо-намагнічувальним.

У синхронному генераторі характер реакції якоря визначається через характер навантаження.



У загальному випадку навантаження у синхронного генератора змішане, тому активна складова струму забезпечує потік поперечної реакції якоря, а реактивна складова струму – потік повздовжньої реакції якоря

## Рівняння електричного стану та векторна діаграма синхронного генератора

ЕРС, струм та напругу для однієї фазної обмотки статора

Розрізняють потоки:

- Потік обмотки ротора (збудження)  $\Phi_0$  наводить  $E_0$ ;
- Потік реакції якоря  $\Phi_a$  наводить  $E_a = -j \cdot I \cdot X_a$   $X_a$  – індуктивний опір реакції якоря
- Потік розсіювання  $\Phi_s$  наводить ЕРС розсіювання  $E_s = -j \cdot I \cdot X_s$   $X_s$  – індуктивний опір розсіювання обмотки статора

За другим законом Кірхгофа  $E_0 + E_a + E_s = I \cdot R + I \cdot Z_H = I \cdot R + U$

$$\underline{U} = \underline{E}_0 + \underline{E}_a + \underline{E}_s - \underline{I} \cdot R = \underline{E}_0 - j \cdot \underline{I} (X_a + X_s) - \underline{I} \cdot R \quad \underline{U} = \underline{E}_0 - j \cdot \underline{I} \cdot X_c - \underline{I} \cdot R$$

$X_c = X_a + X_s$  – синхронний індуктивний опір обмотки статора

$$R \ll X_c \quad \underline{U} = \underline{E}_0 - j \cdot \underline{I} \cdot X$$

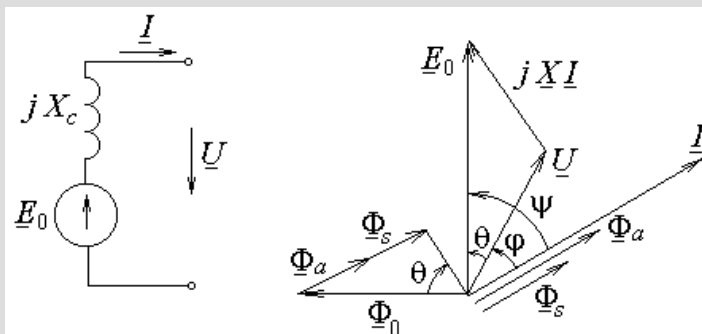


Схема заміщення (а) та векторна діаграма (б) синхронного генератора

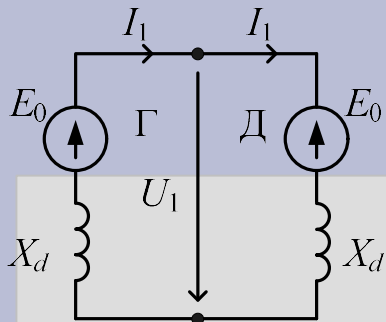
Для активно-індуктивного навантаження струм  $I$  відстає за фазою від ЕРС  $E_0$  на кут  $\Psi = \arctg \frac{X + X_H}{R + R_H}$

$R, X$  – внутрішній опір синхронного генератора (зазначений у каталозі);  $R_H, X_H$  – опір навантаження

Між напругою  $U$  та струмом  $I$  зазначаємо кут  $\varphi$ . Між  $E_0$  та  $U$  визначають кут  $\theta$  – це кут вильоту СГ

$$\Psi = \theta + \varphi$$

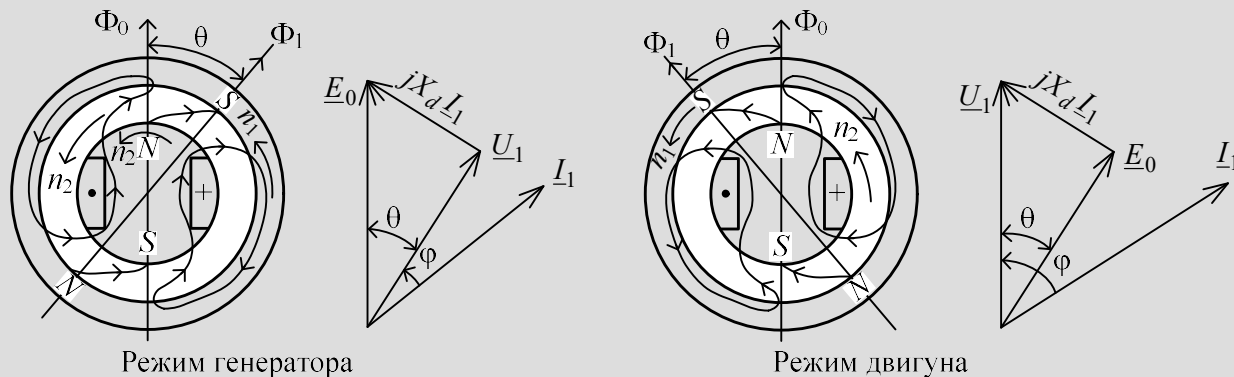
## Спрощена схема заміщення синхронної електричної машини



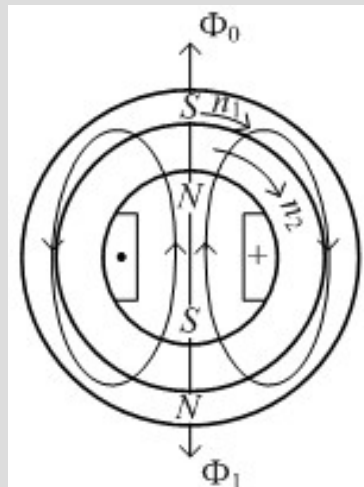
Спрощена схема заміщення синхронної електричної машини, яку можна вважати джерелом ЕРС  $E_0$ , що наводиться магнітним потоком ротора  $\Phi_0$  в обмотці статора, яка підключена до електричної мережі з напругою  $U_1$ . При цьому ця синхронна машина може працювати як у режимі генератора (Г), так і в режимі двигуна (Д).

Резистивний опір обмотки статора  $R_1$  в синхронній електричній машині набагато менший за індуктивний опір  $X_d$ , який складається з основного, пов'язаного з магнітним потоком ротора  $\Phi_0$ , і додаткового, від потоків розсіяння навколо обмотки статора  $\Phi_1$ . У наслідок того, що  $R_1 \ll X_d$ ,  $R_1$  можна не вводити в рівняння електричної рівноваги синхронної машини, яке буде мати вигляд:

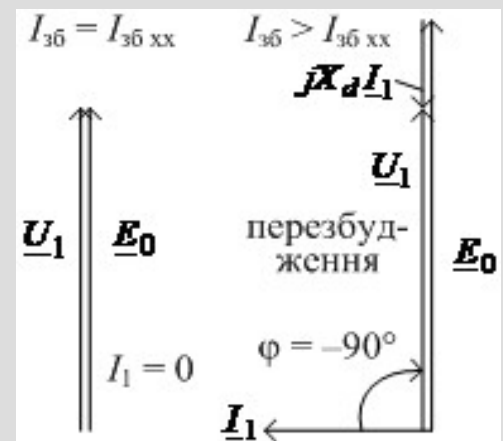
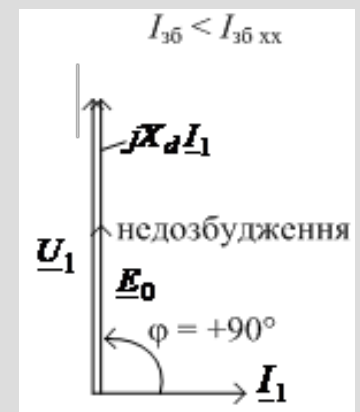
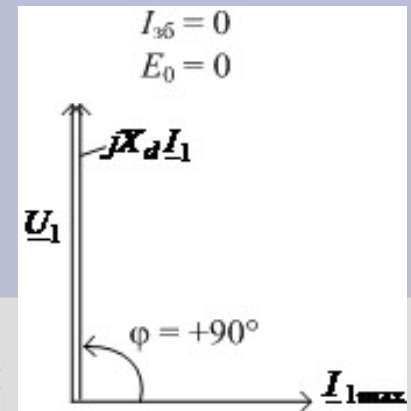
- для генераторного режиму  $\underline{U}_1 = \underline{E}_0 - jX_d \underline{I}_1$ ;
- для двигунного режиму  $\underline{U}_1 = \underline{E}_0 + jX_d \underline{I}_1$ .



Синхронна електрична машина може працювати також у режимі синхронного компенсатора. Особливість цього режиму полягає в тому, що ротор не з чим ні з'єднаний, тобто механічна енергія не передається. У той же час, синхронна машина підключена до електричної мережі з напругою  $U_1$ , в обмотці статора проходить струм  $I_1$ . Такій ситуації відповідає  $P = U_1 I_1 \cos \varphi = 0$ , що можливо тільки за умови  $\varphi = \pm 90^\circ$ . При цьому  $\underline{U}_1 = \underline{E}_0 + jX_d \underline{I}_1$ , а кут  $\theta = 0^\circ$ . Тобто магнітні осі обертового магнітного поля статора й ротора спрямовані зустрічно, їх полюси притягуються один до одного й міцно утримуються взаємно нерухомими із-за відсутності зовнішнього моменту.

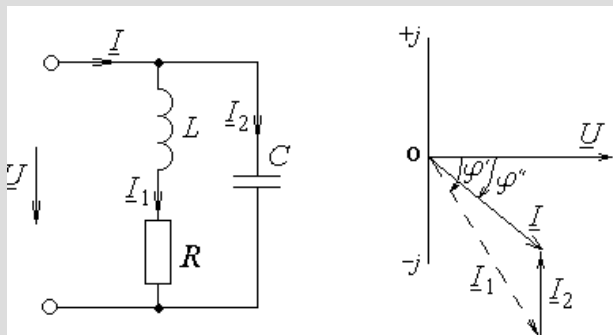


Якщо в ротор не подається струм збудження ( $I_{зб} = 0$ ), в обмотці статора не наводиться ЕРС  $E_0$  і вона являє собою котушку з індуктивним опором  $X_d$ , увімкнуту на напругу  $U_1$ . Цьому відповідає  $I_{1max} = \frac{U_1}{X_d}$ . У міру того, як збільшується струм збудження, зменшується струм в обмотці статора  $I_1 = \frac{U_1 - E_0}{X_d}$  і при  $U_1 = E_0$  стає рівним нулю. При подальшому збільшенні струму збудження струм в обмотці статора змінює свій напрям, і синхронний компенсатор переходить в ємнісний режим.



Таким чином, при паралельній роботі з електричною мережею синхронний компенсатор може покращувати її загальний  $\cos\phi$ .

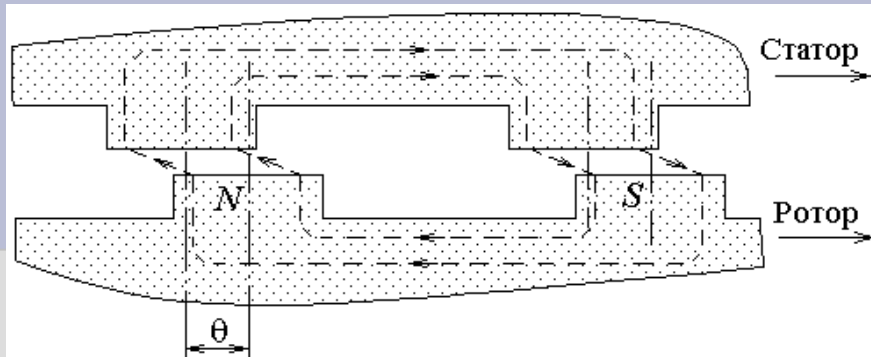
## Підвищення коефіцієнту потужності



Для підвищення  $\cos\phi$  до кола з активно-індуктивними елементами, що є типовим для багатьох споживачів, паралельно підключають компенсаційний конденсатор С, це забезпечує

- зменшення зсуву фаз між струмом джерела і його напругою  $\phi' > \phi''$ ;
- підвищення коефіцієнта потужності кола  $\cos\phi$
- зменшенн струму джерела  $I < I^1$

## Конфігурація магнітних полів у синхронному генераторі



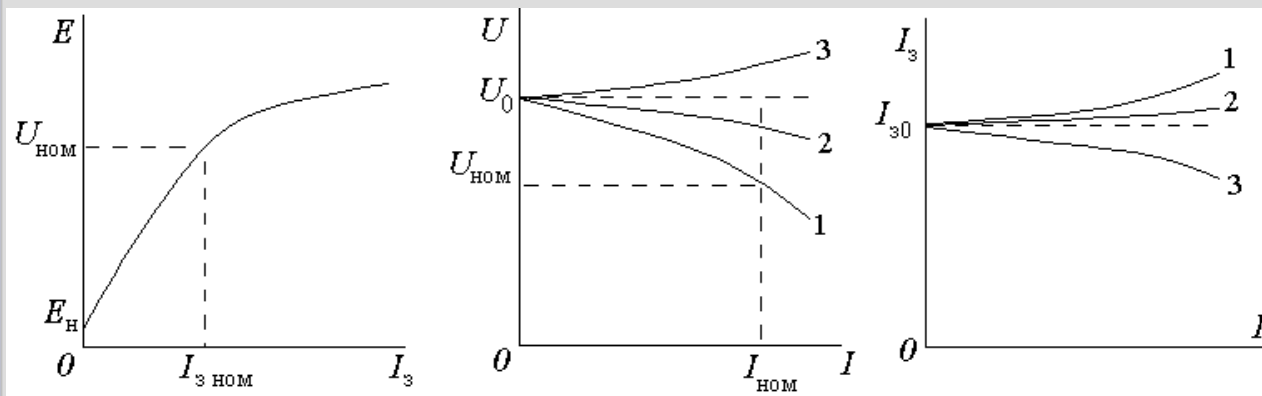
Фізична суть кута вильоту  $\theta$  полягає в тому, що це кут між віссю полюсів ротора та віссю умовних полюсів статора. В режимі генератора ведучим є ротор

## Характеристики синхронного генератора

*Характеристика неробочого ходу* – це залежність ЕРС генератора від струму збудження  $E(I_3)$  при  $I=0$  та при  $n = n_{\text{НОМ}}$

*Зовнішня характеристика* – це залежність напруги генератора від струму в навантаженні  $U(I)$  при  $I_3 = I_{3 \text{ НОМ}}$ ;  $\cos\varphi = \text{const}$ ;  $n = n_{\text{НОМ}}$

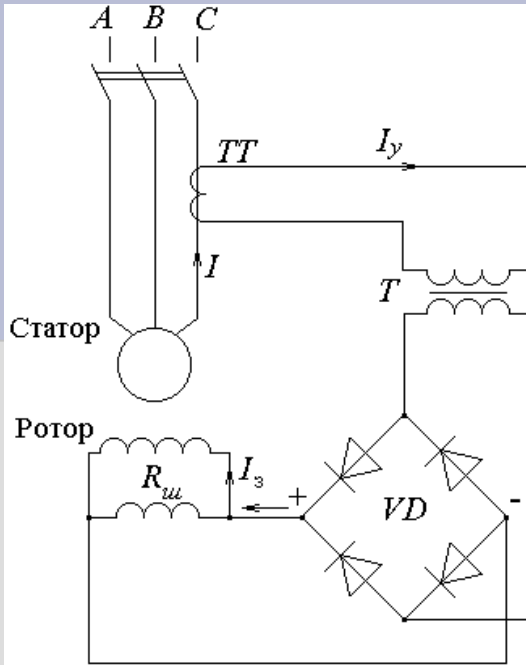
*Регульовальна характеристика* – це залежність струму збудження від струму навантаження  $I_3(I)$  при умові незмінної напруги  $U = \text{const}$ , а саме  $U = U_{\text{НОМ}}$ ;  $\cos\varphi = \text{const}$ ;  $n = n_{\text{НОМ}}$



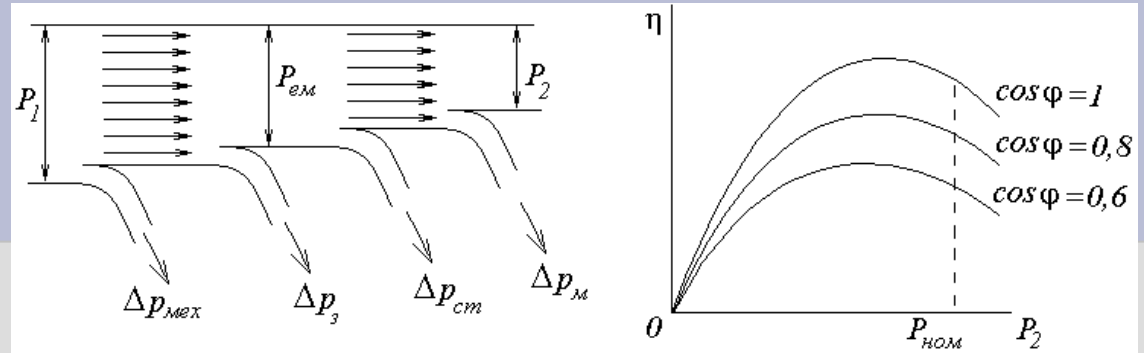
Характеристики синхронного генератора:

- 1 -  $\cos\varphi < 1$ ,  $\varphi > 0$  ;
- 2 -  $\cos\varphi = 1$ ,  $\varphi = 0$  ;
- 3 -  $\cos\varphi < 1$ ,  $\varphi < 0$

## Втрати та ККД синхронного генератора



Регулювання струму збудження  $I_3$ , для того, щоб напруга  $U = const$  залишалась незмінною при зміні навантаження  $I$ , здійснюється автоматично за схемою



Енергетична діаграма і ККД синхронного генератора

$\Delta p_3 = I_3^2 R_3$  - втрати на збудження;  $R_3$  - опір кола збудження

$\Delta p_{мех}$  - механічні втрати, спричинені всіма видами тертя

$\Delta p_{ст}$  - втрати магнітні в сталевому осерді статора (перемагнічування та вихрові струми)

Електромагнітна потужність  $P_{ем}$  генератора менше механічної потужності  $P_1$  на величину втрат

$$P_{ем} = P_1 - (\Delta p_3 + \Delta p_{мех}) = 3E_0 I \cos \Psi \quad \text{3 фази}$$

$$\Delta p_м = 3I_{\phi}^2 R \quad \text{- втрати в обмотці статора}$$

корисна потужність, що віддається умережу, менше механічної потужності  $P_1$  на величину втрат

$$\text{ККД генератора} \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta p}$$

корисна електричну потужність трифазного генератора  $P_2 = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi$

# ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННИХ МАШИН

## Регулювання активної потужності. Кутові характеристики

Електромагнітна потужність  $P_{ем} = 3E_0 I \cos \Psi$

На векторній діаграмі, з подібності трикутників розставимо кути.

Катет  $bd$  дорівнює  $I \cdot X_c \cos \varphi = E_0 \sin \theta$

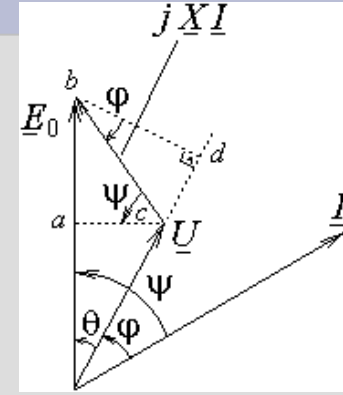
$ac \perp E_0$ ,  $bc \perp I$ , відтак кут  $bca = \Psi$ .

Для трикутника  $abc$  можемо записати

$$\cos \Psi = \frac{ac}{bc} = \frac{U \sin \theta}{I \cdot X_c}$$

при незмінному струмі збудження  $I_z = const$

$$P_{ем} = 3 \frac{E_0 U}{X_c} \sin \theta$$



Синхронний генератор, включений у мережу, забезпечує постійну напругу мережі  $U = U_{мережі} = const$

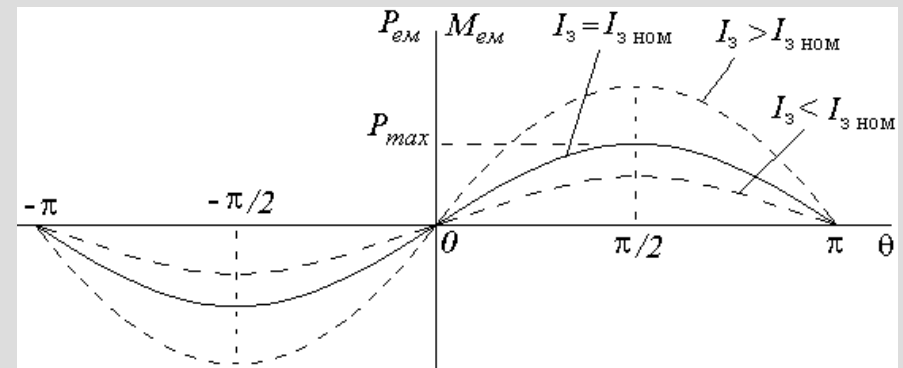
Електромагнітний момент машини

$$M_{ем} = \frac{P_{ем}}{\omega_p}$$

$$\omega_p = \frac{2\pi \cdot n}{60} \quad n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad \omega_p = \frac{2\pi \cdot 60 \cdot f}{60 \cdot p} = \frac{2\pi \cdot f}{p} = \frac{\omega}{p}$$

$$\omega_p = \frac{\omega}{p}$$

$$M_{ем} = \frac{P_{ем}}{\omega_p} = \frac{P_{ем} \cdot p}{\omega} \quad M_{ем} = 3 \frac{p}{\omega} \frac{E_0 U}{X_c} \sin \theta$$



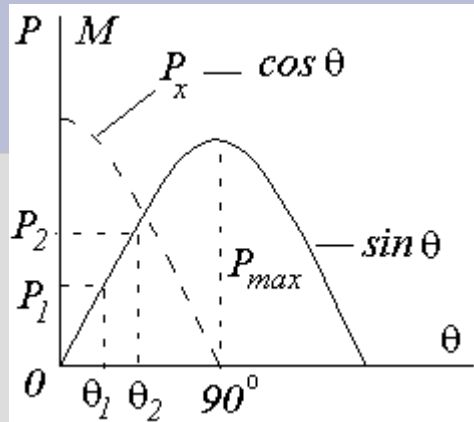
кутова характеристика синхронної машини

Кут  $\theta$  характеризує стійкість синхронної машини.  
Він знаходиться у межах  $0 \leq \theta \leq 90^\circ$

Номінальній потужності синхронних генераторів  
звичайно відповідає  $\theta_{ном} \approx 15...20^\circ$

## Стійкість синхронного генератора

Синхронізувальна потужність  $P_x = \frac{dP}{d\theta}$



Статична перевантажувальна здатність синхронного генератора

$$K_c = \frac{P_{max}}{P_{ном}}$$

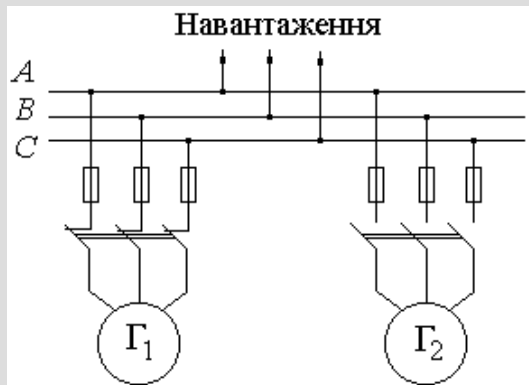
$$P_{max} = 3 \frac{E_0 U}{X_c}$$

$$K_c = \frac{3 \frac{E_0 U}{X_c}}{3 \frac{E_0 U}{X_c} \sin \theta}$$

$$K_c = \frac{1}{\sin \theta}$$

Зазвичай статична перевантажувальна здатність  $K_c \approx 3$

## Включення синхронного генератора у мережу

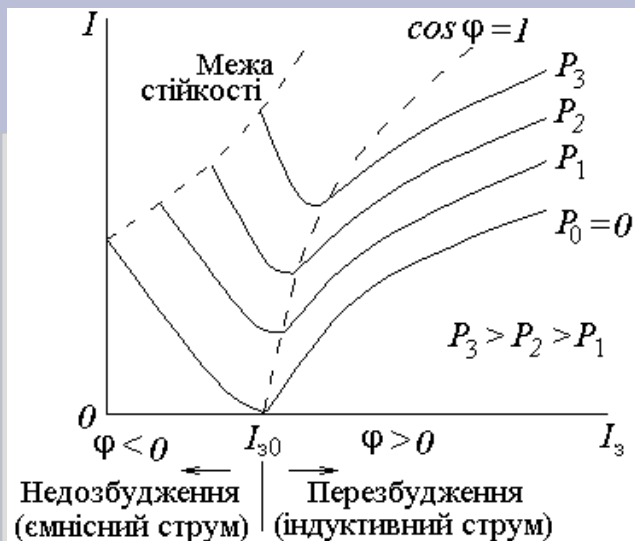


необхідно, щоб:

- 1) ЕРС, яку виробляє генератор, дорівнювала напрузі мережі, та в момент включення вона знаходилась у протифазі до цієї напруги. У протилежному випадку виникає зрівняльний струм. Регулювання величини ЕРС  $E$  здійснюють струмом збудження.
- 2) Частота синхронного генератора дорівнювала частоті мережі. Регулювати при цьому потрібно швидкість обертання генератора.
- 3) Чергування фаз генератора та мережі відповідали один одному. Інакше виникає КЗ.
- 4) Форма ЕРС генератора та форма напруги мережі були однаковими – синусоїдальними

## Регулювання реактивної потужності синхронного генератора

$$\underline{U} = E_0 - j \cdot I \cdot X_c - I \cdot R \quad \text{Оскільки } R \ll X_c \quad \underline{U} \approx E_0 - j \cdot I \cdot X_c \quad I = \frac{E_0 - U}{jX_c}$$



Сімейство U-подібних характеристик при різних потужностях  $P_1 < P_2 < P_3$  показує залежність струму генератора  $I$  від струму збудження  $I_3$  при постійній потужності, а відтак і куті  $\theta$

Активна потужність постійна  $P = const$

$$P = 3U \cdot I \cos \varphi$$

а струм збудження змінюється  $I_3 - var$

Оскільки  $U = const$ , змінюємо струм збудження. При цьому змінюється ЕРС.

Небаланс між ЕРС  $E_0$  та напругою  $U$  має бути погашений за рахунок струму  $I$ . Але оскільки напруга  $U$  та активна потужність  $P$  постійні, то має бути постійним добуток  $I \cos \varphi = const$ .

Таким чином, активний струм залишається постійним, а з'являється реактивний струм, який впливає на  $\cos \varphi$  мережі (при змінненні  $I_3$ )

Сучасні синхронні генератори працюють з перезбудженням.

У цьому випадку генератори забезпечують приймачі мережі (асинхронні двигуни, трансформатори, індукційні печі та ін.) необхідною енергією індуктивного характеру

## Синхронний двигун

У режимі ідеального НХ гальмівний момент відсутній ( $M_r=0$ ) осі полів (полюсів) ротора і статора збігаються, тобто  $\theta=0$

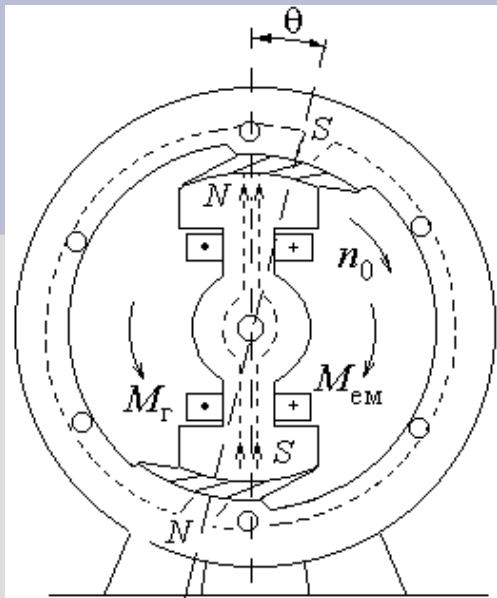
При навантаженні поле ротора, що тягнеться полем статора, відстає на кут  $\theta$ .

У режимі двигуна  $\theta$  змінюється від 0 до  $90^\circ$ , коли  $M=M_{max}$

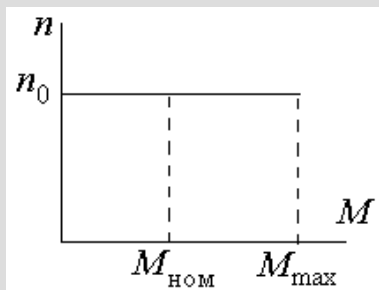
$$M_{max} = 3 \frac{E_0 U}{\omega_p X_c} = 3 \frac{p E_0 U}{\omega X_c}$$

Якщо кут  $\theta$  перевищує  $90^\circ$ , то двигун випадає з синхронізму. Стійкий режим роботи синхронного двигуна можливий тільки в діапазоні  $0 < \theta < 90^\circ$ .

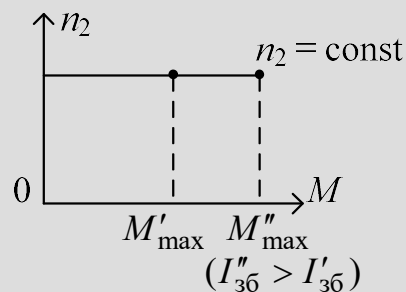
У номінальному режимі кут  $\theta$  вибирають не більше  $30^\circ$



Перевантажна здатність синхронного двигуна  $\lambda = \frac{M_{max}}{M_{ном}} = 1,7 \dots 2,7$



Механічна характеристика синхронного двигуна



Стійкість синхронної машини підвищується при збільшенні струму збудження

## Способи пуску синхронних двигунів

Синхронний двигун не має початкового пускового моменту.  
Використовуються наступні способи пуску:

- 1) *Пуск від розгінного двигуна*
- 2) *Частотний спосіб пуску*
- 3) *Асинхронний спосіб пуску.*

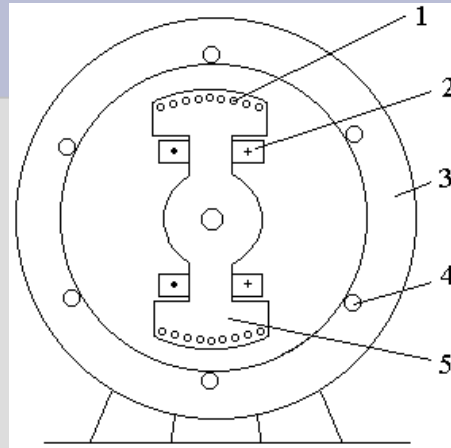


Схема синхронного двигуна:

- 1 – пускова обмотка;
- 2 – обмотка збудження;
- 3 – осердя статора;
- 4 – обмотка статора;
- 5 – полюси ротора

Обмотку збудження при пуску замикають на розрядний опір  $R_p$ , значення якого у 10...15 разів більше опору обмотки збудження

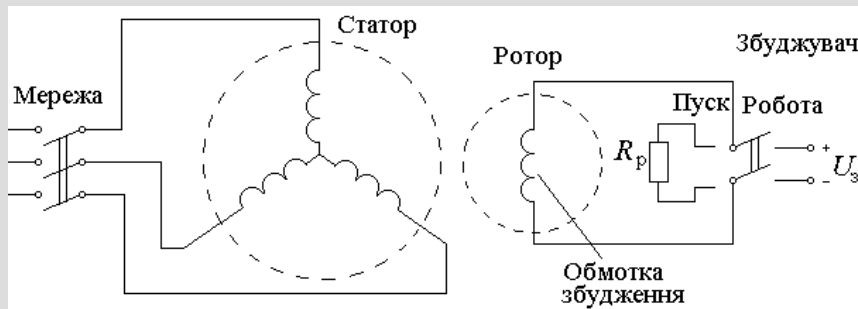


Схема асинхронного пуску синхронного двигуна

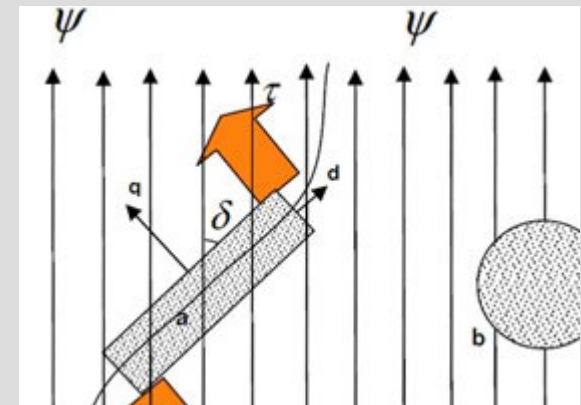
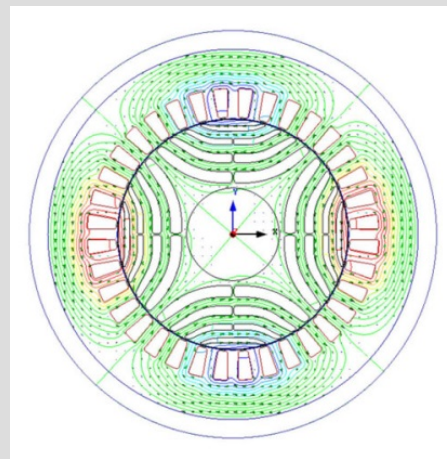
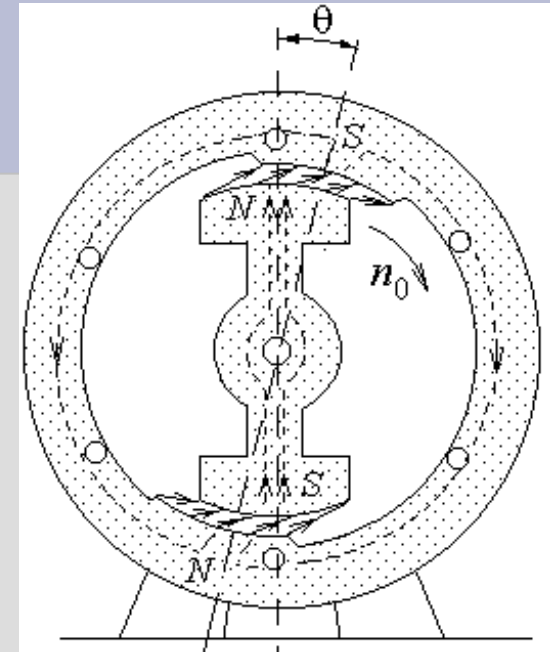
За допомогою синхронного двигуна можна покращити коефіцієнт потужності мережі ( $\cos\phi$ ), а асинхронний двигун для збудження споживає індуктивний струм, тобто він погіршує  $\cos\phi$ .

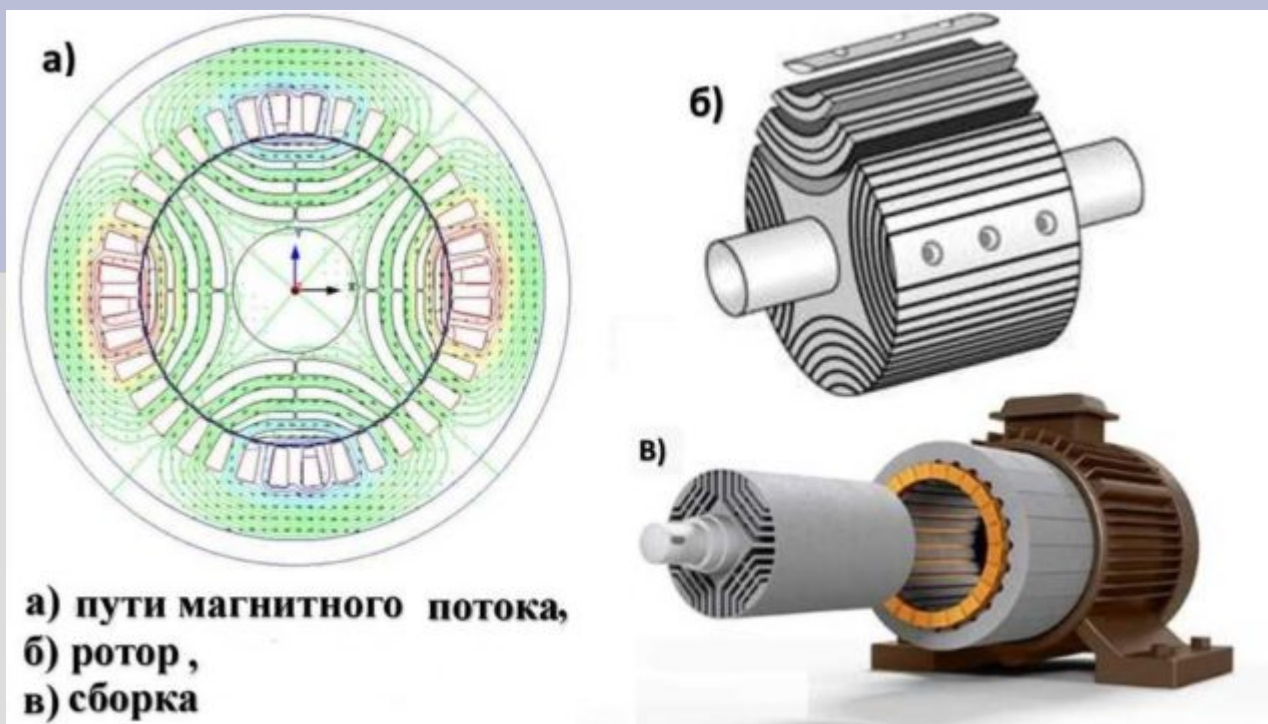
## Синхронні реактивні двигуни

Синхронні реактивні – це безконтактні двигуни малої потужності, призначені для роботи в електроприводах, де потрібна постійна частота обертання.

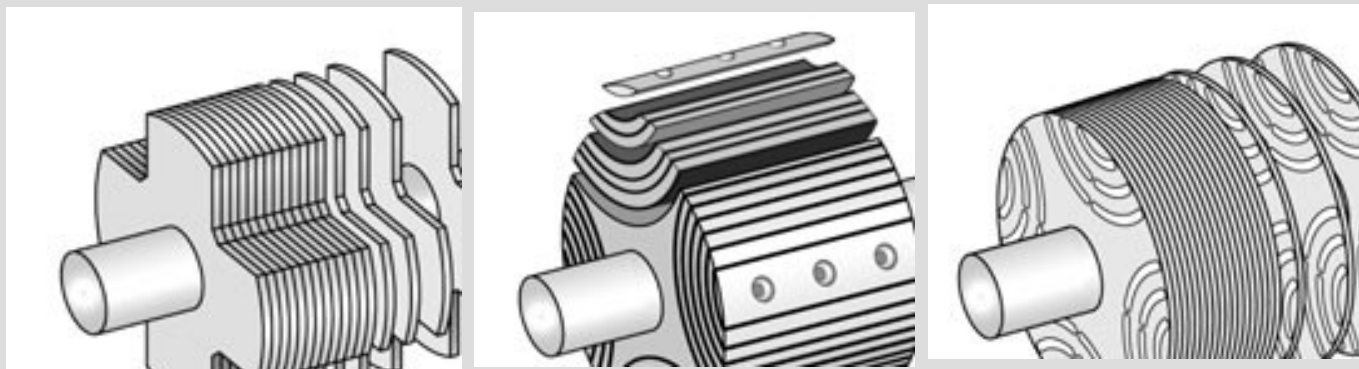
Синхронний реактивний двигун має трифазний статор та явнополюсний стальний ротор без обмотки збудження та постійних магнітів. Ротор виконується з магнітом'якого матеріалу.

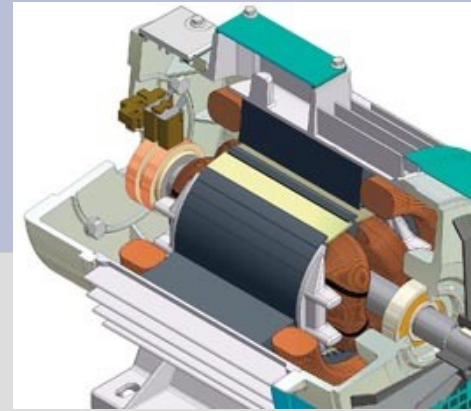
Максимальний момент двигуна буде при куті  $\theta=45^\circ$





### Ротори

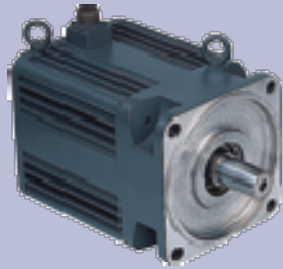




Синхронний двигун SIEMOSYN 1FU8 зі збудженням від постійних магнітів та з короткозамкненою пусковою обмоткою.  
Частота обертання до 15000 об/хв



Синхронні електродвигуни малої потужності (мікродвигуни) використовуються в системах автоматики, різних побутових приладах, часах, фотоапаратах.



Синхронний двигун FAGOR серії FXM, яка спеціально розроблена для використання на осях станків і відрізняється більш широким діапазоном моментів від 1,2 Н·м до 76,6 Н·м при номінальних швидкостях 1200, 2000, 3000 и 4000 об/хв. Вони здатні працювати з 5-кратним перевантаженням по моменту



Низько швидкісний синхронний двигун, який забезпечує високоточне керування швидкістю, низько швидкісне обертання та швидке двонаправлене обертання



Потужний низько оборотний синхронний електродвигун СДС для привода цементних, вуглерозмольних, рудорозмольних та інших промислових млинів (шарових, стрижневих). Ці двигуни живляться від напруги 6 кВ, мають велику потужність від 550 до 2500 кВт та значну кількість полюсів (32, 36, 40, 48, 60)



Явнополюсний синхронний двигун серії СДЕ2-15-34-6. Двигуни серії СДЕ призначені для роботи в перетворювальному агрегаті екскаватора і інших подібних механізмів. Виконання двигуна – горизонтальне на двох щитових підшипниках кочення з двома циліндричними кінцями вала. Збудження двигунів здійснюється від тиристорних або електромашинних збудників. Потужність двигуна 630 кВт, напруга живлення 6 кВ, частота обертання 1000 об/хв, ККД 94,2 %, маса 5,1 т

***Thanks for your attention***