

*Prezentari ppt.*

*Conf. Leonard Livadaru  
Universitatea Tehnica Iasi*

*2020-2021*



MAȘINA ASINCRONA



MAȘINA SINCRONA

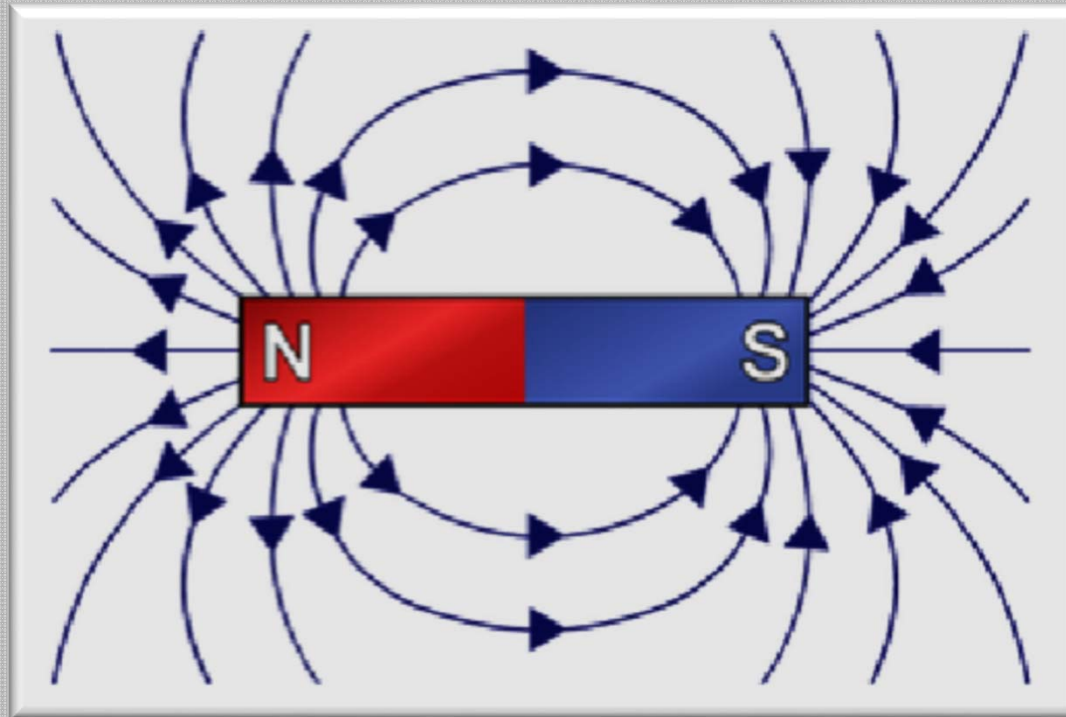
# Surse de câmp magnetic

A diagram illustrating sources of magnetic fields. It features a central vertical metal rod. A horizontal metal rod passes through the center of the vertical rod. Two white, rounded rectangular boxes are positioned on either side of the vertical rod, attached to the horizontal rod. The left box is labeled 'Bobine parcurse de curent electric' and the right box is labeled 'Magneți permanenți'. At the top of the vertical rod, there is a yellow rectangular box with a red border containing the title 'Surse de câmp magnetic'. The background is a light brown gradient with vertical grey lines on the far left and right.

Bobine parcurse  
de curent electric

Magneți  
permanenți

## Sensul liniilor de câmp create de un magnet permanent



Liniile câmpului magnetic creat de un magnet permanent se închid (prin exterior) de la polul N către polul S (desemnarea polilor și a sensului liniilor de câmp este adoptată convențional).



## Sensul liniilor de câmp create de un conductor parcurs de curent

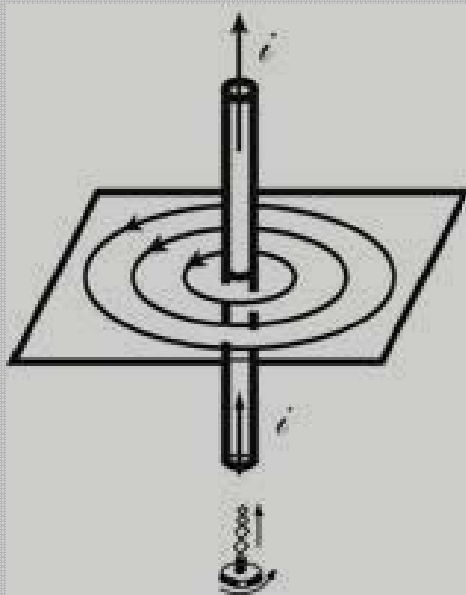


Fig. 1

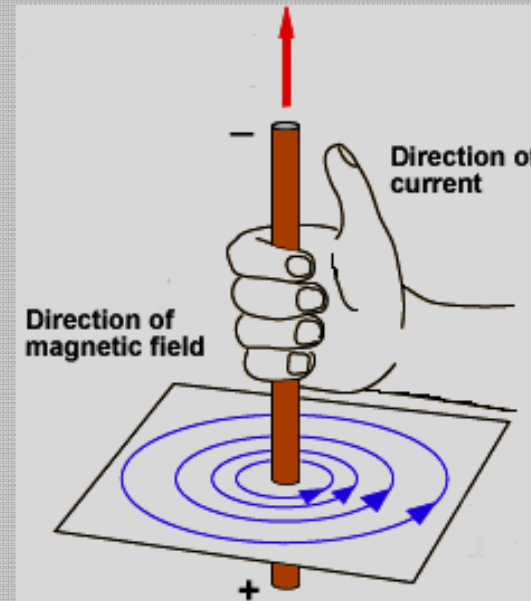
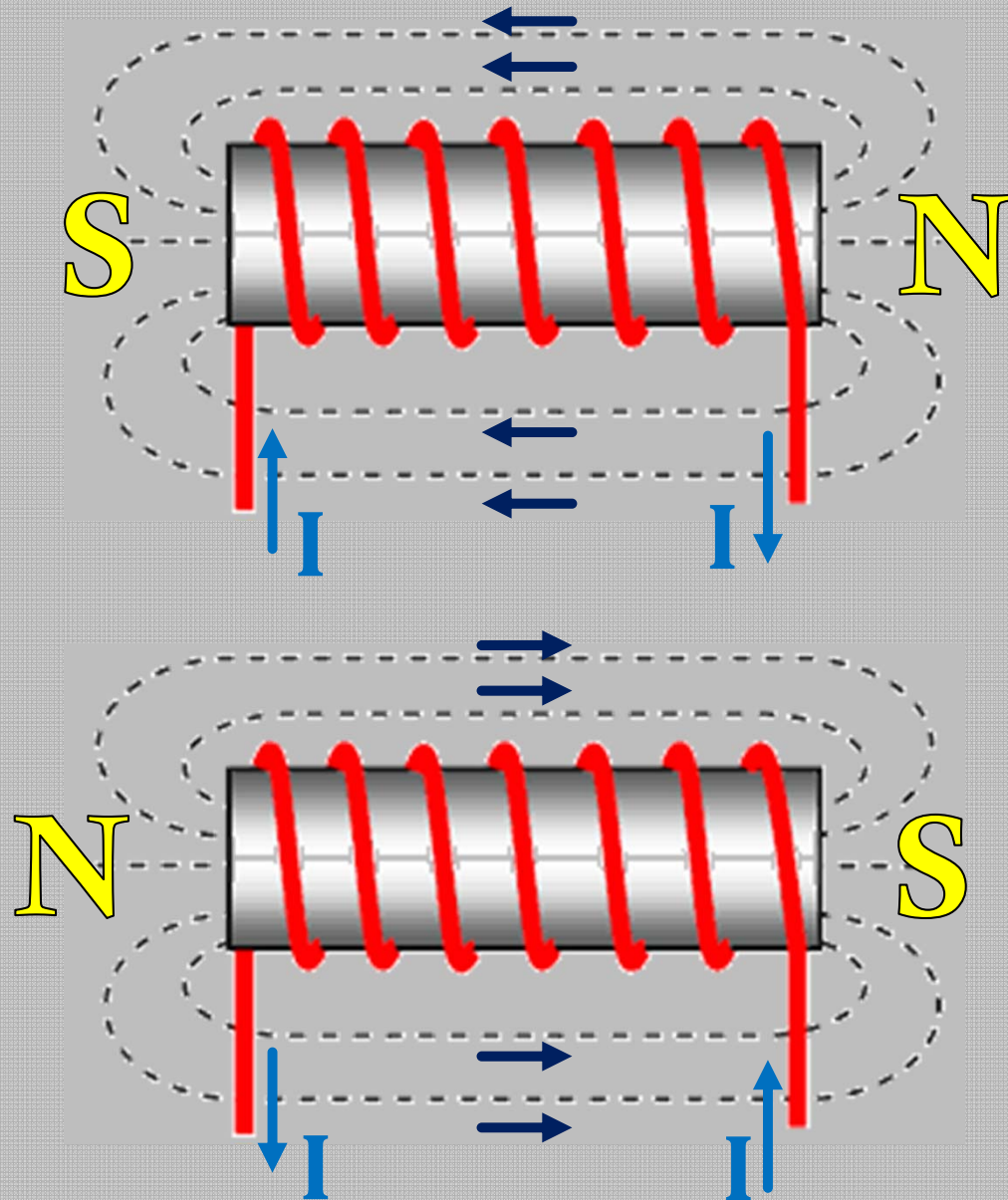


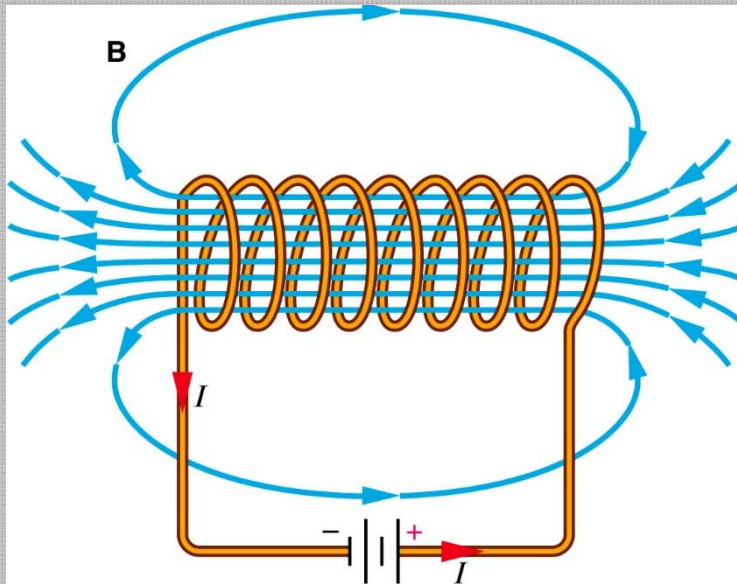
Fig. 2

Liniile de câmp se închid într-un plan perpendicular pe axa conductorului și au sensul dat de regula burghiului drept (sensul de rotire a burghiului ce determină mișcarea lui în sensul curentului ce străbate conductorul) - fig. 1, sau de regula mâinii drepte - fig. 2 .

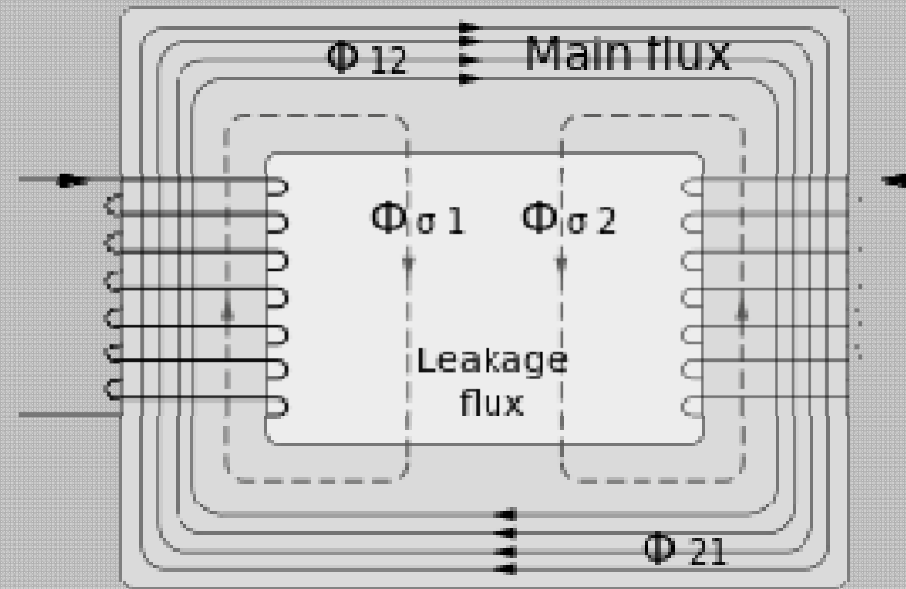
## Sensul liniilor de câmp create de o bobina



Atunci când o bobină (un solenoid) este parcursă de curent electric (indiferent dacă este c.c. sau c.a.) apare un câmp magnetic ale cărei linii se închid similar celor produse de un magnet permanent. Sensul curentului prin spirele solenoidului determină polaritatea câmpului magnetic creat de acesta.



**Bobina fără miez magnetic**



**Bobina plasata pe un miez magnetic**

**Prezența unui miez magnetic duce la două consecințe importante:**

- „intensifică” câmpul magnetic rezultat;
- „conduce” liniile de câmp pe trasee prestabilite utile scopului urmărit.



# Legile lui Faraday (legea inducției electromagnetice)

1. Atunci când un conductor este plasat într-un câmp magnetic VARIABIL se induce o tensiune ce se regăsește la capetele conductorului
2. Mărimea tensiunii induse este proporțională cu viteza de variație a fluxului prin bobină

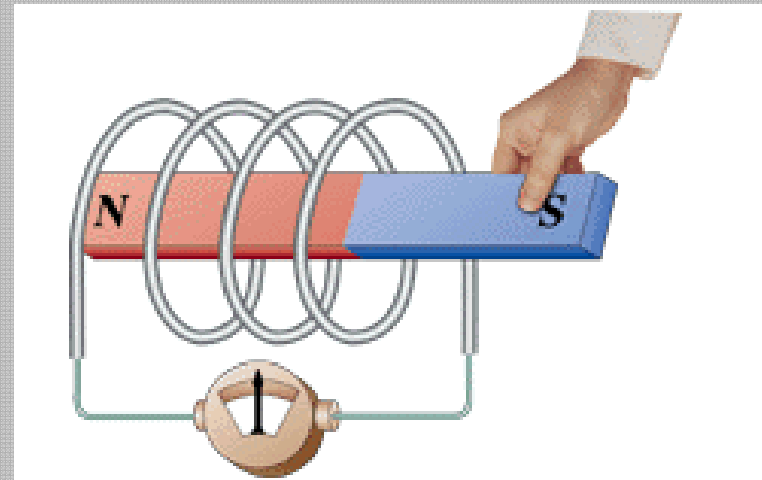
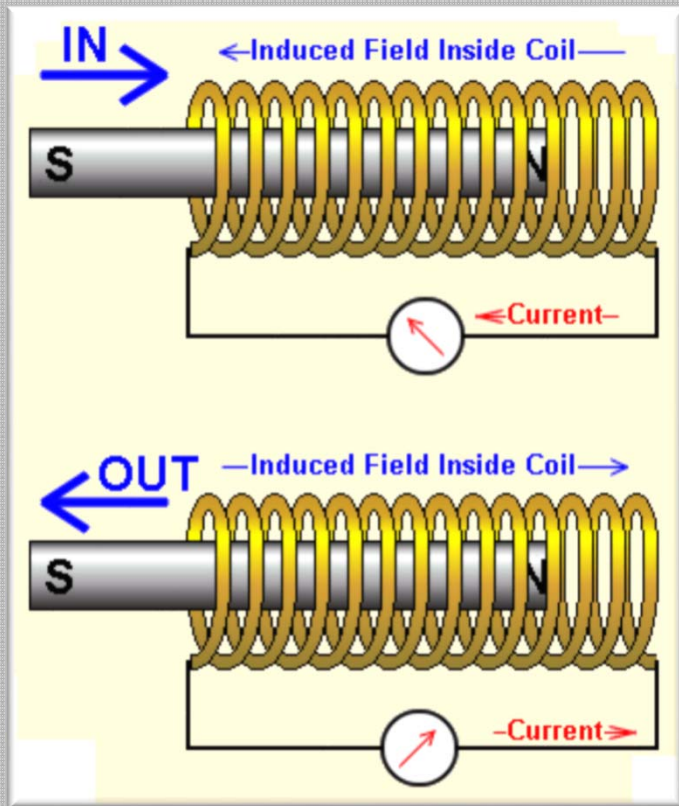
$$e = k \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

## Legea lui Lenz

Curentul determinat de tensiunea indusă creează un câmp magnetic ce se opune câmpului inițial

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = -N \cdot \frac{d\varphi}{dt}$$

## Bobina fixa – câmp magnetic în mișcare



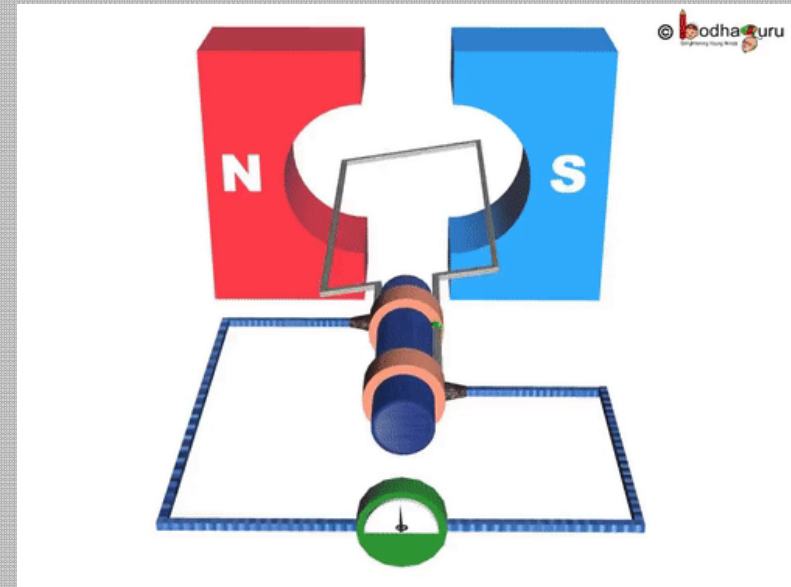
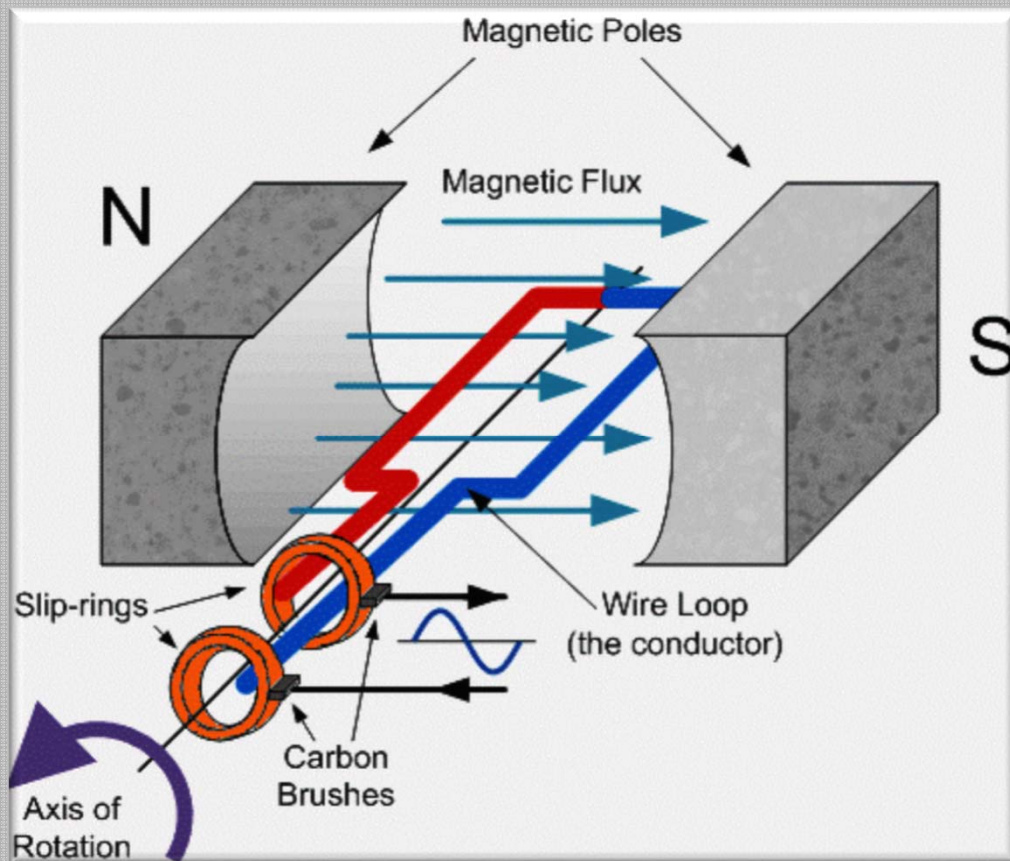
Deplasarea magnetului permanent în interiorul bobinei determină inducerea unei tensiuni în bobină. Acest fapt este demonstrat de aparatul de măsură care sesizează prezența curentului electric.

Sensul deplasării magnetului permanent (către stânga sau către dreapta) determină semnul tensiunii induse.

**NUMAI** mișcarea magnetului determină inducerea unei tensiuni în bobină.



## Bobina in mișcare – câmp magnetic fix



Dacă magnetul permanent este fix dar bobina se deplasează în câmpul magnetic (în cazul din figură bobina este reprezentată de o singură spira și se rotește) atunci, în bobină se induce tensiune care poate fi regăsită și vizualizată la capetele bobinei cu un aparat de măsură.

Semnul tensiunii induse este determinat de sensul de rotație sau de sensul liniilor de câmp create de magnetul permanent.



**BOBINA**

+

**CÂMP MAGNETIC**

+

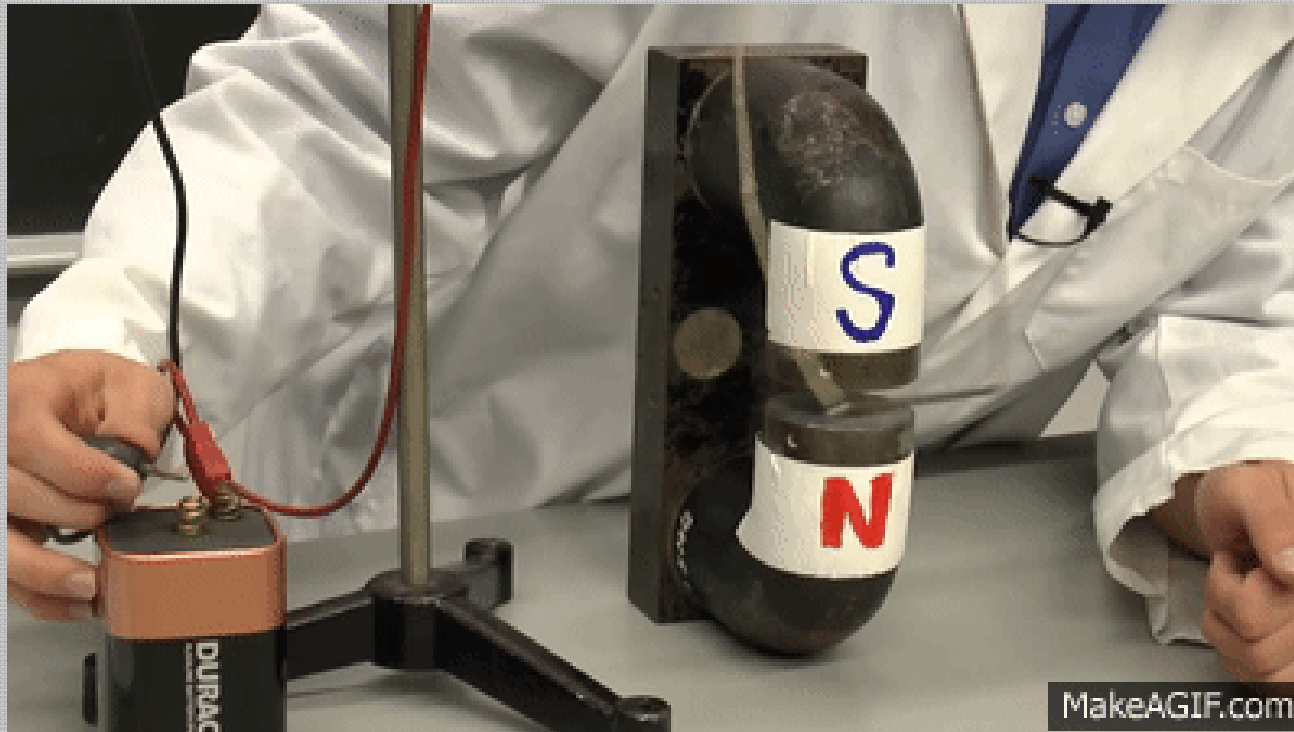
**DEPLASARE**

=

**TENSIUNE INDUSA**



## Forța Laplace



Forța Laplace este forța ce acționează asupra unui conductor parcurs de curent ( $i$ ) și care se afla într-un câmp magnetic de inducție  $B$ . Dacă unghiul dintre direcția conductorului (de lungime  $l$ ) și vectorul inducției magnetice este de  $90^\circ$  atunci mărimea forței este maximă.

$$\vec{F} = i\vec{l} \times \vec{B}$$

$$F = BIl \cdot \sin \theta$$



# Legea inducției electromagnetice

**Forța Laplace**

**CURS 2**

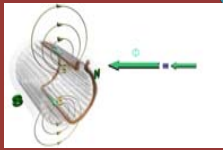
**CÂMPURI MAGNETICE IN MAȘINILE  
DE CURENT ALTERNATIV**





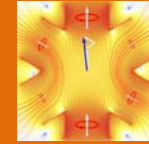
# Cuprins:

1



Câmpul creat de o înfășurare monofazată distribuită

Câmpul creat de o înfășurare trifazată distribuită

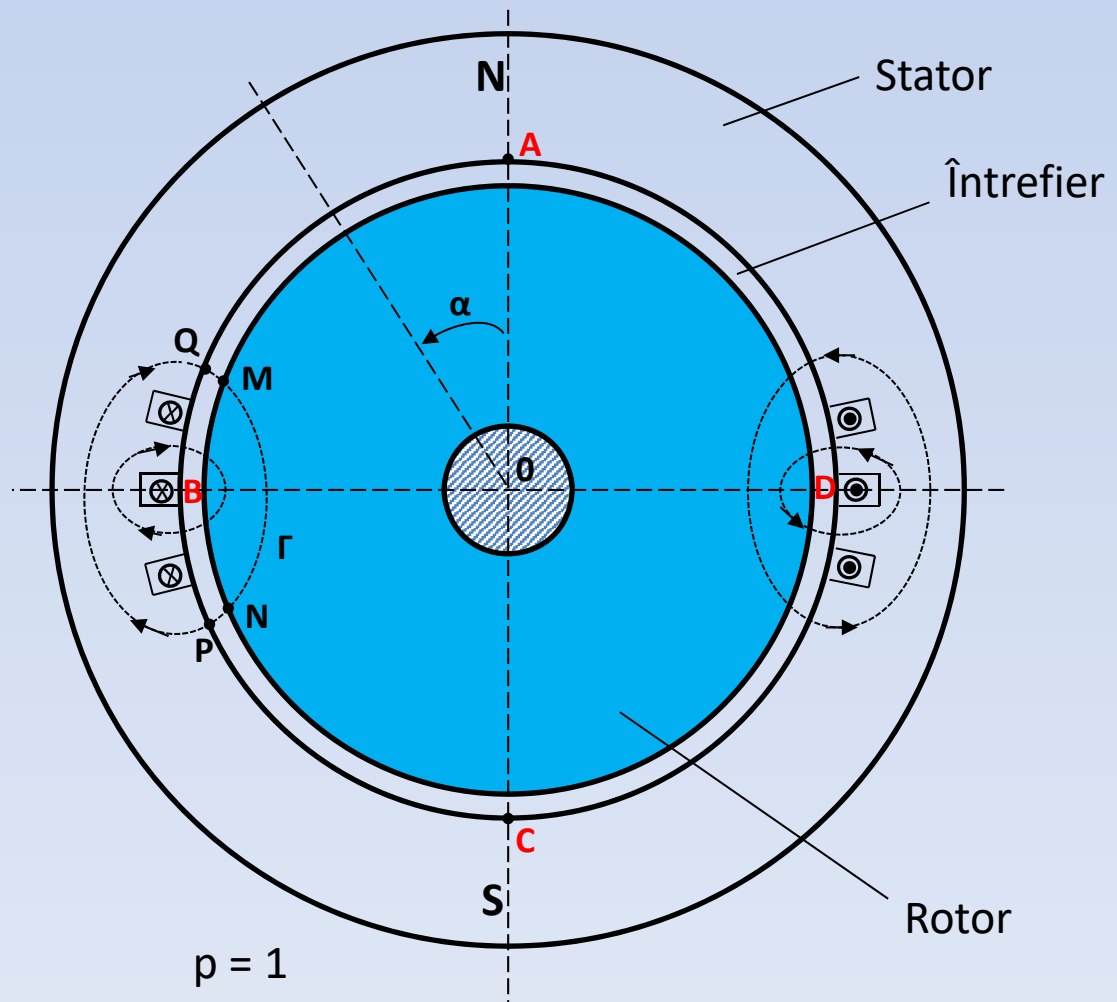
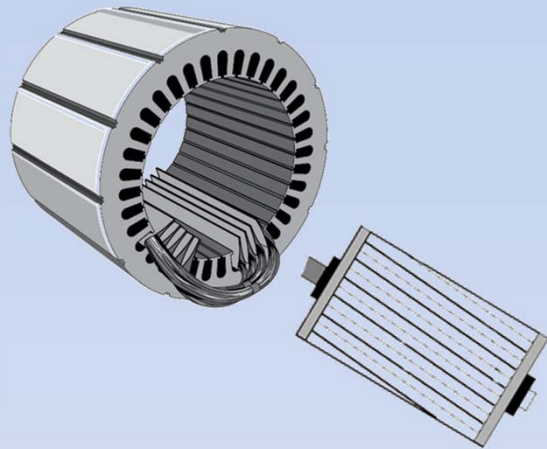


2

3

Teorema lui Leblanc

# CÂMPUL CREAT DE O ÎNFĂȘURARE MONOFAZATĂ DISTRIBUITĂ



Se consideră o structură feromagnetică formată din stator (exterior) și rotor (interior) despărțite de un întrefier. Pe stator, către întrefier, sunt practicate creștături (pentru simplificarea discuției se considera doar 6 creștături plasate câte trei diametral opus).

În creștăturile statorice este plasată o înfășurare. Conductoarele din stânga sunt parcurse de curent într-un sens (curentul intra în secțiune) iar cele din dreapta, în sens contrar (curentul iese din secțiune). Sursa de alimentare a înfășurării este de tensiune alternativă, deci curentul ce străbate conductoarele este alternativ (în figură, sensurile curenților corespund unui anumit moment  $t$  al variației sinusoidale a curenților).

Curenții din înfășurare determină apariția unui câmp magnetic ale cărui linii de câmp se închid conform traseelor figurate pe desen (pentru simplificare, s-a considerat o singură linie de câmp corespunzătoare fiecărui conductor). Sensul liniilor de câmp este dat de regula burghiului drept. Traseul fiecărei linii de câmp traversează jugul statoric (porțiunea PQ în sensul liniei de câmp), jugul rotor (porțiunea MN) și de două ori, pe direcție radială, întrefierul (porțiunile QM și NP).

Ca urmare a sensului închiderii liniilor de câmp, pe stator se formează doi poli magnetici: în partea de sus, un pol N (liniile de câmp ies din stator) și în partea de jos un pol S (liniile de câmp intra în stator). Rezultă astfel o structură feromagnetică (în cazul acesta o mașină electrică) cu 2 poli sau o pereche de poli ( $p = 1$ ).

Expresia curentului prin  
înfășurarea statorică:

$$i = \sqrt{2}I \sin \omega t$$

Pentru determinarea modului de variație a câmpului magnetic în întrefier se aplică legea circuitului magnetic (legea lui Ampere) pe un contur ( $\Gamma$ ):

$$\oint_{\Gamma} H dl = \sum Ni$$

Se descompune integrala de pe conturul  $\Gamma$  într-o sumă de integrale pe porțiuni:

$$\underbrace{\int_P^Q H dl}_{V_{Fe}} + \underbrace{\int_Q^M H dl}_{V_{\delta}} + \underbrace{\int_M^N H dl}_{V_{Fe}} + \underbrace{\int_N^P H dl}_{V_{\delta}} = \sum Ni$$

unde: H-intensitatea câmpului magnetic; N-numărul de conductoare înălțuit de conturul  $\Gamma$ ; i-curentul ce parcurge conductoarele; V-tensiune magnetica

Prima si a treia integrală definesc tensiunea magnetică in fier iar a doua si a patra, tensiunea magnetică in întrefier. Rezultă:

$$2V_{Fe} + 2V_{\delta} = \sum Ni$$

$$\left( \begin{array}{l} \mathcal{R}_{Fe} = \frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe} \cdot S} \\ \mathcal{R}_{\delta} = \frac{l_{\delta}}{\mu_0 \cdot S} \end{array} \right) \quad \text{Dar: } \mu_{Fe} \gg \mu_{\delta} \longrightarrow \mathcal{R}_{Fe} \ll \mathcal{R}_{\delta}$$

$$\text{Dar: } V = \mathcal{R} \cdot \phi$$



$$V_{Fe} \ll V_{\delta}$$

Întrucât reluctanța circuitului magnetic (a fierului) este mult mai mica decât reluctanța întrefierului (a aerului), rezulta ca tensiunea magnetica a fierului este muuult mai mica decât cea a întrefierului si, prin urmare, aceasta se poate neglija. Rezulta:

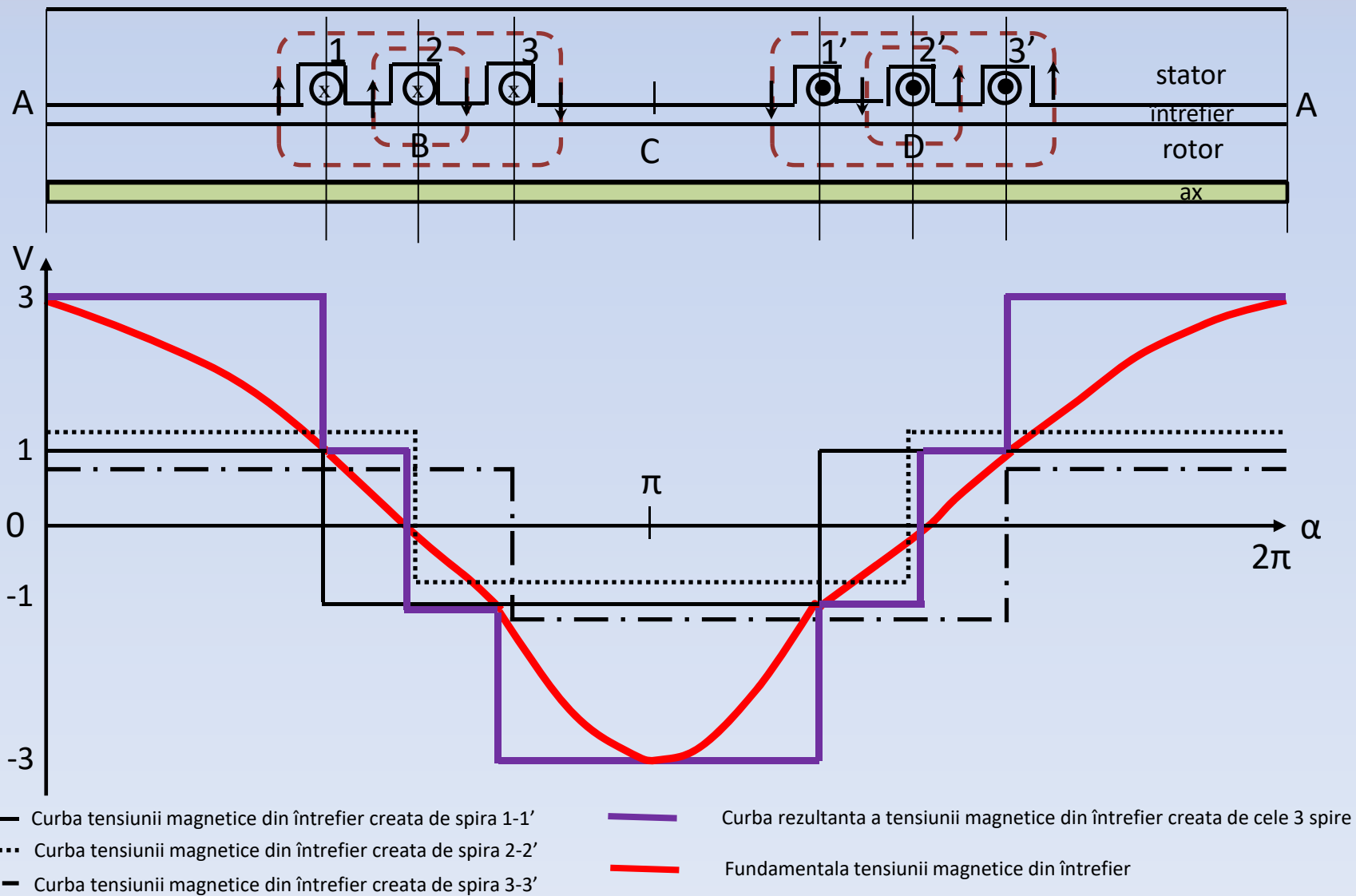
$$2V_{\delta} = \sum Ni = N(\alpha) \cdot i$$

Înlocuind si expresia curentului, se obține:

$$V(\alpha, t) = \frac{1}{2} N(\alpha) \cdot \sqrt{2} I \sin \omega t$$

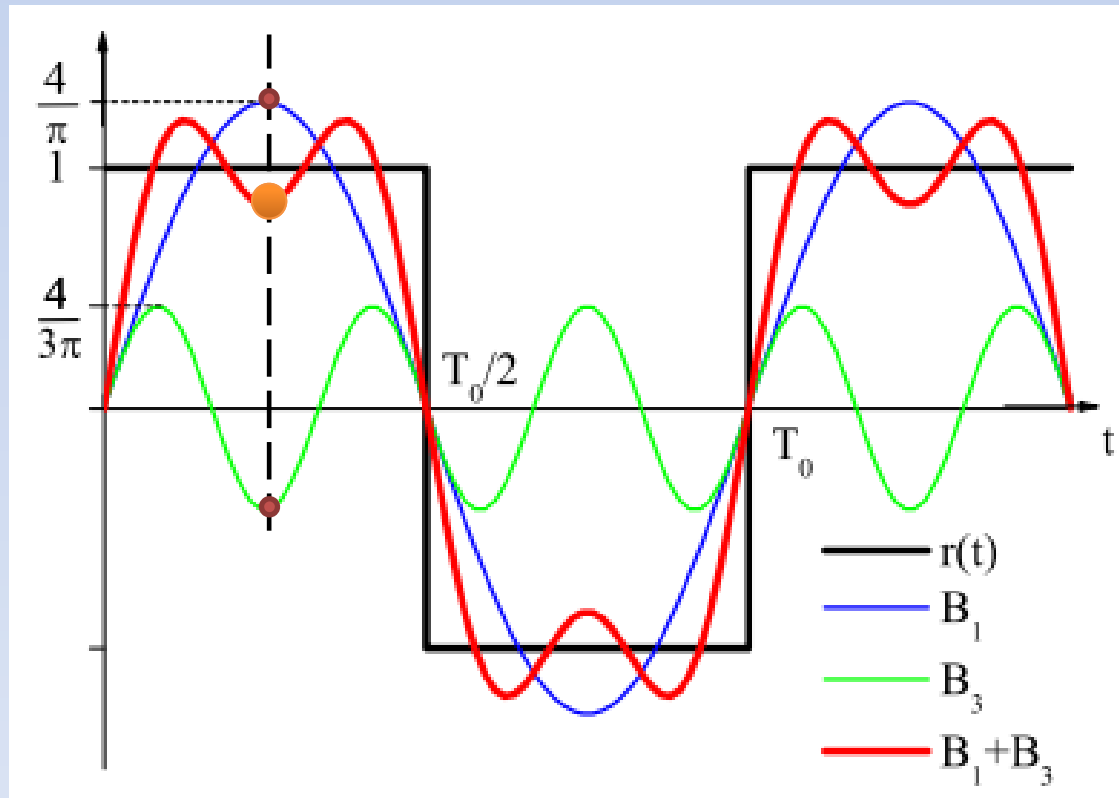


## Construcția grafică a tensiunii magnetice din întrefier pentru structura cu 6 crestături



In figura este reprezentata o „curba” alternativa, nesinusoidală –  $r(t)$  – a cărei simetrie este de tipul:  $V(\alpha, t) = -V(\alpha + \pi, t)$

Descompunerea in serie Fourier reține NUMAI termenii impari (funcția  $r(t)$  poate fi obținută prin însumarea punct cu punct a curbelor sinusoidale  $B_1$  și  $B_3$ )



Explicativa la descompunerea in serie Fourier a undelor alternative nesinusoidale in armonici sinusoidale ( $B_1$ -fundamentala,  $B_3$ -armonica de ordin 3).

Prin urmare, expresia tensiunii magnetice dedusa grafic in slide-ul anterior, poate fi scrisa astfel:

$$v(\alpha, t) = \sum_{\gamma=1,3,5\dots}^{\infty} \frac{1}{\gamma} \cdot V_{max} \cos \gamma \alpha \cdot \sin \omega t$$

Expresia unei fundamentale (armonica de ordinul I,  $\gamma=1$ ) este:

$$v(\alpha, t) = V_{max} \cos \alpha \cdot \sin \omega t$$

$$H(\alpha, t) = \frac{v(\alpha, t)}{\delta(\alpha)}$$

Variația unei fundamentale a „intensității câmpului magnetic” are aceeași expresie ca și variația tensiunii magnetice, întrucât se poate considera întrefierul  $\delta$  ca fiind cvasi-uniform:

$$H = H_{max} \cos \alpha \cdot \sin \omega t$$

In cazul unei mașini cu  $p$  perechi de poli:

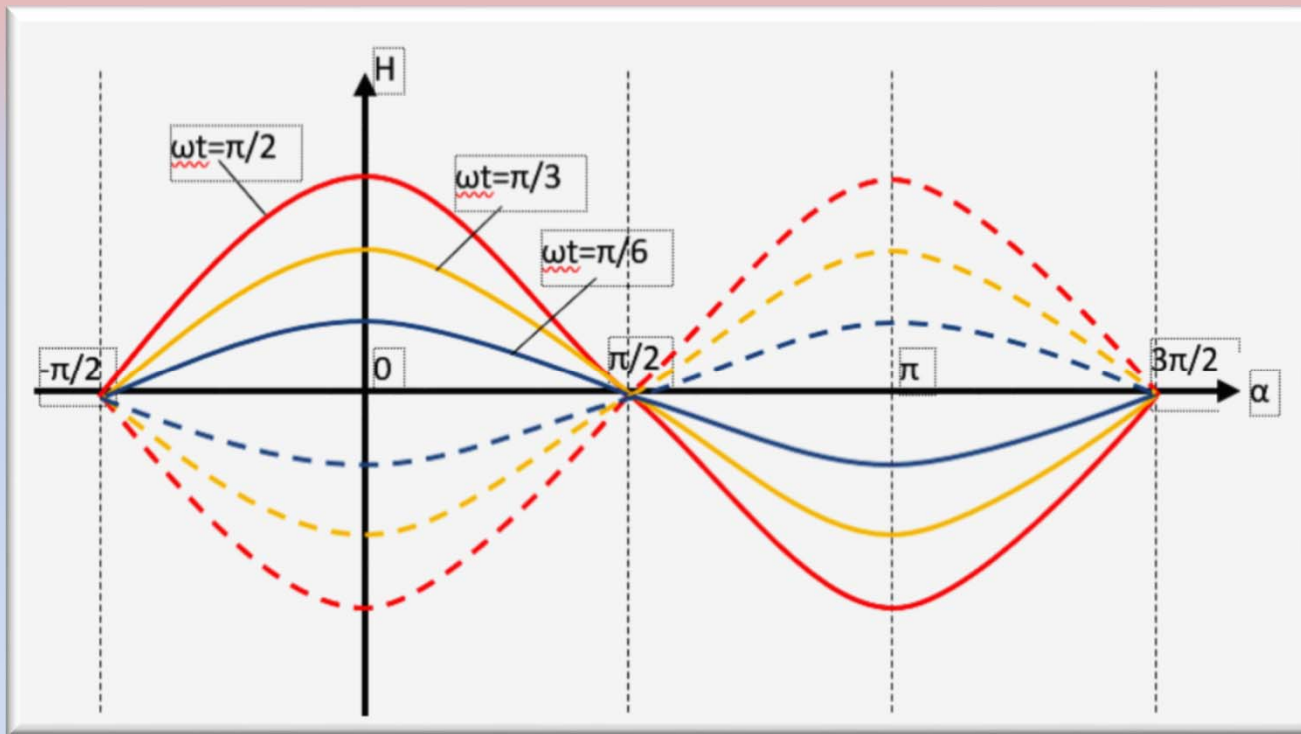
$$H = H_{max} \cos p\alpha \cdot \sin \omega t$$

In mod analog, expresia unei fundamentale a inducției electromagnetice este:

$$B = B_{max} \cos p\alpha \cdot \sin \omega t$$



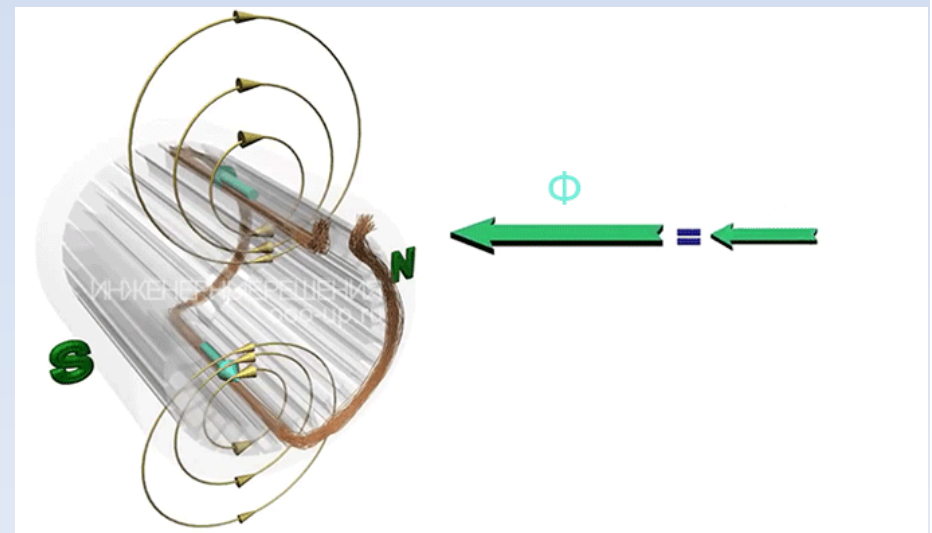
**Această relație reprezintă expresia unui câmp PULSATORIU (sau alternativ) care este FIX in spațiu si VARIABIL in timp**



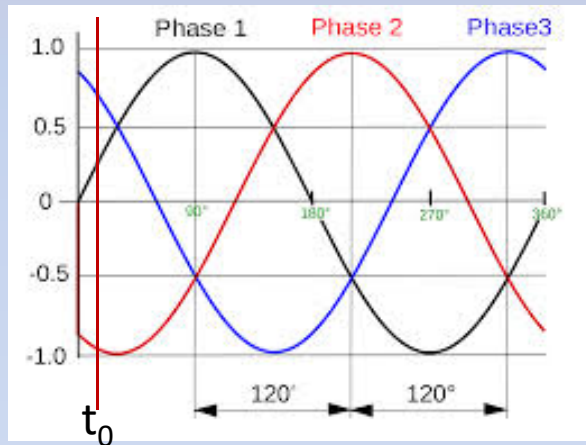
Curbele câmpului creat de o înfășurare monofazata la diverse momente de timp

La diverse momente ( $\omega t$ ), modul ideal de variație a câmpului este o sinusoida. Valorile de minim și de maxim (adică poziția polilor) corespund unor poziții fixe (pentru  $\alpha=0$  și  $\alpha=\pi$ ).

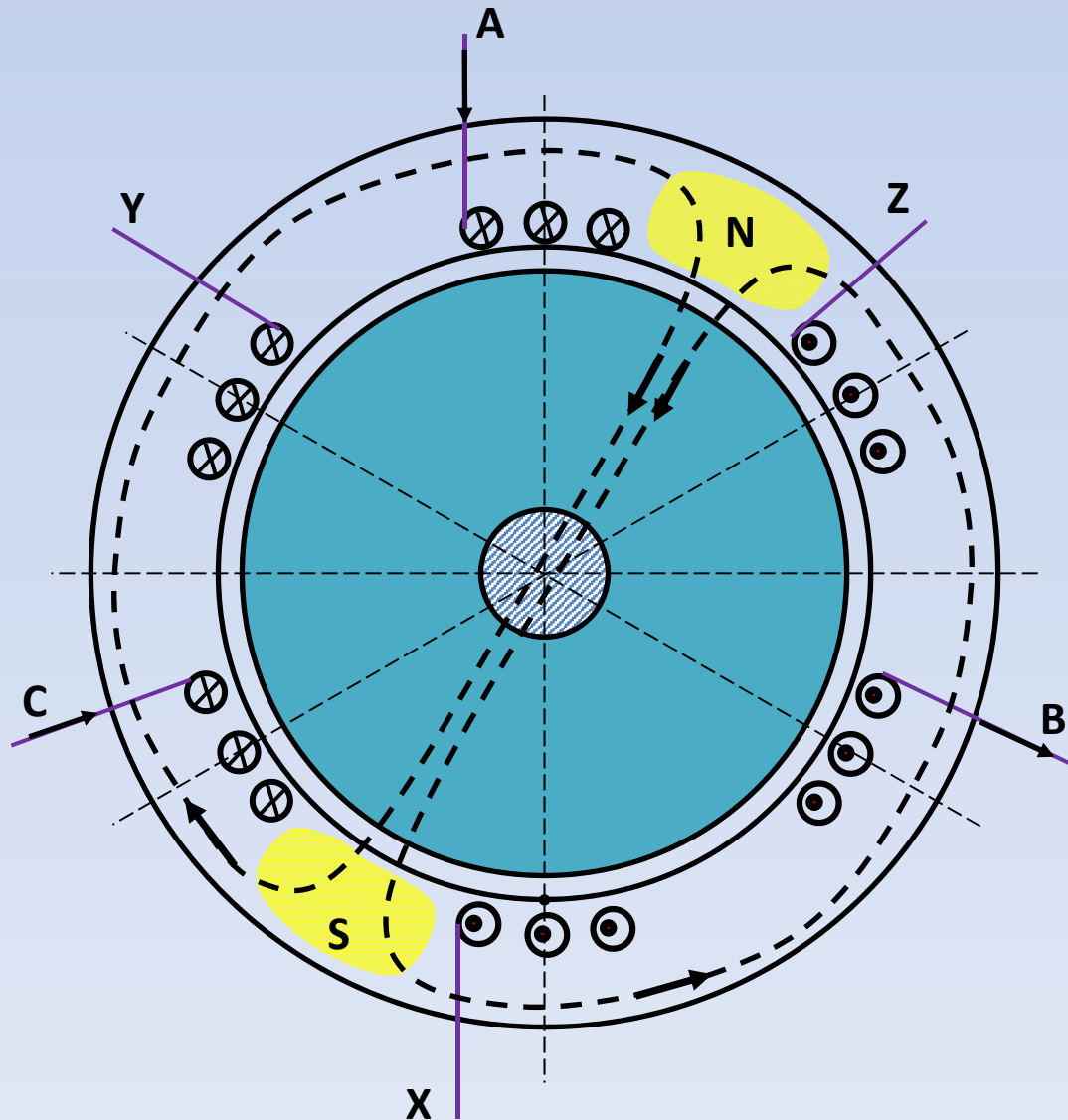
$$H = H_{max} \cos \alpha \cdot \sin \omega t$$



# CÂMPUL CREAT DE O ÎNFĂȘURARE TRIFAZATĂ DISTRIBUITĂ



a. Sistem trifazat de curenți



b. Structura electromagnetica cu înfășurare statorică trifazată



Pe structura feromagnetică din cazul anterior, se plasează în creștături o înfășurarea trifazată distribuită. Aceasta este formată din trei înfășurări monofazate identice (A-X, B-Y și C-Z) care sunt plasate SPAȚIAL la  $120^\circ$  (electrice).

Înfășurarea este parcursă de un sistem trifazat de curenți. La momentul  $t_0$ , curenții sunt pozitivi prin fazele A-X și C-Z și negativ prin faza B-Y (conform variației sinusoidale a curenților, prezentată în figura a) .

Pentru această situație, liniile câmpului magnetic creat de sistemul trifazat de curenți se închid ca în figura b și formează doi poli (N și S), marcați cu galben (pentru simplificarea desenului s-a prezentat doar câte o linie de câmp creată de grupul de 9 conductoare din dreapta ce este parcurs în același sens de curenții sistemului trifazat, respectiv o linie de câmp a celor 9 conductoare din stânga) .

Are loc o magnetizare a circuitului magnetic al statorului, care este particulară momentului  $t_0$ .

Expresia sistemului trifazat de curenți ce străbate conductoarele înfășurării statorice este:

$$\begin{cases} i_{AX} = \sqrt{2}I \sin \omega t \\ i_{BY} = \sqrt{2}I \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ i_{CZ} = \sqrt{2}I \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{cases}$$

Câmpul magnetic rezultat din întrefier este suma câmpurilor magnetice create de fiecare înfășurare monofazata in parte, adică:

$$H_{rez} = H_{AX} + H_{BY} + H_{CZ}$$

sau:

$$\begin{aligned} H_{rez} &= \\ &= H_{max} \sin \omega t \cdot \cos p\alpha + H_{max} \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \cos \left( p\alpha - \frac{2\pi}{3} \right) \\ &+ H_{max} \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \cdot \cos \left( p\alpha - \frac{4\pi}{3} \right) \end{aligned}$$

Întrucât:  $\sin x \cdot \cos y = \frac{1}{2} [\sin(x + y) + \sin(x - y)]$

Expresia câmpului  
rezultant devine:

$$\begin{aligned} H_{rez} &= \\ &= \frac{1}{2} H_{max} [\sin(\omega t + p\alpha) + \sin(\omega t - p\alpha)] \\ &+ \frac{1}{2} H_{max} \left[ \sin\left(\omega t + p\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) + \sin(\omega t - p\alpha) \right] \\ &+ \frac{1}{2} H_{max} \left[ \sin\left(\omega t + p\alpha - \frac{8\pi}{3}\right) + \sin(\omega t - p\alpha) \right] \end{aligned}$$

dar:  $\sin(\omega t + p\alpha) + \sin\left(\omega t + p\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) + \sin\left(\omega t + p\alpha - \frac{8\pi}{3}\right) = 0$

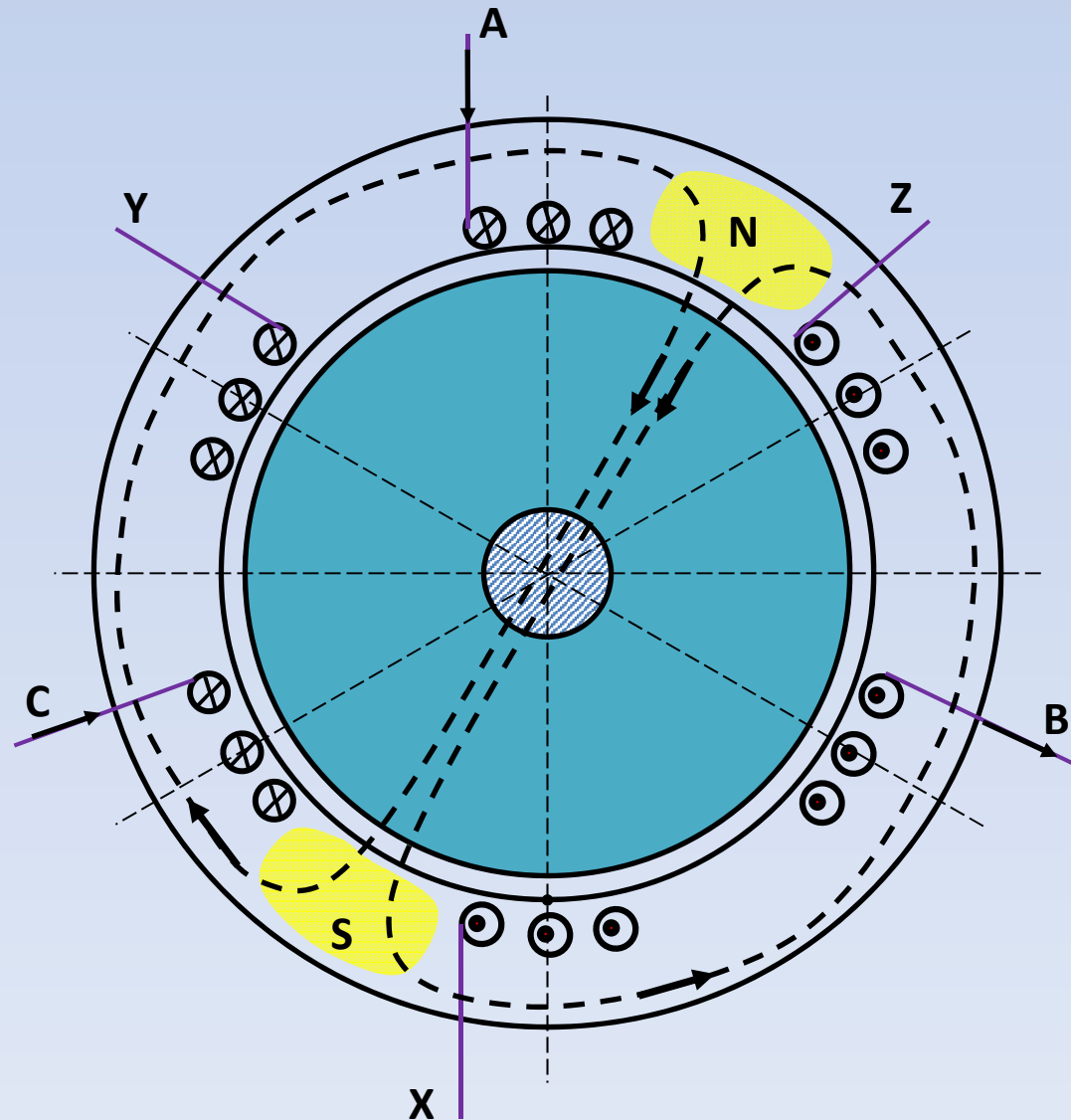
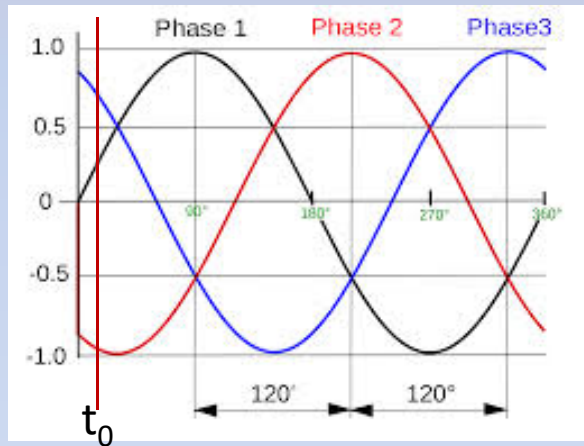
$$H_{rez} = \frac{3}{2} H_{max} \cdot \sin(\omega t - p\alpha);$$

$$B_{rez} = \frac{3}{2} B_{max} \cdot \sin(\omega t - p\alpha)$$

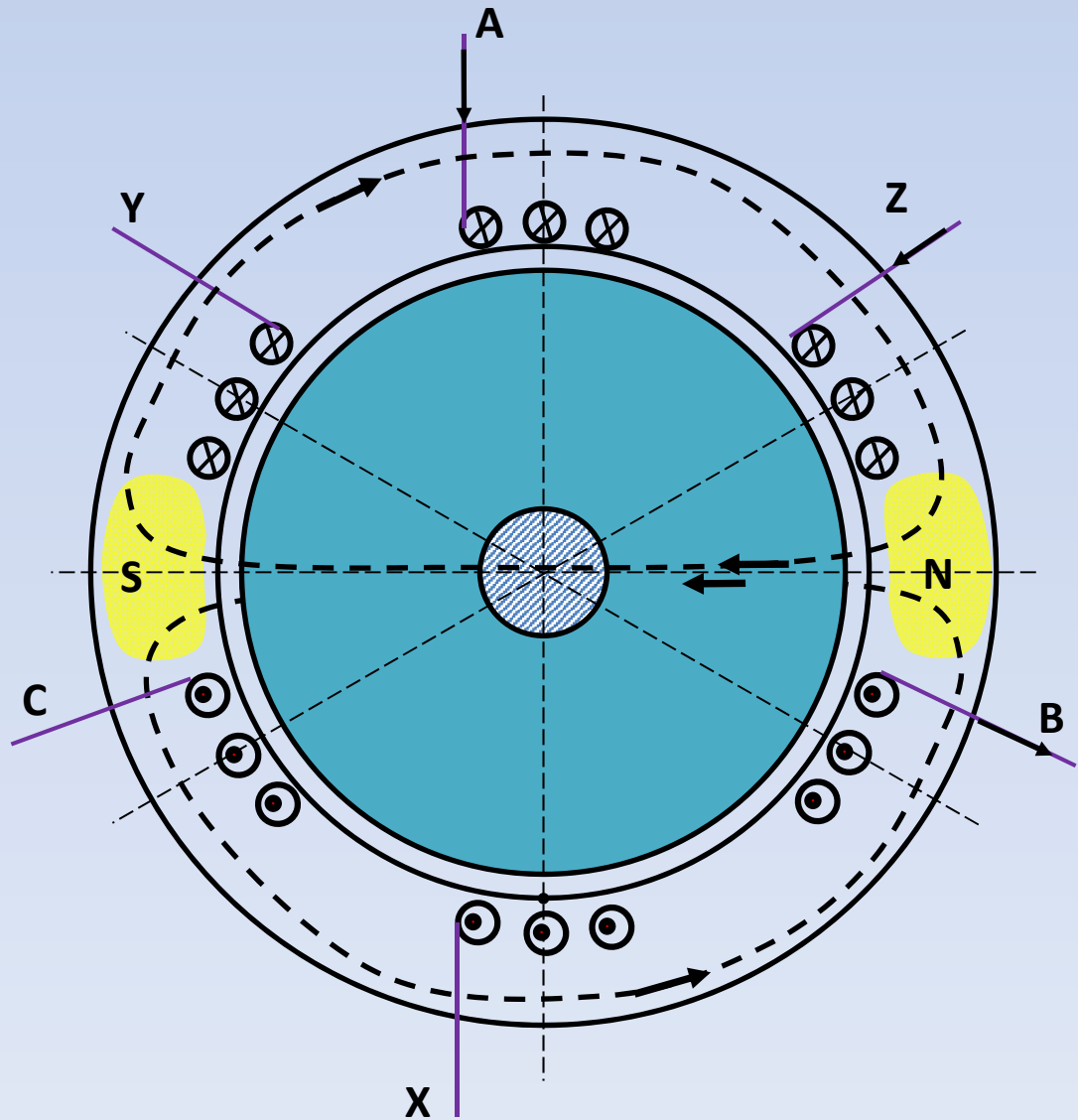
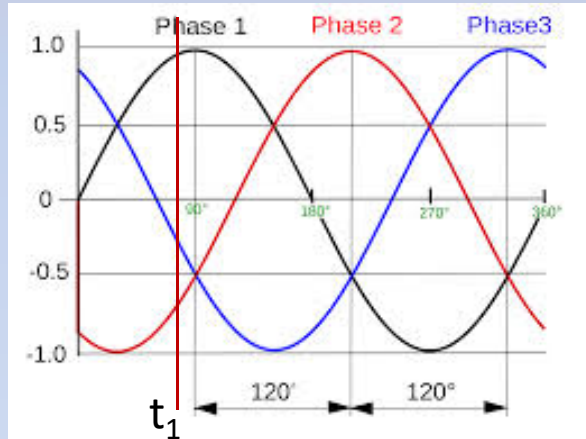


**Această relație reprezintă expresia unui câmp  
ÎNVÂRTITOR care este VARIABIL in spațiu si VARIABIL in  
timp**

a) Poziția câmpului la momentul  $t_0$

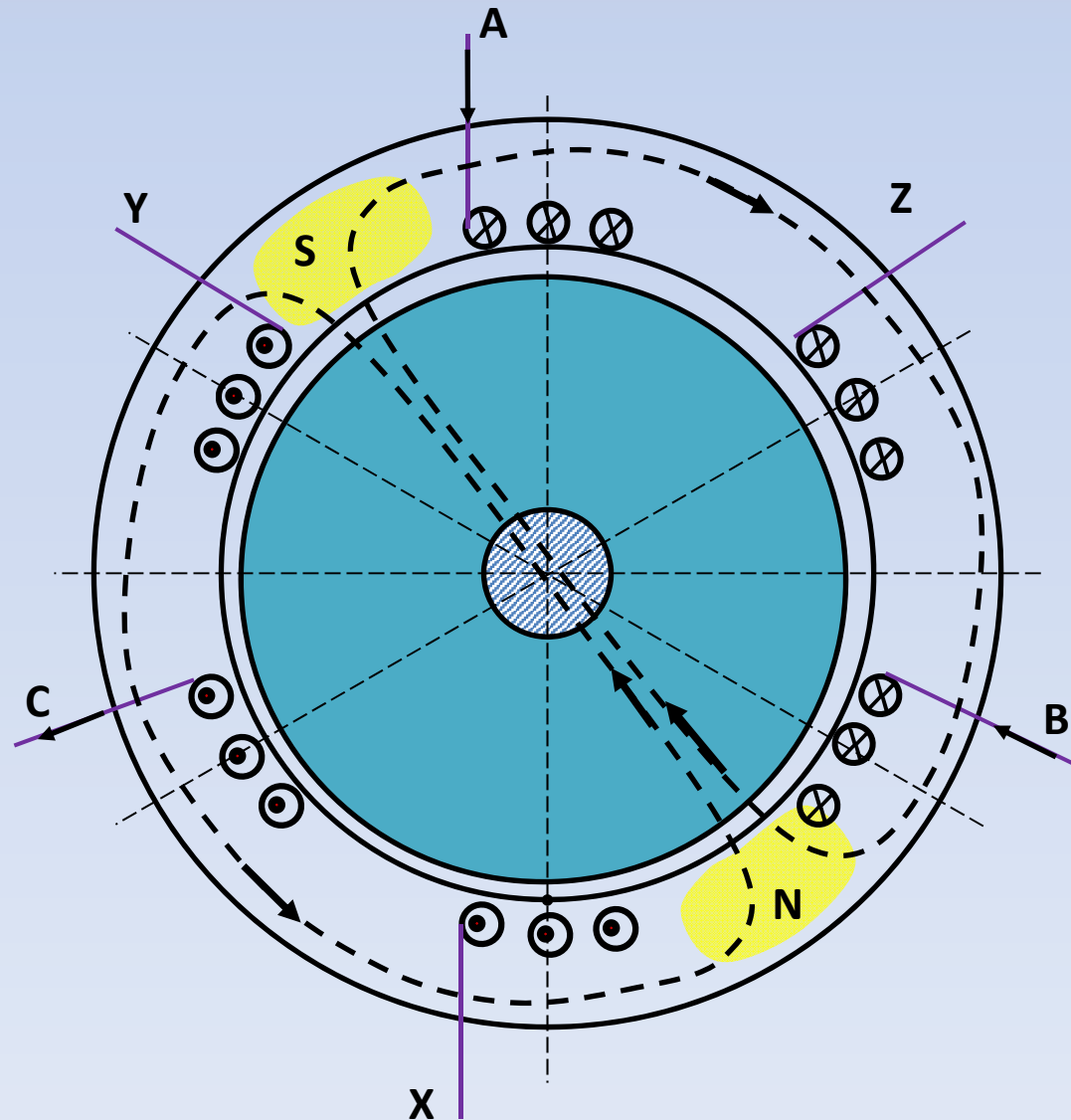
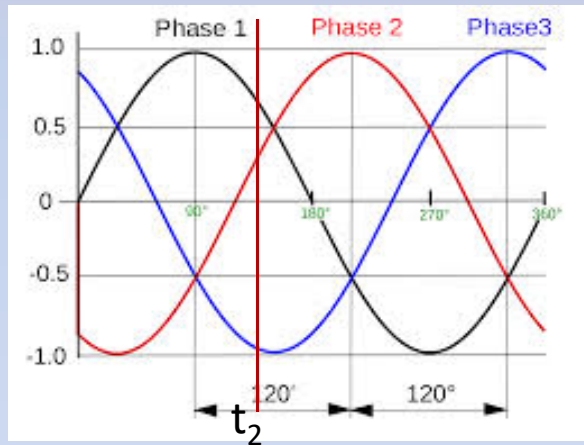


b) Poziția câmpului la momentul  $t_1$

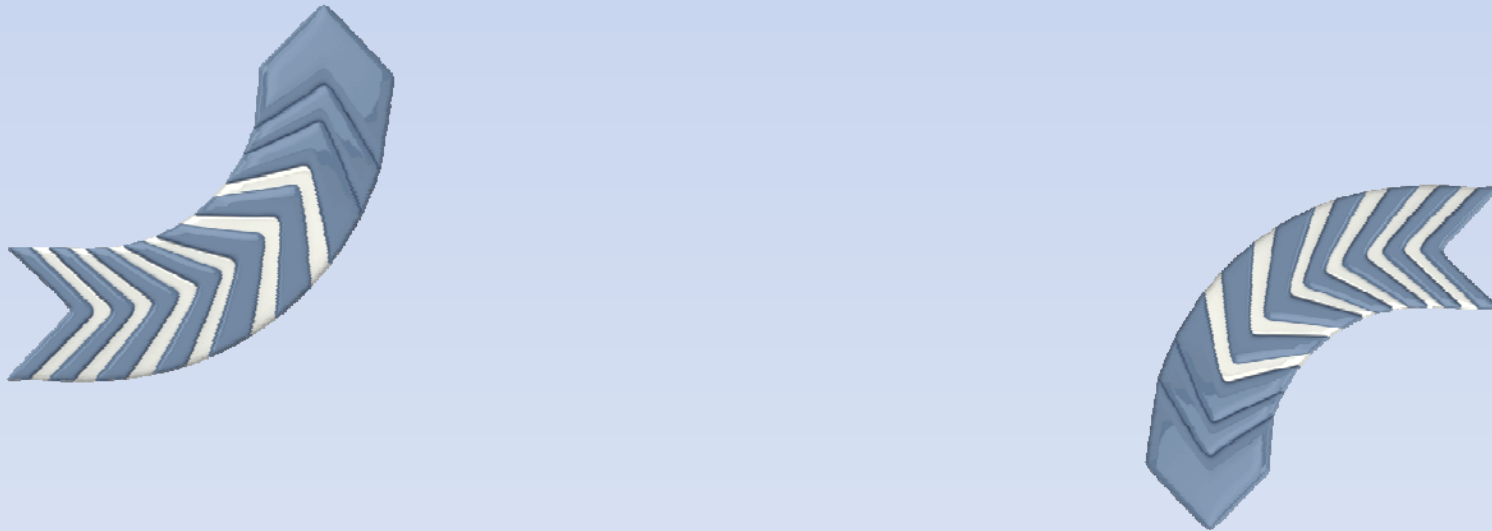




c) Poziția câmpului la momentul  $t_2$

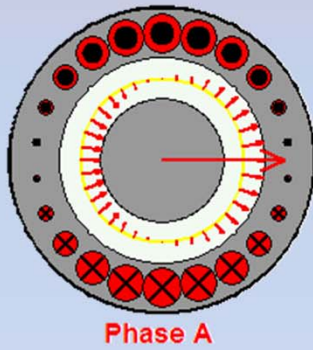


**Sistemul de curenți trifazat (caracterizat de defazajul temporal între curenți de  $120^\circ$ ) ce străbate înfășurarea trifazată (având fazele decalate spațial la  $120^\circ$  electrice) determină formarea unui câmp magnetic ai cărui poli ocupă diferite poziții spațiale.**

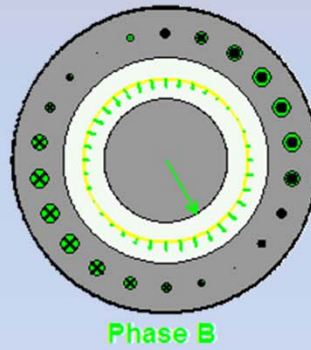


**Poziția polilor magnetici sugerează o rotire a acestora. Sensul de rotire este dat de succesiunea fazelor (sensul curenților prin cele trei înfășurări de fază).**

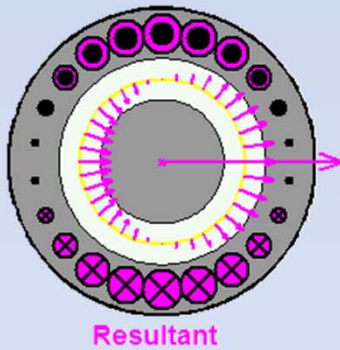
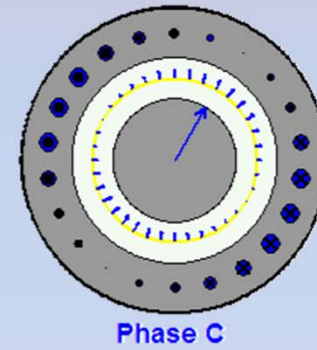
Câmpul creat de faza A-X



Câmpul creat de faza B-Y

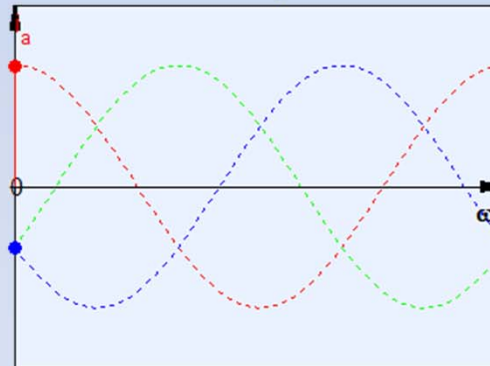


Câmpul creat de faza C-Z



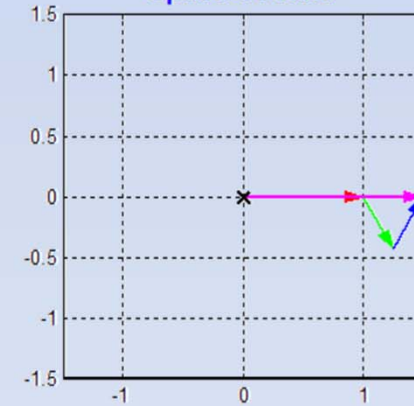
Câmpul rezultat

Balanced three-phase currents



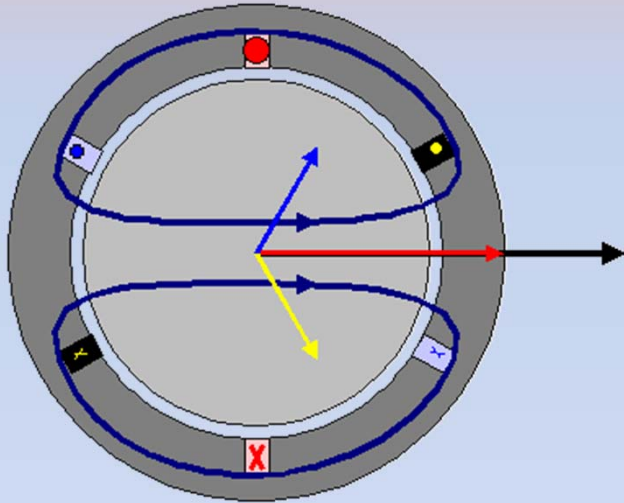
Variația curenților sistemului trifazat

Space vectors



Variația vectorilor spațiali de câmp

0°



Viteza câmpului învârtitor este data de:

$$\Omega_1 = \frac{\omega}{p} \quad [\text{rad/sec}]$$

unde:  $\omega$ -pulsăția curentului,  $p$ -numărul perechilor de poli magnetici formați

Întrucât:  $\Omega_1 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p}$  dar, de asemenea:  $\Omega_1 = \frac{2\pi \cdot n_1}{60}$

Rezulta expresia turației câmpul învârtitor:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad [\text{rot/min}]$$

**Viteza câmpului învârtitor poarta numele de VITEZA DE SINCRONISM.**

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$$

In funcție de numărul de poli ai mașinii, pentru frecvența de 50 Hz, pot exista următoarele turații de sincronism:

$$p = 1 \rightarrow n_1 = 3000 \text{ rot/min}$$

$$p = 2 \rightarrow n_1 = 1500 \text{ rot/min}$$

$$p = 3 \rightarrow n_1 = 1000 \text{ rot/min}$$

$$p = 4 \rightarrow n_1 = 750 \text{ rot/min}$$

.....



# INVERSAREA SENSULUI DE rotație AL CÂMPULUI ÎNVÂRTITOR

Dacă se modifică succesiunea curenților a doua faze (de ex. faza a doua și a treia) se obține:

$$\begin{aligned} H_{rez} &= \\ &= H_{max} \sin \omega t \cdot \cos p\alpha + H_{max} \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \cdot \cos \left( p\alpha - \frac{2\pi}{3} \right) \\ &+ H_{max} \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \cos \left( p\alpha - \frac{4\pi}{3} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{rez} &= \\ &= \frac{1}{2} H_{max} [\sin(\omega t + p\alpha) + \sin(\omega t - p\alpha)] \\ &+ \frac{1}{2} H_{max} \left[ \sin(\omega t + p\alpha - 2\pi) + \sin \left( \omega t - p\alpha - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ &+ \frac{1}{2} H_{max} \left[ \sin(\omega t + p\alpha - 2\pi) + \sin \left( \omega t - p\alpha + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \end{aligned}$$

$$H_{rez} = \frac{3}{2} H_{max} \cdot \sin(\omega t + p\alpha)$$

$$\Omega_1 = -\frac{\omega}{p}$$



**Inversarea sensului de rotație al câmpului învârtitor se obține prin schimbarea succesiunii fazelor curenților (inversarea a două faze).**

## TEOREMA LUI LEBLANC

Expresia câmpului alternativ este:

$$H = H_{max} \cos p\alpha \cdot \sin \omega t$$

Prin înlocuirea produsului trigonometric  $\cos(p\alpha) \cdot \sin(\omega t)$ , se obține:

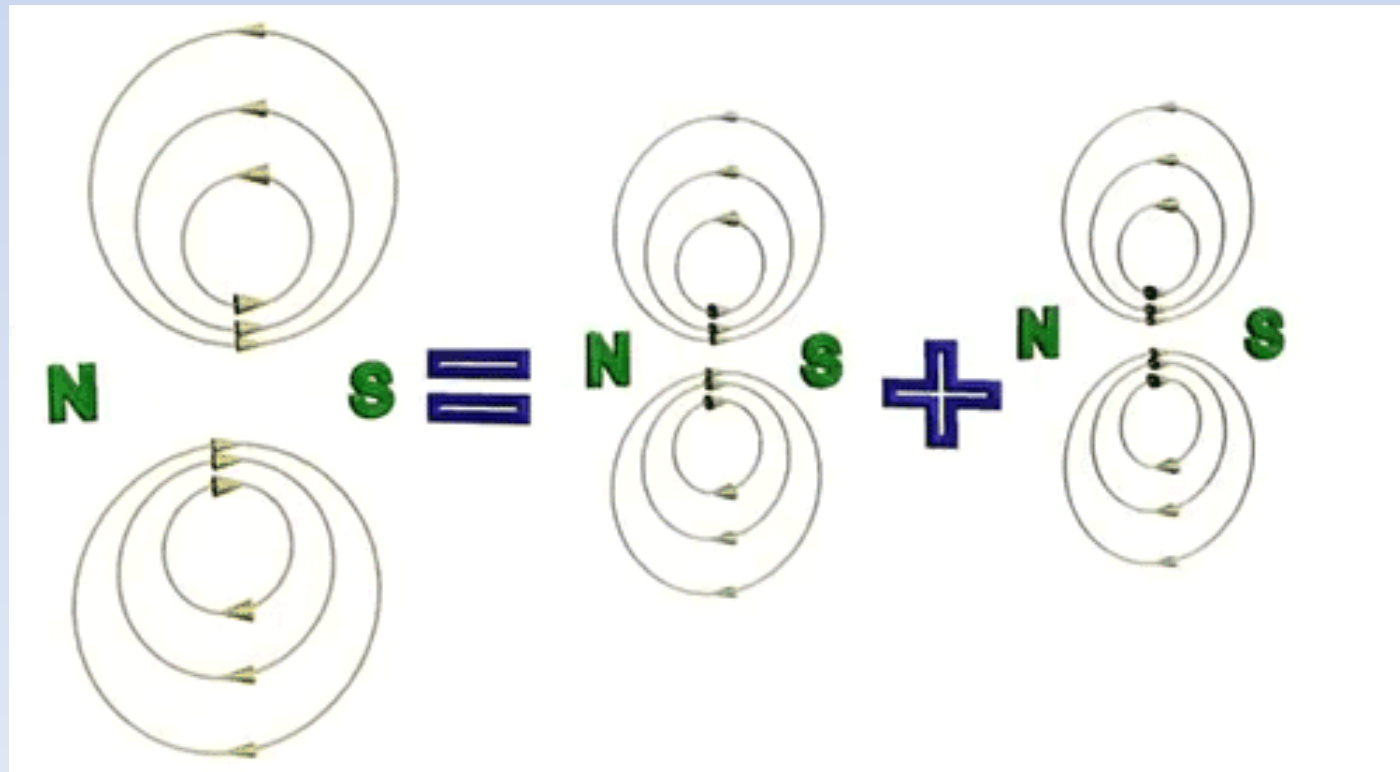
$$H = \frac{1}{2} H_{max} \cdot \sin(\omega t - p\alpha) + \frac{1}{2} H_{max} \cdot \sin(\omega t + p\alpha)$$

Expresia unui câmp magnetic învârtitor  
ce se rotește în sens „direct”

Expresia unui câmp magnetic învârtitor  
ce se rotește în sens „invers”



Câmpul magnetic creat de o înfășurare monofazată este echivalent cu două câmpuri învârtitoare identice care se rotesc în sensuri contrare și au amplitudinea pe jumătate.







***Câmp pulsatoriu (alternativ)*** – este creat de o înfășurare monofazată

***Câmp învârtitor*** – este creat de o înfășurare polifazată

***Viteza de sincronism*** – viteza câmpului magnetic învârtitor



Special Thanks  
Sajith K V

[www.LearnEngineering.org](http://www.LearnEngineering.org)

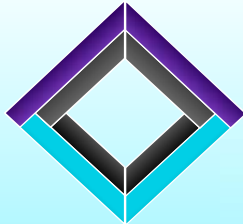


Curs 3

# Structura mașinilor asincrone



# CUPRINS



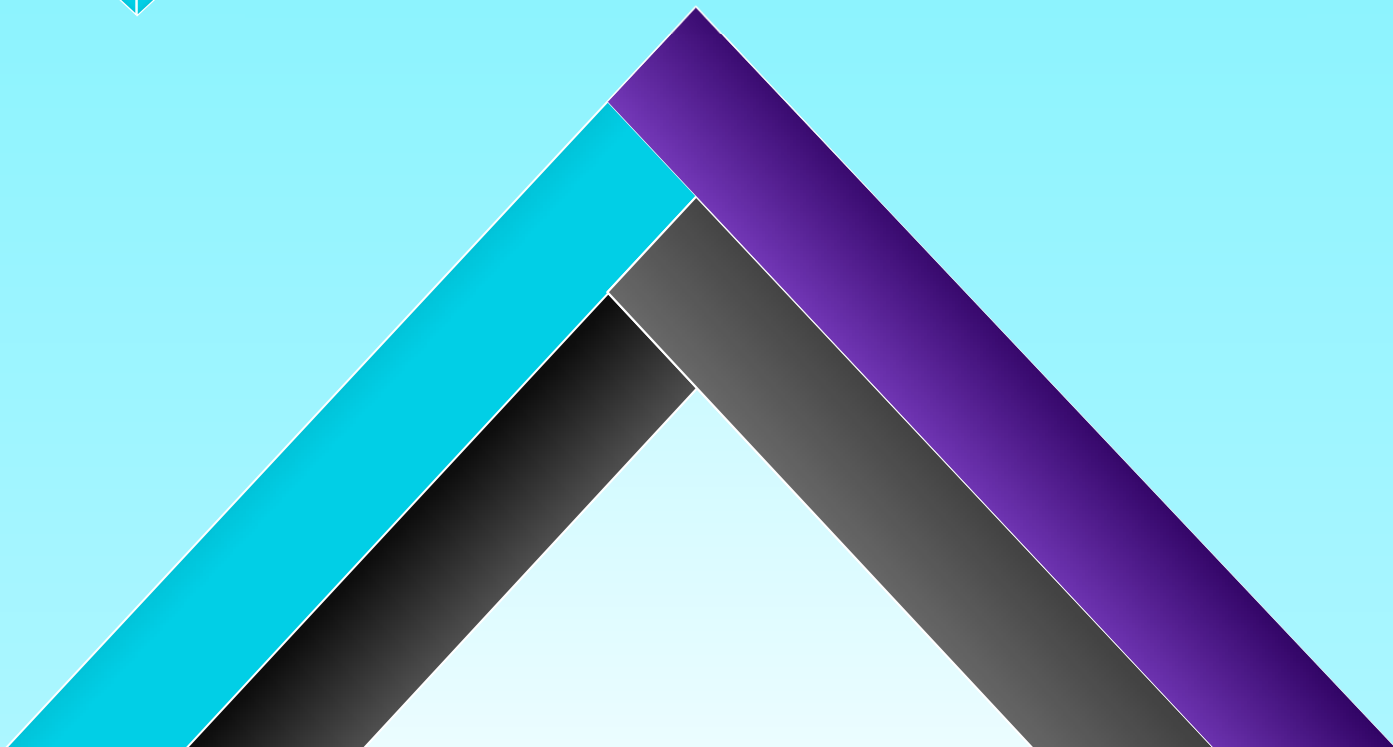
1. Înfășurările mașinilor de curent alternativ



2. Elemente componente si tipuri constructive de mașini asincrone



3. Principiul de funcționare a mașinii asincrone







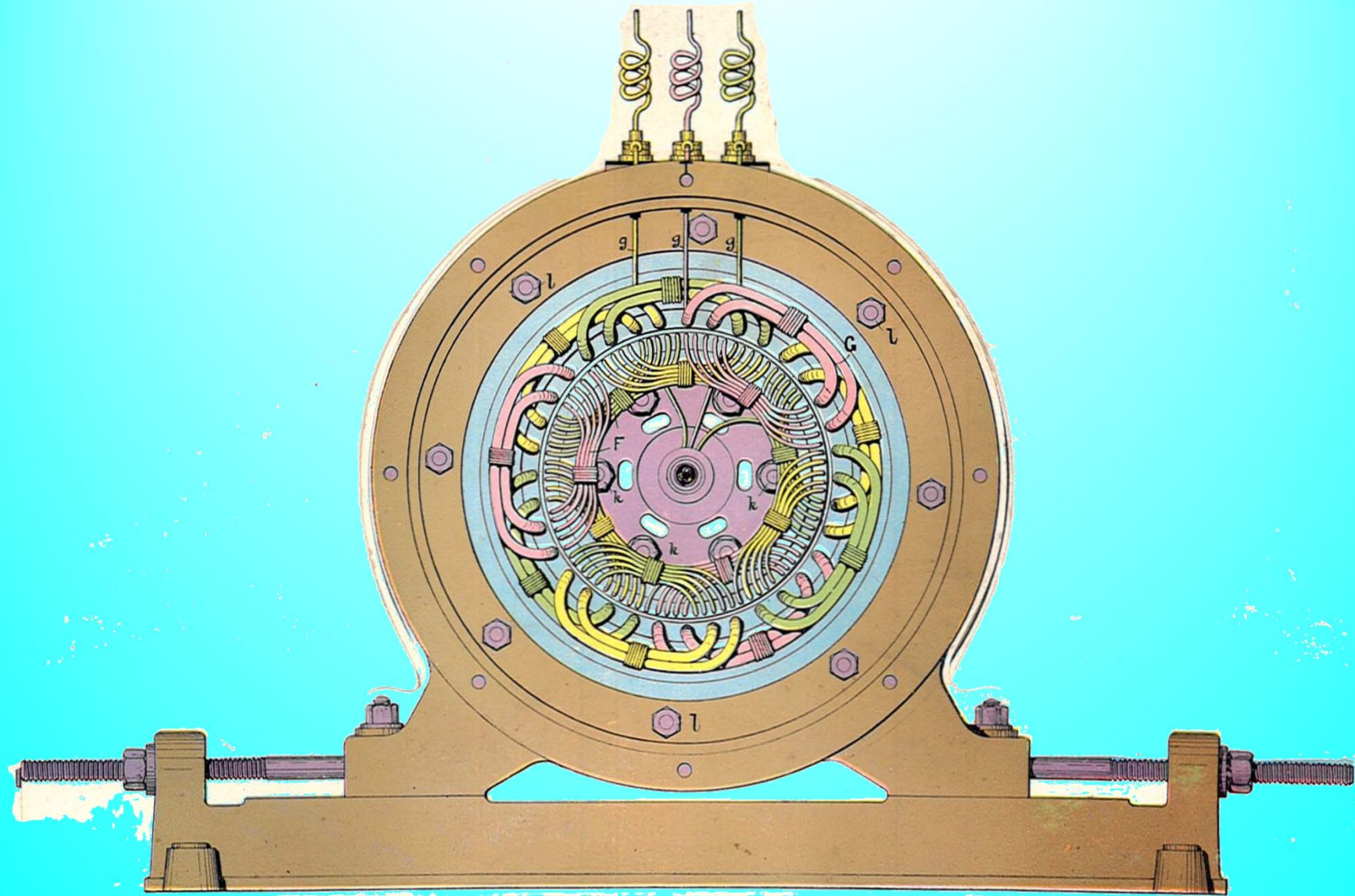
# Înfășurări de curent alternativ



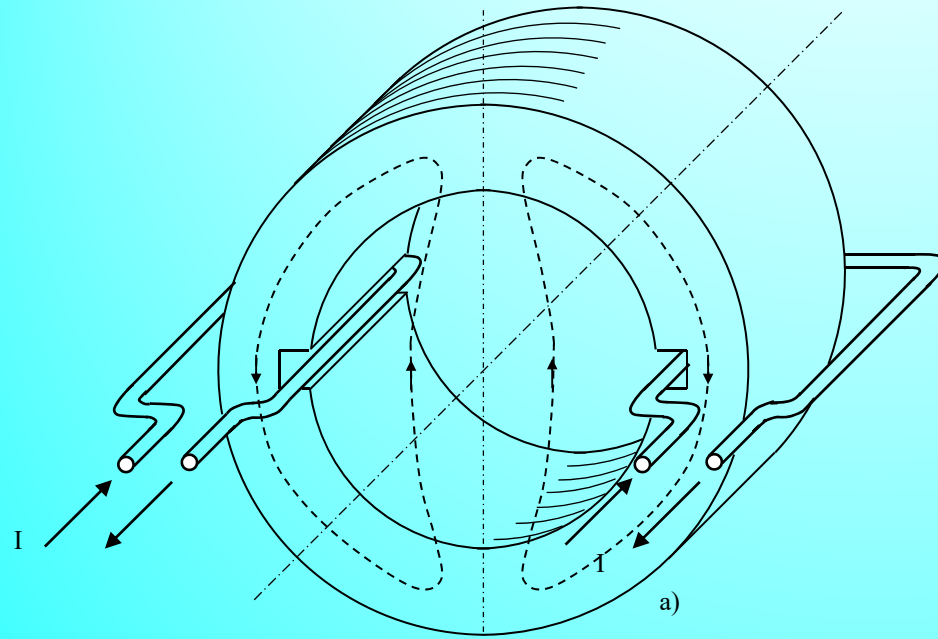
- Înfășurări de tip repartizat

- Înfășurări in scurtcircuit (colivie de veveriță)

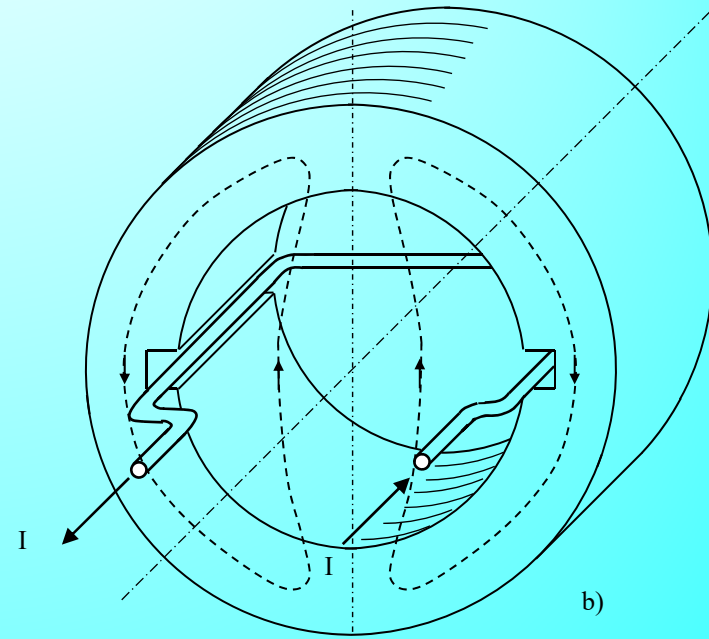
- Înfășurări de tip concentrat



**Mașină asincronă – secțiune transversală**



a. Înfășurare în inel (toroidală)  
(o singura latura activa)



b. Înfășurare în tobă  
(ambele laturi active)

$$2p = 2$$

Bobinele ce formează înfășurarea în inel sunt plasate în câte o creștătură statorică având laturile de o parte și de cealaltă a statorului (fig. a din slide-ul anterior). Partea activă a fiecărei bobine este latura plasată în creștătură.

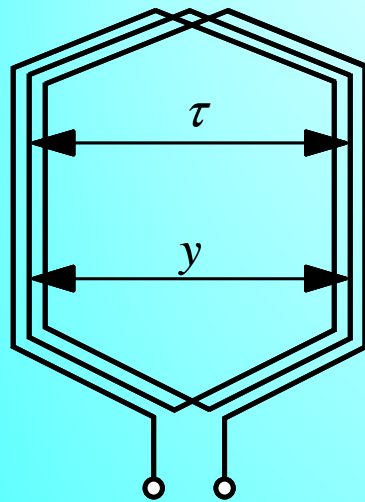
Acest tip de înfășurare este mai puțin folosit întrucât se consideră că o mare parte din fiecare bobină nu joacă un rol activ.

Înfășurările în tobă sunt formate din bobine care au ambele laturi plasate în creștături statorice și deci partea activă este preponderentă.

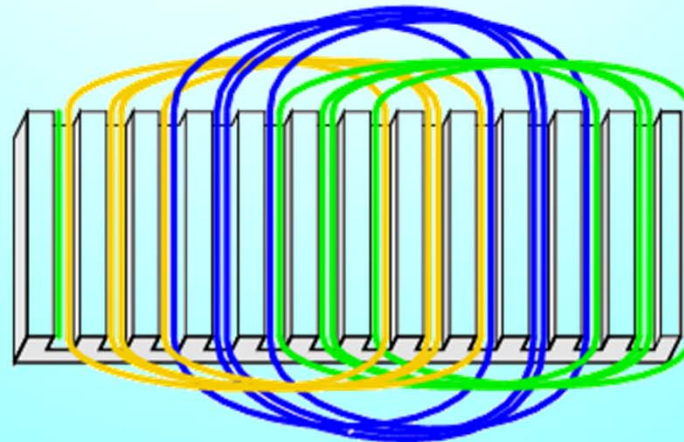
Acest tip de înfășurare este cel mai utilizat în construcția actuală a mașinilor de curent alternativ.





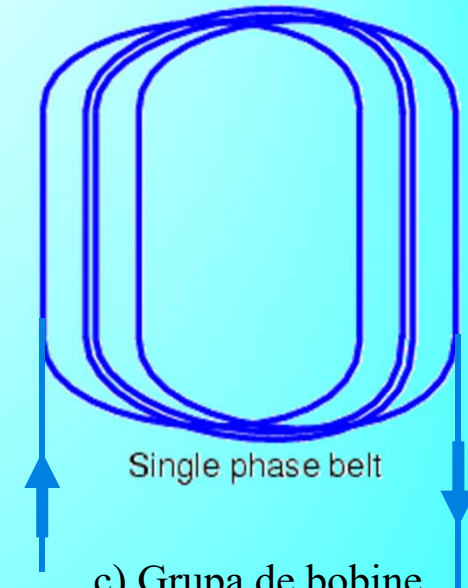


a)  $w_s=3$  (buclată)



3- $\phi$  distributed winding

b) Înfășurare distribuita trifazata



Single phase belt

c) Grupa de bobine

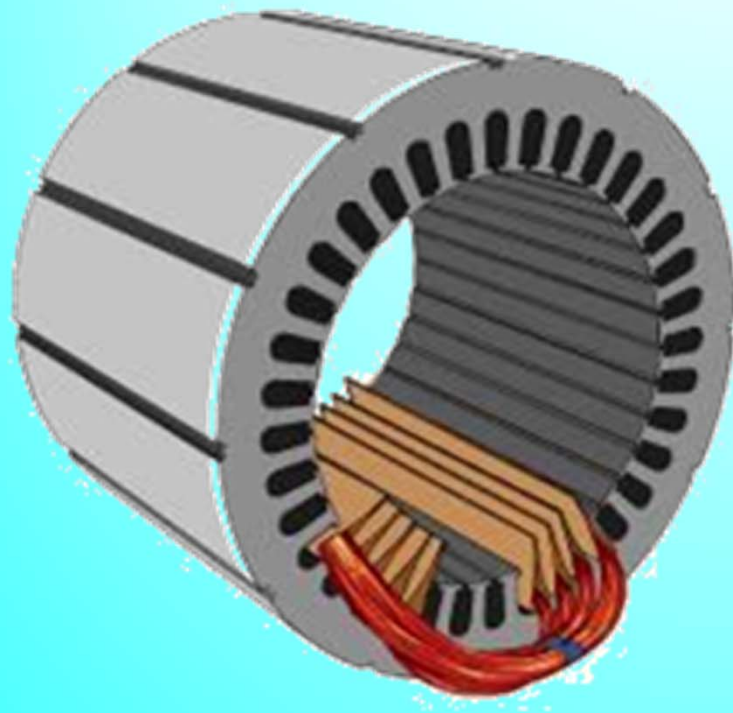
Fiecare bobină de tip repartizat are o latură de ducere (de ex. latura din stânga a figurii a) și o latură de întoarcere, care sunt plasate în creștăturile statorului. Bobinele pot fi formate dintr-o singură spirală sau din mai multe spire (în cazul bobinei din fig. a sunt 3 spire).

Distanța, în număr de creștături, dintre latura de ducere și latura de întoarcere se numește „pasul bobinei” sau „pasul înfășurării”.

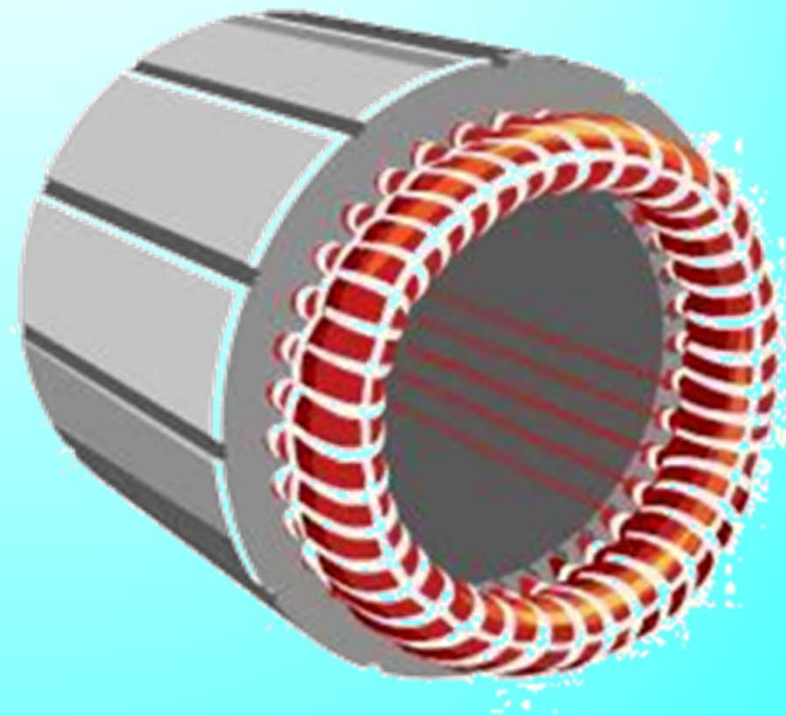
$y$  – pasul înfășurării;  $\tau$  – pasul diametral ( $\tau = \frac{Z}{2p}$ )

$y = \tau$  – pas diametral;  $y < \tau$  – pas scurtat;  $y > \tau$  – pas alungit





a) Bobinare in curs de realizare



b) Bobinaj finalizat





Bobinarea unui stator de mașină de CA cu bobine preformate

# CLASIFICARE

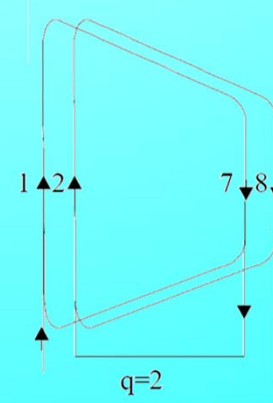
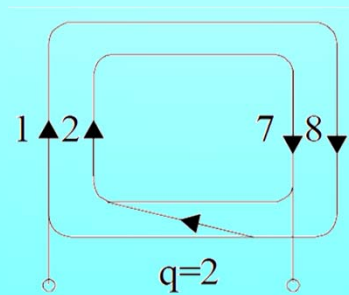
## I. După tipul bobinelor

➤ Bobine egale

➤ Bobine concentrice

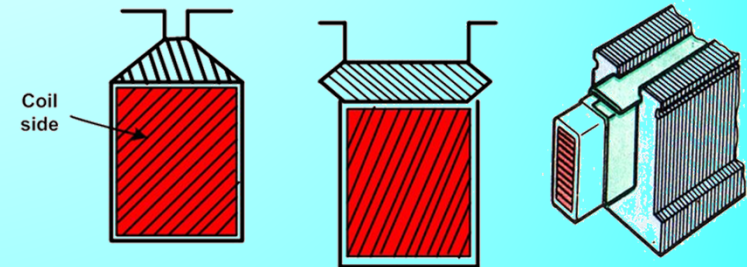
➤ Bobine trapezoidale

➤ Bobine in manta

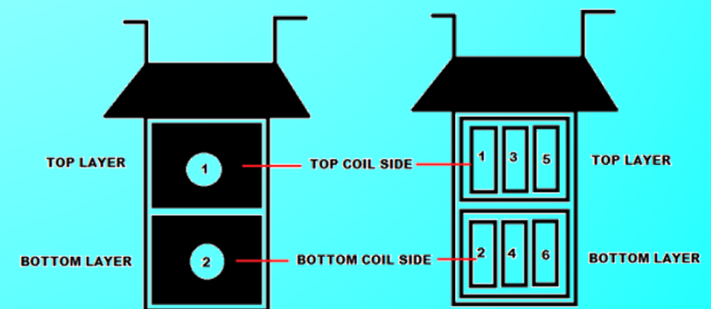


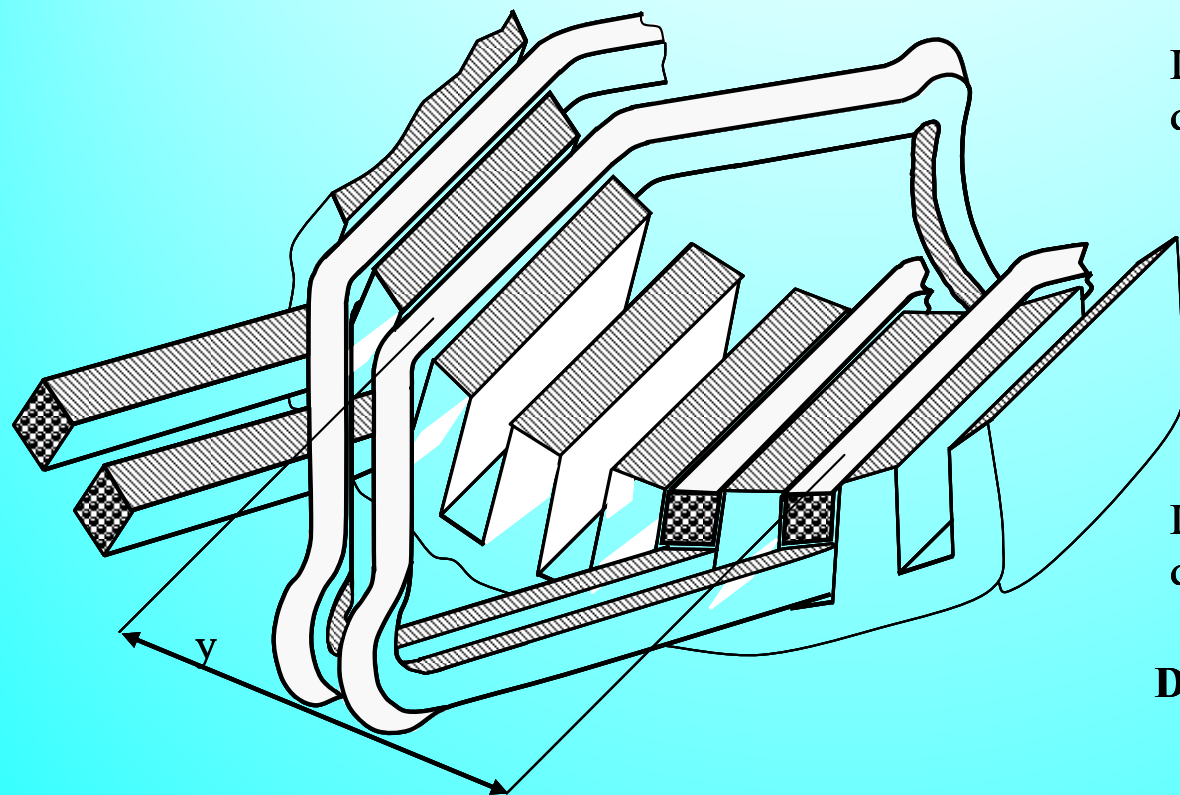
## II. După numărul de straturi al înfășurării

- Înfășurări într-un singur strat (in fiecare crestătură este plasată o *singura* latură de bobină);



- Înfășurări in doua straturi (in fiecare crestătură sunt plasate *două* laturi a două bobine diferite – o latură de ducere respectiv o latură de întoarcere. Bobinele pot fi din aceeași fază sau din faze diferite).





Latură (mănunchi)  
de ducere

Latură (mănunchi)  
de întoarcere

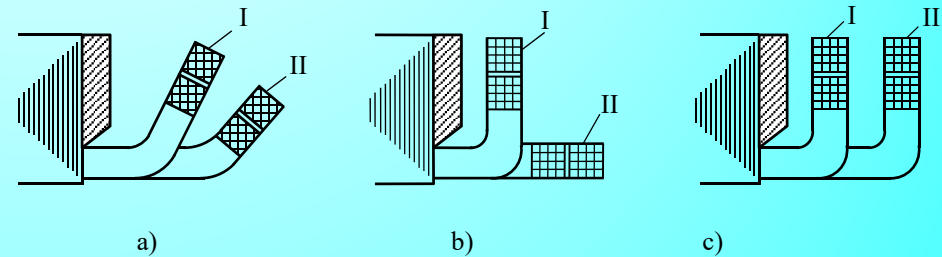
**Detaliu creștătură**

Înfășurare în dublu strat



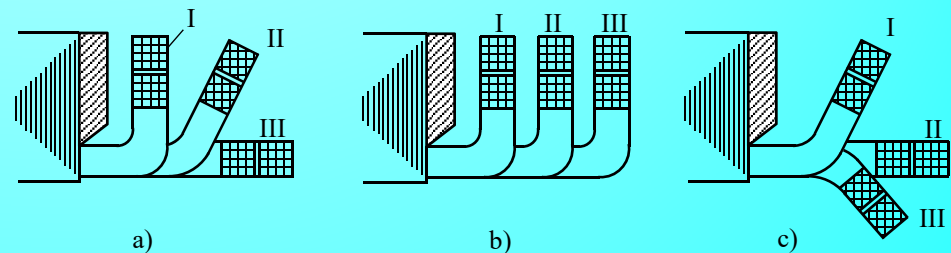
### III. După dispunerea părților frontale

➤ **Înfășurări in doua etaje**



Forme ale capetelor de bobine la înfășurări în 2 etaje

➤ **Înfășurări in trei etaje**



Dispunerea capetelor de bobine la înfășurări în 3 etaje

➤ **Înfășurări cu capetele dispuse in coroana**

# CALCULUL INFASURARILOR TRIFAZATE

Date inițiale:

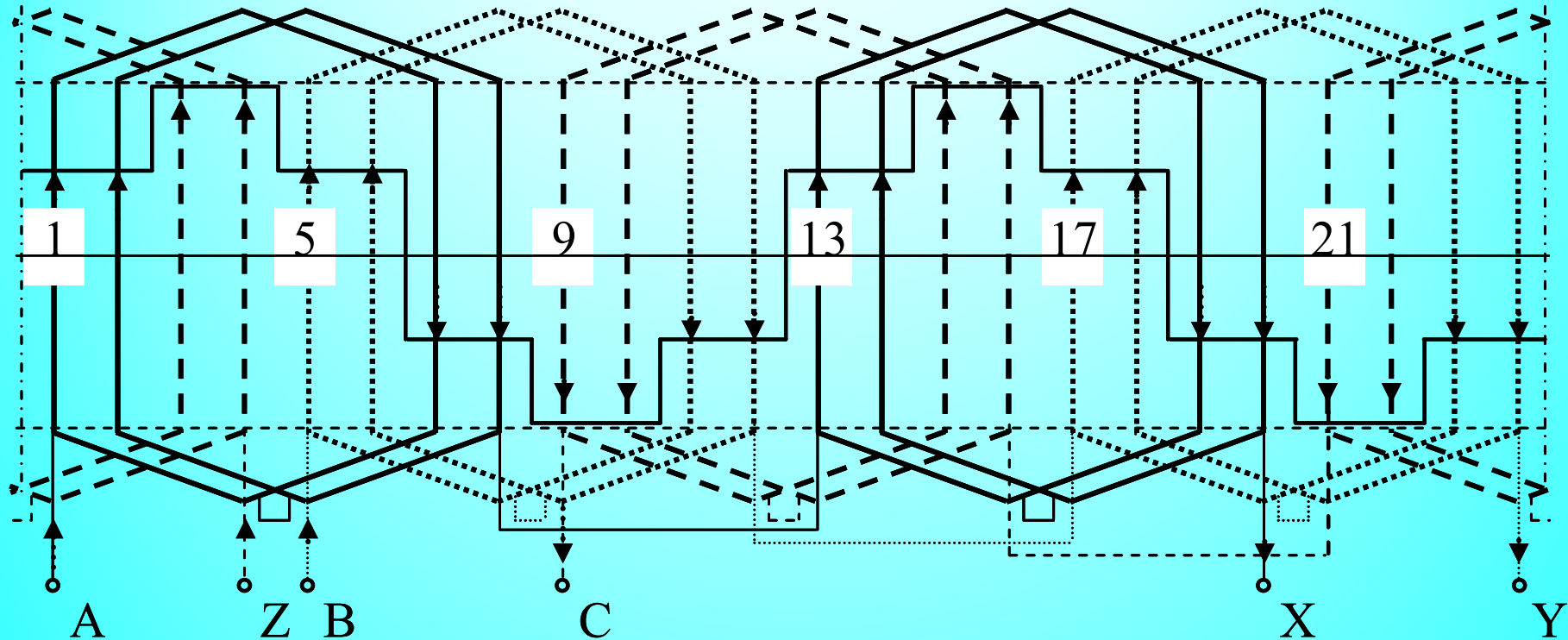
- $Z$  – numărul de crestături statorice
- $2p$  – numărul de poli
- $m$  – numărul de faze

Date calculate:

- $Q$  – numărul de crestături pe pol  $Q = \frac{Z}{2p}$
- $q$  – numărul de crestături pe pol și fază  $q = \frac{Z}{2pm}$
- $y$  – pasul înfășurării  $y = \tau = \frac{Z}{2p}$
- unghiul electric al fazorilor  $\alpha_{el} = \frac{2\pi}{Z} \cdot p = \frac{360}{Z} \cdot p$



## Înfășurare trifazată cu bobine identice (în manta): $Z=24$ , $2p=4$ , $a=1$

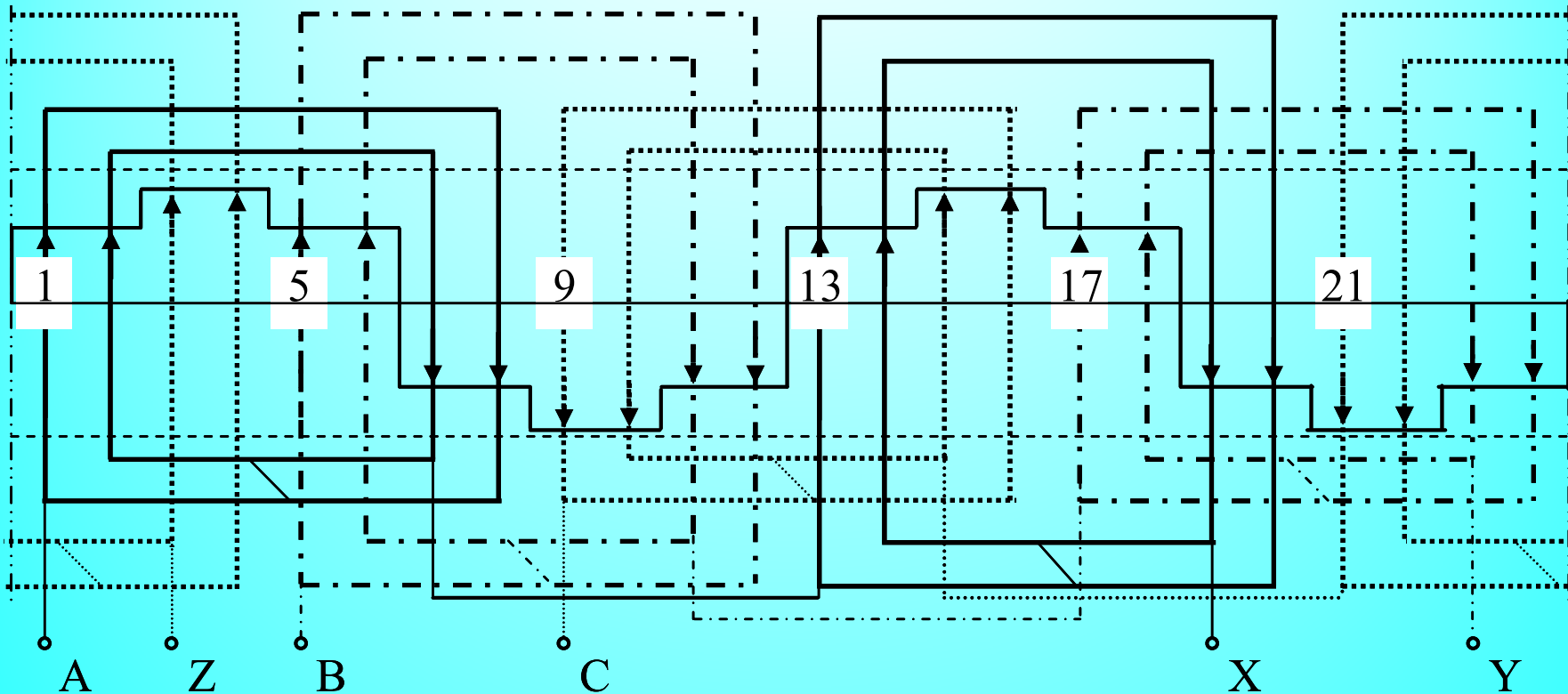


$Q=24/4=6$ ;  $q=24/12=2$ ;  $y=\tau=24/4=6$ .

- Numărul de creștături pe pol,  $Q$ , arata cate creștături contribuie la formarea fiecărui pol (de ex. primele 6 creștături sunt parcurse de curent in același sens si formează un pol).
- Numărul de creștături pe pol si faza,  $q$ , arata cate creștături ale unei faze contribuie la formarea fiecărui pol (de ex. primele 2 creștături ale fazei AX contribuie la formarea primului pol magnetic;
- Pasul înfășurării este diametral. Distanța dintre latura de ducere si latura de întoarcere a fiecărei bobine este de 6 creștături.



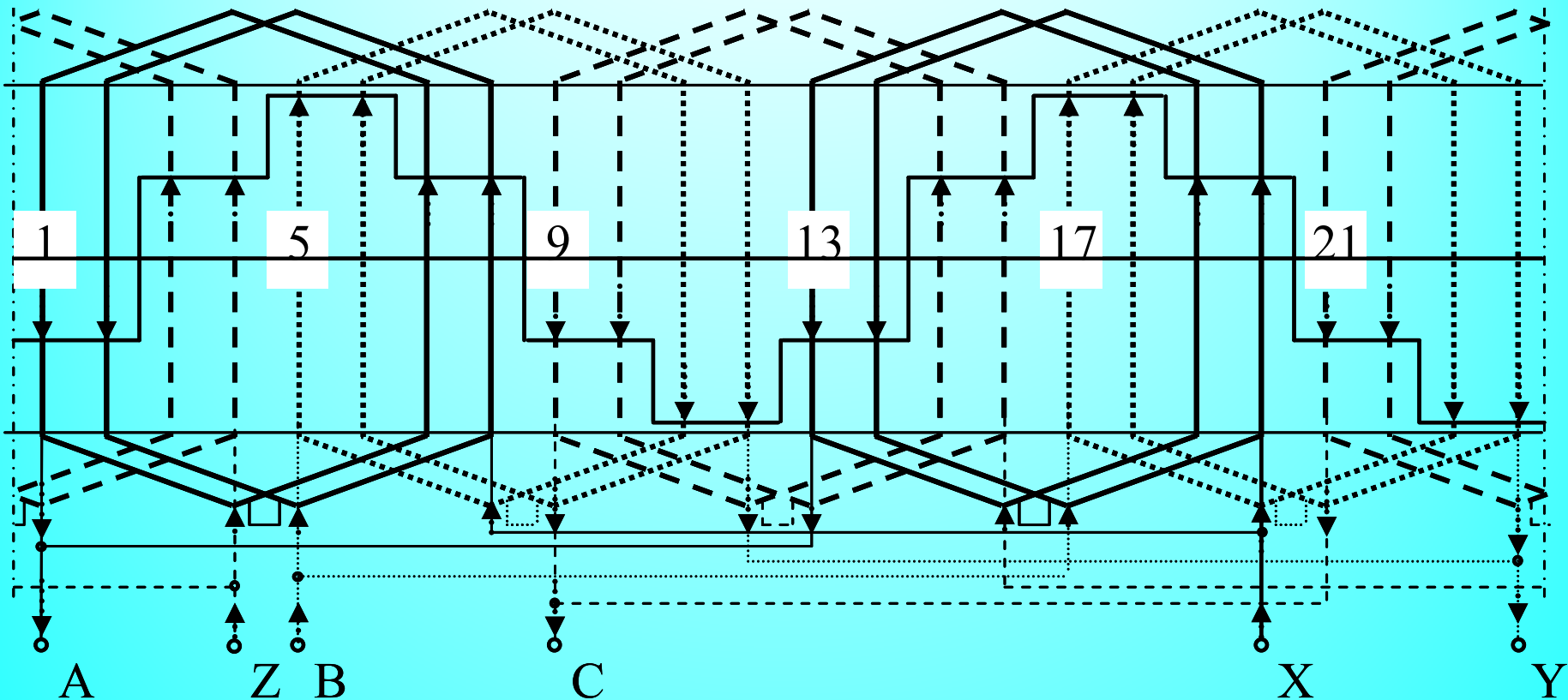
## Înfășurare trifazată într-un strat (în două etaje) cu bobine concentrice, $Z=24$ , $2p=4$ , $a=1$



- Din punct de vedere funcțional, aceasta înfășurare este identică cu cea de pe slide-ul anterior. Ea diferă doar din punct de vedere tehnologic;
- Pe fiecare faza exista cate 2 grupuri de bobine care sunt diferite ca mărime;
- In plus fiecare grup de bobine conține cate doua bobine de mărime diferita, așezate concentric;
- De ex: primul grup de bobine din faza AX are o bobina cu laturile plasate in creștăturile 1-8 și o a doua bobina având laturile plasate in creștăturile 2-7;
- Pasul înfășurării, ce corespunde cu pasul fiecărui grup de bobine, este:  $(7+5)/2=6$ , adică la fel ca in cazul anterior al înfășurării in manta.

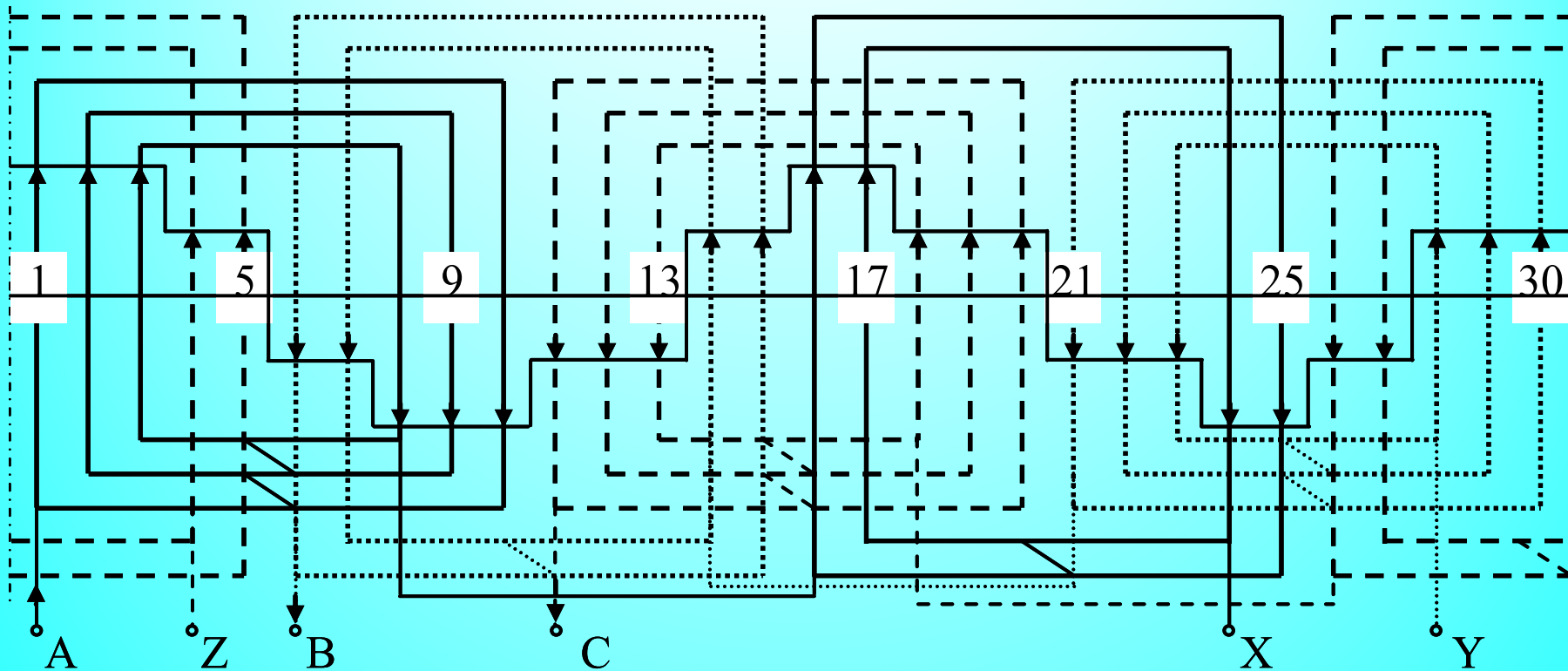


## Înfășurare trifazată cu bobine identice (în manta): $Z=24$ , $2p=4$ , $a=2$



- Parametrul  $a$  reprezintă numărul de căi de curent în paralel;
- Pe fiecare fază, cele două grupuri de bobine componente sunt legate în paralel;
- Și această înfășurare, din punct de vedere funcțional, este identică cu cele două anterioare. Curentul prin bobine este însă mai mic.

## Înfășurare trifazată cu $q$ fracționar (2,5) într-un strat: $Z=30, 2p=4$

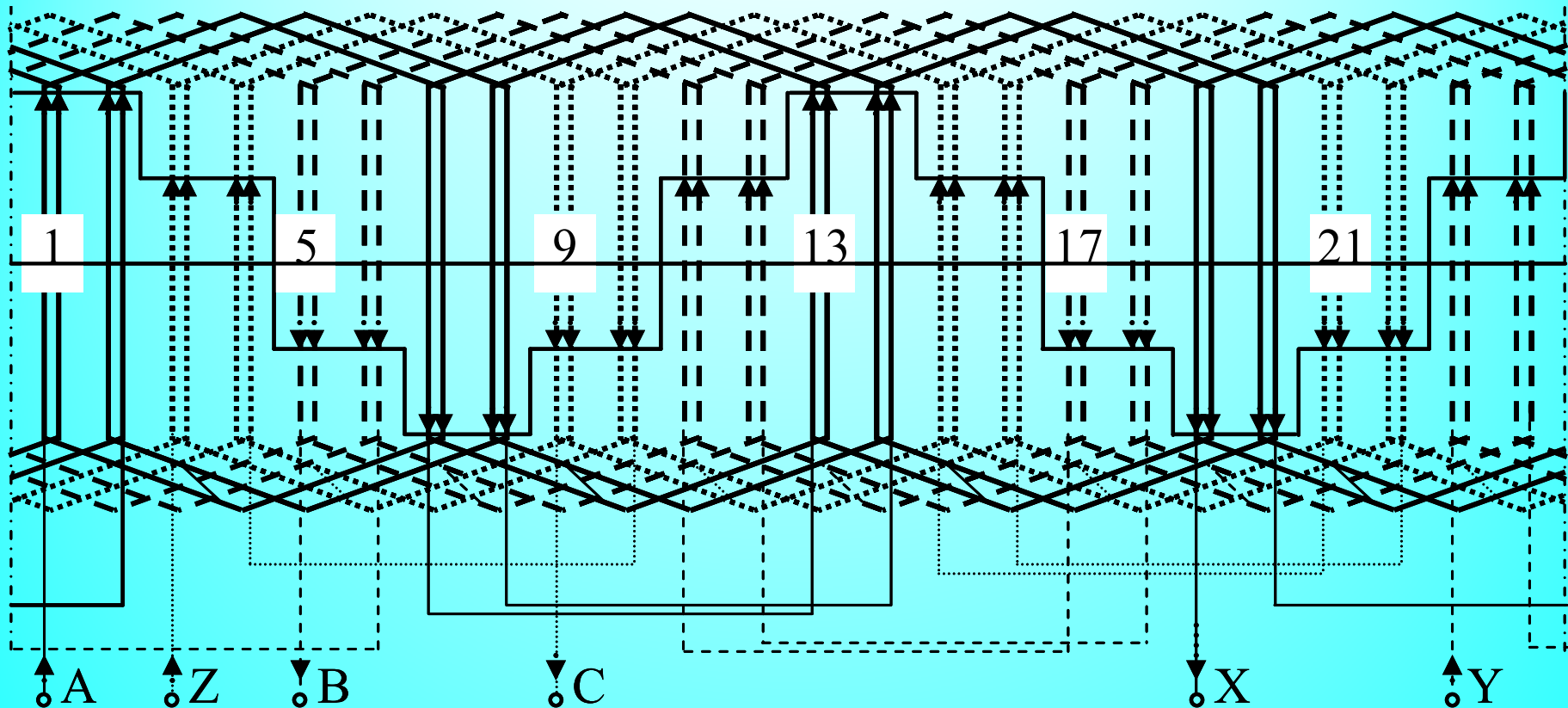


$$Q=30/4=7,5; q=30/12=2,5; y=\tau=30/4=7,5.$$

- Întrucât numărul  $q$  este fracționar, pe fiecare fază avem grupuri de bobine cu număr diferit de bobine: un grup cu 3 bobine și un grup cu 2 bobine (media este tocmai 2,5);
- Primul grup de bobine are pasul 7 iar cel de-al doilea are pasul 8 (media este 7,5);
- Înfășurarea este oarecum asimetrică pe fiecare fază dar simetrică în ansamblul ei.

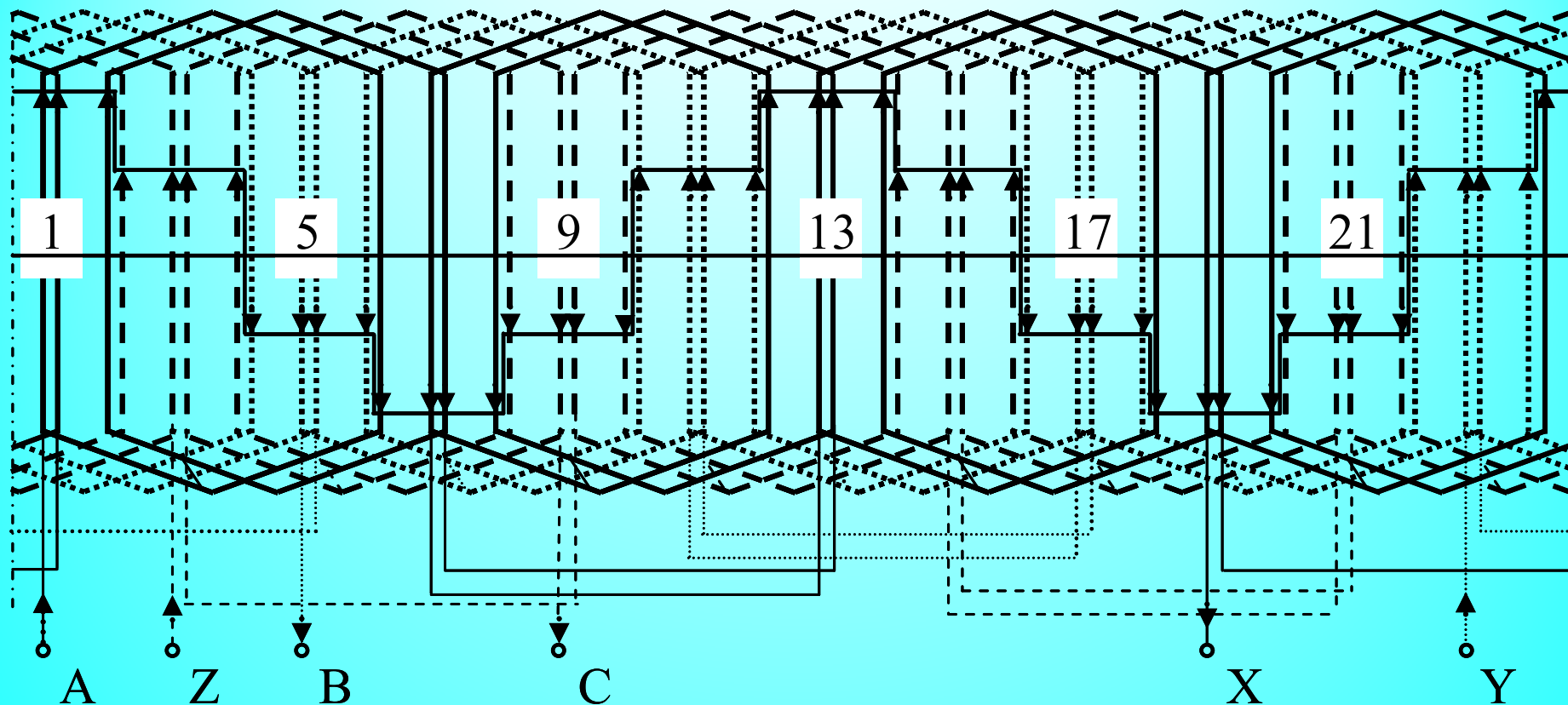


## Înfășurare trifazată în 2 straturi cu pas diametral: $Z=24$ , $2p=4$



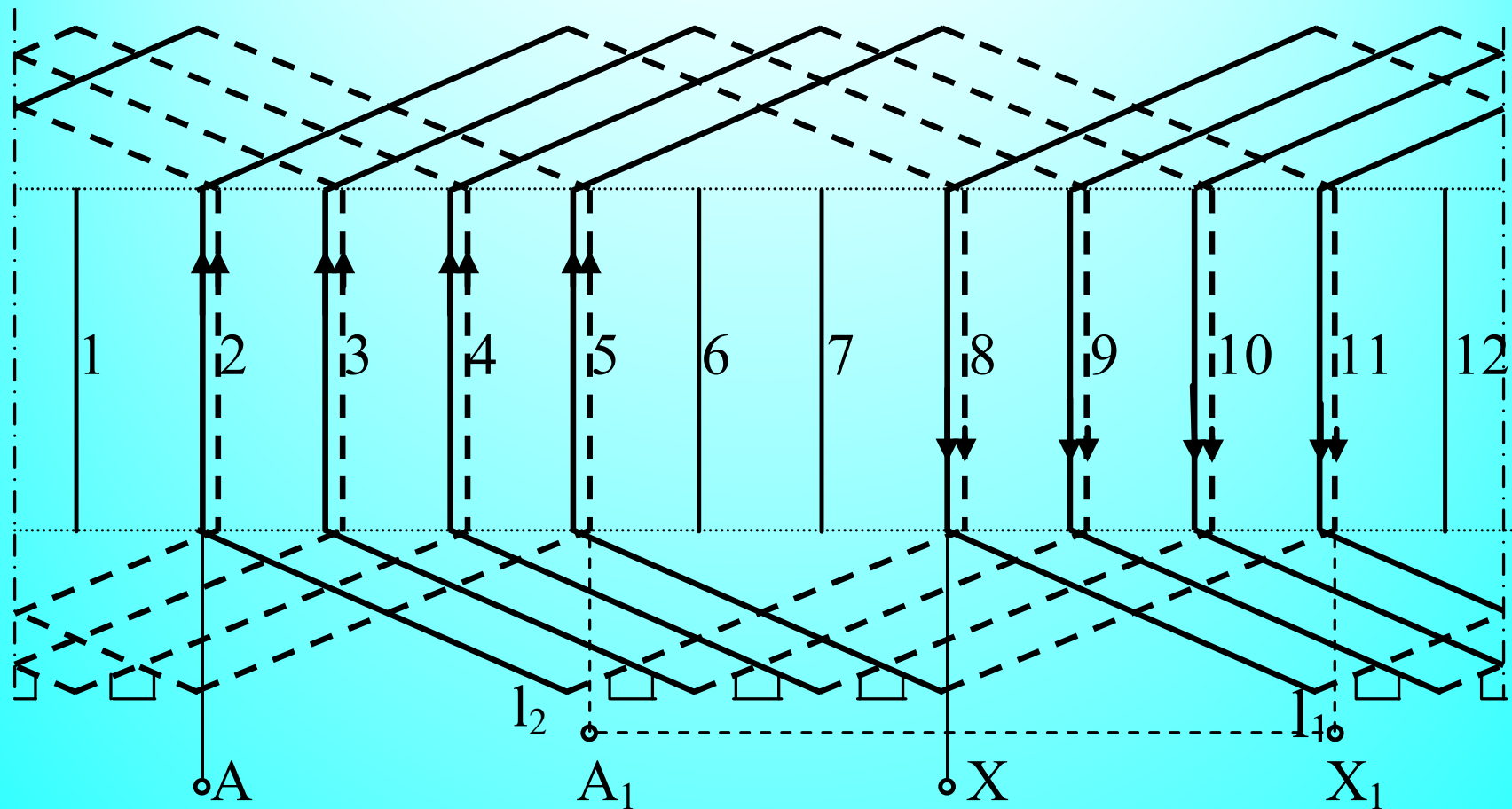
- Înfășurarea în două straturi are numărul de bobine dublat dar numărul de conductoare în creștătură rămâne același;
- În fiecare creștătură se regăsesc o latură de ducere respectiv o latură de întoarcere a unor bobine de pe faza respectivă;

## Înfășurare trifazată cu pas scurtat, în 2 straturi: $Z=24$ , $2p=4$



- La înfășurările cu pas scurtat, în mod deliberat se scurtează pasul diametral (în acest exemplu  $y=5$  în loc de  $y=6$ );
- Apar creștături ce adăpostesc laturi de bobine aparținând unor faze diferite. Drept urmare apar curenți de valori diferite, uneori în sens contrar;
- Aceste înfășurări creează câmpuri magnetice în întrefier care au o formă mai apropiată de sinusoidă decât cele create de înfășurările cu pas diametral.
- Înfășurările cu pas scurtat sunt cele mai folosite în construcția mașinilor electrice. Scurtarea pasului cu 1, 2 sau 3 creștături se face după criterii bine stabilite.

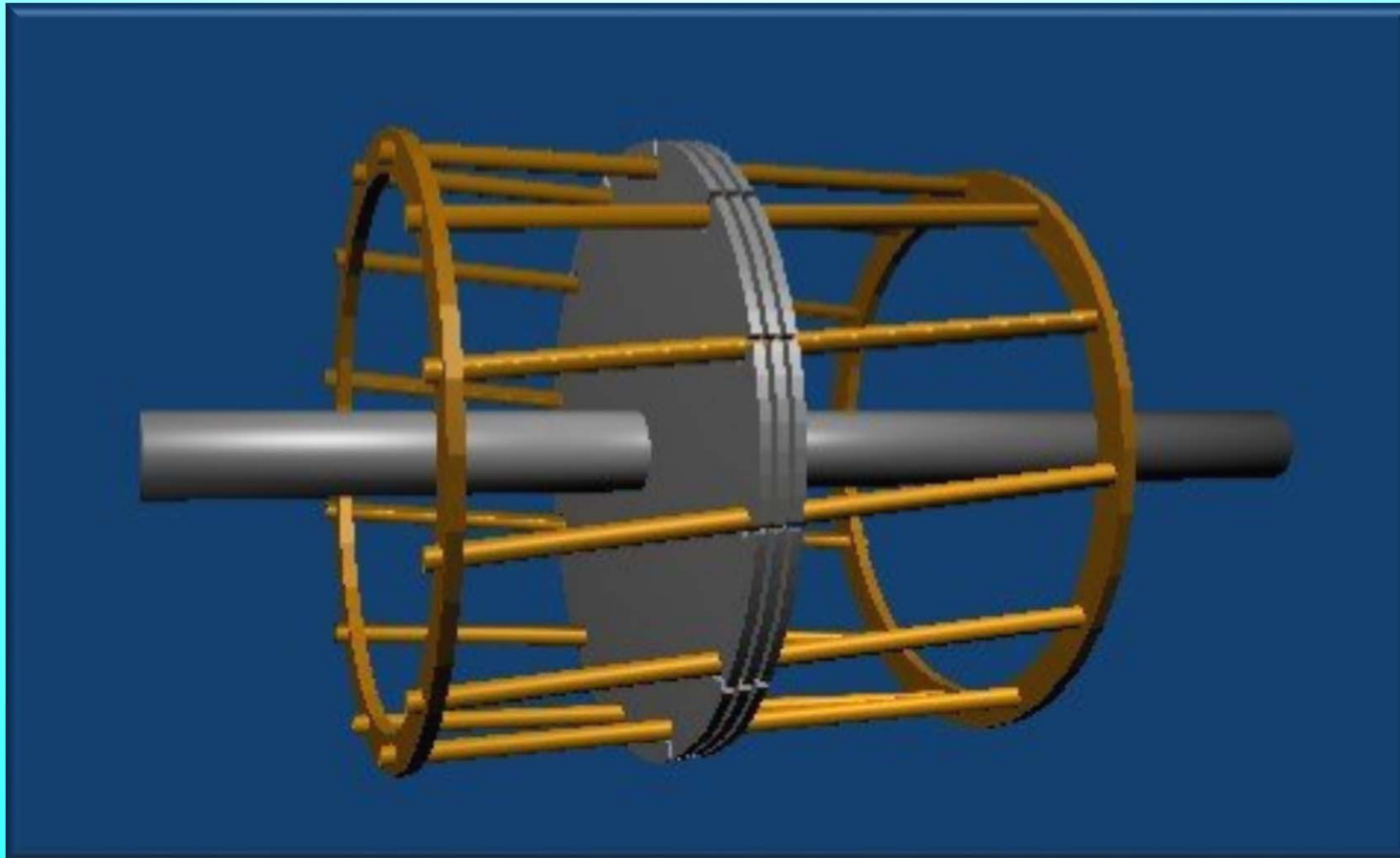
## Înfășurare monofazata in dublu strat: $Z=12, 2p=2$



$$y=12/2=6$$

- Înfășurarea monofazată, utilizată la mașinile asincrone monofazate, ocupa doar 2/3 din creștăturile statorului. Relațiile de calcul sunt identice cu cele folosite la înfășurările trifazate

# Înfășurare rotorica în scurt-circuit



Înfășurarea în scurt-circuit este realizată din bare (cupru sau aluminiu) scurtcircuitate la capete de două inele.

NU este o înfășurare inductoare (nu se alimentează niciodată de la o sursă de tensiune exterioară) ci întotdeauna o înfășurare indusă.



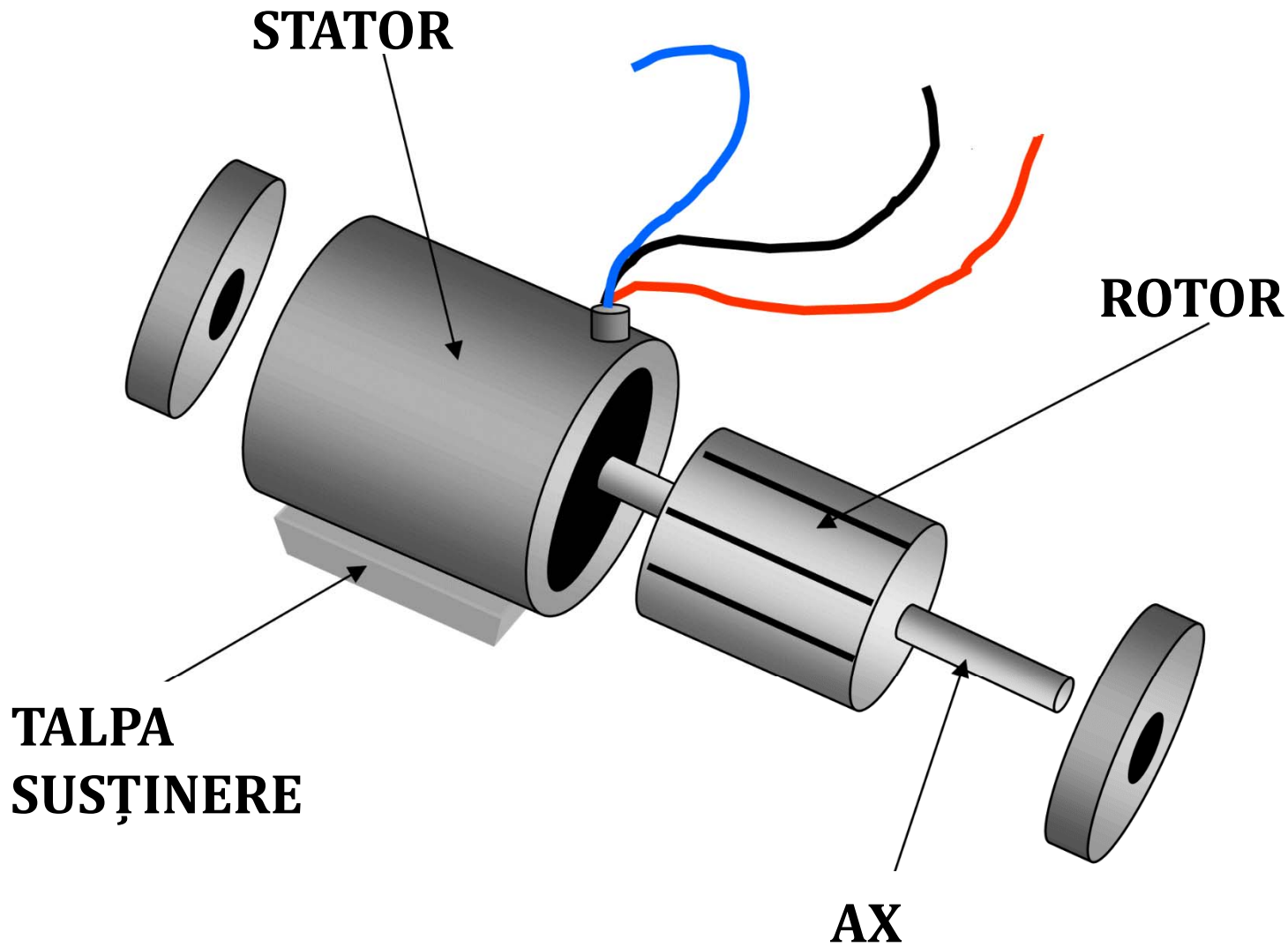


# Elemente constructive si tipuri de mașini asincrone



*„Mașina asincronă este o mașină de curent alternativ la care viteza rotorului variază cu sarcina și nu rămâne într-un raport constant cu frecvența rețelei la care este conectată”*





**Mașina asincronă are două elemente constructive principale: statorul și rotorul.**

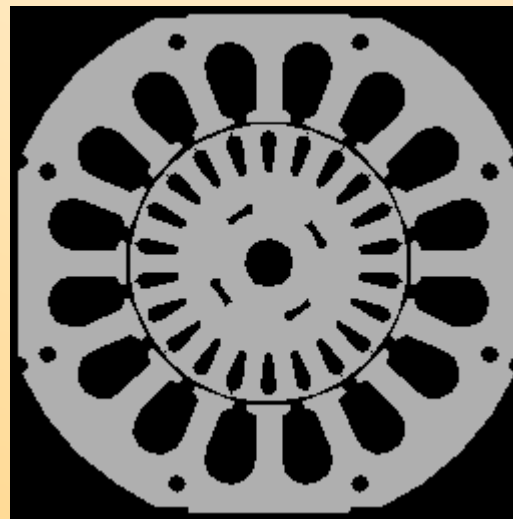
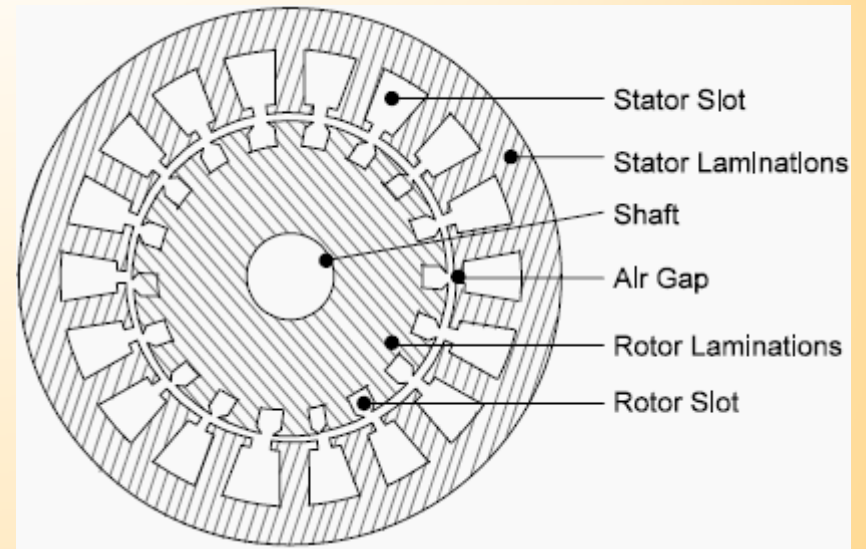
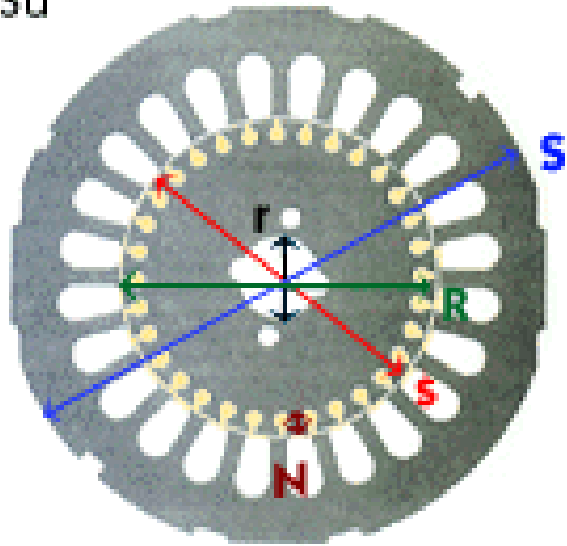
**Statorul, partea fixă a mașinii, îndeplinește, din punct de vedere funcțional, rolul de INDUCTOR (creează câmpul magnetic principal în mașină).**

**Rotorul, partea mobilă a mașinii, reprezintă INDUSUL (locul unde se află înfășurarea în care se „induc” curenții responsabili de crearea cuplului electromagnetic).**

**Adițional (nefigurate), mașina asincronă are elemente constructive ce nu participă la procesul de conversie electromecanică, dar fac posibilă utilizarea mașinii în acționări electrice: ax, rulmenți, carcasă, capace laterale, tălpi de susținere, cutie de borne, ventilator, etc.**



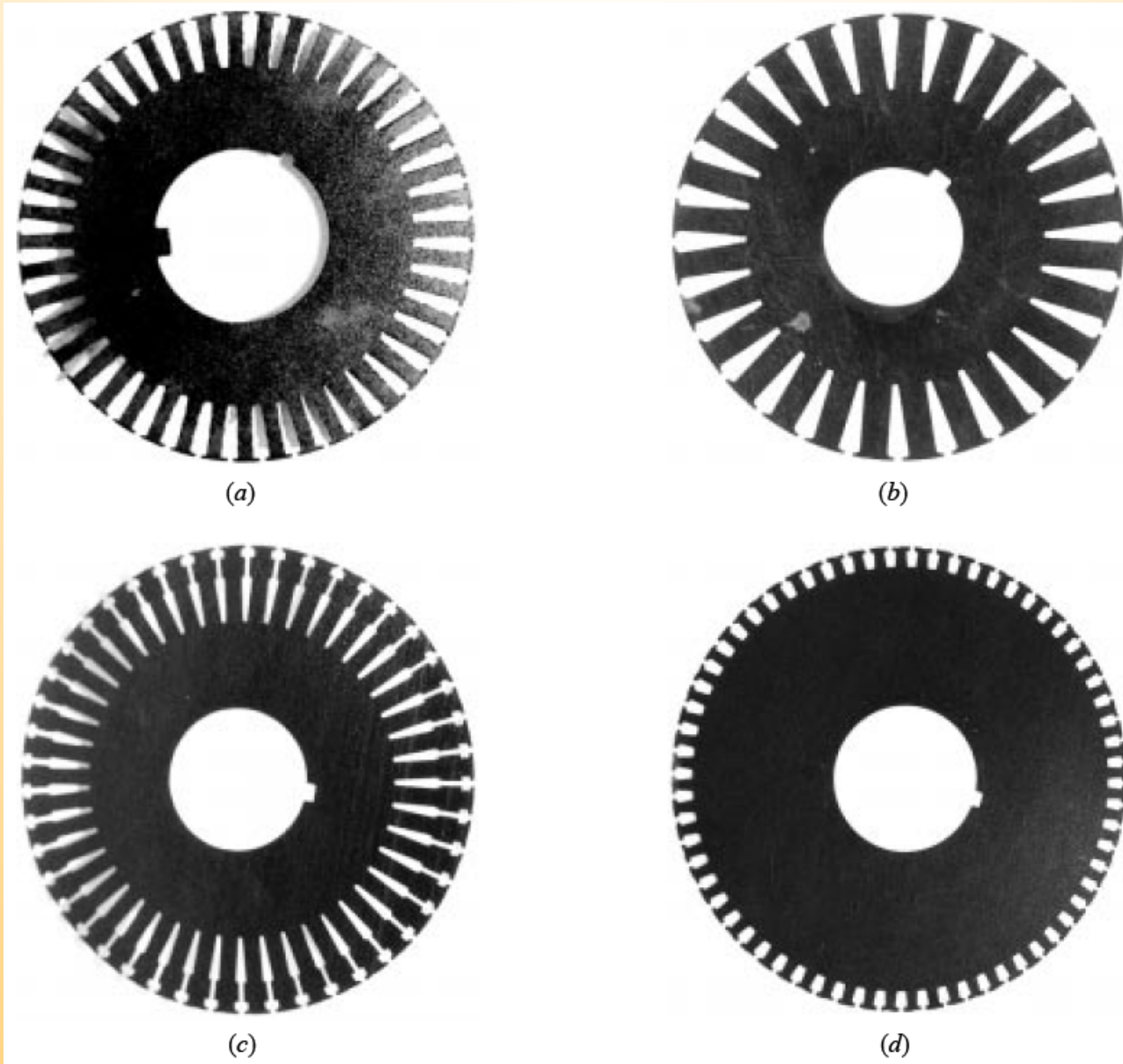
□ : Su



**Atât circuitul magnetic statoric cât și cel rotoric sunt realizate din tole . Acestea sunt fâșii din tabla feromagnetică de diverse grosimi (0,35mm, 0,28mm, etc) aliată cu siliciu.**

**Motivul „segmentării” circuitului magnetic este prezența curenților turbionari induși în miez. Tolele, fiecare din ele purtând un strat de izolație, determină o micșorare a acestor curenți și deci o scădere a pierderilor în fier.**

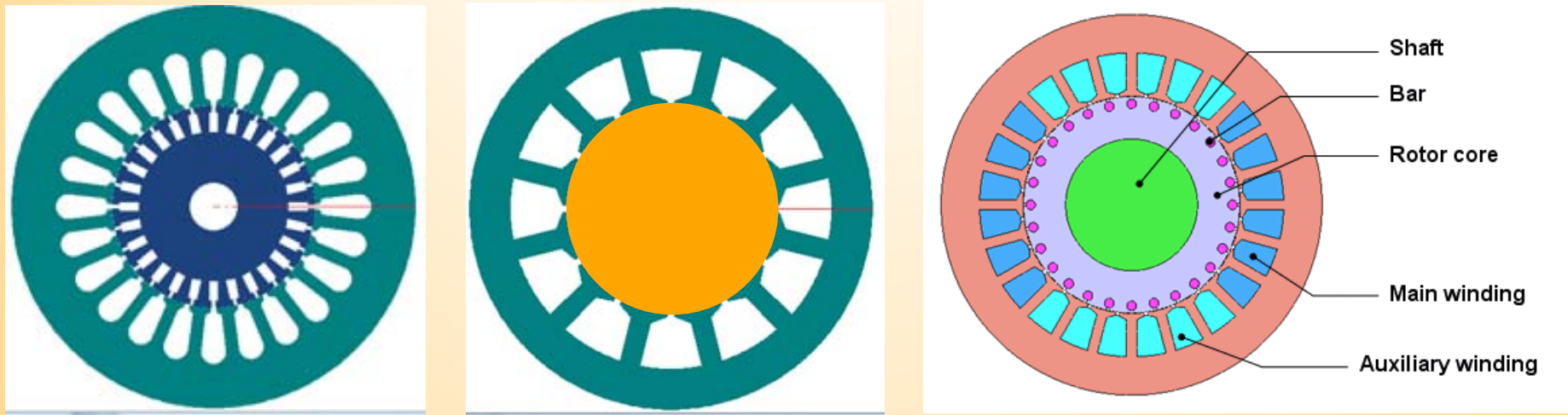




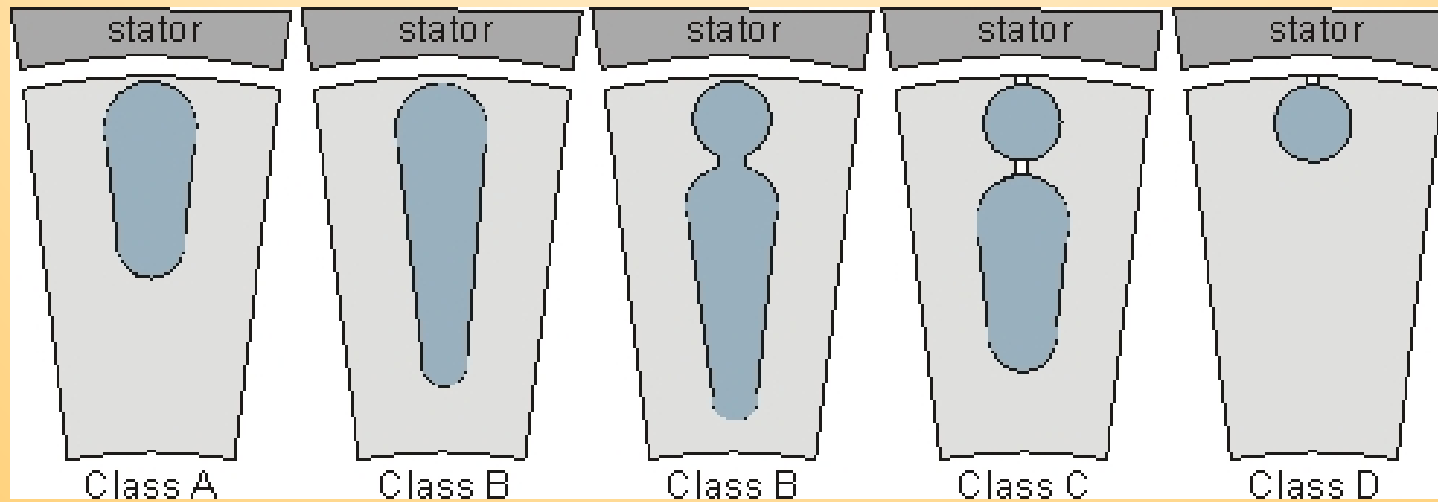
**Tole rotorice: a) si b) crestături tip amfora; c) dubla colivie; d) crestături trapezoidale**



## Crestături statorice – stator slots



## Crestături rotorice – rotor slots





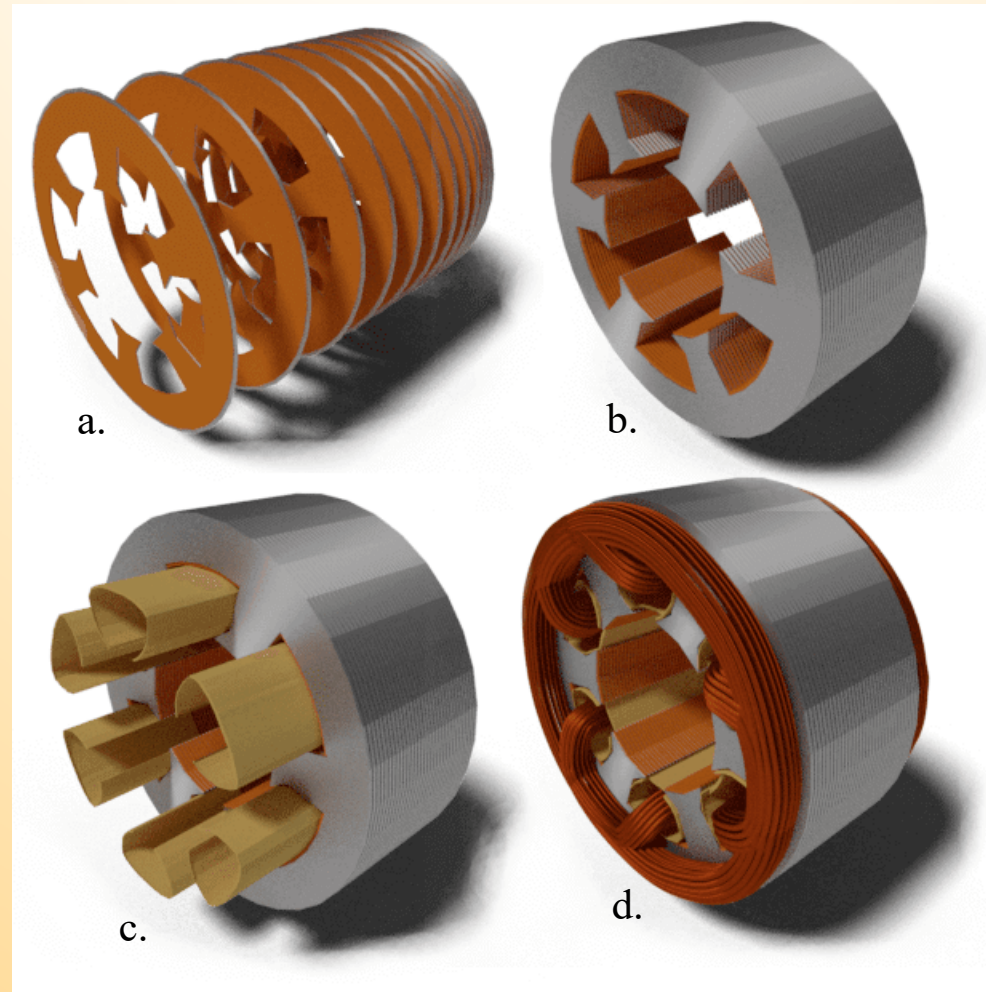
**Atât statorul cât și rotorul sunt prevăzute către întrefier cu creștături (respectiv dinți) distribuite pe întreaga periferie. În aceste creștături sunt plasate înfășurările.**

**Forma creștăturilor, mai ales în cazul celor de pe rotor, este diversă. Drept consecință, anumite valori ale parametrilor de funcționare se modifică.**





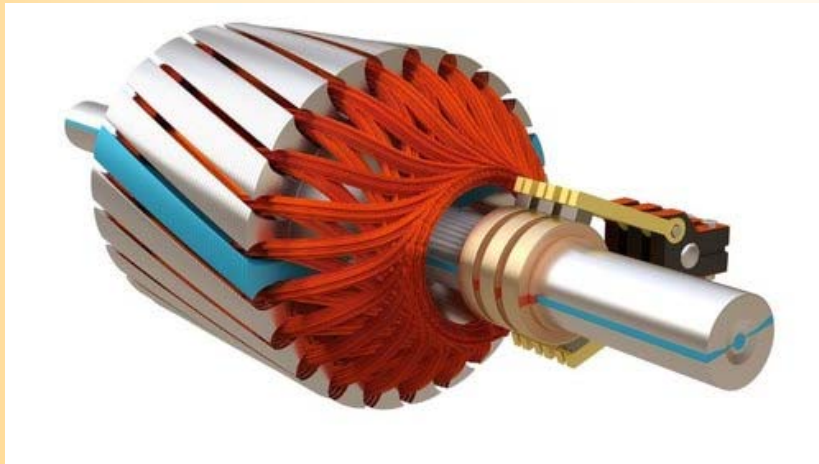
**Miezurile magnetice se obțin prin împachetarea axiala a tolelor.**



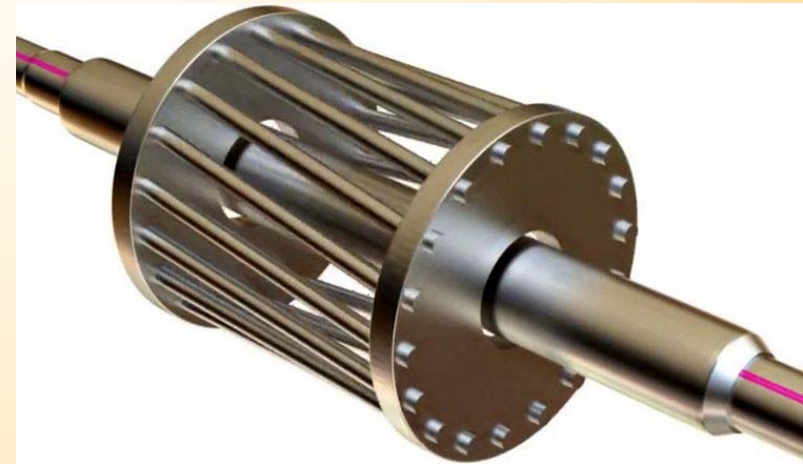
**Procesul tehnologic de realizare a statorului include: împachetarea axiala si fixarea tolelor (a. si b.), izolarea creștăturilor (c.) si plasarea bobinelor in creștături (d.).**



**Rotor bobinat**



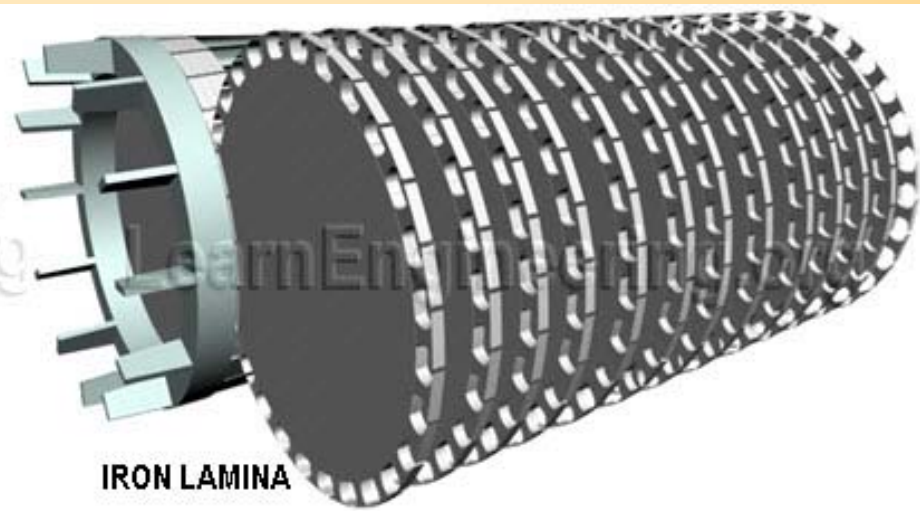
**Rotor in sc**

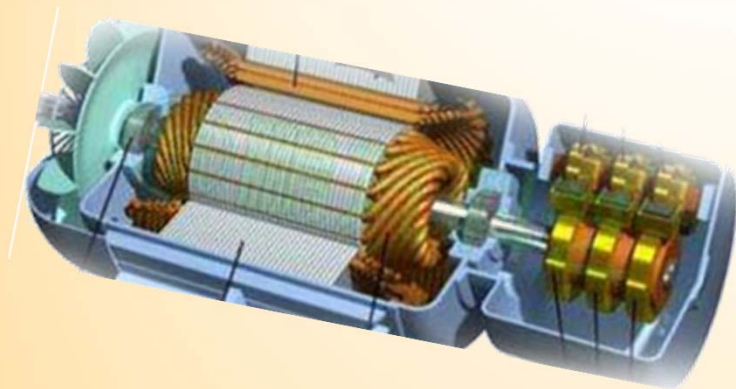


**Colivie de veveriță**



**Circuit magnetic rotoric „expandat”**





Înfășurarea de pe rotorul bobinat se realizează după aceleași principii ca înfășurarea statorică.

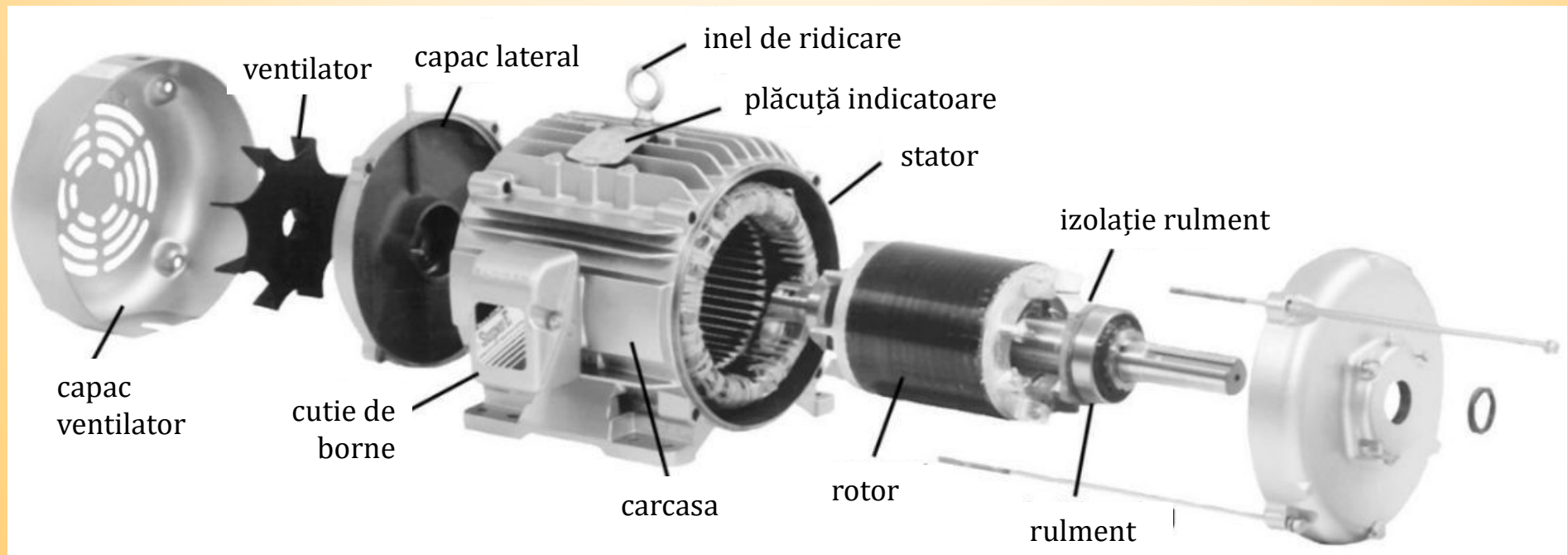
Înfășurarea in sc este realizată din bare de material conductor (cupru sau aluminiu) care sunt scurtcircuitate la cele două capete ale rotorului de către două inele.

Înfășurarea este de asemenea trifazată și se conectează totdeauna în stea (Y). Cele trei capete ramase libere se conectează fiecare la câte un inel din cele trei de pe axul mașinii. În acest fel, prin intermediul periilor ce calca pe inele, înfășurarea rotorică are legături scoase la o placă de borne.

Înfășurarea in sc (colivie de veveriță) este polifazată (numărul de faze este egal cu numărul de bare).

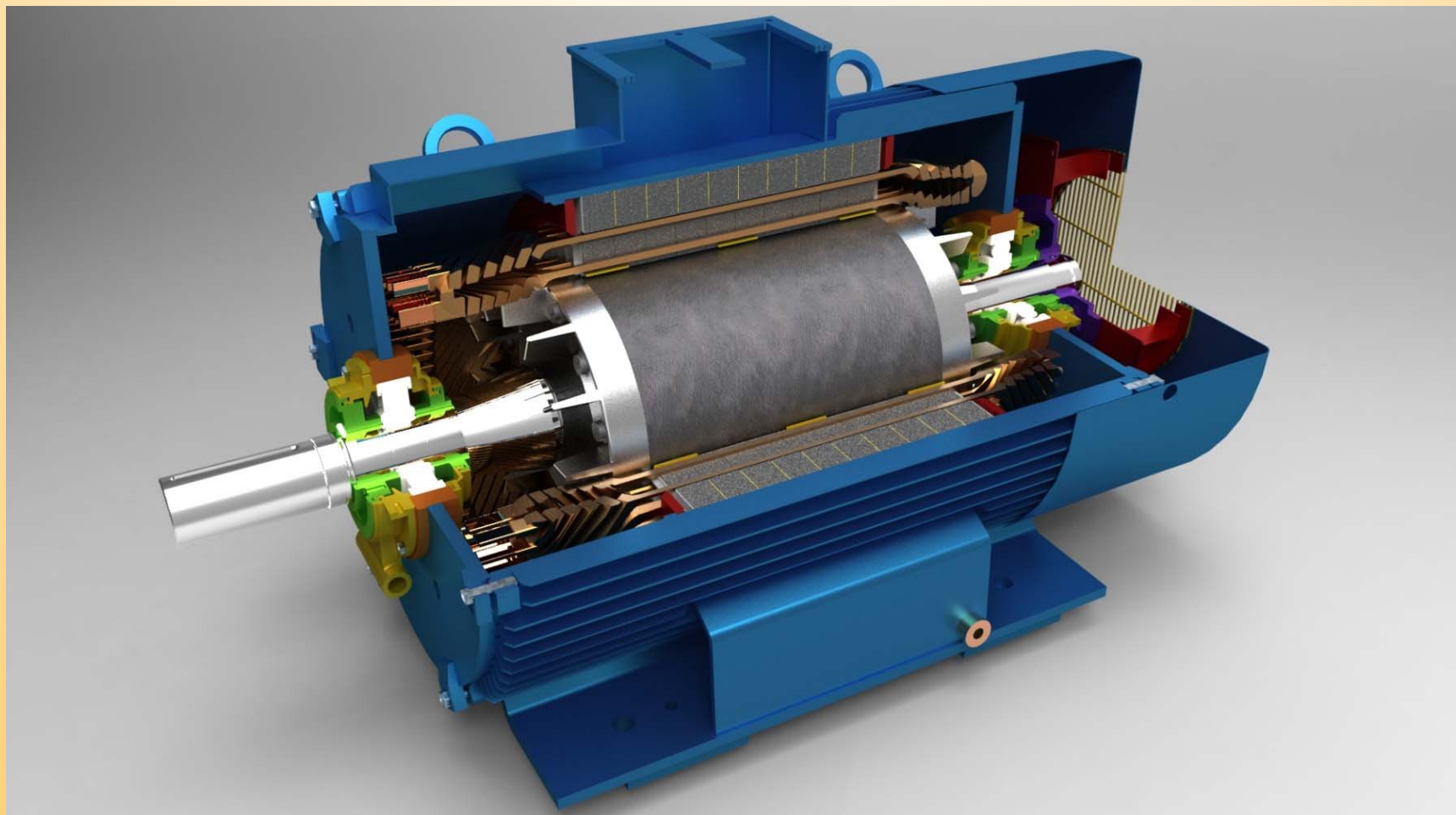
Înfășurarea rotorică **TREBUIE** să formeze un câmp de reacție având **ACELAȘI** număr de poli ca și câmpul creat de înfășurarea statorică.

Înfășurarea in sc **ADOPTA** în mod automat numărul de poli pe care îl are câmpul magnetic creat de înfășurarea statorică.

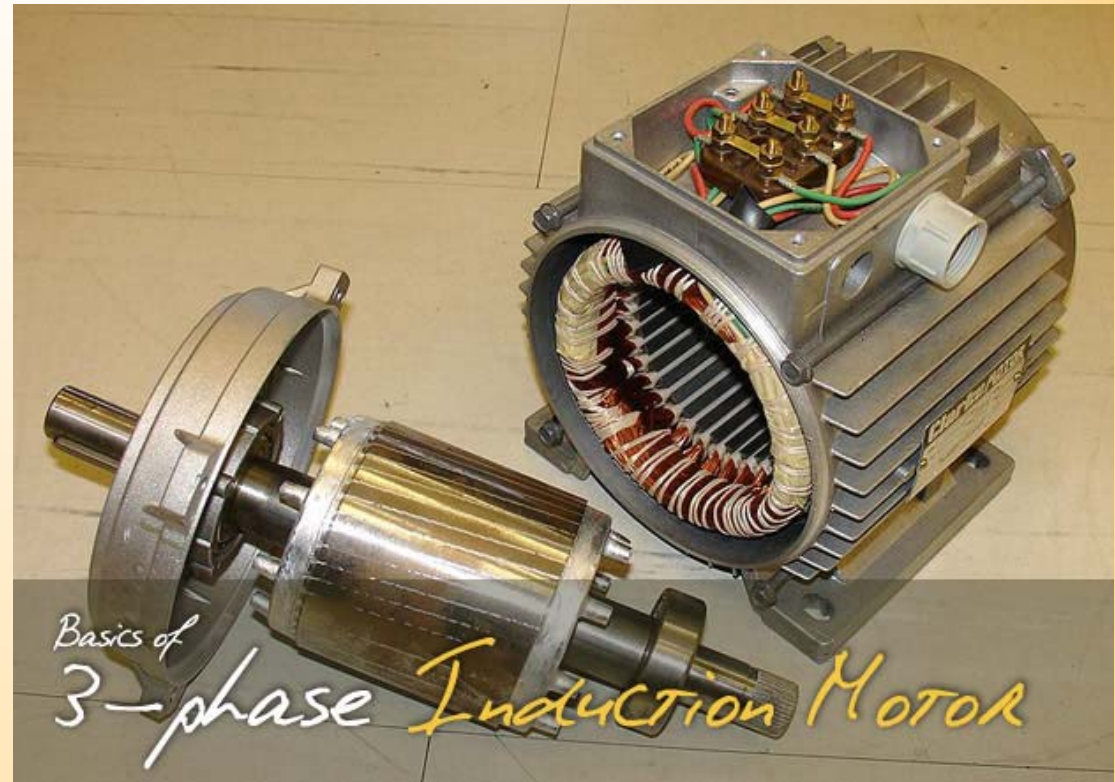


Elementele componente ale unei mașini asincrone

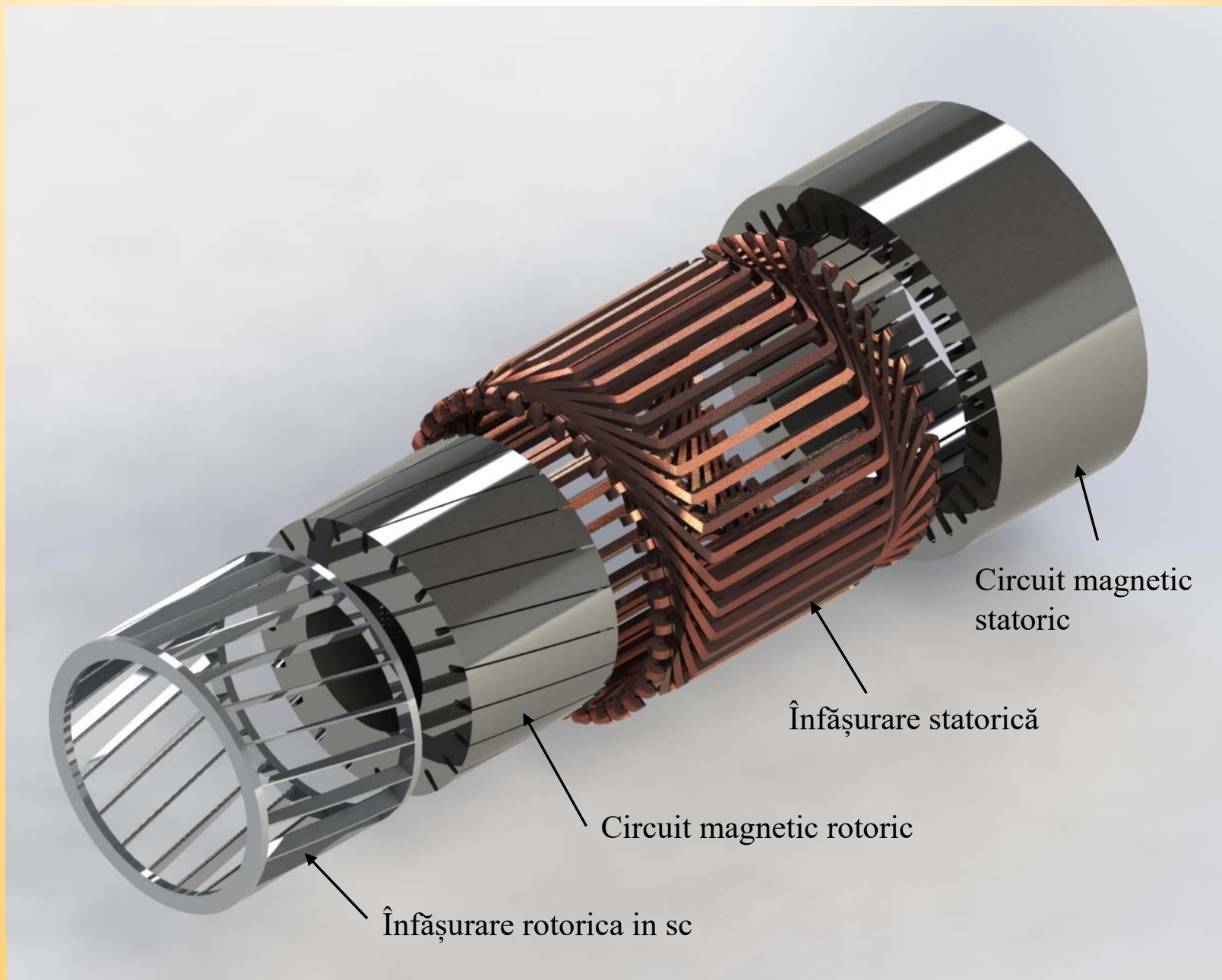




**Rotor in scurtcircuit –  
squirrel cage rotor**



**Rotor bobinat – wound rotor**



**Circuit magnetic + înfășurări la mașina asincronă (imagine descompusă)**





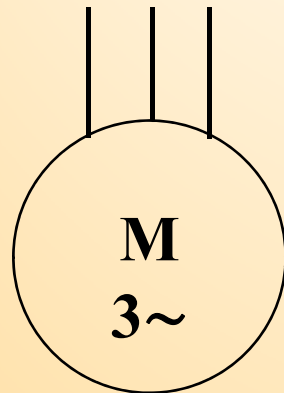
**Squirrel cage motor**  
(rotor in scurtcircuit)



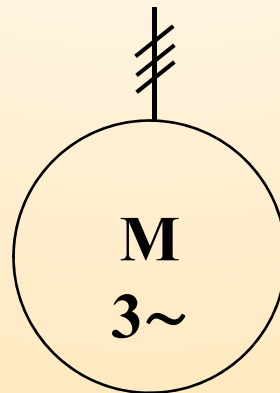
(rotor bobinat)

**Wound rotor motor**

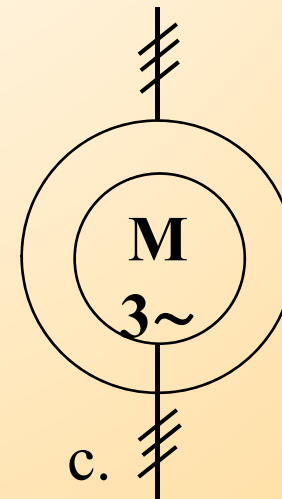
## Simbolizarea mașinilor asincrone



a.



b.



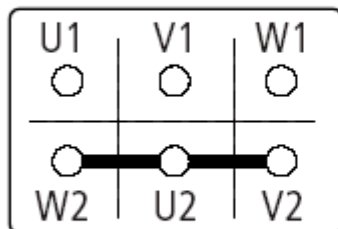
c.

- a. Motor asincron trifazat cu rotor in scurtcircuit
- b. Motor asincron trifazat cu rotor in scurtcircuit – in scheme monofilare
- c. Motor asincron trifazat cu rotor bobinat

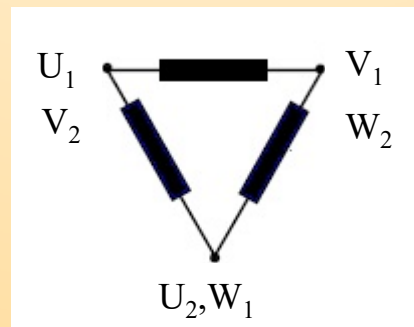
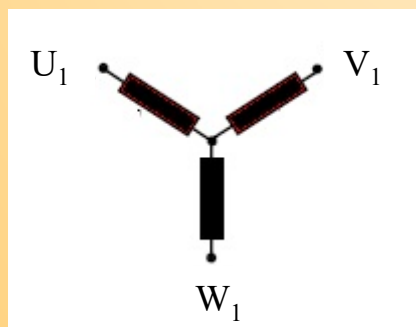
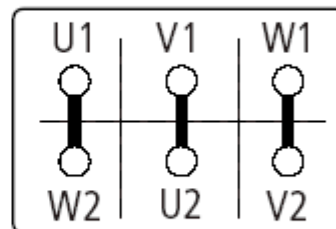


# Placa de borne, conexiuni

*Conexiune stea*



*Conexiune triunghi*



## Plăcuța indicatoare

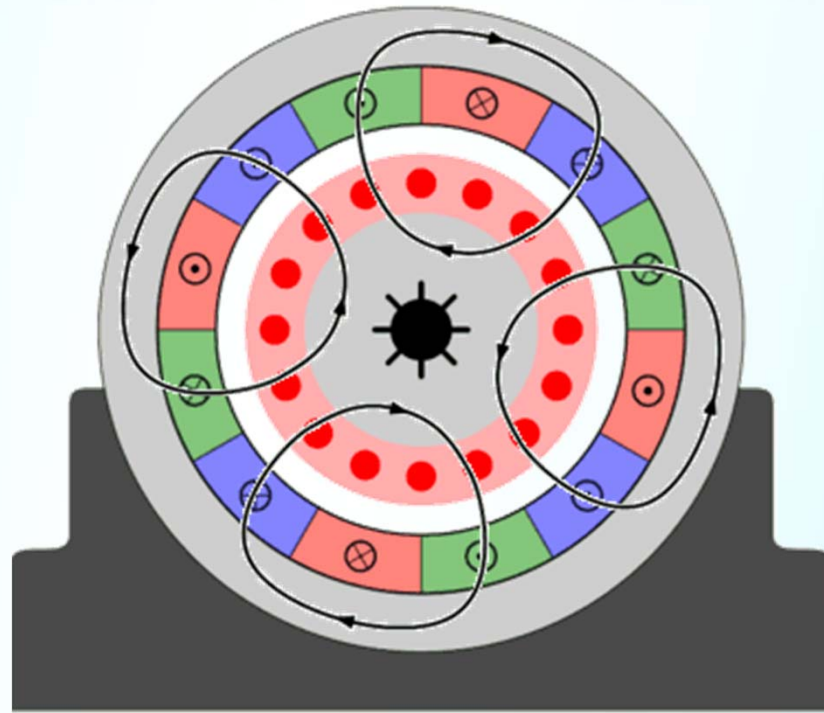
Motor & Co GmbH		
Typ 160 I		
3 ~ Mot.	Nr. 12345-88	
$\Delta$ Y 400/690 V	29/17 A	
S1 15 kW	cos $\varphi$ 0,85	
1430 U/min	50 Hz	
Iso.-Kl. F	IP 54	t
IEC34-1/VDE 0530		

Datele nominale principale ale mașinii electrice se regăsesc pe plăcuța indicatoare: tipul conexiunii, tensiunea de alimentare, curentul nominal, puterea nominala, factorul de putere, frecvența tensiunii de alimentare, turația.

În unele cazuri, pot apărea și alte date nominale dacă mașina are o construcție sau utilizare particulară.



# Principiul de funcționare



**Se considera o mașină asincrona trifazată.**

**Prin alimentarea înfășurării statorice de la o sursă de tensiune alternativă trifazată, ia naștere un câmp magnetic învârtitor.**

**Acest câmp intersectează conductoarele înfășurării rotorice, care inițial se considera imobil.**

**Conform legii inducției electromagnetice, în conductoarele înfășurării rotorului se induc tensiuni.**

**Dacă înfășurarea este închisă (este întotdeauna cazul înfășurării în sc) atunci prin conductoarele rotorului apar curenți (uneori sunt denumiți „curenți induși”).**

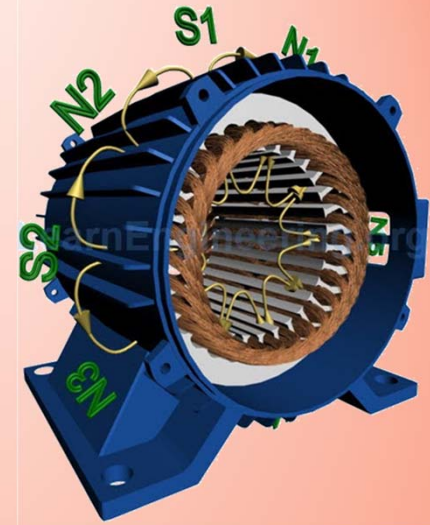
**Interacțiunea dintre acești curenți și câmpul învârtitor creat de înfășurarea statorică se manifesta prin apariția unei forțe (forța Laplace) respectiv a unui cuplu electromagnetic ce pune în mișcare de rotație rotorul.**

**Acesta accelerează până la o viteză apropiată de viteza de sincronism, dar mai mică decât aceasta. Valoarea vitezei depinde de cuplul rezistent.**



1. Producere câmp magnetic învârtitor

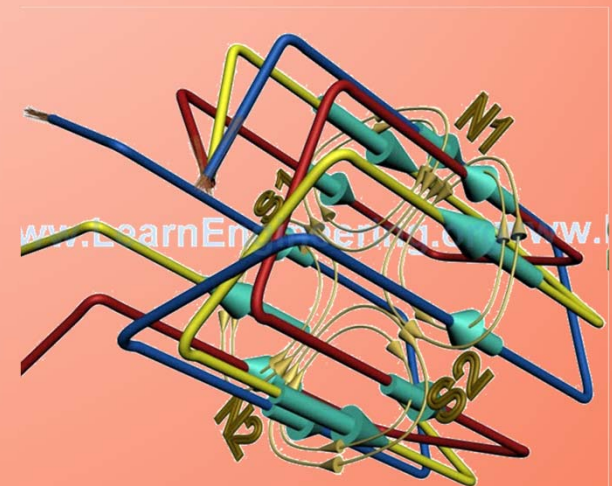
$$\Omega_1 = \frac{\omega_1}{p}$$



2. Se induce in înfășurarea rotorică o tensiune a cărei pulsație este:

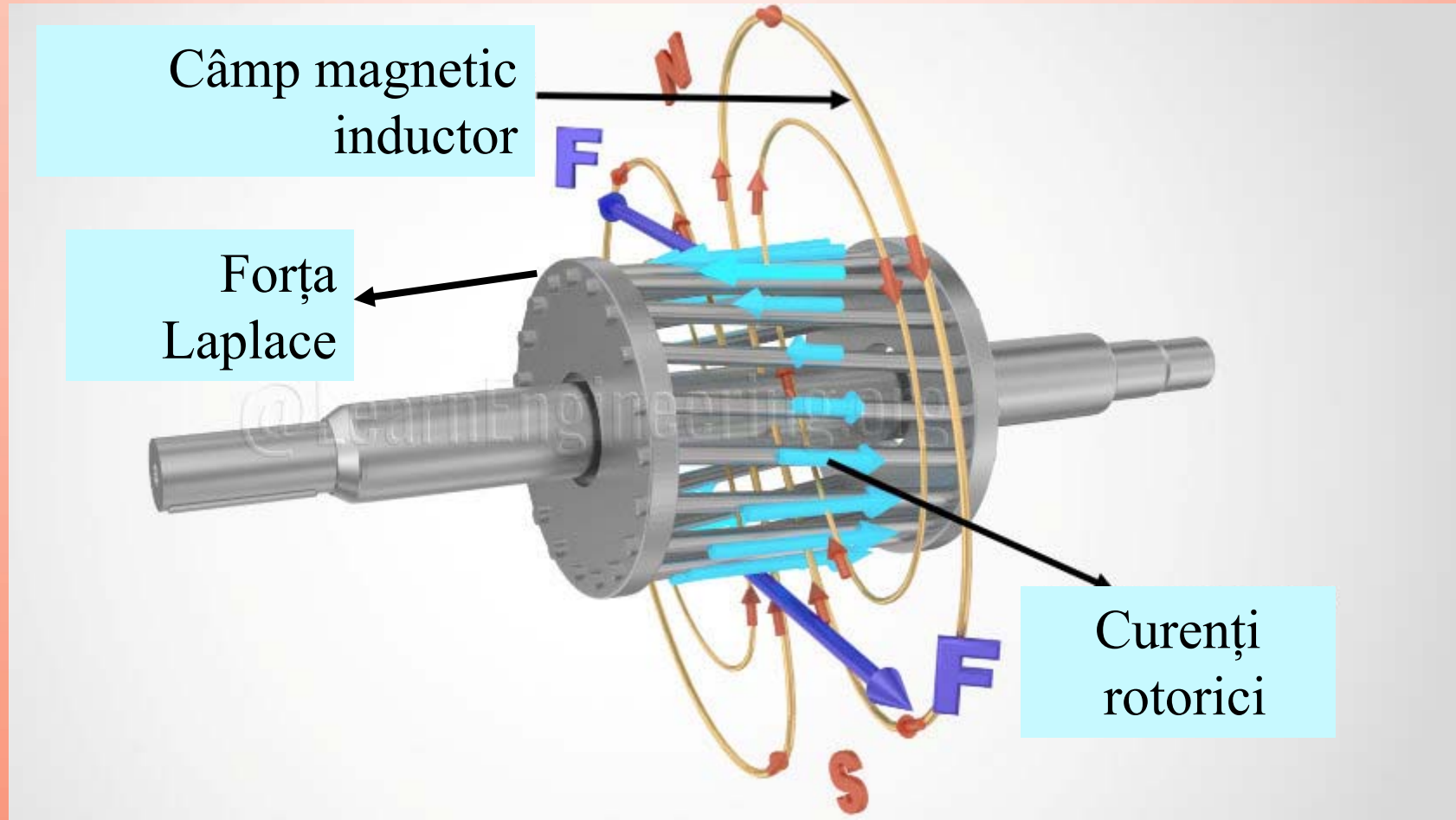
$$\omega_2 = p \cdot \Omega_1 = \omega_1$$

3. Apariția curentului rotoric și a câmpului de reacție





#### 4. Apariția cuplului electromagnetic ce pune în mișcare de rotație rotorul până la viteza $\Omega$





5. Tensiunea indusă în înfășurarea rotorica are o pulsație de:

$$\omega_2 = p \cdot (\Omega_1 - \Omega)$$

6. Câmpul de reacție se rotește față de rotor cu:

$$\Omega_2 = \frac{\omega_2}{p} = \Omega_1 - \Omega$$

iar față de stator cu:

$$\Omega + \Omega_2 = \Omega + \Omega_1 - \Omega = \Omega_1$$



## Expresia alunecării

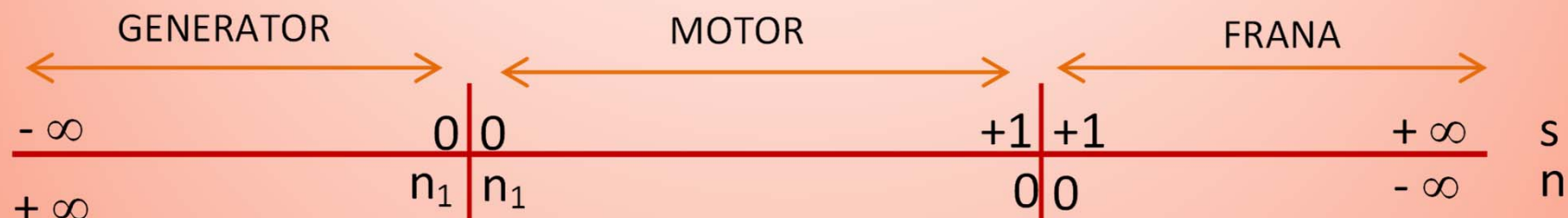
$$s = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1} = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100 [\%]$$



**Alunecarea este mărimea caracteristică numai mașinilor asincrone. Ea exprimă cantitativ diferența de viteză (turație) dintre câmpul învârtitor statoric și rotor.**

## Regimuri de funcționare



Regim de funcționare	Alunecare $s$	Turație rotor $n$
Motor	$s \in (0, 1)$	$n \in (0, n_1)$
Generator	$s < 0$	$n > n_1$
Frână	$s > 1$	$n < 0$





*Regimul de motor* are loc atunci când mașina electrică absoarbe energie electrică pe la borne și furnizează energie mecanică la ax. În acest regim, mașina asincronă are o turație a rotorului mai mică decât turația de sincronism.

Funcționarea în *regim de generator* are loc atunci când viteza rotorului depășește viteza de sincronism. Acest lucru este posibil numai dacă mașina electrică primește energie mecanică din exterior, pe la ax.

*Regimul de frână* se obține atunci când rotorul se rotește în sens invers sensului câmpului învârtitor statoric. Regimul de frânare propriu-zis este un regim tranzitoriu, limitat.



- Înfășurări de tip repartizat
- Rotor in scurt-circuit
- Rotor bobinat
- Alunecare





**Special Thanks**  
**Sajith K V**

*[www.LearnEngineering.org](http://www.LearnEngineering.org)*





# CURS 4

Ecuatiile masinii asincrone

Scheme electrice echivalente



# CUPRINS

Masina asincrona  
ideala

1

Masina asincrona  
raportata

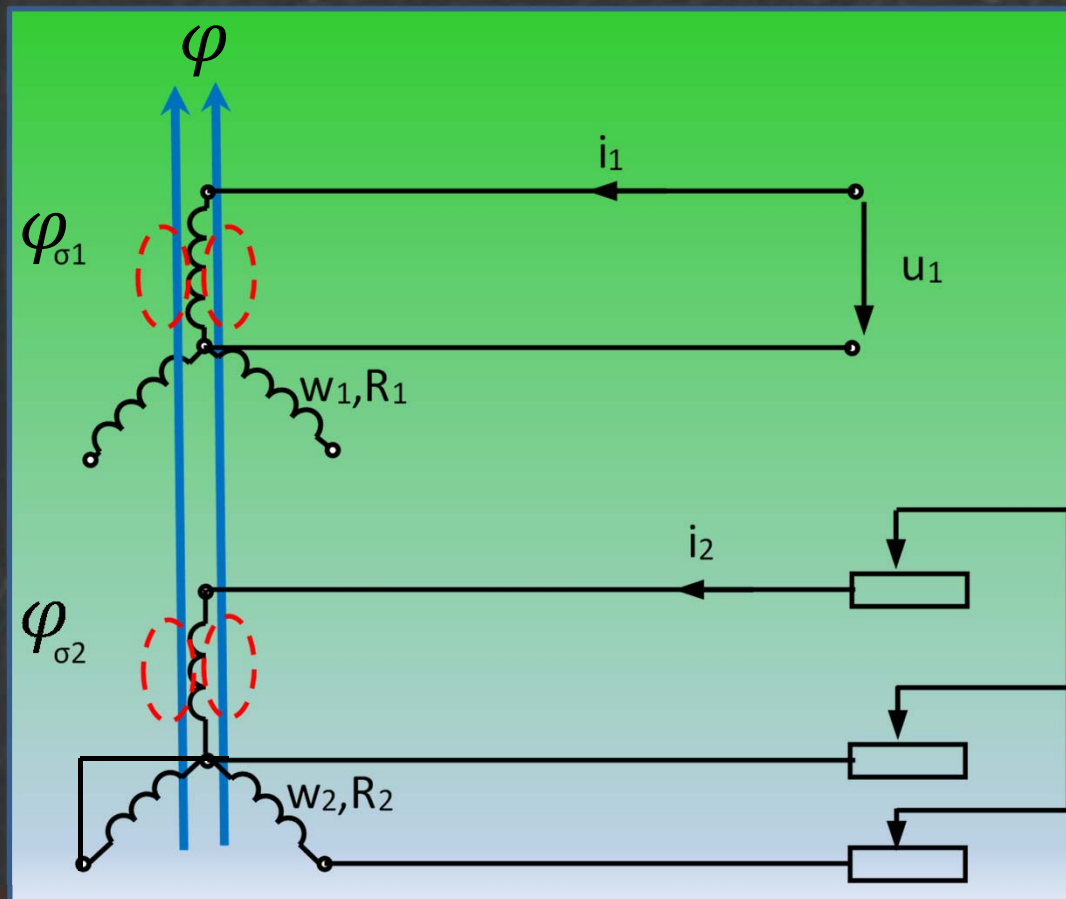
2

Masina asincrona  
reala

3

Scheme echivalente

# Ecuatiile de funcționare a mașinii asincrone *ideale*



$\varphi$  - flux fascicular rezultat  
(fluxul ce înlanțuie o  
singură spiră)

$\varphi_{\sigma 1}, \varphi_{\sigma 2}$

- fluxuri fasciculare de  
dispersie ce corespund  
înfășurării statorice,  
respectiv rotorice

$w_1, w_2$  - nr. de spire ale  
înfășurărilor de fază  
statorice și rotorice

$R_1, R_2$  - rezistența  
înfășurărilor de fază  
statorice și rotorice

*Explicații slide anterior*

Se consideră o mașină trifazată atât în stator cât și în rotor. Înfășurarea statorică este alimentată de la o sursă de tensiune trifazată, sinusoidală având tensiunea de fază  $u_1$ . Prin înfășurarea statorică se stabilește curentul  $i_1$  ce determină apariția unui câmp magnetic învârtitor. Totodată apare un flux de dispersie  $\varphi_{\sigma 1}$

*Obs: În figură s-au reprezentat numai mărimile de pe o singură fază*

Câmpul învârtitor creat de înfășurarea statorică induce în înfășurarea rotorică, conform principiului inducției electromagnetice, un sistem trifazat de tensiuni. Dacă înfășurarea rotorică este scurtcircuitată sau închisă pe o sarcină (în desen este reprezentată o sarcină rezistivă) atunci apare un curent  $i_2$  ce determină un câmp „de reacție”, câmp produs de înfășurarea rotorică. Este un câmp învârtitor ce se rotește cu aceeași viteză de sincronism ca și câmpul creat de înfășurarea statorică, indiferent de viteza de rotație a rotorului. De asemenea, apare și câmpul de dispersie caracterizat de fluxul  $\varphi_{\sigma 2}$

Cele două câmpuri învârtitoare se compun dând naștere câmpului rezultat în mașină, caracterizat de fluxul  $\varphi$



Expresiile fluxurilor totale de dispersie corespunzătoare înfășurării statorice (1) respectiv rotorice (2) sunt:

$$\Psi_{\sigma 1} = L_{\sigma 1} \cdot i_1; \quad \Psi_{\sigma 2} = L_{\sigma 2} \cdot i_2 \quad \text{unde: } L_{\sigma} - \text{inductanța de dispersie}$$

Ecuțiile corespunzătoare unei faze statorice (1) respectiv rotorice (2):

$$\begin{cases} u_1 = R_1 i_1 + \frac{d}{dt} (\Psi_{u1} + \Psi_{\sigma 1}) & (1) \\ 0 = R_2 i_2 + \frac{d}{dt} (\Psi_{u2} + \Psi_{\sigma 2}) & (2) \end{cases}$$

unde:  $\Psi_{u1} = k_{w1} \cdot w_1 \cdot \varphi$  - reprezintă fluxurile utile totale

$$\Psi_{u2} = k_{w2} \cdot w_2 \cdot \varphi$$

- $\varphi$  - flux util fascicular
- $k_w$  - factor de înfășurare
- $w$  - număr de conductoare

Introducând expresiile fluxurilor totale utile și de dispersie în ecuațiile (1) și (2) se obține:

$$\begin{cases} u_1 = R_1 i_1 + k_{w1} \cdot w_1 \cdot \frac{d\varphi}{dt} + L_{\sigma 1} \cdot \frac{di_1}{dt} \\ 0 = R_2 i_2 + k_{w2} \cdot w_2 \cdot \frac{d\varphi}{dt} + L_{\sigma 2} \cdot \frac{di_2}{dt} \end{cases}$$

Considerând o variație sinusoidală a tensiunii și curentului, deci și a fluxului, se poate trece la scrierea ecuațiilor în *complex simplificat*. Regulile de scriere a unei mărimi sinusoidale în complex simplificat sunt date mai jos (inclusiv regulile de derivare și integrare).

$$\left( \begin{array}{l} i = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \varphi) \leftrightarrow \underline{I} = I \cdot e^{j\omega t} \\ \frac{di}{dt} \leftrightarrow j\omega \underline{I} \qquad \int i \cdot dt \leftrightarrow \frac{1}{j\omega} \underline{I} \end{array} \right)$$

*Obs: În complex simplificat, mărimile electrice sunt mărimi efective iar mărimile magnetice sunt valori maxime.*

Sistemul de ecuații, în complex simplificat, devine:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + j\omega_1 L_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 + j\omega_1 \cdot k_{w1} \cdot w_1 \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \\ 0 = R_2 \underline{I}_2 + j\omega_2 L_{\sigma 2} \cdot \underline{I}_2 + j\omega_2 \cdot k_{w2} \cdot w_2 \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \end{cases}$$

Întrucât:  $\omega_2 = s \cdot \omega_1$ , adică:  $(f_2 = s \cdot f_1)$  ecuația 2 devine:

$$0 = R_2 \underline{I}_2 + js\omega_1 L_{\sigma 2} \cdot \underline{I}_2 + js\omega_1 \cdot k_{w2} \cdot w_2 \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}}$$

-împart membrul din dreapta cu s:

$$0 = \frac{R_2}{s} \underline{I}_2 + j\omega_1 L_{\sigma 2} \cdot \underline{I}_2 + j\omega_1 \cdot k_{w2} \cdot w_2 \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}}$$

Notăm termenul:

$$-j\omega_1 \cdot k_{w1} \cdot w_1 \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} = \underline{E_1}$$

întrucât el reprezintă t.e.m. indusă în înfășurarea statorică de către câmpul magnetic rezultat

Analog:

$$\underline{E_{2s}} = -j\omega_2 \cdot k_{w2} \cdot w_2 \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} = -js\omega_1 \cdot k_{w2} \cdot w_2 \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} = -s \cdot \underline{E_2}$$

$E_2$  - reprezintă t.e.m. indusă în înfășurarea rotorică de către câmpul magnetic rezultat când rotorul este fix ( $s=1$  sau  $n=0$ )

Sistemul de ecuații devine:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + j\omega_1 L_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ 0 = \frac{R_2}{s} \underline{I}_2 + j\omega_1 L_{\sigma 2} \cdot \underline{I}_2 - \underline{E}_2 \end{cases}$$

Din ecuația a doua poate fi evidențiată expresia curentului rotoric:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + (\omega_1 L_{\sigma 2})^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + \left(\frac{\omega_2}{s} L_{\sigma 2}\right)^2}} = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + (\omega_2 L_{\sigma 2})^2}}$$



Celor doua ecuații li se poate adăuga ecuația circuitului magnetic (de egalitate a solenațiilor):

$$k_{w1} \cdot w_1 \cdot i_1 + k_{w2} \cdot w_2 \cdot i_2 = k_{w1} \cdot w_1 \cdot i_{1\mu}$$

sau in complex simplificat:

$$\underline{I_1} + \frac{k_{w2} \cdot w_2}{k_{w1} \cdot w_1} \cdot \underline{I_2} = \underline{I_{1\mu}}$$

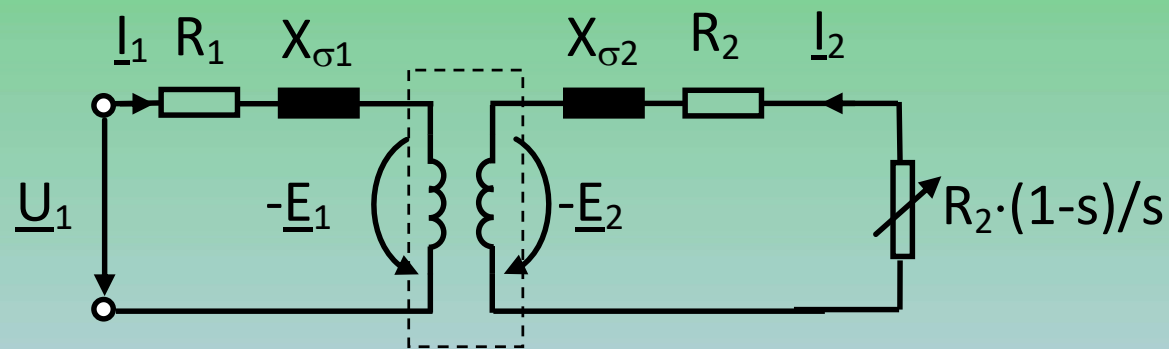
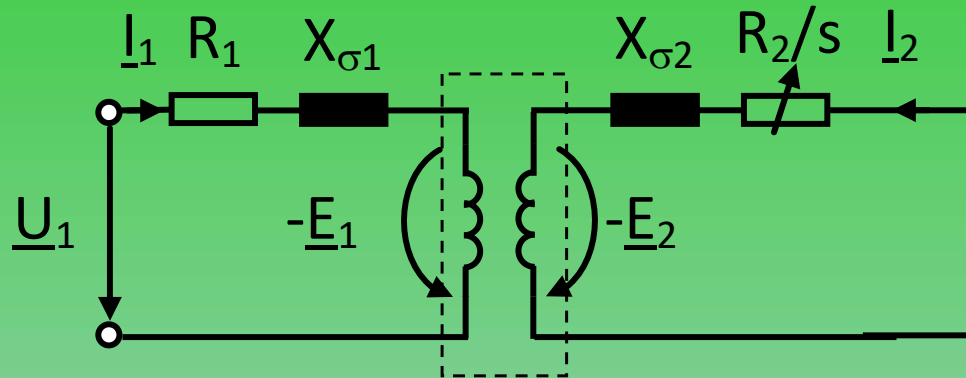
$I_{1\mu}$  reprezintă *curentul de magnetizare*



$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ 0 = \frac{R_2}{s} \underline{I}_2 + jX_{\sigma 2} \cdot \underline{I}_2 - \underline{E}_2 \\ \underline{I}_1 + \frac{k_{w2} \cdot w_2}{k_{w1} \cdot w_1} \cdot \underline{I}_2 = \underline{I}_{1\mu} = \underline{I}_{10} \end{cases}$$

- unde s-au înlocuit expresiile:  $\omega_1 L_{\sigma 1} = X_{\sigma 1}$  ce reprezintă reactanțe de  
 $\omega_1 L_{\sigma 2} = X_{\sigma 2}$  dispersie

## Schema electrica echivalentă – mașina ideală



$$\frac{R_2}{s} = R_2 + R_2 \cdot \frac{1-s}{s}$$

# Ecuatiile mașinii asincrone cu mărimile rotorului raportate la stator

Pentru a putea face o comparație reală între circuitul statoric și circuitul rotoric, în ceea ce privește parametrii electro-magnetici, se poate realiza procedura de „raportare” a mărimilor unui circuit la celălalt circuit. De obicei se raportează mărimile rotorului (circuit secundar) la stator. Procedura este similară cu cea de la studiul transformatorului electric în mărimi raportate.



*Mașina cu mărimi raportate – este o mașină echivalentă cu mașina reală dar care are același număr de conductoare ( $w$ ) și același factor de înfășurare ( $k_w$ ) pe ambele armături.*

$$w_1 = w_2$$
$$K_{w1} = k_{w2}$$

## Condiții de echivalență

1. Solenația raportată să fie egală cu cea reală

$$k_{w1} \cdot w_1 \cdot I'_2 = k_{w2} \cdot w_2 \cdot I_2$$

$$I'_2 = \frac{k_{w2} \cdot w_2}{k_{w1} \cdot w_1} \cdot I_2 = K \cdot I_2$$

Obs: Mărimile raportate se notează cu „prim” iar K reprezintă coeficientul de raportare.



## Condiții de echivalență

2. Pierderile de putere activă pentru cele doua situații să fie aceleași

$$R'_2 \cdot (I'_2)^2 = R_2 \cdot I_2^2$$

$$R'_2 = R_2 \cdot \left( \frac{I_2}{I'_2} \right)^2 = \frac{1}{K^2} \cdot R_2$$

## Condiții de echivalență

3. Pierderile de putere reactivă datorate fluxului de dispersie să fie aceleași

$$X'_{\sigma 2} \cdot (I'_2)^2 = X_{\sigma 2} \cdot I_2^2$$

$$X'_{\sigma 2} = X_{\sigma 2} \cdot \left(\frac{I_2}{I'_2}\right)^2 = \frac{1}{K^2} \cdot X_{\sigma 2}$$

In plus, tensiunea indusă in înfășurarea rotorică echivalentă trebuie să fie aceeași ca in înfășurarea statorică întrucât înfășurările sunt acum identice

$$E'_2 = E_1$$

dar

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{k_{w1} \cdot w_1}{k_{w2} \cdot w_2} = \frac{E'_2}{E_2}$$

de unde rezultă:

$$E'_2 = \frac{1}{K} \cdot E_2$$

Prin urmare, condițiile de echivalență sunt:

$$I'_2 = K \cdot I_2 \quad (1)$$

$$R'_2 = \frac{1}{K^2} \cdot R_2 \quad (2)$$

$$X'_{\sigma 2} = \frac{1}{K^2} \cdot X_{\sigma 2} \quad (3)$$

$$E'_2 = \frac{1}{K} \cdot E_2 \quad (4)$$

unde:  $K = \frac{k_{w2} \cdot w_2}{k_{w1} \cdot w_1}$

(ecuațiile mașinii ideale rescrise pentru comparație)

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ 0 = \frac{R_2}{s} \underline{I}_2 + jX_{\sigma 2} \cdot \underline{I}_2 - \underline{E}_2 \\ \underline{I}_1 + \frac{k_{w2} \cdot w_2}{k_{w1} \cdot w_1} \cdot \underline{I}_2 = \underline{I}_{1\mu} = \underline{I}_{10} \end{array} \right.$$

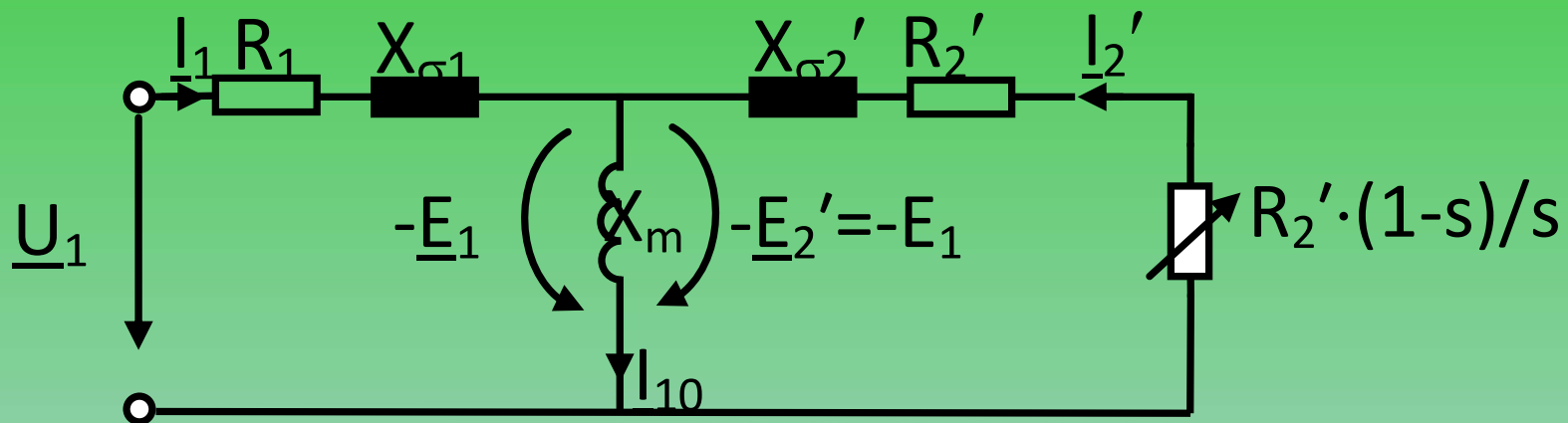
Înlocuind în ecuațiile a doua și a treia ale mașinii ideale mărimile obținute din condițiile de echivalență, se obține:

### Ecuațiile mașinii raportate



$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ 0 = \frac{R'_2}{s} \underline{I}'_2 + jX'_{\sigma 2} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{E}_1 \\ \underline{I}_{1\mu} = \underline{I}_{10} = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 \end{array} \right.$$

## Schema electrică echivalentă – rotorul este raportat la stator



$X_m$  se numește reactanța de magnetizare și reprezintă elementul de circuit ce „întreține” fluxul în mașina asincronă.



Prin raportarea mărimilor rotorice la cele statorice s-a obținut o mașină echivalentă a cărei schemă electrică nu mai conține cuplajul mutual între circuitul electric statoric și cel rotoric. Analiza circuitului obținut devine mult mai simplă.



# Ecuatiile mașinii asincrone când sunt luate in considerare pierderile in fier ( *mașina reala* )

Ecuatiile mașinii asincrone prezentate până aici NU iau in considerație pierderile in fier (in circuitul magnetic). In realitate, curentul de magnetizare conține pe lângă componenta reactivă si una „activă” ce corespunde pierderilor in fier. Deci, expresia reală a curentului de magnetizare este:

$$\underline{I_{10}} = \underline{I_{1\mu}} + \underline{I_{10a}} = \underline{I_1} + \underline{I_2'}$$

$I_{10a}$  - componenta activă a curentului de magnetizare ce corespunde pierderilor in fier

$I_{1\mu}$  - componenta reactiva a curentului de magnetizare

Expresia componentei active a curentului de magnetizare este:

$$I_{10a} = \frac{P_{Fe1}}{3E_1}$$

unde  $P_{Fe1}$  sunt pierderile in fier in circuitul magnetic statoric. De regula, intrucat pierderile in fier in miezul rotoric sunt foarte mici, ele se neglijeaza.

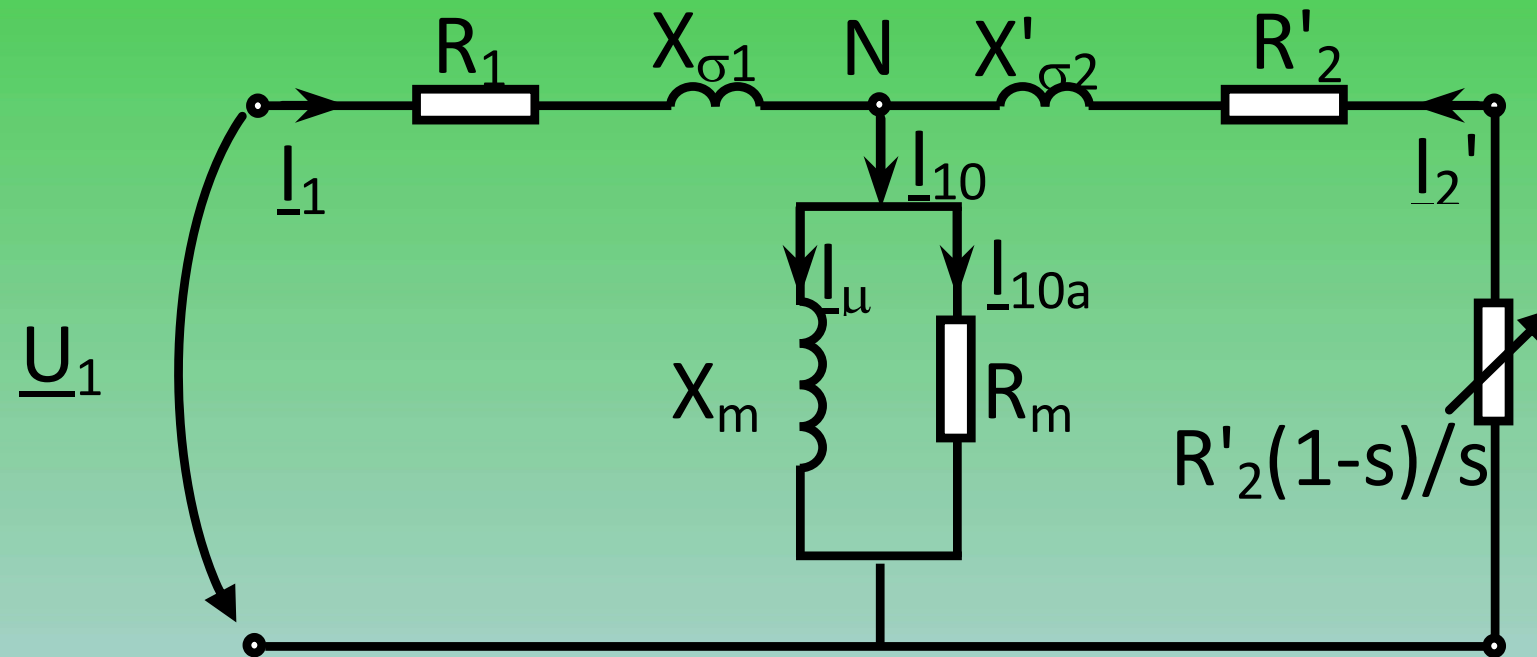
Pierderile in fier, care se manifesta prin incalzirea miezului magnetic, pot fi echivalate cu pierderile pe o rezistenta. In acest scop, se introduce rezistenta  $R_m$ , care, in schema echivalenta a masinii, apare in paralel cu reactanta de magnetizare. Expresia ei poate fi obtinuta din explicitarea pierderilor in fier:

$$P_{Fe} = 3 \cdot R_m \cdot I_{10a}^2 = 3 \cdot R_m \cdot \left( \frac{P_{Fe}}{3E_1} \right)^2$$

respectiv:

$$R_m = \frac{3E_1^2}{P_{Fe}}$$

## Schema electrică echivalentă – mașina reală



$R_m$  – rezistența de magnetizare – elementul de circuit „responsabil” de pierderile în fierul mașinii asincrone

Ramura de circuit in paralel  $X_m, R_m$  poate fi înlocuită printr-o impedanță echivalenta, notata cu  $Z_0$ , si care este parcursa de curentul  $I_{10}$ . Expresia ei este:

$$\frac{1}{Z_0} = \frac{1}{R_m} + \frac{1}{jX_m}$$

de unde:

$$\begin{aligned} Z_0 &= \frac{j \cdot R_m \cdot X_m}{R_m + jX_m} = \frac{j \cdot R_m^2 \cdot X_m + R_m \cdot X_m^2}{R_m^2 + X_m^2} = \frac{R_m \cdot X_m^2}{R_m^2 + X_m^2} + j \cdot \frac{R_m^2 \cdot X_m}{R_m^2 + X_m^2} \\ &= R_0 + j \cdot X_0 \end{aligned}$$

unde am amplificat la numitor si la numărător cu  $(R_m - jX_m)$

Daca se fac si înlocuirile:

$$R_1 + jX_{\sigma 1} = Z_1$$

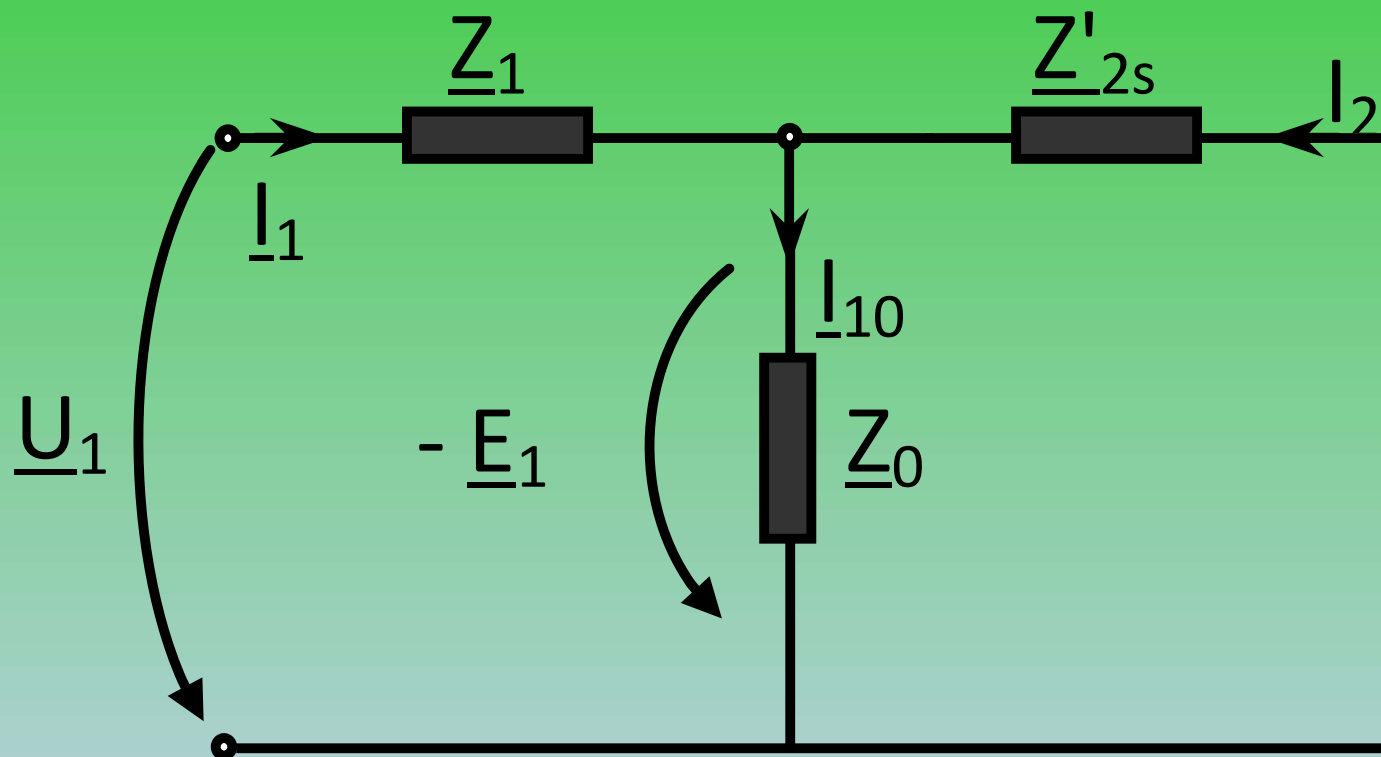
$$\frac{R'_2}{s} + jX'_{\sigma 2} = Z'_{2s}$$

atunci, sistemul de ecuații ale mașinii asincrone poate fi scris sub forma:

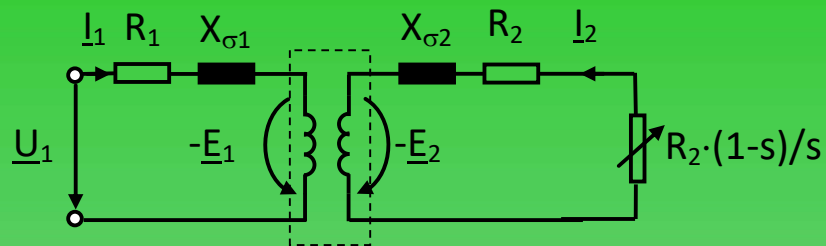


$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 = \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_1 + \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}_{10} \\ 0 = \underline{Z}'_{2s} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{E}_1 = \underline{Z}'_{2s} \cdot \underline{I}'_2 + \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}_{10} \\ \underline{I}_{10} = \underline{I}_{1\mu} + \underline{I}_{10a} = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 \\ -\underline{E}_1 = jX_m \cdot \underline{I}_{\mu} = \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}_{10} \end{cases}$$

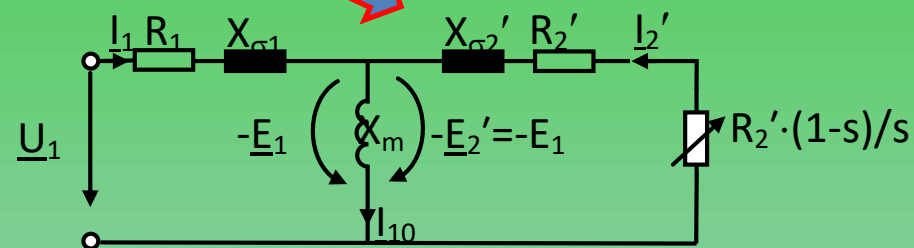
## Schema electrică echivalentă – in T



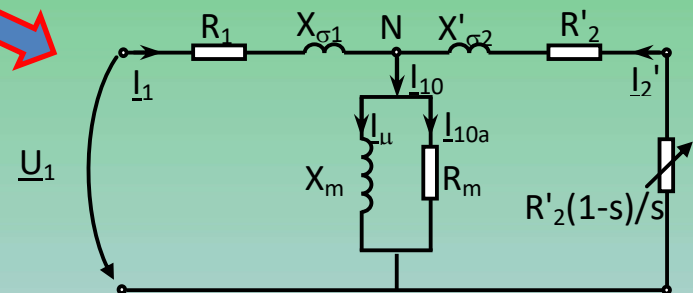




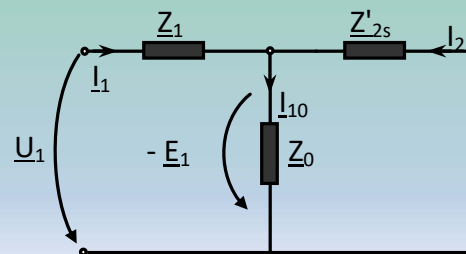
*Mașina asincronă ideală*



*Mașina asincronă ideală în mărimi raportate*



*Mașina asincronă reală*



*Schema în T*

Pentru determinarea curentului  $I_2'$

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_1 + \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}_{10} \\ \mathbf{0} = \underline{Z}'_{2s} \cdot \underline{I}'_2 + \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}_{10} \\ \underline{I}_{10} = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 \end{cases}$$

In ecuația 2 înlocuiesc termenul  $I_{10}$  cu cel din ecuația 3:

$$\mathbf{0} = \underline{Z}'_{2s} \cdot \underline{I}'_2 + \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}_1 + \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}'_2$$

de unde rezulta:

$$\underline{I}_1 = -\frac{\underline{Z}'_{2s} + \underline{Z}_0}{\underline{Z}_0} \cdot \underline{I}'_2$$

Înlocuiesc expresia curentului  $I_1$  obținut in prima ecuație a sistemului:

$$\underline{U}_1 = -\underline{Z}_1 \cdot \frac{\underline{Z}'_{2s} + \underline{Z}_0}{\underline{Z}_0} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{Z}_0 \cdot \frac{\underline{Z}'_{2s} + \underline{Z}_0}{\underline{Z}_0} \cdot \underline{I}'_2 + \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}'_2$$

respectiv:

$$\underline{U}_1 = -\frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}'_{2s}}{\underline{Z}_0} \cdot \underline{I}'_2 - \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_0}{\underline{Z}_0} \cdot \underline{I}'_2 - \frac{\underline{Z}_0 \cdot \underline{Z}'_{2s}}{\underline{Z}_0} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}'_2 + \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}'_2$$

Obțin in final:

$$\underline{U}_1 = -\underline{Z}'_{2s} \left( 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_0} \right) \cdot \underline{I}'_2 - \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}'_2$$

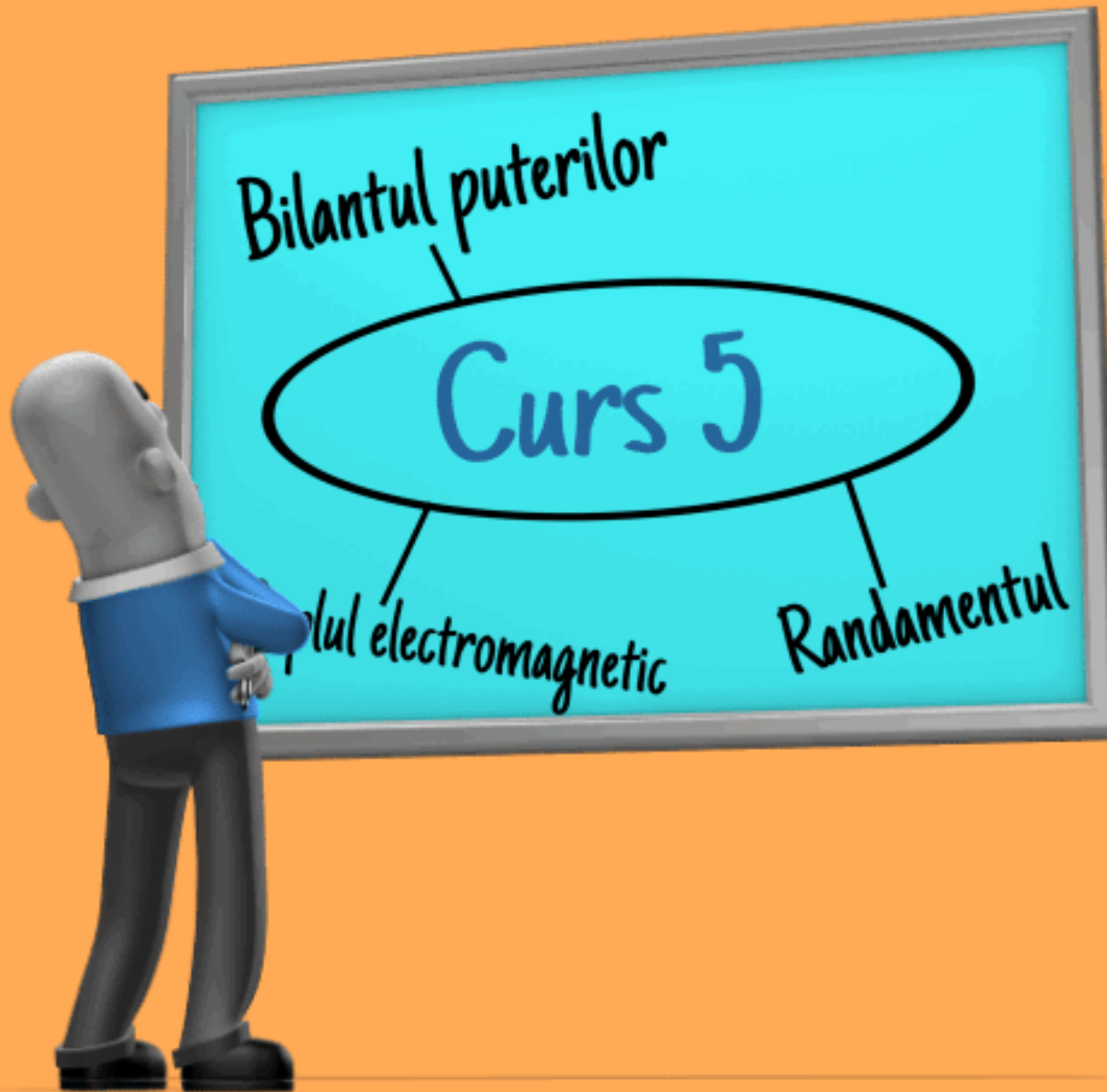
Notez: 
$$1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_0} = c_1$$

Expresia tensiunii  $\underline{U}_1$  devine:

$$\underline{U}_1 = -c_1 \cdot \underline{Z}'_{2s} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}'_2$$

iar expresia curentului prin circuitul secundar este:

$$\underline{I}'_2 = - \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_1 + c_1 \cdot \underline{Z}'_{2s}}$$





## CUPRINS

Bilantul puterilor

Randamentul  
masinii asincrone

Expresia cuplului  
electromagnetic



# Bilanțul puterilor și randamentul mașinii asincrone

Se pornește de la sistemul de ecuații ale mașinii asincrone reale:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 & \text{ecuația 1} \\ 0 = \frac{R'_2}{s} \underline{I}'_2 + jX'_{\sigma 2} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{E}_1 & \text{ecuația 2} \\ \underline{I}_{1\mu} = \underline{I}_{10} = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 & \text{ecuația 3} \end{cases}$$

La scrierea in complex simplificat avem relațiile:

$$\underline{I}_1 = I_1 e^{j\alpha_1} = I_1 (\cos \alpha_1 + j \sin \alpha_1)$$

$$\underline{I}_1^* = I_1 e^{-j\alpha_1} = I_1 (\cos \alpha_1 - j \sin \alpha_1)$$

$$\underline{I}_1 \cdot \underline{I}_1^* = I_1^2$$

Se înmulțește, in ecuația 1, cu  $\underline{I}_1^*$ :

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 & \left| \underline{I}_1^* \right. \\ 0 = \frac{R'_2}{s} \underline{I}'_2 + jX'_{\sigma 2} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{E}_1 \\ \underline{I}_{1\mu} = \underline{I}_{10} = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 \end{cases}$$

$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = R_1 \underline{I}_1 \cdot \underline{I}_1^* + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 \cdot \underline{I}_1^* - \underline{E}_1 \cdot \underline{I}_1^*$$

Din ecuația 3 înlocuiesc pe  $I_1$

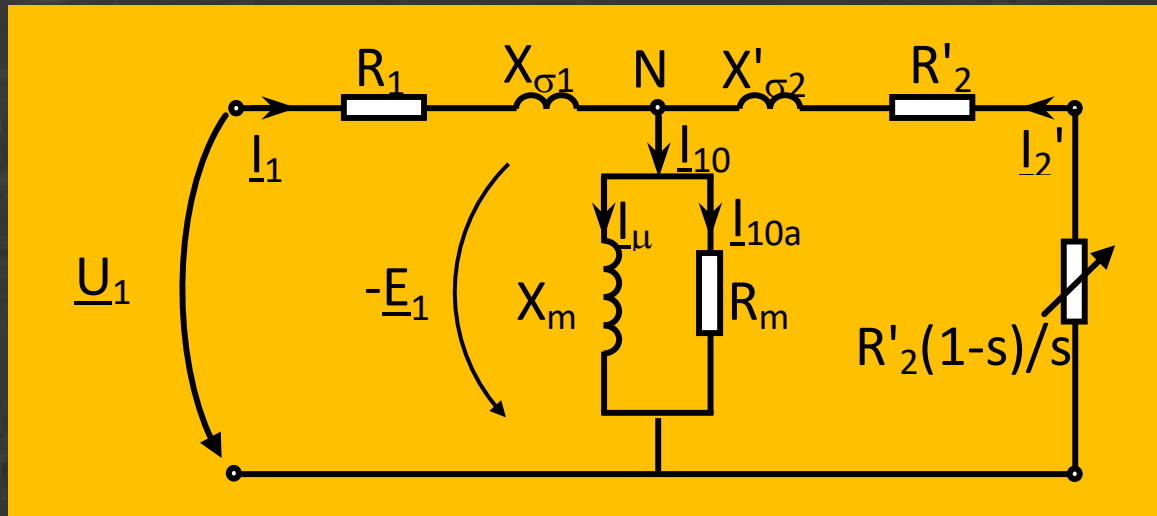
$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = R_1 I_1^2 + jX_{\sigma 1} \cdot I_1^2 - \underline{E}_1 \left( \underline{I}_{10} - \underline{I}'_2 \right)^*$$

respectiv:

$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = R_1 I_1^2 + jX_{\sigma 1} \cdot I_1^2 - \underline{E}_1 \cdot \underline{I}_{10}^* + \underline{E}_1 \cdot \underline{I}'_2^*$$

Înlocuiesc pe  $I_{10}$  cu suma celor doi curenți (componentele activa și reactiva):

$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = R_1 I_1^2 + jX_{\sigma 1} \cdot I_1^2 - \underline{E}_1 \left( \underline{I}_{10a} + \underline{I}_{\mu} \right)^* + \underline{E}_1 \cdot \underline{I}'_2^*$$



Însă, din schema echivalenta:

$$\begin{aligned}
 -E_1(I_{10a} + I_\mu)^* &= -E_1 \cdot I_{10a}^* - E_1 \cdot I_\mu^* = R_m \cdot I_{10a} \cdot I_{10a}^* + jX_m \cdot I_\mu \cdot I_\mu^* = \\
 &= R_m \cdot I_{10a}^2 + jX_m \cdot I_\mu^2
 \end{aligned}$$

unde, evident s-au folosit expresiile:

$$-E_1 = R_m \cdot I_{10a} \quad \text{si} \quad -E_1 = jX_m \cdot I_\mu$$

Ecuția 1 rezulta:

$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = R_1 I_1^2 + jX_{\sigma 1} \cdot I_1^2 + R_m \cdot I_{10a}^2 + jX_m \cdot I_\mu^2 + \underline{E}_1 \cdot \underline{I}_2'^*$$

Înlocuiesc în ecuația obținută pe  $E_1$  dat de ecuația 2:

$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = R_1 I_1^2 + jX_{\sigma 1} \cdot I_1^2 + R_m \cdot I_{10a}^2 + jX_m \cdot I_\mu^2 + \underline{I}_2'^* \left( \frac{R_2'}{s} \underline{I}_2' + jX_{\sigma 2}' \cdot \underline{I}_2' \right)$$

dar:

$$\frac{R_2'}{s} = R_2' + R_2' \cdot \frac{1-s}{s}$$

Înlocuiesc si rearanjez termenii:

$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = R_1 I_1^2 + R_m \cdot I_{10a}^2 + R_2' \cdot I_2'^2 + jX_{\sigma 1} \cdot I_1^2 + \\ + jX_m \cdot I_\mu^2 + jX_{\sigma 2}' \cdot I_2'^2 + R_2' \cdot ((1-s)/s) I_2'^2$$

Trec la modul de scriere in mărimi de faza (pentru termenul din stânga) si egalez părțile reale respectiv părțile imaginare :

$$\begin{cases} U_1 I_1 \cos \varphi_1 = R_1 I_1^2 + R_m \cdot I_{10a}^2 + R_2' \cdot I_2'^2 + R_2' \cdot ((1-s)/s) I_2'^2 \\ U_1 I_1 \sin \varphi_1 = X_{\sigma 1} \cdot I_1^2 + X_m \cdot I_\mu^2 + X_{\sigma 2}' \cdot I_2'^2 \end{cases}$$

unde  $\varphi_1$  este defazajul dintre  $\underline{U}_1$  si  $\underline{I}_1$



Prima ecuație reprezintă echilibrul puterilor active:

$$U_1 I_1 \cos \varphi_1 = R_1 I_1^2 + R_m \cdot I_{10a}^2 + R'_2 \cdot I_2'^2 + R'_2 \cdot ((1 - s)/s) I_2'^2$$

Puterea activă absorbită (pentru mașina trifazată în ansamblu):

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1$$

Pierderi în înfășurarea statorică și fierul statorului

$$p_{j1} = 3R_1 I_1^2$$

$$p_{Fe1} = 3R_m I_{10a}^2$$

Putere electrică rămasă în urma eliminării pierderilor din stator ( $p_{j1}$  și  $p_{Fe1}$ ) reprezintă *puterea electromagnetică*, adică puterea transmisă pe cale electromagnetică de la stator către rotor:

$$P_e = P_1 - (p_{j1} + p_{Fe1})$$

Pierderi în înfășurarea rotorului

$$p_{j2} = 3R'_2 \cdot I_2'^2$$

De regulă, pierderile în fierul rotorului se neglijează întrucât ponderea lor este foarte mică (frecvența curenților rotorici este de 1-2 Hz).

*Puterea mecanică* reprezintă puterea furnizată de mașină la ax (puterea obținută după scăderea pierderilor în fier și înfășurări):

$$P_{mec} = P_e - p_{j2} = R'_2 \cdot ((1 - s)/s) I_2'^2$$

Puterea disponibilă la arbore (valoarea indicată pe plăcuța indicatoare a mașinii) este:

$$P_2 = P_{mec} - (p_{fv} + p_s)$$

unde:  $p_{fv}$ =pierderi prin frecare și ventilație;  $p_s$ =pierderi suplimentare

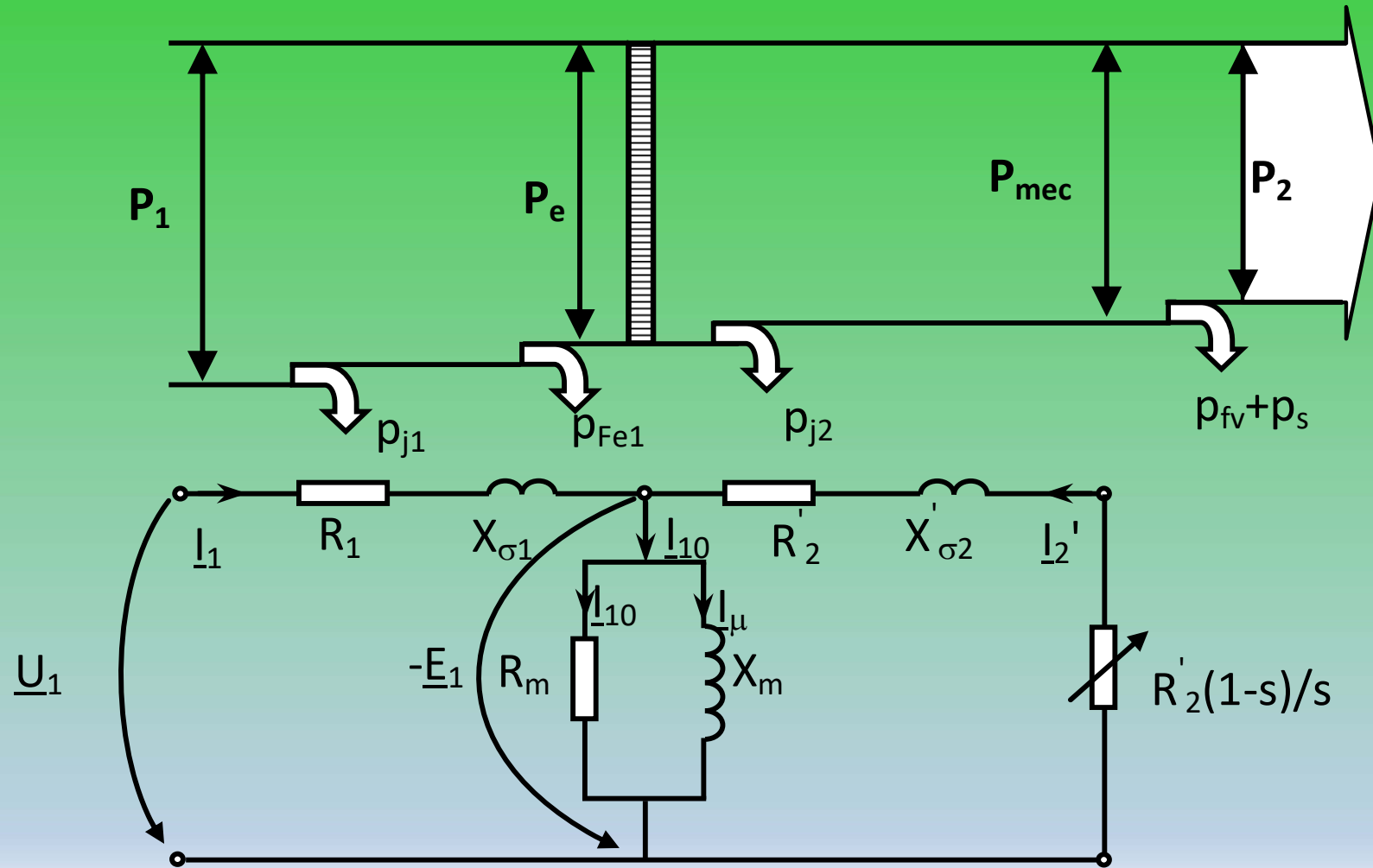
Expresia generală, ce include toate pierderile, a puterii utile la arbore este:

$$P_2 = P_1 - (p_{j1} + p_{Fe1} + p_{j2} + p_{fv} + p_s) = P_1 - \sum p$$

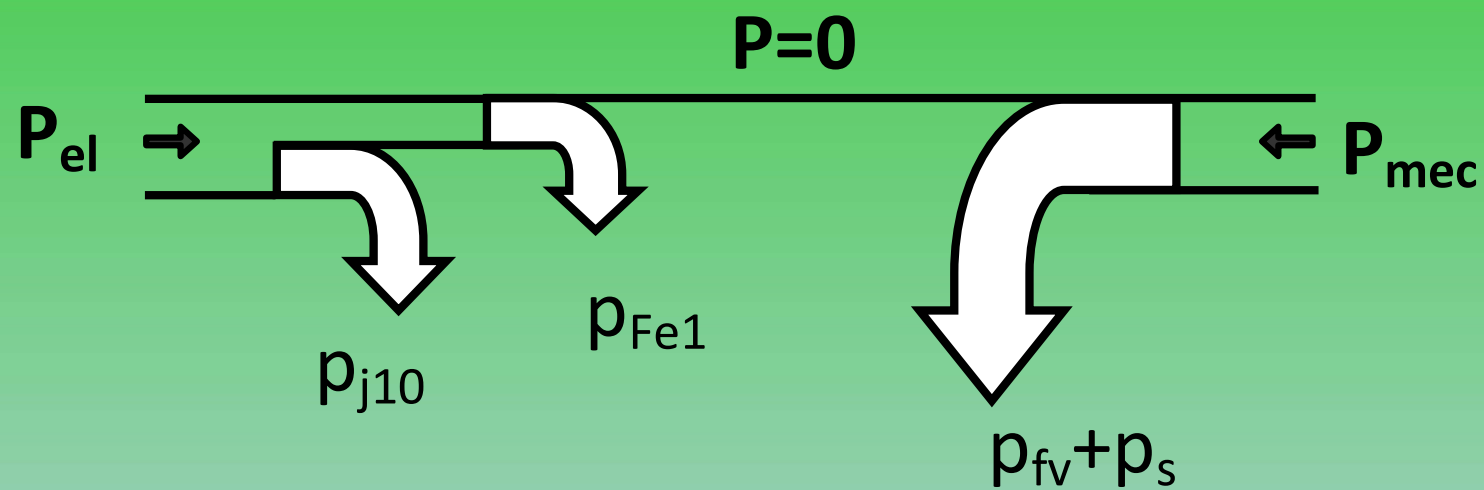
Expresia randamentului este:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum p}{P_1}$$

# MOTOR



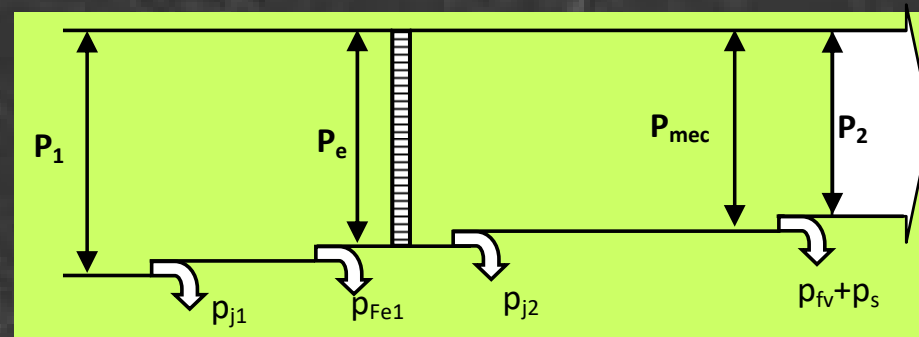
# SINCRONISM



# Cuplul electromagnetic la mașina asincrona

Din diagrama bilanțului energetic

$$P_e = p_{j2} + P_{mec}$$



Folosind relația  $P=M \cdot \Omega$  rezulta:

$$M_e \cdot \Omega_1 = 3R'_2 \cdot I_2'^2 + M_e \cdot \Omega$$

respectiv:

$$M_e = \frac{3R'_2 \cdot I_2'^2}{s \cdot \Omega_1}$$

$$\left( s = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1} \right)$$




Expresia curentului rotoric (vezi curs anterior) este:

$$\underline{I}'_2 = - \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_1 + c_1 \cdot \underline{Z}'_{2s}}$$

iar expresia modulului curentului rotoric:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2}}$$

Prin urmare, expresia *cuplului electromagnetic* produs in mașina asincrona devine:


$$M_e = \frac{3U_1^2 \cdot R'_2}{s \cdot \Omega_1 \left[ \left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \right]}$$

Pentru determinarea valorii maxime a cuplului se  
deriveaza in functie de alunecarea  $s$ :

$$\frac{dM_e}{ds}$$

Pentru ușurință, rescriu relația cuplului electromagnetic știind că:

$$\left( \Omega_1 = \frac{\omega_1}{p} = \frac{2\pi f_1}{p} \right)$$

$$M_e = \frac{3U_1^2 \cdot p}{2\pi f_1} \cdot \frac{\frac{R'_2}{s}}{\left[ \left( R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \right]}$$

$$\left( \begin{array}{l} \text{!} \\ \frac{dM_e}{ds} = \frac{3U_1^2 \cdot p}{2\pi f_1} \cdot \frac{A' \cdot B + A \cdot B'}{A^2 + B^2} \end{array} \right) \text{ Regula de derivare}$$

$$\frac{dM_e}{ds} = \frac{3U_1^2 \cdot p}{2\pi f_1} \cdot \frac{-\frac{R'_2}{s^2} \left[ \left( R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \right] - \frac{R'_2}{s} \left[ -\frac{2R_1 \cdot c_1 \cdot R'_2}{s^2} - \frac{2c_1^2 \cdot R'_2{}^2}{s^3} \right]}{\left( \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left[ \left( R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \right]^2}$$

Pentru determinarea valorii alunecării la care se obține valoarea maximă de cuplu, se egalează derivata cu zero:

$$\frac{dM_e}{ds} = 0 \rightarrow R_1^2 - \left( \frac{c_1 \cdot R'_2}{s} \right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 = 0$$

Valoarea maximă a cuplului se obține pentru:

$$s_{cr} = \pm \frac{c_1 \cdot R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2}}$$

numită *alunecare critică*.

Înlocuiesc valoarea critică a alunecării pentru a obține valoarea maximă a cuplului:

$$M_{emax} = \pm \frac{3U_1^2}{\Omega_1} \cdot \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2} \cdot \left[ \left( R_1 \pm \frac{c_1 \cdot R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2}} \right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \right]}$$



$$M_{emax} = \pm \frac{3U_1^2}{2c_1 \cdot \Omega_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2} \pm R_1} = M_{cr}$$

Semnul „+” corespunde regimului de motor iar semnul „-” celui de generator.

Cuplul de pornire, obținut pentru  $s=1$ , are expresia:



$$M_p = \frac{3U_1^2 \cdot R'_2}{\Omega_1 \left[ \left( R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \right]}$$

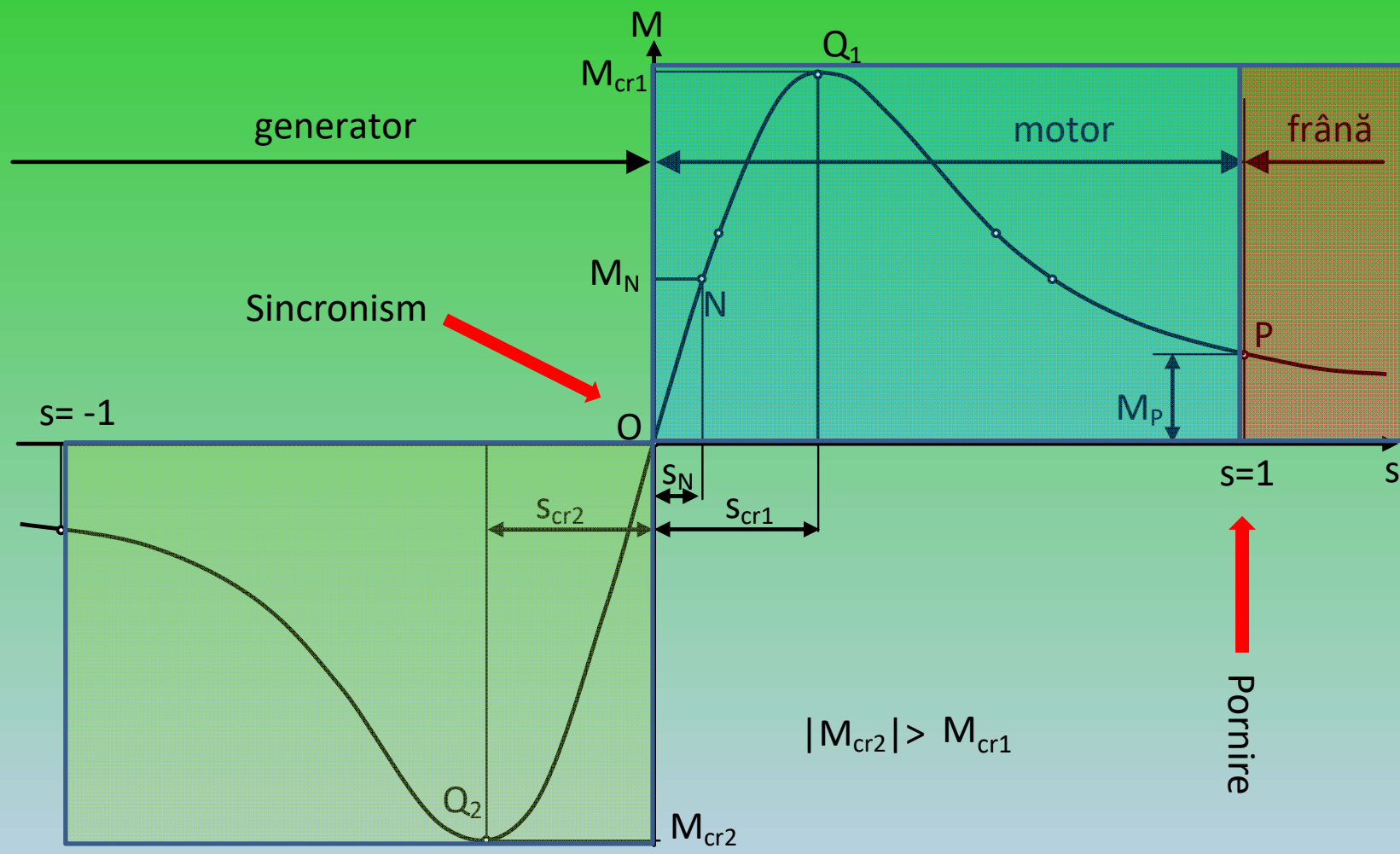
Pentru a exprima sintetic raportul dintre cuplul electromagnetic dezvoltat de mașina asincronă la o anumită alunecare și cuplul maxim, se folosește în mediul ingineresc o formulă simplificată care neglijează rezistența înfășurării rotorice,  $R_1$ , ce poartă numele de formula lui Kloss.

$$\frac{M_e}{M_{cr}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s}}$$

Se definește și coeficientul de suprasarcină ca fiind raportul dintre cuplul maxim (cuplul critic) și cuplul nominal:

$$\frac{M_{cr}}{M_n} = \frac{1}{2} \left( \frac{s_n}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s_n} \right) = K$$

Coeficientul de suprasarcină descrie capacitatea mașinii asincrone de a funcționa peste cuplul nominal, o perioadă scurtă de timp (fixată de regimul termic).



Caracteristica  $M = f(s)$  a mașinii asincrone (variația cuplului electromagnetic cu alunecarea)



Mașina asincronă funcționează în regim de motor pentru  $s = (0, 1)$

Pentru  $s < 0$ , mașina asincronă funcționează în regim de generator.

Când alunecarea  $s > 1$ , mașina asincronă funcționează în regim de frână.

***Puncte de funcționare specifice:***

- Punctul P este punctul de pornire în regim de motor. În funcție de caracteristicile constructive ale mașinii, ea poate dezvolta un cuplu electromagnetic,  $M_p$ , ce reprezintă cuplul de pornire ce pune în mișcare de rotație rotorul. Este caracterizat de valorile  $M_p$  respectiv  $s=1$ .
- Punctul  $Q_1$  reprezintă punctul corespunzător valorii maxime a cuplului electromagnetic. Este deci caracterizat de valorile  $M_{cr}$  respectiv  $s_{cr}$ .
- Punctul N este punctul de funcționare nominală. Corespunde valorilor indicate pe plăcuța indicatoare a mașinii și este caracterizat de valorile  $M_N$  respectiv  $s_N$ .

La funcționarea în regim de motor, punctul de funcționare evoluează din P1 spre Q1 apoi coboară pe caracteristică spre punctul N. În funcție de cuplul rezistent la arbore (adică sarcina motorului), el se fixează în N sau mai jos către punctul de sincronism ce corespunde lui  $M=0$  și  $s=1$ . Zona de funcționare P-Q1, este o zonă tranzitorie de funcționare (doar la pornire și la oprire). Mașina nu poate funcționa stabil pe această porțiune.

Regimul de funcționare ca generator presupune antrenarea rotorului la o viteză mai mare decât cea de sincronism. Caracteristica  $M=f(s)$  este situată în cadranul trei.

**Important**

La funcționarea în regim de generator, cuplul electromagnetic dezvoltat de mașina asincronă are valoare negativă, adică se opune mișcării rotorului.

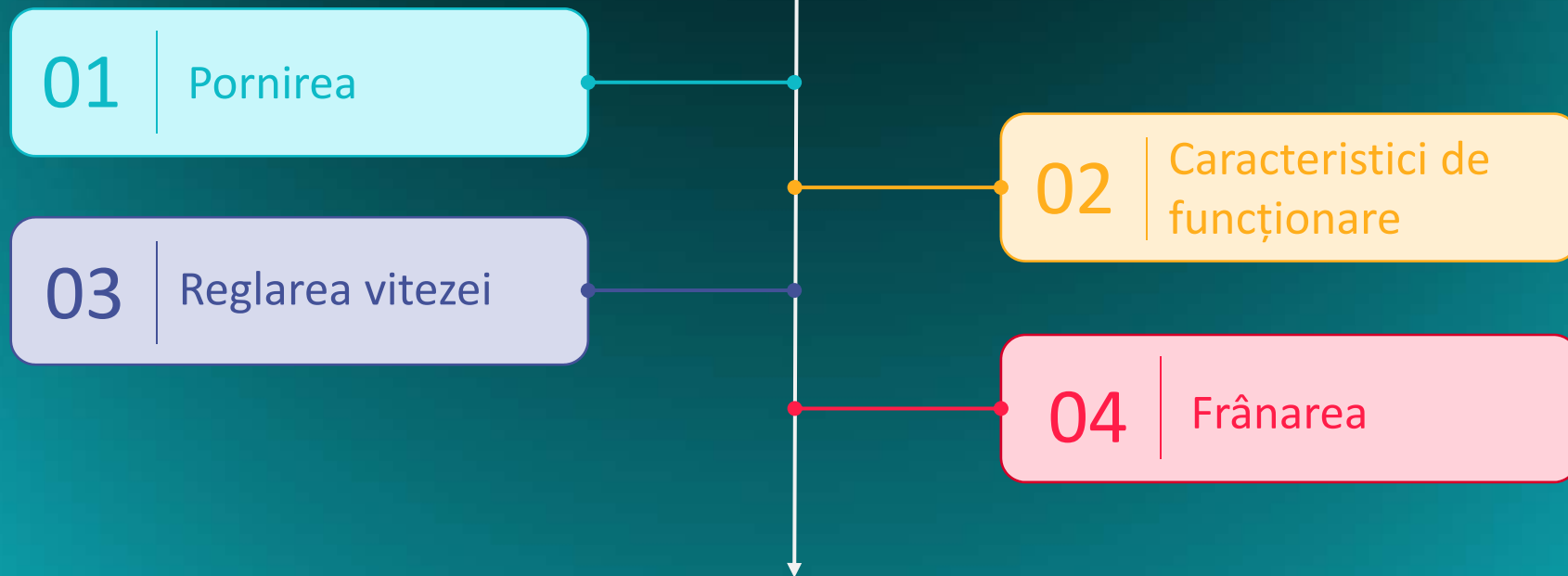
Punctele de funcționare nominal și critic, descrise la regimul de motor, sunt valabile și pentru regimul de generator.

# CURS 6

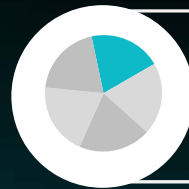
## Pornirea motoarelor asincrone



# Tematici de analiza la motorul asincron



# CUPRINS



I.  
Cuplarea directa la rețea

II.  
Pornirea stea-triunghi



III.  
Pornirea cu autotransformator

IV.  
Pornirea cu soft-starter



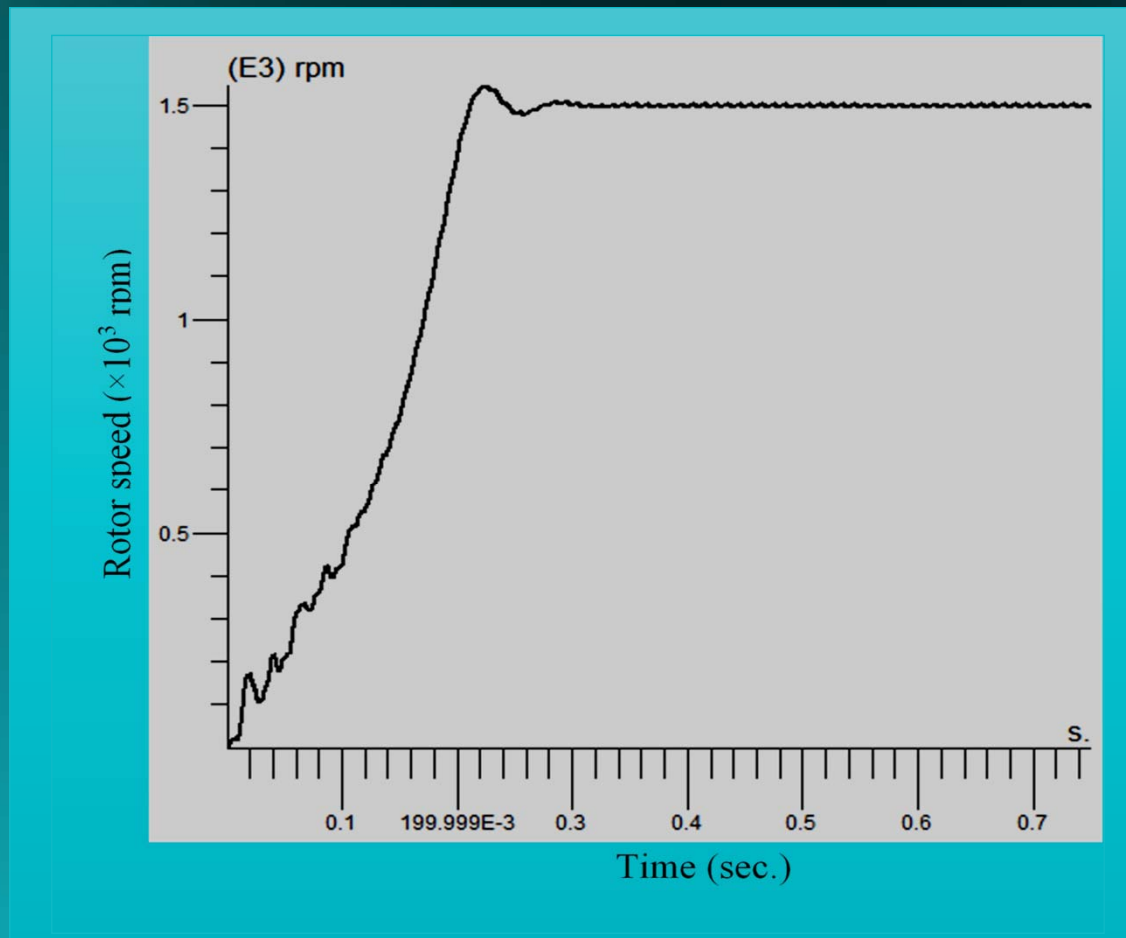
V.  
Pornirea cu convertor de frecvență

VI.  
Pornirea cu rezistențe înseriate in  
circuitul rotoric

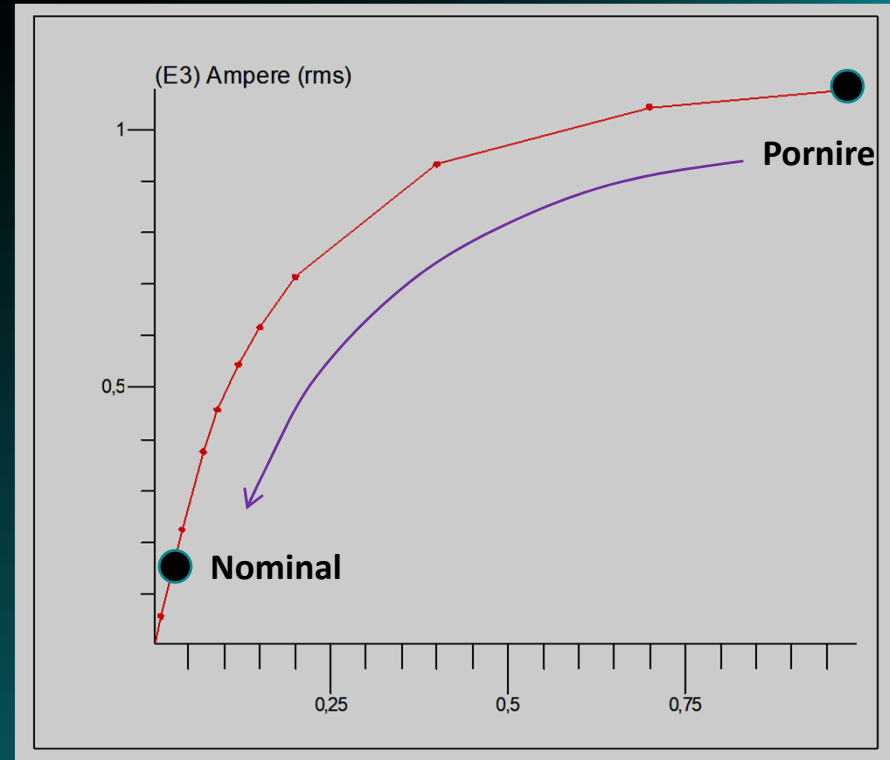
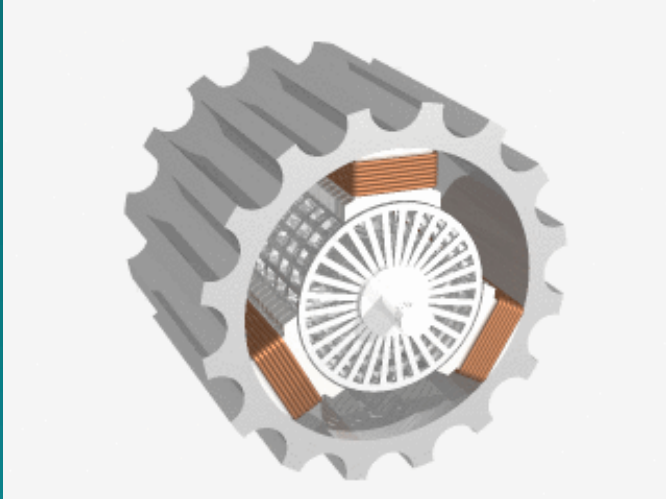




***Pornirea*** este un regim tranzitoriu al funcționării in regim de motor pe parcursul căruia mașina accelerează de la zero până la stabilizarea vitezei la o valoare constantă determinată de sarcină.



Caracteristica de pornire in gol a unui motor asincron (variația turației in timp)



Variația curentului, în barele rotorice, pe perioada pornirii.



**Pe timpul pornirii, curentul depășește valoarea sa nominală atât în înfășurarea statorică cât și în cea rotorică.**



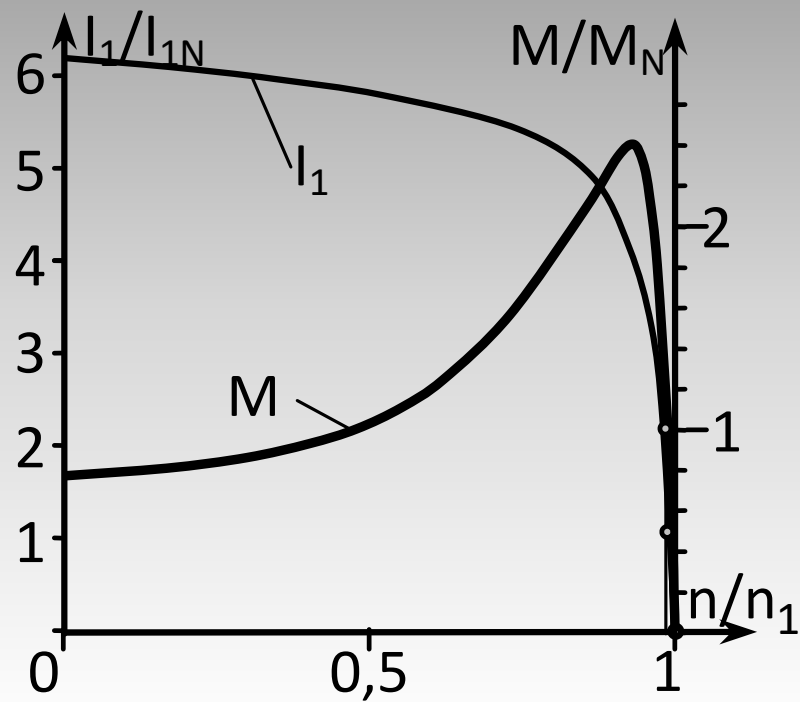
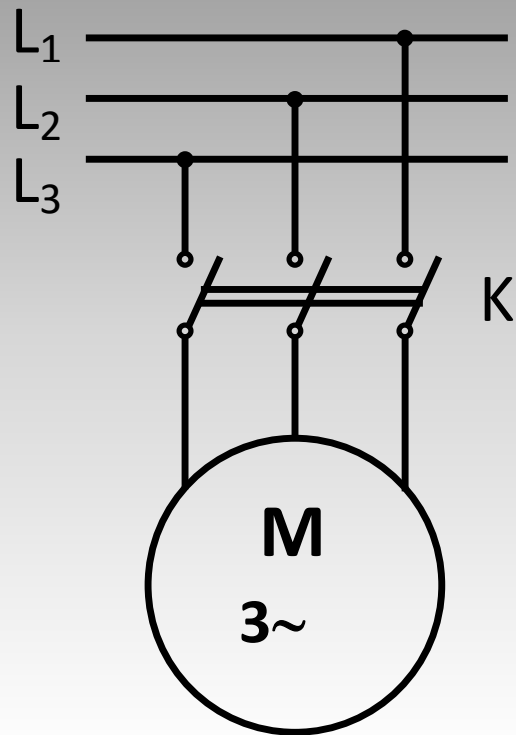
La pornirea motorului asincron apare întotdeauna prin înfășurări un curent mai mare decât valoarea nominală. Acest curent în mod uzual se încadrează în limitele  $(4-7)I_N$ . Deși, pe moment, acest curent nu produce defectarea mașinii întrucât regimul de pornire este scurt, în timp are loc o depreciere mai rapidă a înfășurărilor.

De asemenea, valoarea mare a curentului poate afecta în mod negativ rețeaua de alimentare, mai ales dacă aceasta este de putere scăzută.

În plus, regimul mecanic de pornire se poate manifesta prin șocuri ce pot afecta cuplajele mecanice sau însuși procesul tehnologic.

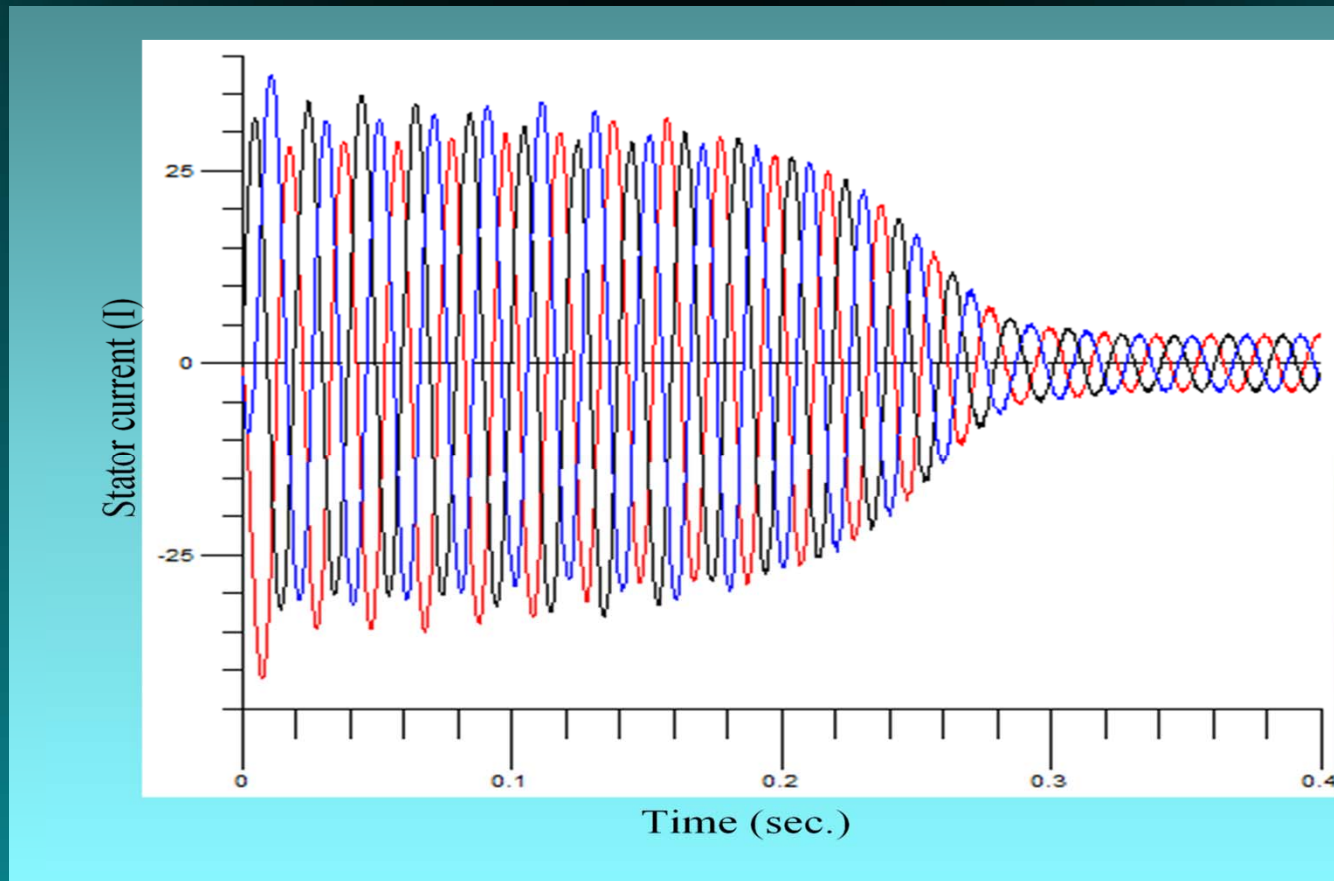
Drept urmare, de cele mai multe ori trebuie adoptate măsuri speciale pentru pornirea în siguranță a motorului asincron.

## I. Cuplarea directa



Mașina se conectează la rețea prin intermediul contactorului K, FĂRĂ a se lua vreo măsură de limitare a curentului de pornire. Metoda se aplică în cazul motoarelor de mică putere (puteri până la 2-3 kW) ținând cont și de frecvența pornirilor.

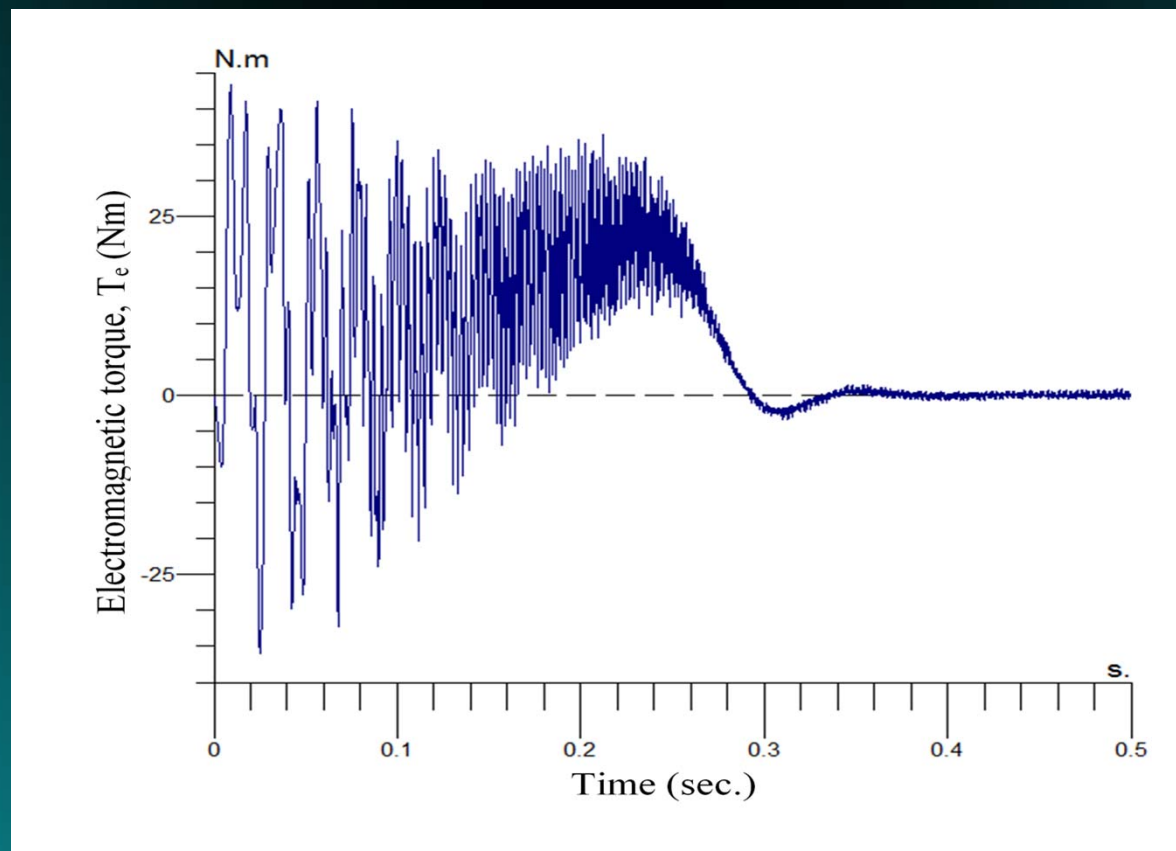
Variația unui sistem trifazat de curenți la conectarea unei mașini asincrone la rețea.



Timpul de pornire durează până la stabilizarea valorii curentului (pe figură  $t_p=0,32\text{sec}$ )

Pe timpul pornirii curentul poate atinge valori de până la 6-7 ori peste valoarea nominală.

## Variația cuplului electromagnetic la conectarea unei mașini asincrone la rețea

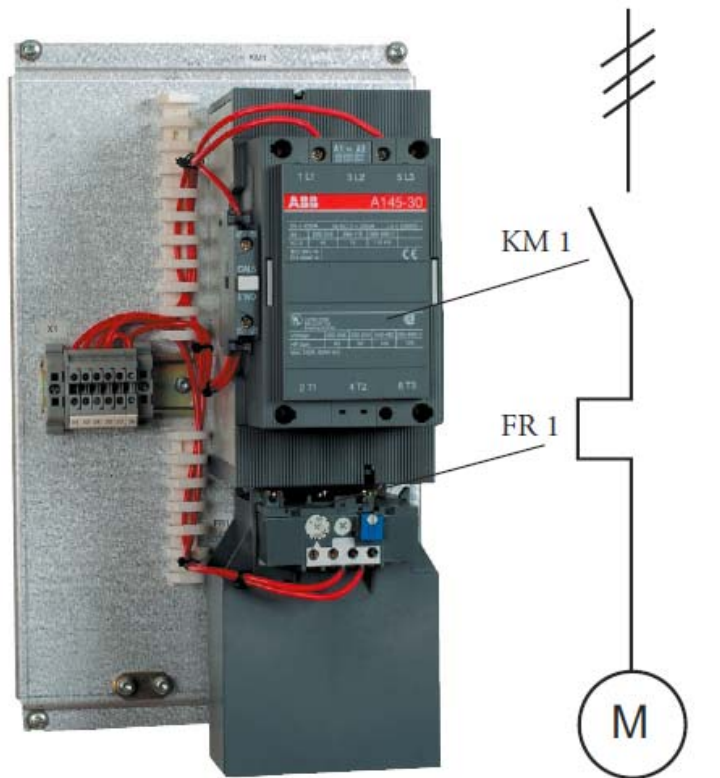


$$M_e = J \frac{d\Omega}{dt} + M_r$$

unde:  $J$  – momentul de inerție;  $M_r$  – cuplul rezistent;

$\Omega$  – viteza unghiulară a rotorului.

Pe timpul pornirii are loc o variație importantă și alternativă a cuplului electromagnetic.



D.O.L. starter with contactor and O/L relay

Single line diagram for a D.O.L.

KM 1 Main contactor  
FR 1 Overload relay



1. Curent de pornire  $I_p = (4-7.5)I_n$
2. Cuplul de pornire depinde numai de caracteristicile motorului
3. Pentru ca pornirea motorului să nu dezechilibreze rețeaua de alimentare trebuie îndeplinită următoarea condiție:

$$\frac{I_p}{I_n} \leq \frac{3}{4} + \frac{\text{Puterea instalata pe retea}}{4 \times \text{Puterea motorului}}$$

Contactor utilizat la cuplarea directă a motorului asincron la rețea

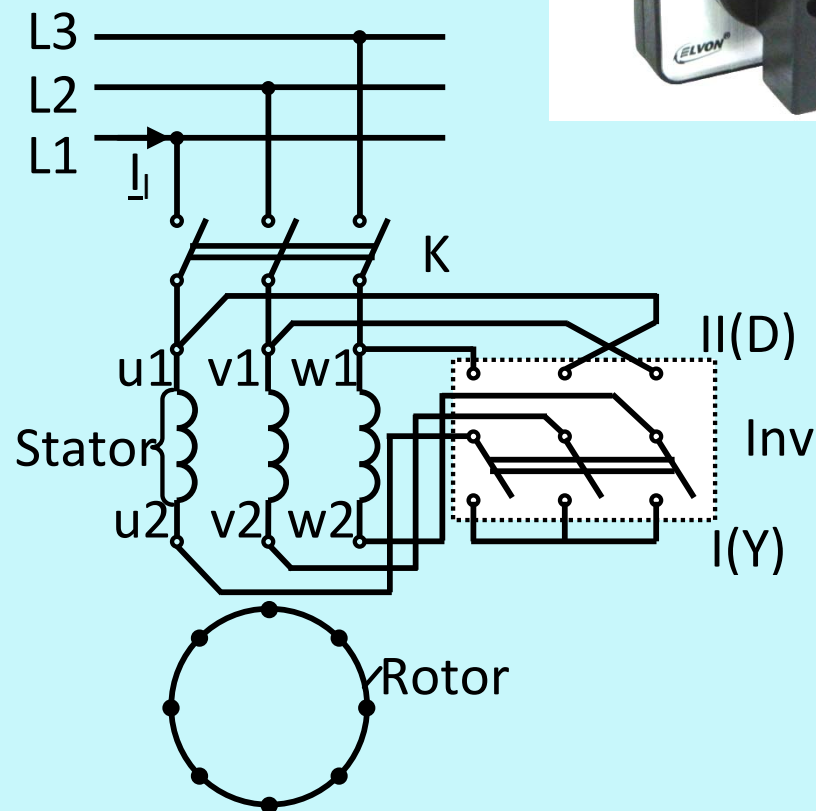
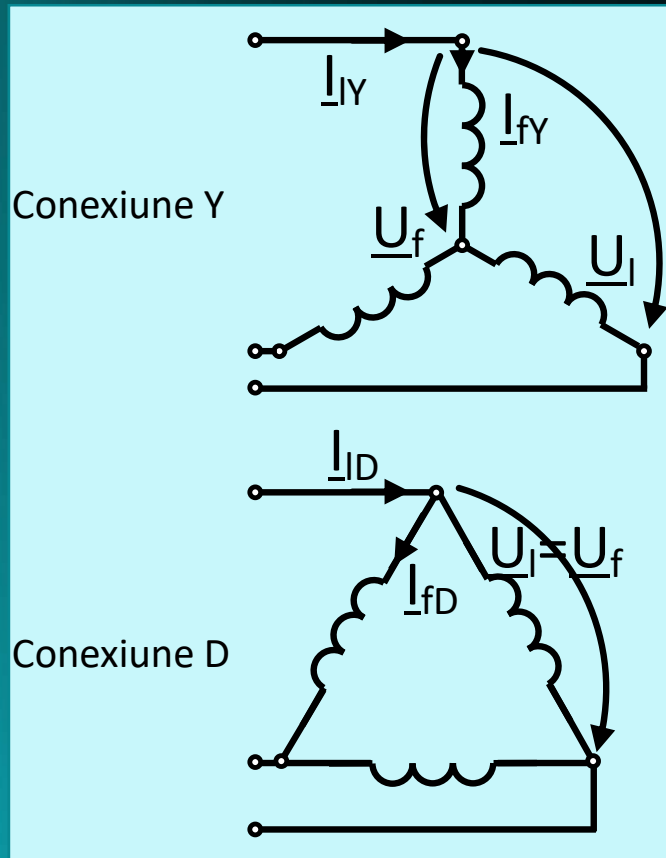
## II. Pornirea stea-triunghi

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2}}$$

Principial, metoda constă în scăderea tensiunii de alimentare. În sistemul trifazat românesc (având tensiunea de linie de 400 V), tensiunea de alimentare se reduce de la 400V la 230V pe fiecare fază a motorului.

Practic, înfășurarea trifazată statorică este conectată inițial în stea (Y) după care se trece la conexiunea triunghi (D).

# Comutator stea-triunghi

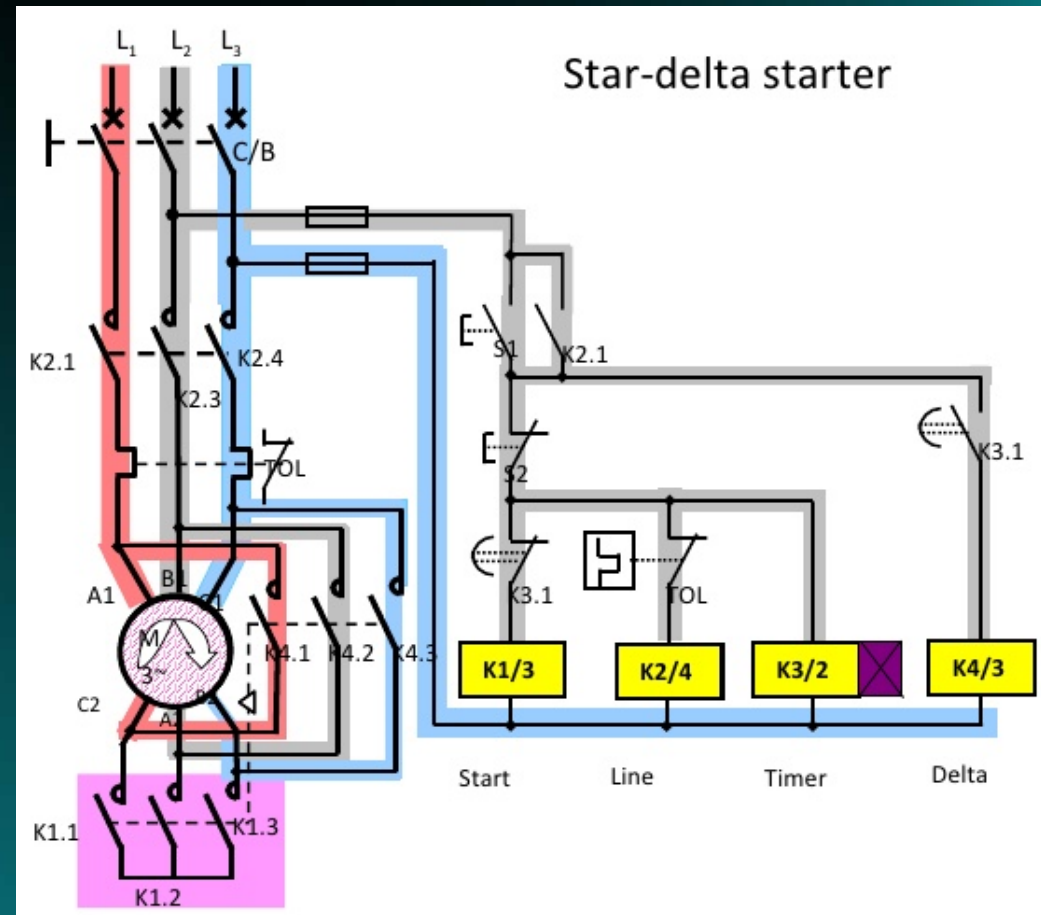
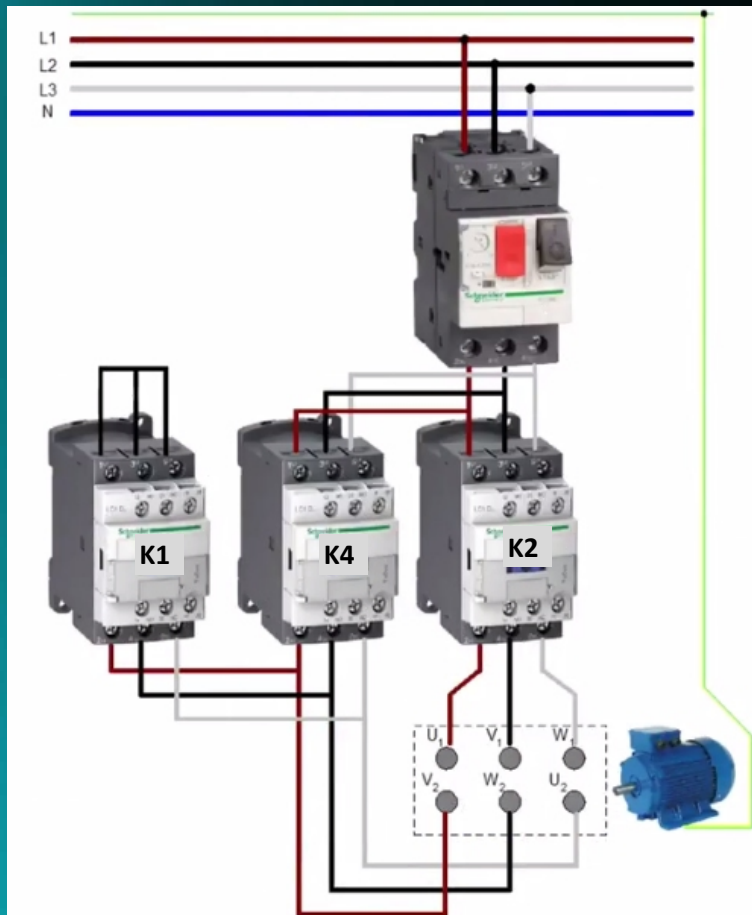


Principiul reducerii tensiunii de faza utilizând trecerea de la conexiunea triunghi la conexiunea stea

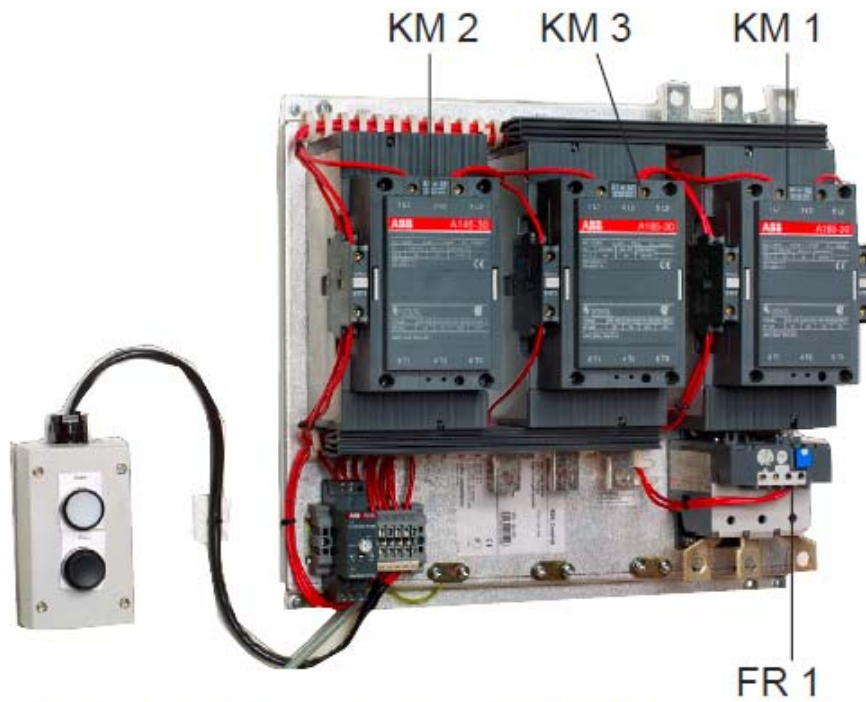
Schema de principiu a comutatorului stea-triunghi



# Sistem de pornire Y/Δ automatizat

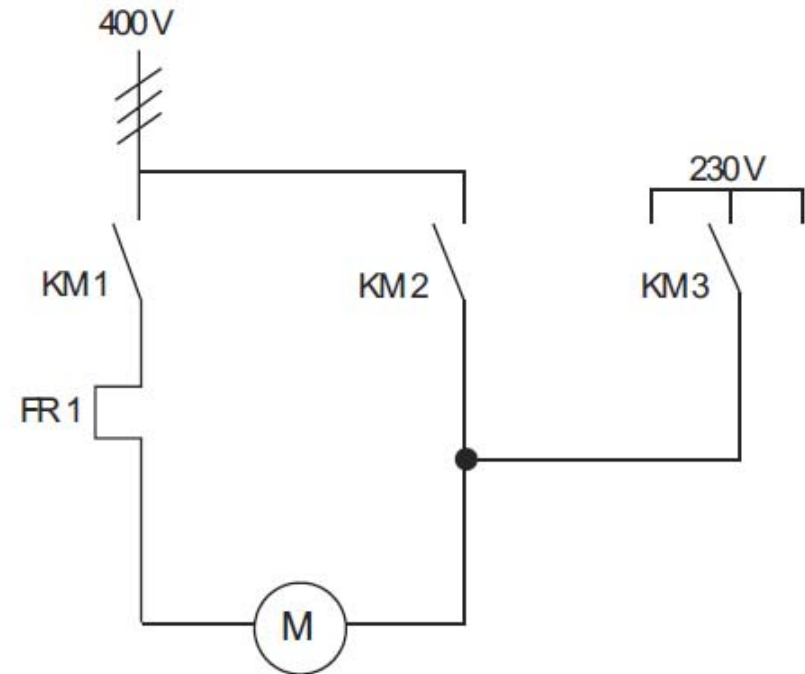


- Contactoarele K1 și K2 sunt închise. Se apasă butonul de pornire S1 și mașina este alimentată în conexiunea Y. De asemenea se alimentează bobina releului de timp K3/2.
- După timpul setat pe K3/2, se deschide contactul K3.1 (de pe ramura lui K1/3) și se închide contactul K3.1 de pe ramura lui K4/3. Astfel se trece de pe conexiunea Y pe conexiunea Δ (se deschid contactele principale K1.1-K1.3 și se închid contactele K4.1-K4.3).



Star-delta starter with contactors and O/L relay

- KM 1 Main contactor
- KM 2 Delta contactor
- KM 3 Star contactor
- FR 1 Overload relay



Single line diagram for a Star-delta starter

## Sistem de pornire Y/Δ industrial ABB

$$\left( \begin{array}{cc} \mathbf{Y} & \mathbf{\Delta} \\ I_{linie} = I_{faza} & U_{linie} = U_{faza} \\ U_{linie} = \sqrt{3} U_{faza} & I_{linie} = \sqrt{3} I_{faza} \end{array} \right)$$

$$I_{lY} = I_{fY} = \frac{U_f}{Z_f} = \frac{U_l}{\sqrt{3} \cdot Z_f} \quad (1)$$

$$I_{l\Delta} = \sqrt{3} \cdot I_{f\Delta} = \sqrt{3} \cdot \frac{U_f}{Z_f} = \sqrt{3} \cdot \frac{U_l}{Z_f} \quad (2)$$

$$\frac{I_{lY}}{I_{l\Delta}} = \frac{1}{3}$$

Dacă exprimăm curenții de linie, corespunzători celor două conexiuni, în funcție de tensiunea de linie,  $U_l$ , și impedanța de fază,  $Z_f$  (rel. 1 și 2), atunci se constată că raportul curenților pentru cele două conexiuni este de  $1/3$ .

## Caracteristicile de cuplu si curent ale motorului asincron la pornirea stea-triunghi

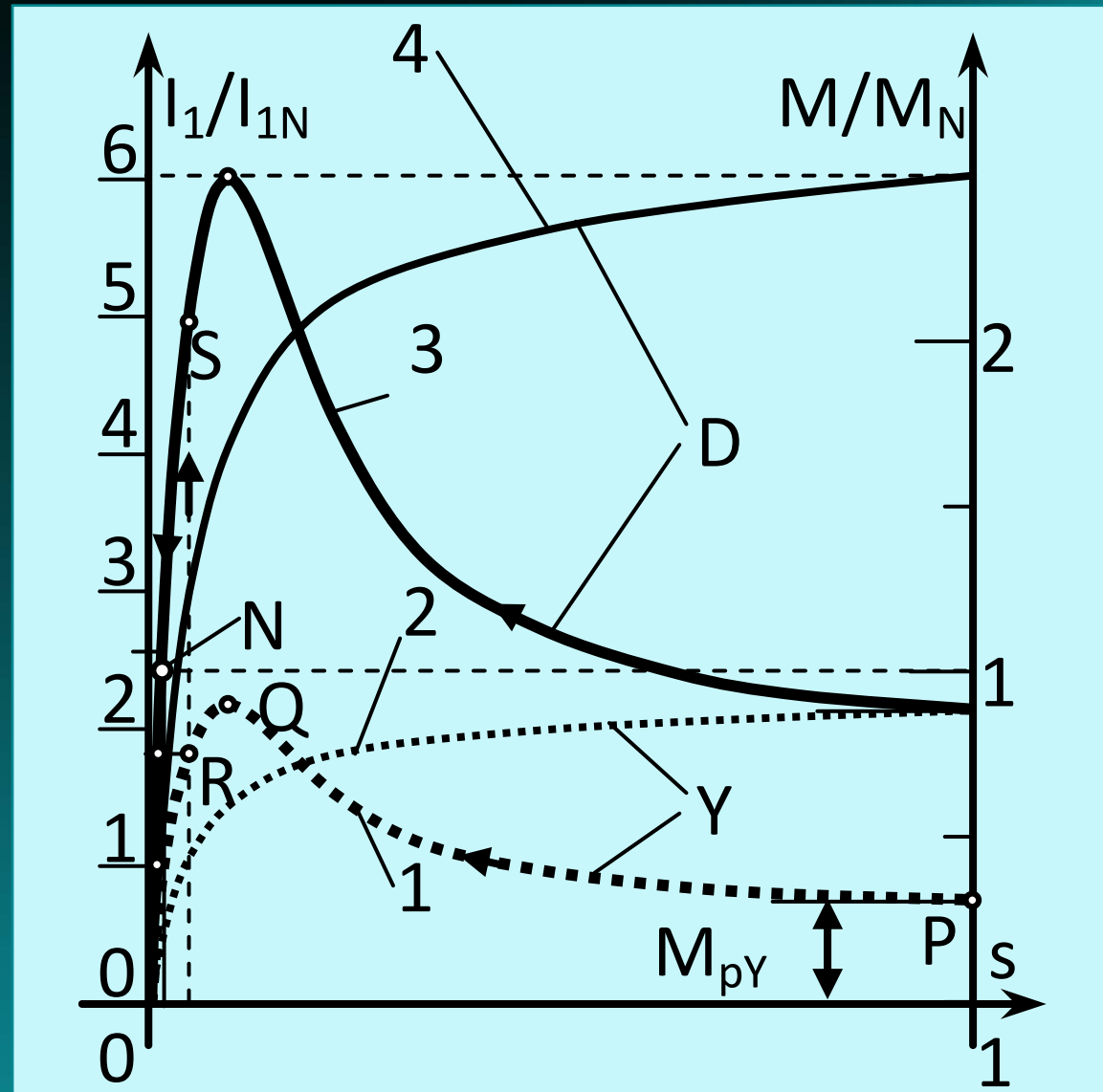
- 1- curba  $M=f(s)$  la funcționarea Y
- 2- curba  $I=f(s)$  la funcționarea Y
- 3- curba  $M=f(s)$  la funcționarea  $\Delta$
- 4- curba  $M=f(s)$  la funcționarea  $\Delta$

P- *punctul de pornire*

R- *punctul de schimbare a conexiunii din stea in triunghi*

S- *punctul de funcționare omolog lui R de pe caracteristica conexiunii triunghi*

N- *punctul nominal de funcționare*



Explicații



a. Motorul pornește din punctul P, iar punctul de funcționare evoluează pe caracteristica 1 până în punctul R.

b. Se trece de la conexiunea stea la conexiunea triunghi.

c. Punctul de funcționare „sare” din R în S.

d. Punctul de funcționare evoluează pe noua caracteristică (3) din S în N (dacă mașina este încărcată la cuplu nominal) sau mai jos.

1. Curentul de pornire *scade de 3ori*

2. Cuplul de pornire *scade de 3ori*

3. Mașina trebuie să aibă toate capetele înfășurării statorice scoase la cutia de borne (6 borne)

4. Mașina trebuie să fie destinată funcționării in triunghi

Indicația de pe plăcuța indicatoare trebuie sa arate astfel:

$\Delta/Y$  - 380/660 V (400/690)

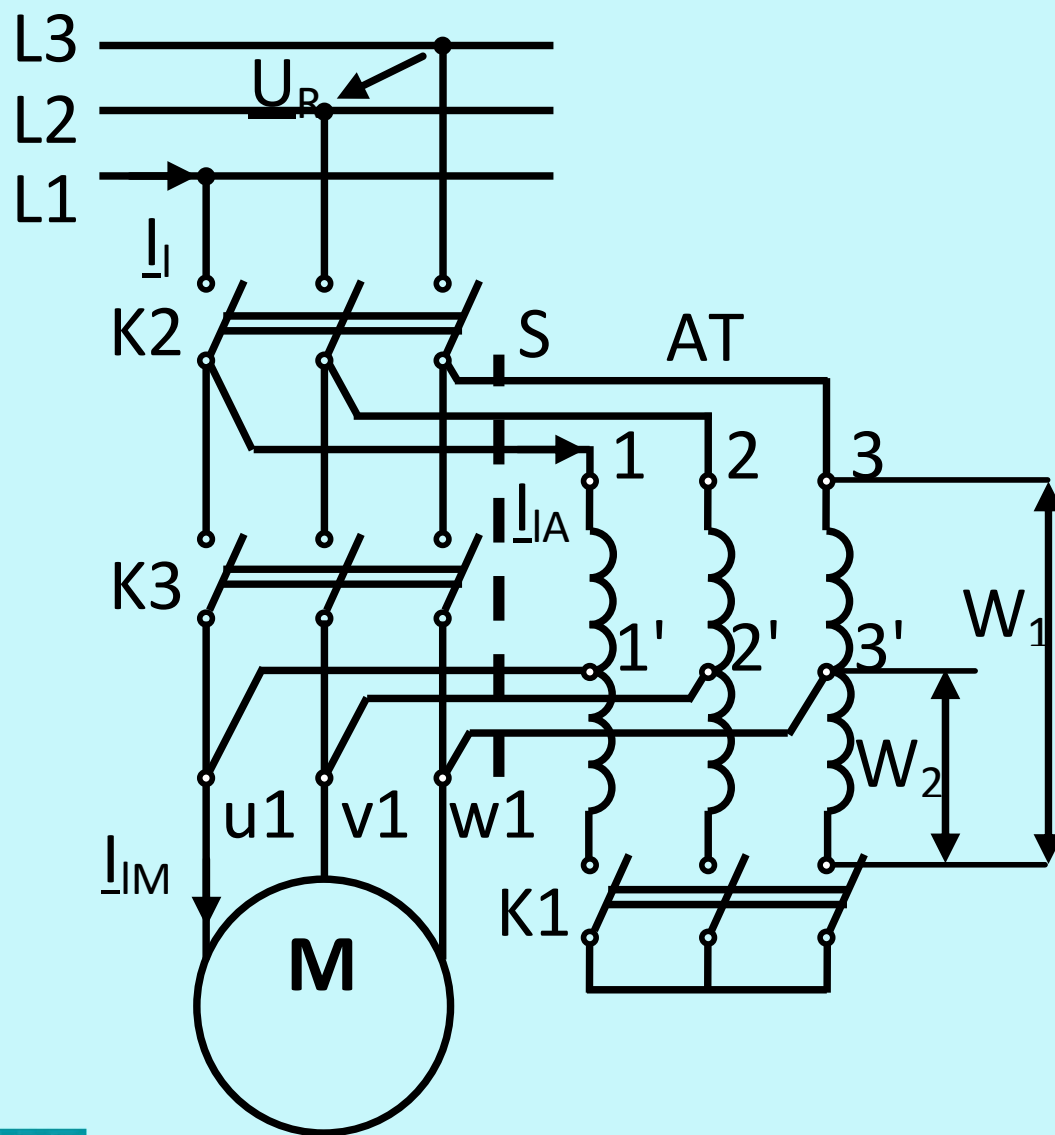


*Daca pe plăcuța indicatoare a mașinii apare:*

$\Delta/Y$  - 220/380 V (230/400)

*înseamnă ca mașina este destinată să funcționeze in conexiunea stea si trecerea ei in conexiunea triunghi determină o tensiune de fază mai mare decât tensiunea nominală*

### III. Pornirea cu autotransformator



*Acest tip de pornire se folosește în cazul motoarelor de foarte mare putere (MW sau uneori sute de kW)*

1. Se închide K1 și apoi K2. Înfășurarea statorică este alimentată la jumătate din tensiunea rețelei.

2. Se deschide K1. Rămâne jumătate din înfășurarea autotransformatorului pe care are loc o anumită cădere de tensiune iar tensiunea de alimentare crește peste jumătatea tensiunii rețelei dar sub valoarea sa nominală.

3. Se închide K3. Mașina se alimentează la tensiunea nominală.





1. Curentul de pornire *scade de  $w_1/w_2$  ori*

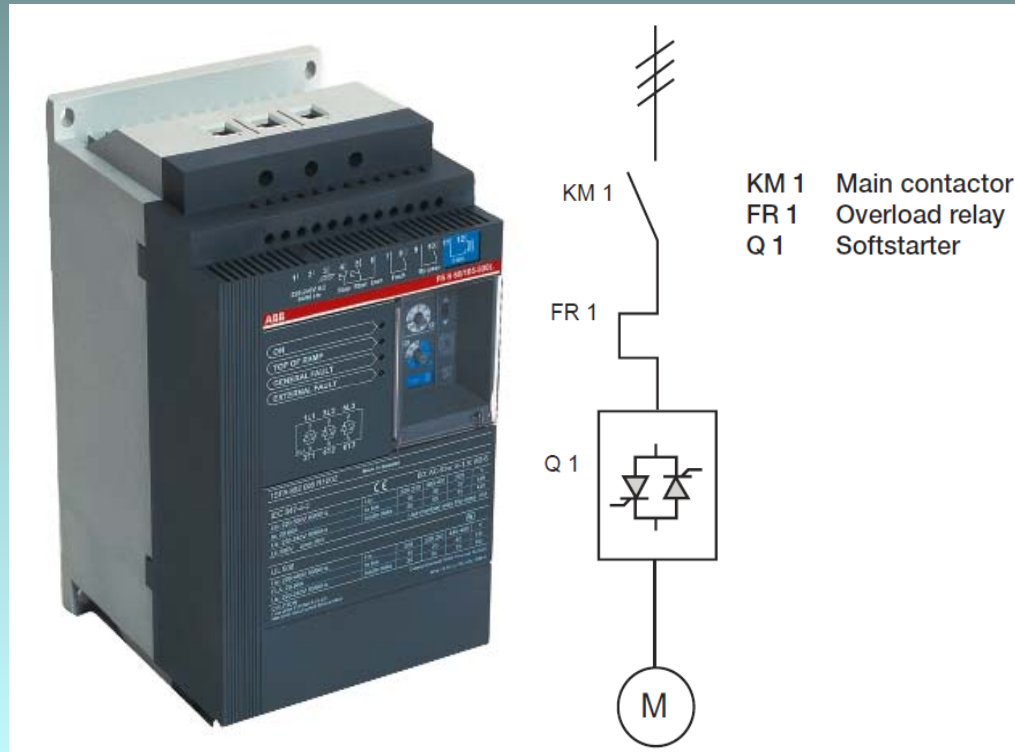
$$\text{Daca } \frac{w_1}{w_2} = 2 \quad \text{atunci } U_{1m} = \frac{1}{2} U_{1r} \quad \text{dar } M = 0,25 \cdot M_{pN}$$

2. Cuplul de pornire *scade cu pătratul raportului  $w_1/w_2$*

3. Metoda se aplică mașinilor de mare putere (4-5 MW)

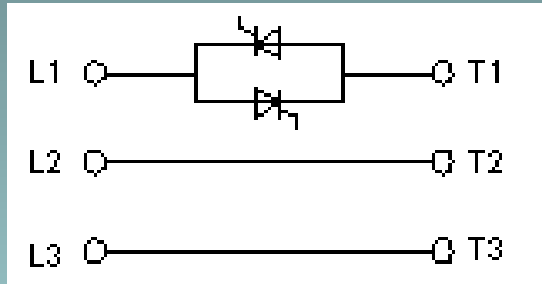
4. Deoarece costul ATR este mare, metoda se folosește pentru alimentarea succesivă a mai multor motoare.

## IV. Pornirea cu soft-starter

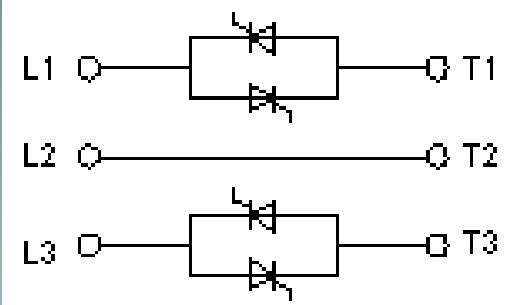


Soft-starterul este un dispozitiv ce permite reglarea temporară, pe cale electronică, a tensiunii de alimentare. De regulă, este prevăzut cu tiristoare legate in antiparalel pe una, două sau toate trei fazele. Valoarea tensiunii este reglată prin modificarea unghiului de conducție al tiristoarelor.

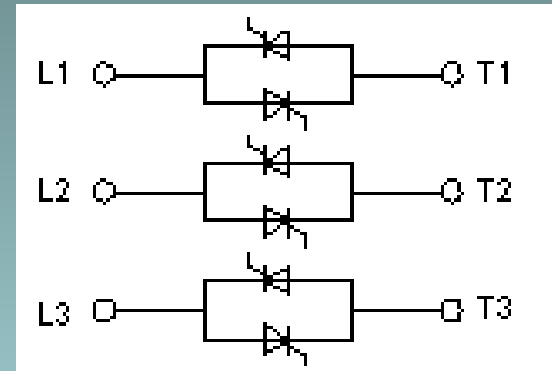
# Tipuri de soft-startere



Soft-starter cu reglajul tensiunii pe o singura faza a sistemului de alimentare

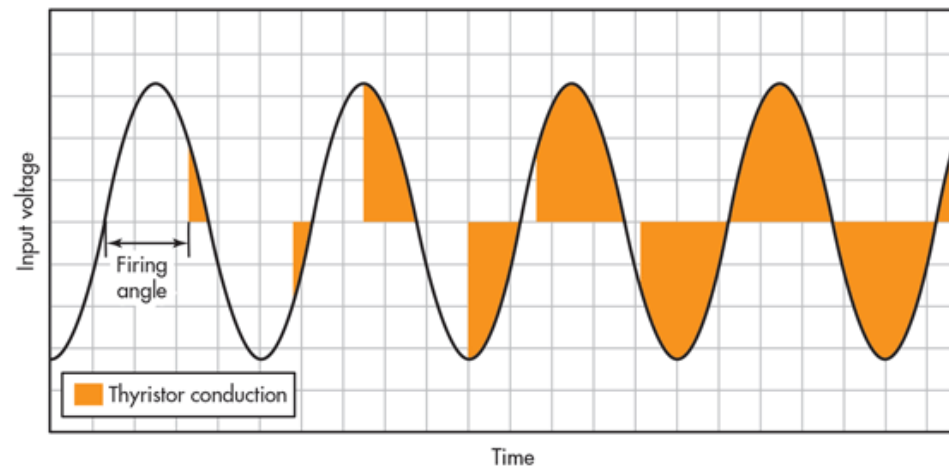


Soft-starter cu reglajul tensiunii pe doua faze ale sistemului de alimentare

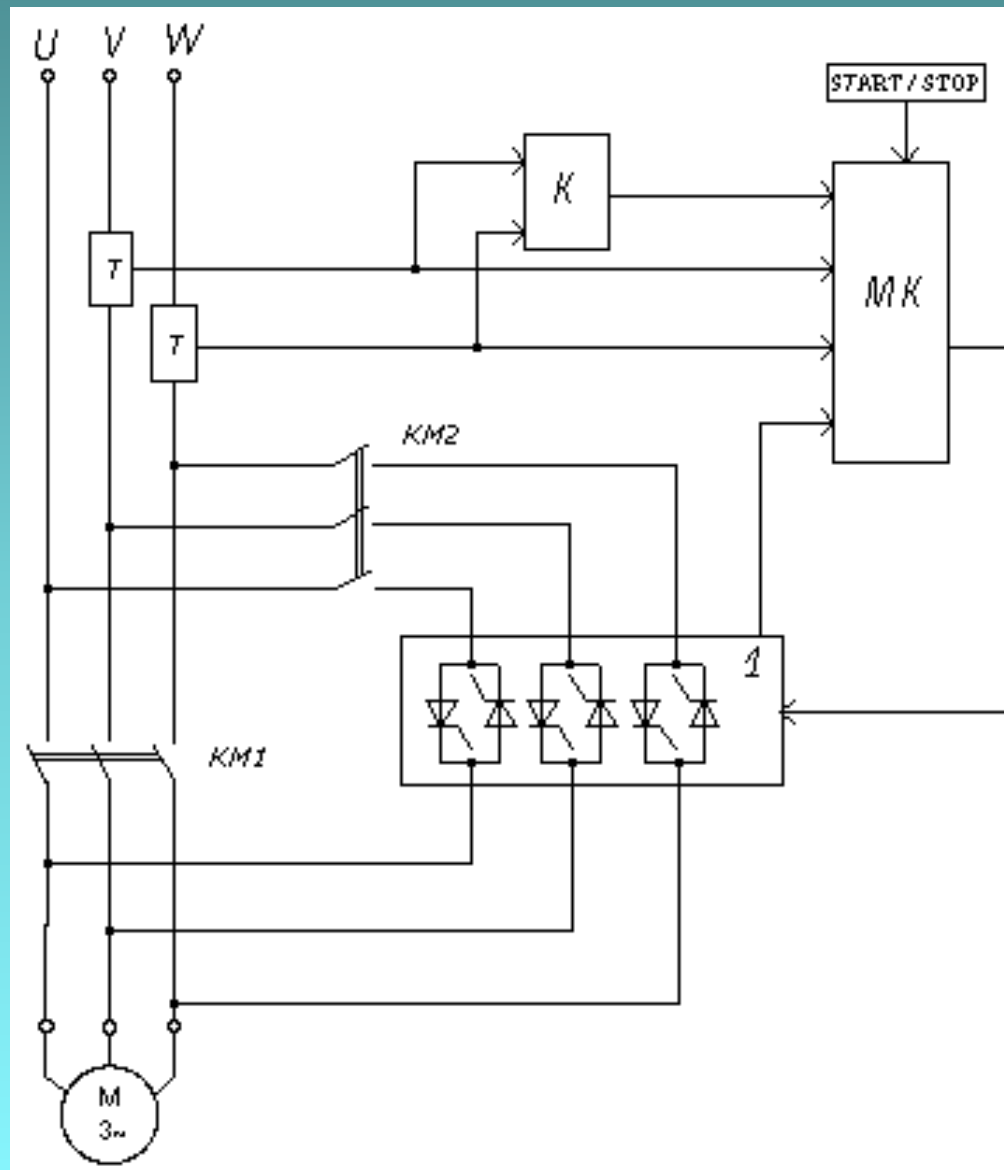


Soft-starter cu reglajul tensiunii pe toate fazele sistemului de alimentare

Secvență de comanda a tiristoarelor soft-starterului

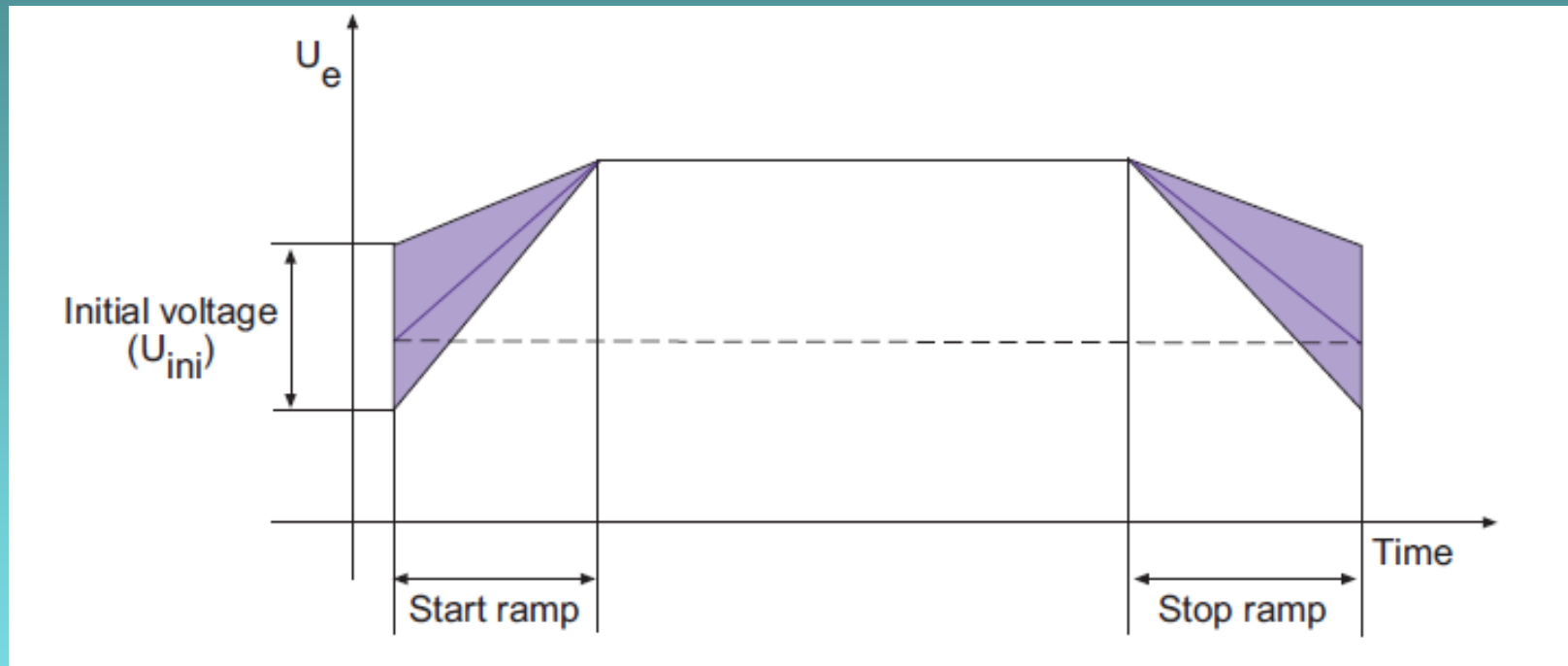


## Schema de pornire cu soft-starter



- Secvența de pornire cu soft-starter presupune:
- închiderea întrerupătorului *KM2*;
  - alimentarea cu tensiune variabil crescătoare a motorului până la atingerea valorii nominale;
  - închiderea întrerupătorului *KM1* și deschiderea lui *KM2*.

## Diagrama de pornire cu soft-starter



Soft-starterul permite pornire cu tensiune redusă a cărei valoare poate fi ajustată de utilizator în funcție de specificul pornirii. În plus, se poate regla și timpul de pornire.

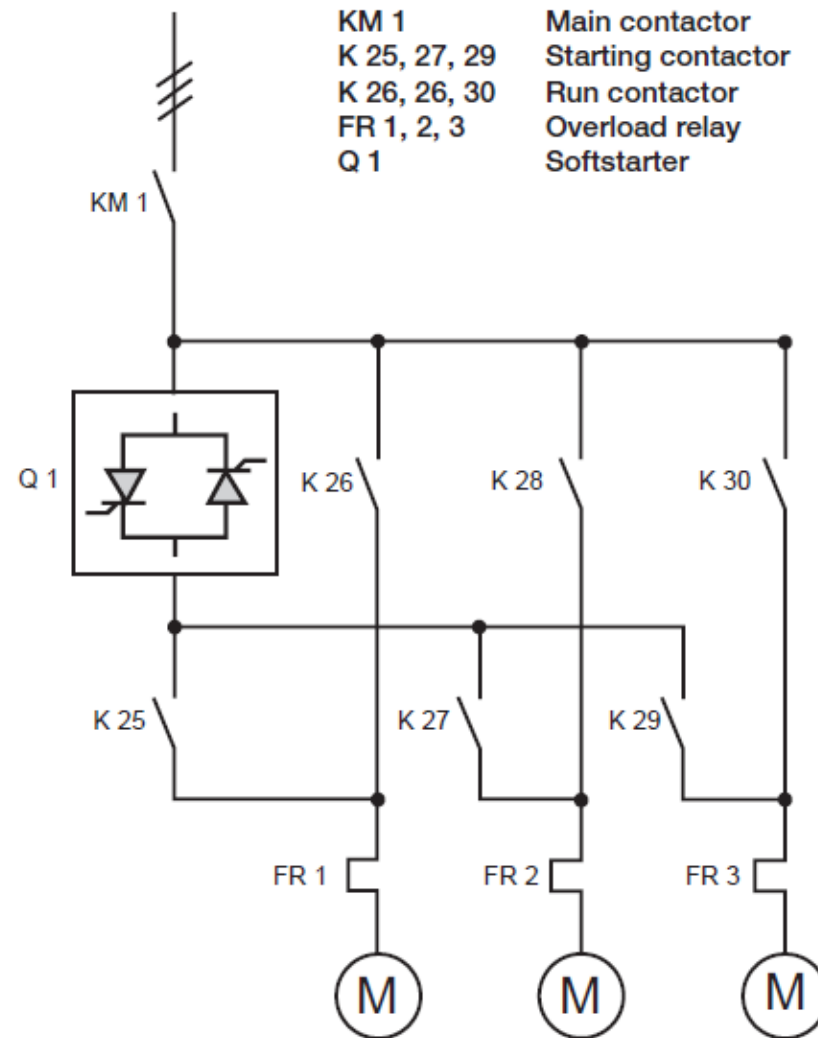
Unele soft-startere permit funcția de „Soft-stop” (utilă la pompe, benzi rulante, etc) – este o oprire controlată a mașinii prin descreșterea tensiunii de alimentare și fixarea precisă a timpului de oprire.

# Pornirea cu un singur soft-starter a mai multor motoare

Se poate folosi un singur dispozitiv pentru pornirea mai multor motoare.

Pornirea are loc *secvențial* – motoarele sunt pornite pe rând.

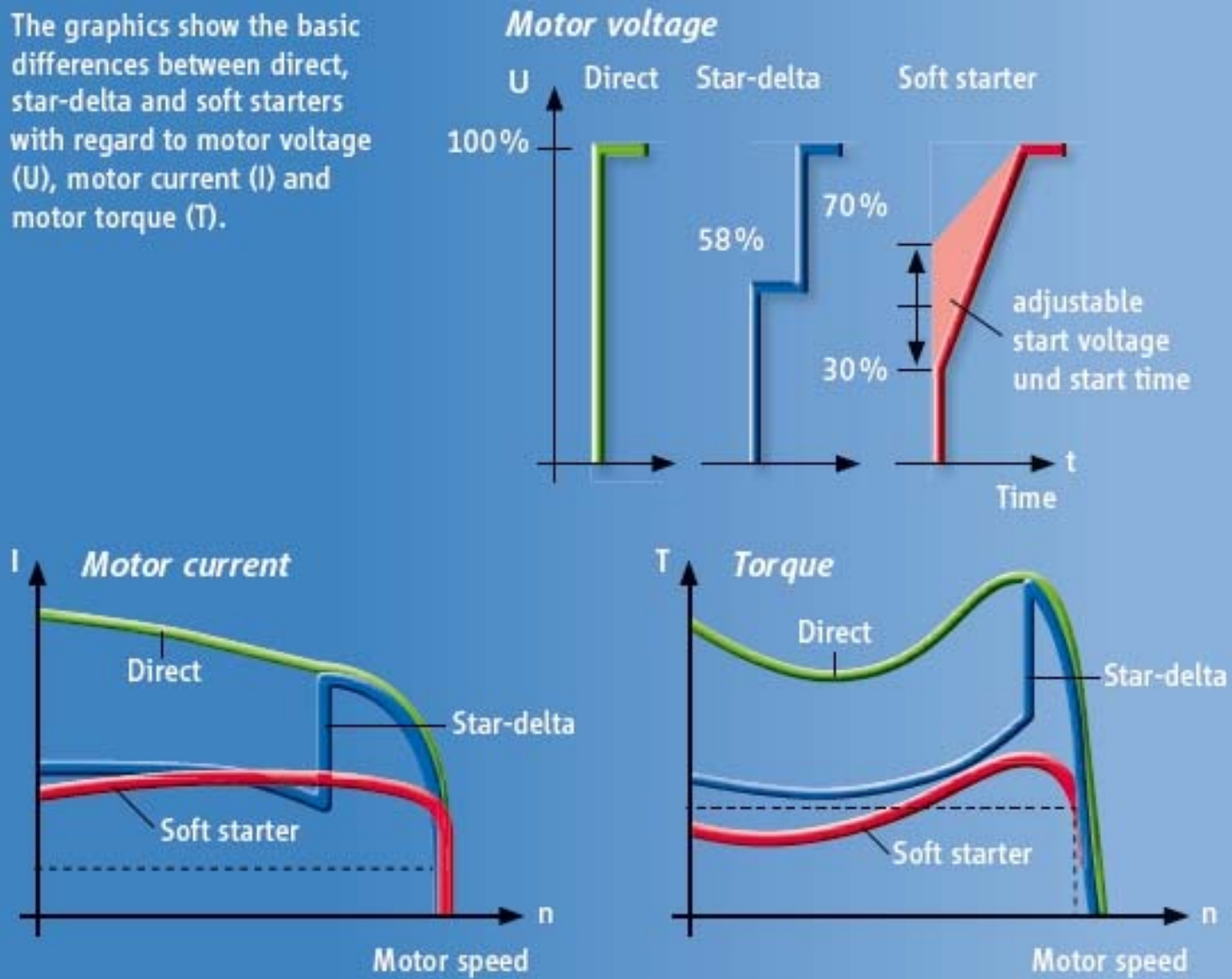
Soft-starterul trebuie dimensionat corespunzător motorului cu cel mai mare curent de pornire.



Sequential start of motors using a softstarter

# Diagrame de pornire

The graphics show the basic differences between direct, star-delta and soft starters with regard to motor voltage (U), motor current (I) and motor torque (T).





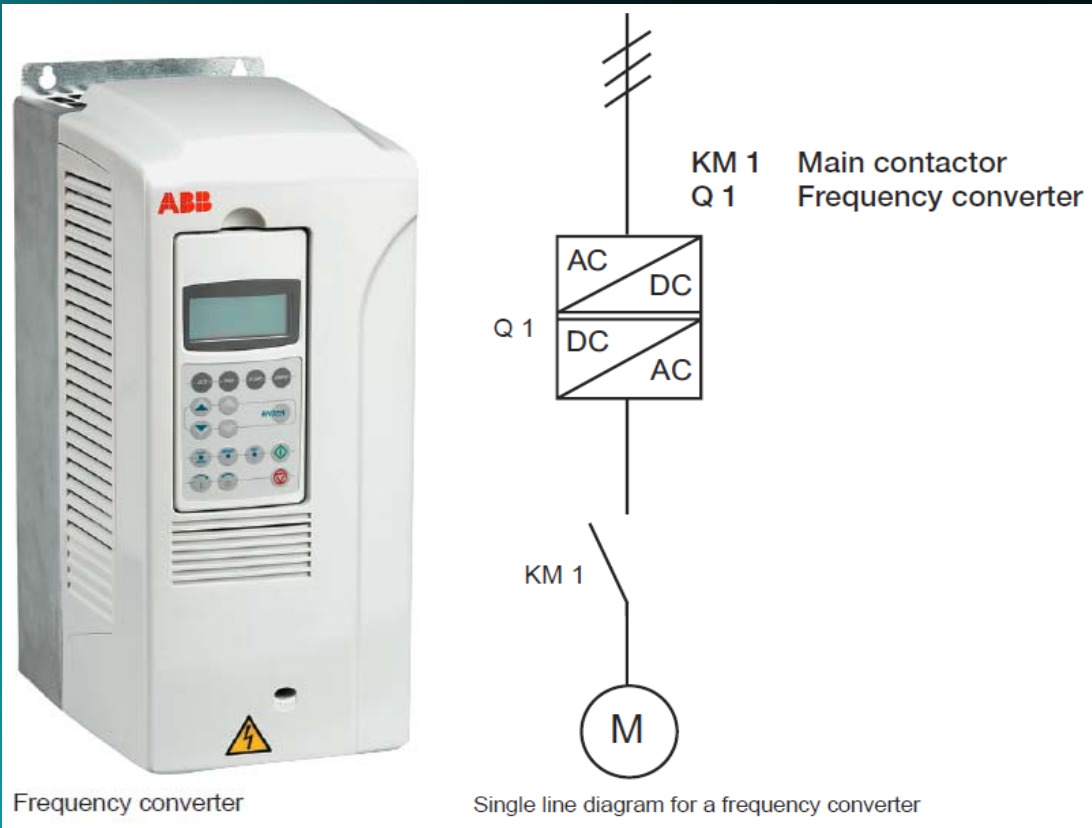


- 1. Pornire se face cu tensiune redusa *ajustabila*.**
- 2. Se poate face controlul rampei de pornire. Oprirea poate fi de asemenea controlata.**
- 3. Se poate folosi un singur starter pentru pornirea mai multor motoare.**
- 4. Atenție la reducerea cuplului de pornire.**

## Tabel comparativ cu parametri specifici de pornire

Tipul pornirii	Directă	Cu AT sau/și react. înser.	Cu com. Y-Δ	Cu soft-startere
Procent din $I_{1N}$ la pornirea directă (în rețea)	100%	30-40% sau 64%	33%	Dependent de reglaje <90%
Procent din cuplul la pornirea directă	100%	30-40% sau 64%	33%	Depend. de reglaje <80%
Nr. de pași la pornire (modif. bruște de vit.)	1	4,3 sau 2	2	Continuu, fără pași
Nr. de conexiuni la motor	3	3	6	3
Supracurentul în rețea (aprox.)	$5I_{1N}$	1,5-2,1 sau 3,2 $I_{1N}$	$1,65I_{1N}$	Depend. de regl. < $5I_{1N}$

## V. Pornirea cu convertor de frecvență



Pornirea se face cu *tensiune si frecvență* reduse.

Este o metodă ce se folosește doar atunci când este necesar si reglaj de viteza.



Beneficiază de funcția *soft-stop*.

**Aceasta metoda se poate aplica NUMAI la motoarele asincrone cu rotor bobinat.**

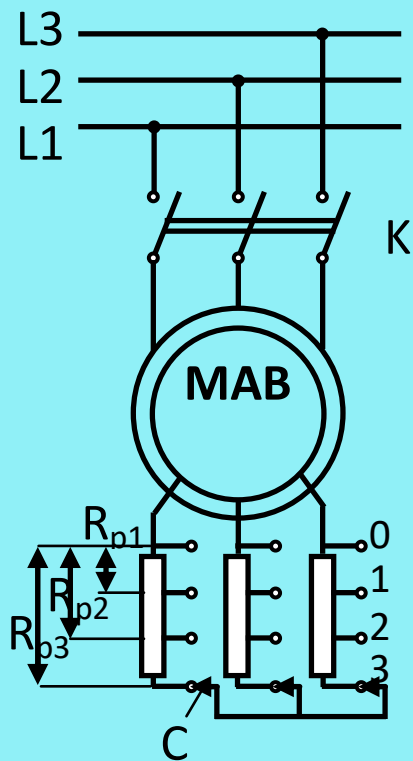
$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2}} \quad M_p = \frac{3U_1^2 \cdot R'_2}{\Omega_1 \left[ \left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \right]}$$



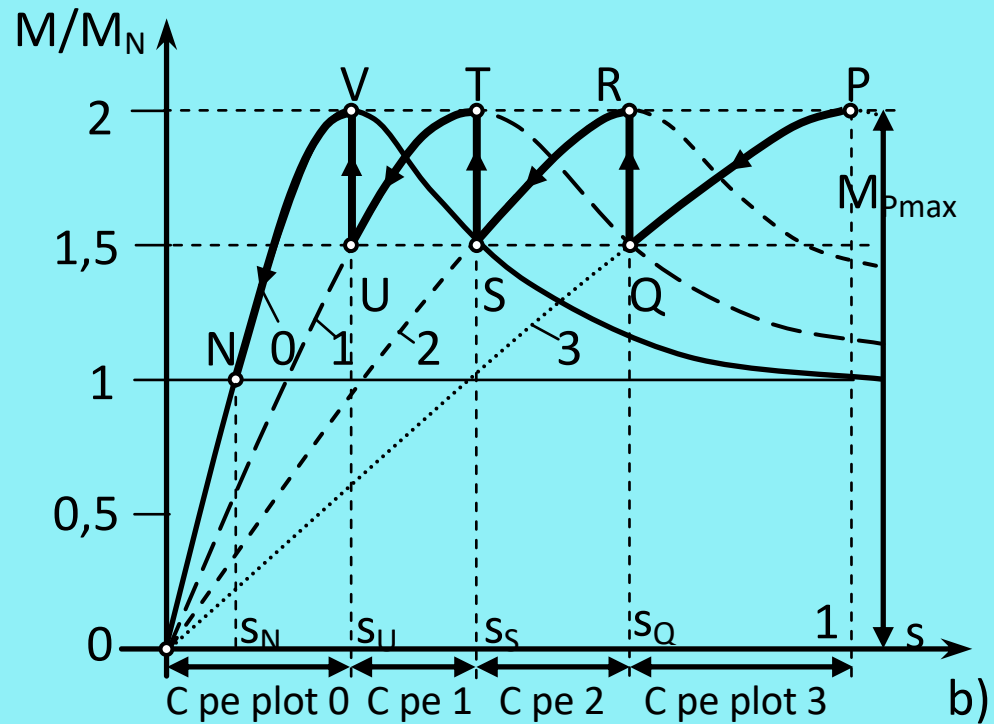
**Din expresia curentului rotoric se poate observa că o creștere a rezistenței circuitului,  $R'_2$ , determină scăderea valorii acestuia.**



**Din expresia cuplului de pornire se observă că, o creștere a rezistenței circuitului rotoric duce la creșterea cuplului de pornire.**



a)



b)

Procedura de pornire implică înserierea în circuitul rotoric al mașinii a unei rezistențe variabile special dimensionată (de regulă este o rezistență cu ploturi).

## Procedura de pornirea cu rezistențe înseriate în circuitul rotoric

1. Se poziționează rezistența de pornire pe valoarea sa maximă.
2. Motorul asincron pornește și evoluează pe porțiunea PQ.
3. În momentul atingerii unei valori de cuplu de  $1,5 M_n$  se trece rezistența de pe valoarea  $R_{p3}$  pe valoarea  $R_{p2}$ . Punctul de funcționare sare în R și evoluează pe caracteristica 2.
4. Când ajunge în punctul S, se micșorează din nou rezistența de pornire, la valoarea  $R_{p1}$ , iar punctul de funcționare sare pe caracteristica 1, în T.
5. În mod similar, în punctul U se elimină și ultima treaptă de rezistență, iar mașina trece pe caracteristica naturală, 1, punctul de funcționare evoluând din V până în N, la valoarea nominală de funcționare.



1. Curentul de pornire se poate micșora cu mai mult de 30% față de pornirea directă.
2. Cuplul de pornire se poate aduce la valoarea cuplului maxim al motorului. Pentru aceasta  $R_p = 5,1R_2'$
3. Se poate menține cuplul în anumite limite pe perioada pornirii (de ex.  $1,5-2 I_n$ ).
4. Metoda se folosește pentru porniri în sarcină grea.





**TECHNICAL SUPPORT FROM**  
**Assoc Prof. SREEDHAR CHITTA**  
**MATRUSRI ENGINEERING COLLEGE**

**You Tube / LearnEngineering**

# *Curs 7*



# ***CUPRINS***



***1***

***Caracteristici de funcționare***

***2***

***Reglarea vitezei motoarelor asincrone***

***3***

***Inversarea sensului de rotație***

***4***

***Frânarea motoarelor asincrone***

*\**

# Caracteristici de funcționare

Caracteristicile de funcționare exprimă modul de comportare a unei mașini electrice atunci când *sarcina este variabilă*.

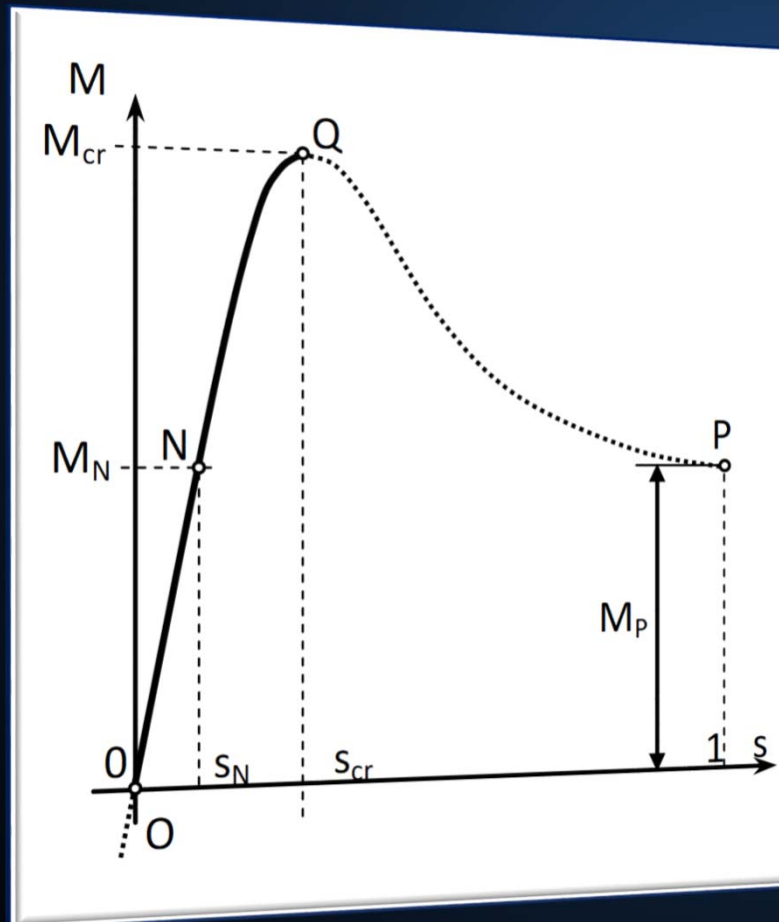
Dacă funcționarea are loc la mărimi nominale (tensiune, frecvență indicate pe plăcuța indicatoare), atunci caracteristicile obținute se numesc „naturale”.

În cazul în care parametrii menționați sunt modificați prin intermediul unor dispozitive exterioare, caracteristicile rezultate se numesc „artificiale”.

# Mărimi variabile cu alunecarea

# 1

Caracteristica  $M=f(s)$  – reprezintă variația cuplului electromagnetic cu alunecarea



Această caracteristică este specifică mașinii asincrone.

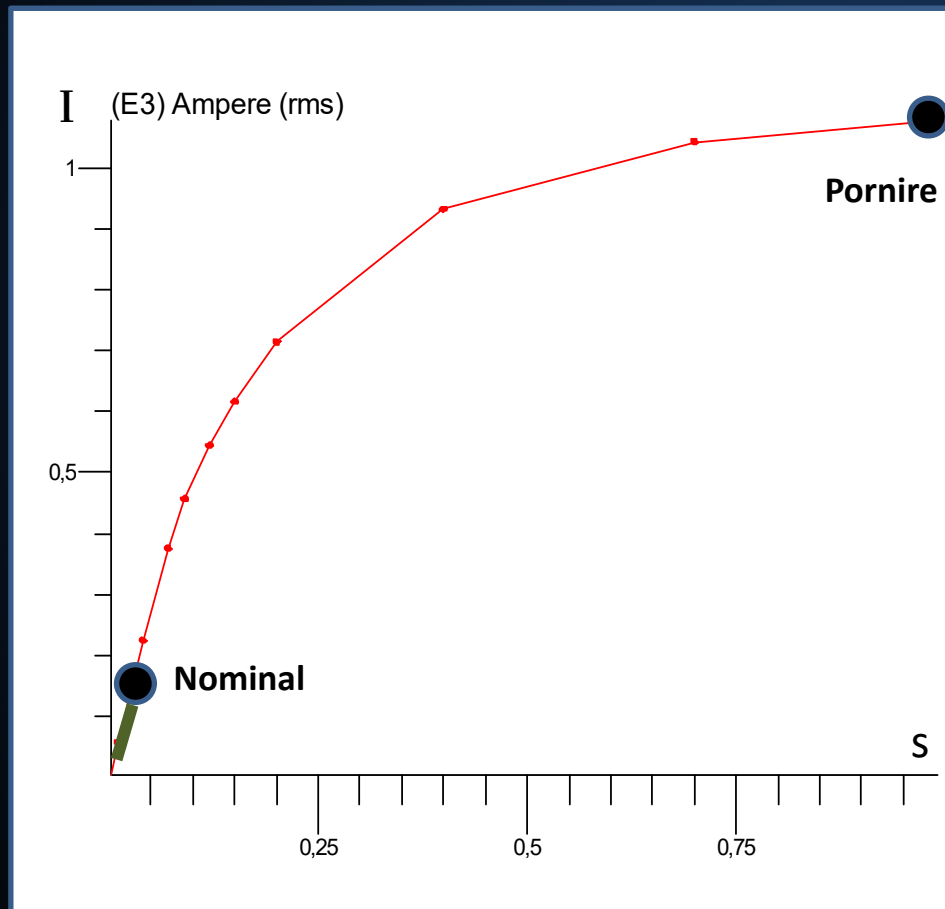
În regim de motor, caracteristica este plasată în cadranul I, adică în zona de cuplu dezvoltat „pozitiv” și alunecare cuprinsă în intervalul  $(0,1)$ .

Punctele caracteristice și de interes sunt:  $P$  (pornire),  $Q$  (valoare maximă),  $N$  (valoare nominală).



# 2

## Caracteristica curentului, $I=f(s)$ – exprima variația curentului (statoric sau rotoric) odată cu alunecarea

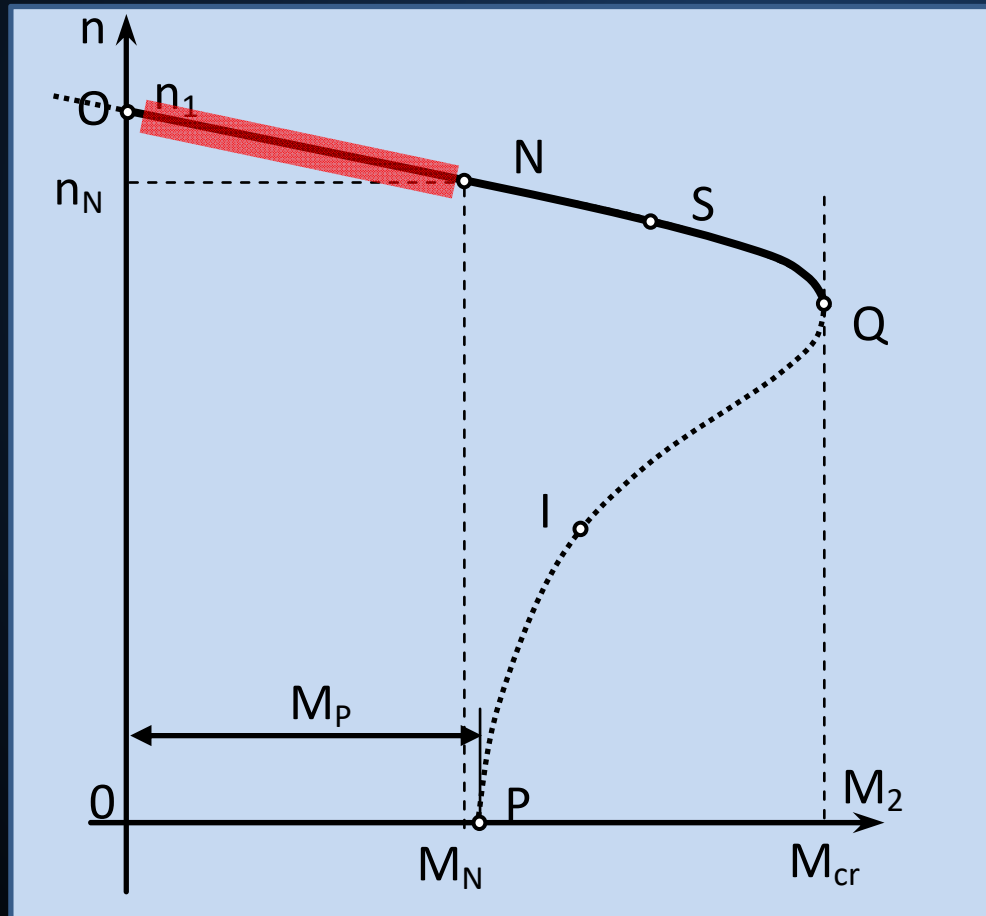


Zona dintre punctul de pornire si cel de funcționare nominală corespunde regimului tranzitoriu de pornire.

Funcționarea in sarcină are loc pe zona verde, adică între nominal si gol.

# 3

Caracteristica mecanică  $n=f(M_2)$  – reprezintă variația vitezei motorului asincron datorită variației cuplului de sarcină



Creșterea cuplului de sarcină duce la SCĂDEREA vitezei motorului asincron.  
Caracteristica mecanică este similară celei a motorului de c.c. cu excitație separată (derivație), adică o caracteristica mecanică „rigidă”.



## *Caracteristica mecanică*

Punctele specifice caracteristicii mecanice sunt:

- *Punctul P* – punctul de pornire caracterizat de valoarea cuplului de pornire,  $M_p$  (cuplul pe care mașina îl poate dezvolta la pornire)
- *Punctul Q* – punctul de cuplu maxim,  $M_{max}$ , și alunecare critică,  $s_{cr}$
- *Punctul N* – punctul de funcționare nominală caracterizat de cuplul nominal,  $M_N$ , și viteza nominală,  $n_N$ . Aceste valori sunt indicate pe plăcuța indicatoare a mașinii.
- *Punctul S* – punct situat între N și Q, este punctul de funcționare la suprasarcină. Funcționarea în acest punct este limitată în timp de regimul termic (încălzirea mașinii).

Pentru sarcini mai mici decât cea nominală, punctul de funcționare se fixează în zona roșie a caracteristicii. Aceasta reprezintă, în fapt, zona de funcționare uzuală a motorului asincron.

# Mărimi variabile cu puterea utilă, $P_2$

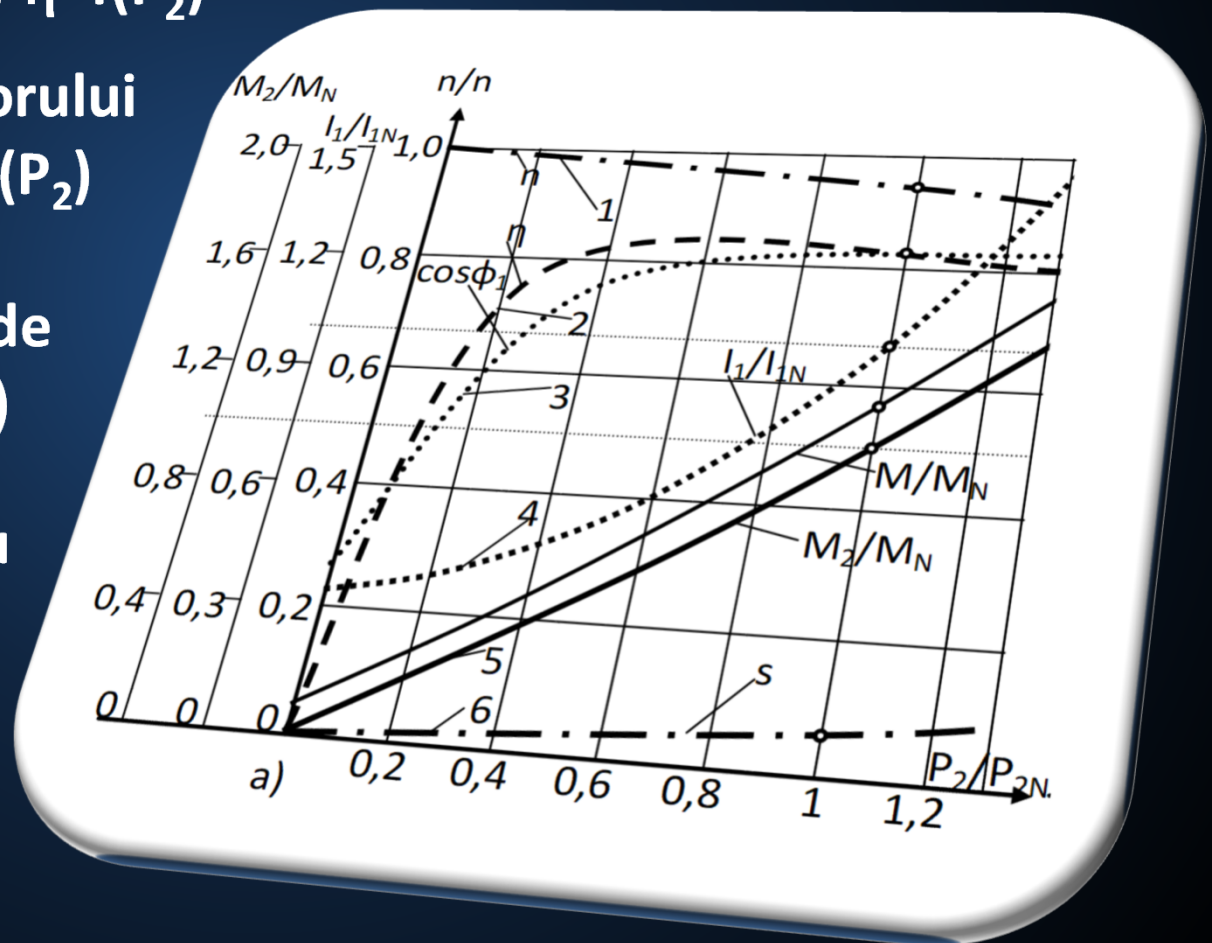
4. Caracteristica de randament(2),  $\eta=f(P_2)$

5. Caracteristica factorului de putere(3),  $\cos\varphi=f(P_2)$

6. Caracteristica de curent(4),  $I_1=f(P_2)$

7. Caracteristici de cuplu

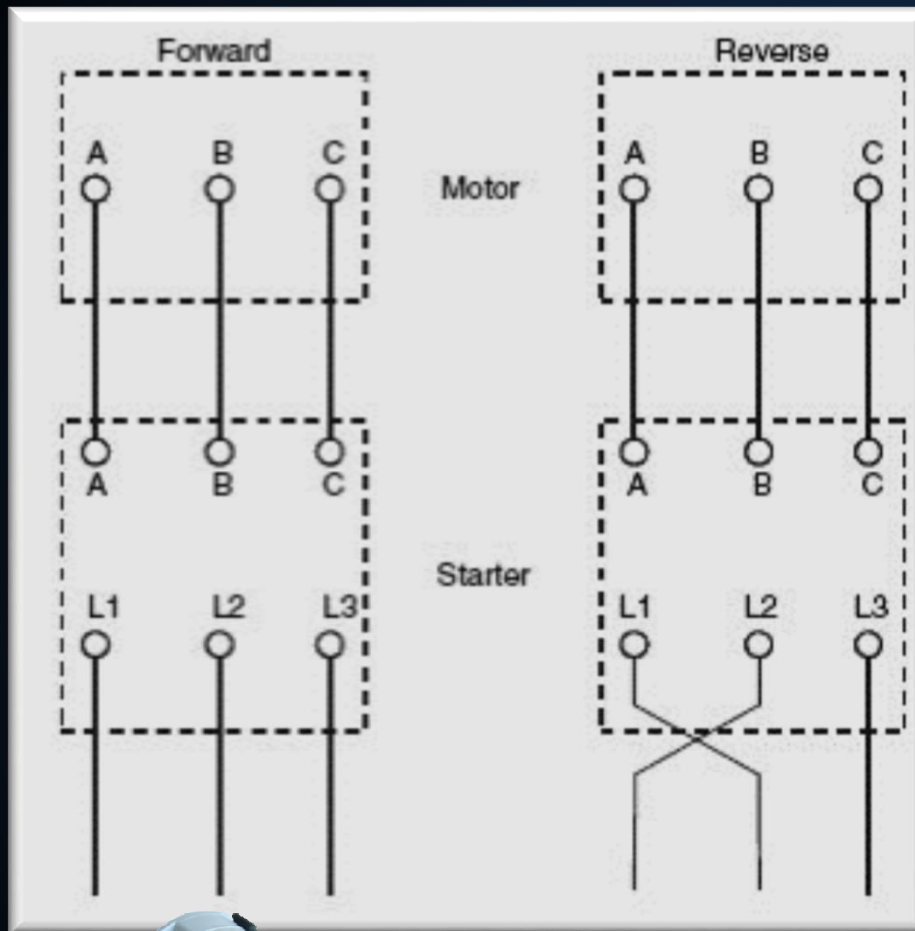
8. Caracteristica de alunecare (6)



Caracteristicile de randament si factor de putere pun in evidență faptul că valorile lor cresc către valorile maxime in preajma punctului de funcționare nominală. Cu alte cuvinte, funcționarea la gol sau la sarcini reduse duce la randamente si factor de putere reduse.

Evident, atât curentul (prin înfășurarea statorică sau rotorică) cât si cuplul electromagnetic dezvoltat cresc odată cu puterea utilă  $P_2$ .

# Inversarea sensului de rotație



Inversarea sensului de rotație la motorul asincron trifazat se obține prin inversarea sensului de rotație a câmpului magnetic învârtitor produs de înfășurarea statorică.

Pentru aceasta este suficientă inversarea alimentării a două dintre fazele înfășurării statorice. În exemplul din figură, se inversează alimentarea fazelor A și B.

De regulă, există comutatoare speciale care au poziția de zero centrală iar pozițiile 1 și 2 corespund celor două sensuri inverse de rotație.

*De regulă, inversarea sensului de rotație se face în stare de repaus a motorului. Dacă inversarea fazelor se face în timpul funcționării, mașina intră în regim de frânare bruscă.*



La alimentarea în succesiune „directă” a înfășurării trifazate statorice, sistemul de curenți este :

$$\begin{cases} i_{AX} = \sqrt{2}I \sin \omega t \\ i_{BY} = \sqrt{2}I \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ i_{CZ} = \sqrt{2}I \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{cases}$$

Câmpul rezultat și viteza de sincronism au expresiile:

$$B_{rez} = \frac{3}{2} B_{max} \cdot \sin(\omega t - p\alpha) \longrightarrow \Omega_1 = +\frac{\omega}{p}$$

La alimentarea în succesiune „inversă” se modifică defazajul a doi dintre curenți:

$$\begin{cases} i_{AX} = \sqrt{2}I \sin \omega t \\ i_{BY} = \sqrt{2}I \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \\ i_{CZ} = \sqrt{2}I \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \end{cases}$$

Se modifică expresia câmpului rezultat iar viteza de sincronism devine „negativă”, adică își schimbă sensul de rotație:

$$B_{rez} = \frac{3}{2} B_{max} \cdot \sin(\omega t + p\alpha) \longrightarrow \Omega_1 = -\frac{\omega}{p}$$



# Reglarea vitezei motorului asincron

**Reglarea vitezei presupune modificarea intenționată a unor parametri nominali, ceea ce duce la modificarea vitezei rotorului.**

**Această operație nu trebuie confundată cu modificarea vitezei rotorului datorită variației sarcinii.**


**Caracteristicile obținute sunt caracteristici „artificiale”.**



# Reglarea turației

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$$

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$


$$n = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (1 - s)$$

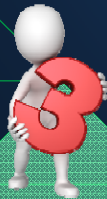
# Reglarea turației



Modificarea frecvenței tensiunii de alimentare

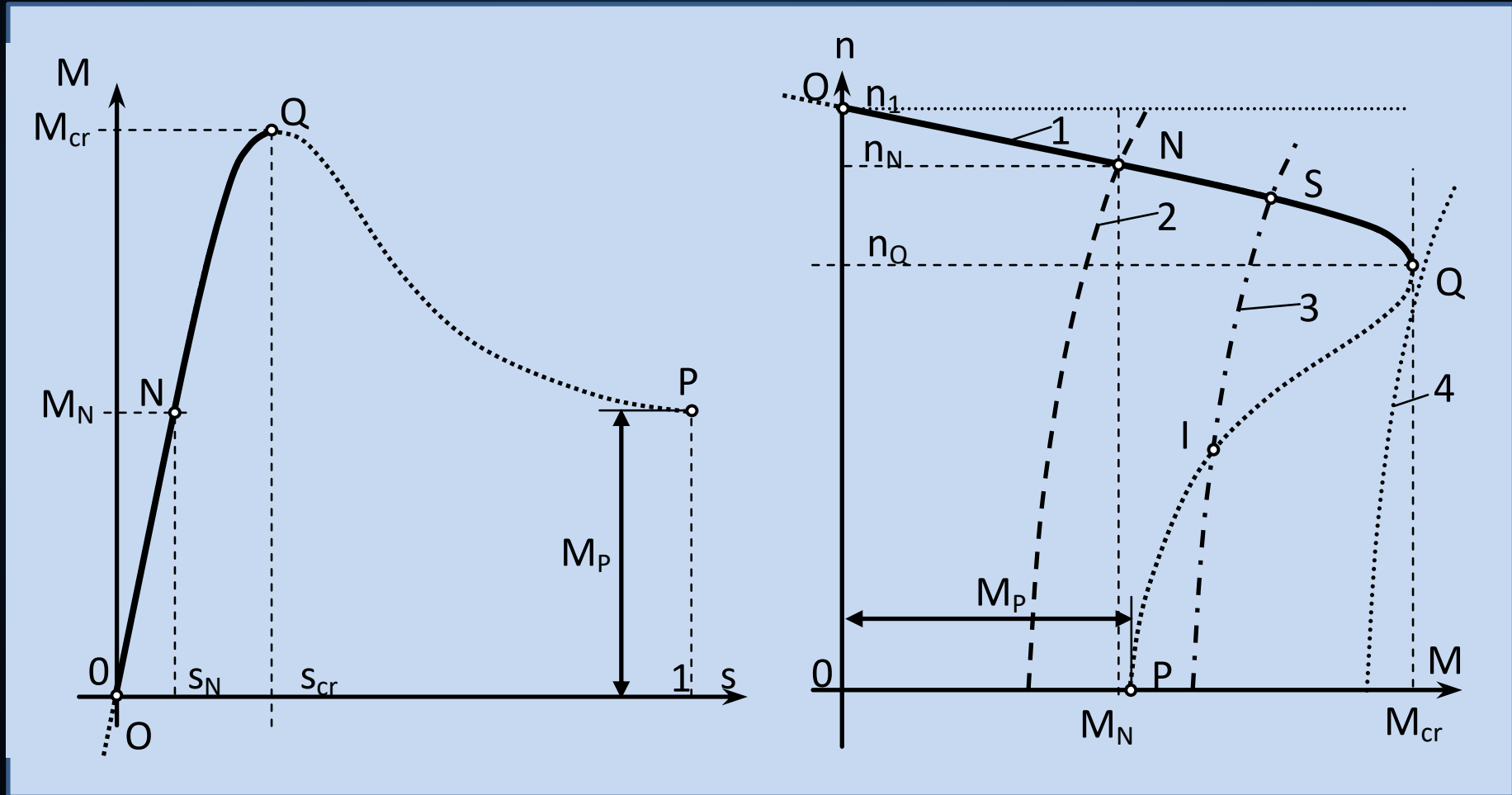


Modificarea numărului de poli ai mașinii



Modificarea alunecării

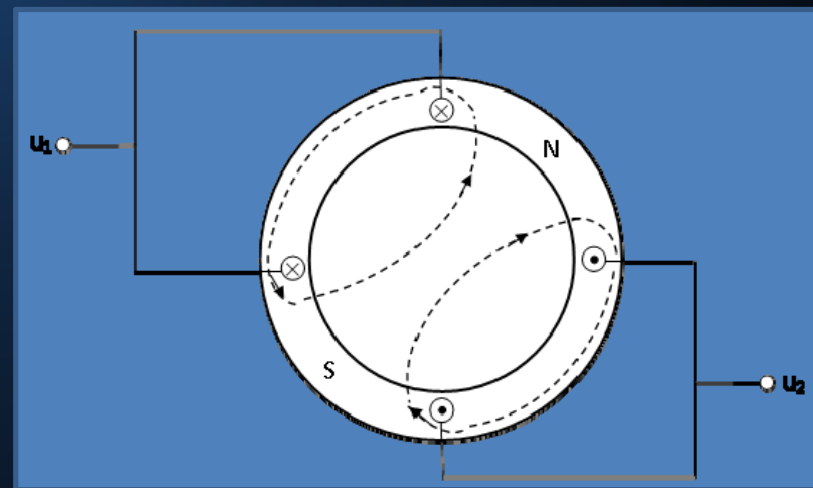
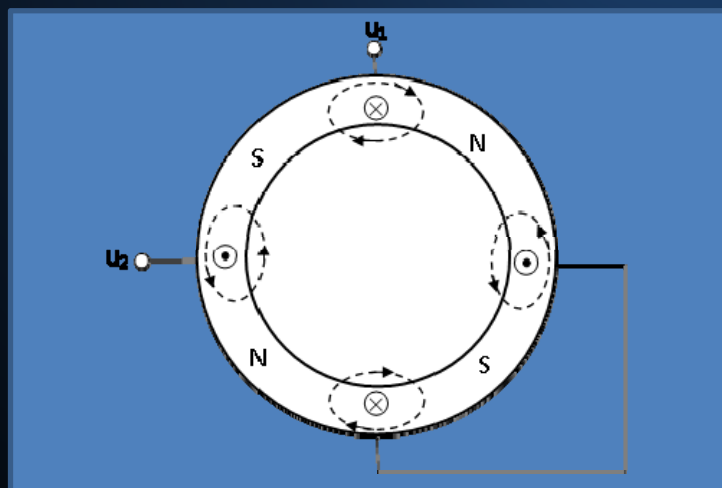
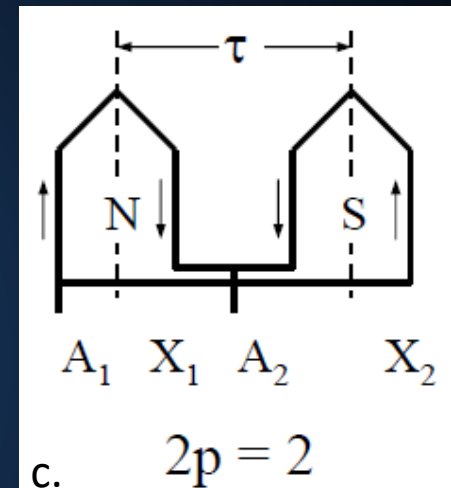
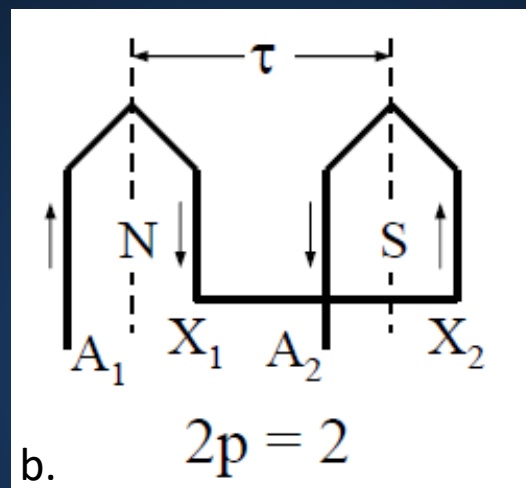
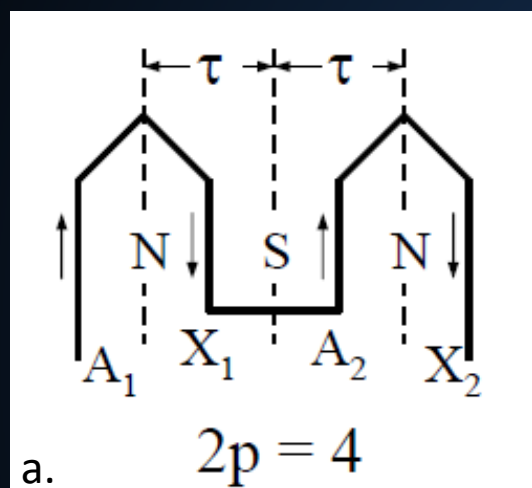
# Caracteristica mecanică



*Caracteristica 1* – reprezintă variația vitezei odată cu variația cuplului rezistent la arbore. Este caracteristica mecanică. Este ușor căzătoare.

*Caracteristicile 2, 3 și 4* – reprezintă variația cuplului rezistent la arbore. Pentru caracteristica 2, intersecția cu caracteristica mecanică a motorului asincron determină funcționarea în punctul N, punctul nominal. Pentru cupluri de sarcină mai mari, punctul de funcționare se poate stabili în S (funcționare la suprasarcină pe perioadă limitată de timp). Caracteristica de cuplu limită la care mașina asincronă poate funcționa este caracteristica 4 (funcționarea are loc în punctul de cuplu maxim).

# Reglarea vitezei prin schimbarea numărului de poli - *principiu*



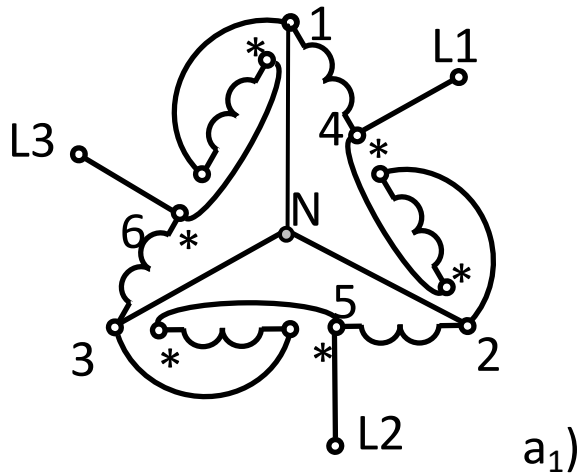
Această metodă este posibilă întrucât polii mașinii asincrone sunt determinați de modul prin care curentul statoric parcurge înfășurarea.

Pentru a putea schimba numărul de poli este necesar ca fiecare înfășurare de fază să conțină un număr par de bobine sau grupe de bobine și să fie posibil accesul la punctul median al acestor înfășurări.

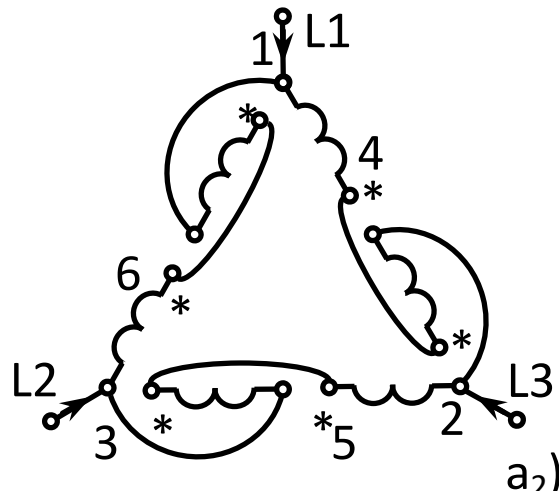
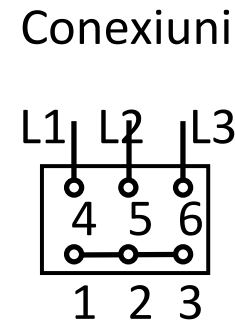


*Prin schimbarea sensului curentului prin jumătate de fază (fie prin conectarea „serie-invers” – fig. b, fie prin conectarea în paralel – fig. c), se înjumătățește numărul de poli ai mașinii și deci turația de sincronism.*

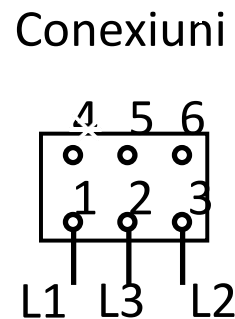
# Reglarea vitezei prin schimbarea numarului de poli – tipuri de *conexiuni*



**YY**  
(dublă-stea)  
**2p**  
Viteza mica



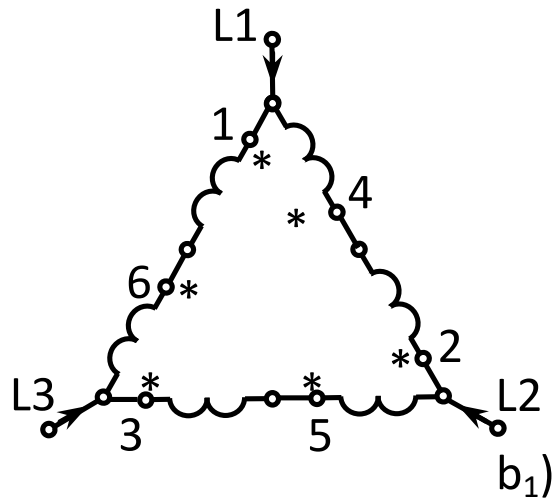
**D**  
(triunghi)  
**p**  
Viteza mare



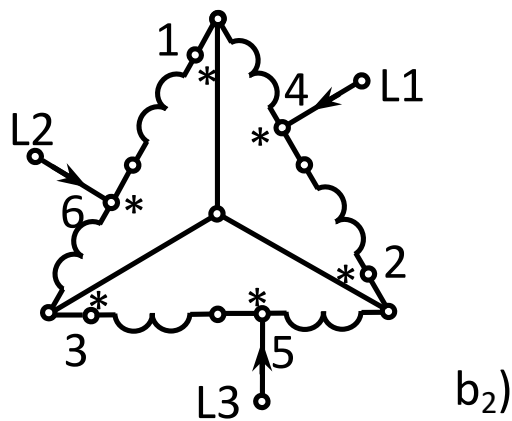
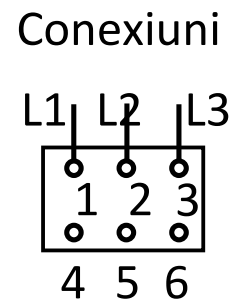
la putere constantă



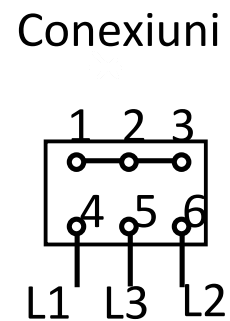
# Reglarea vitezei prin schimbarea numarului de poli - *conexiuni*



**D**  
(triunghi)  
**2p**  
Viteza mica

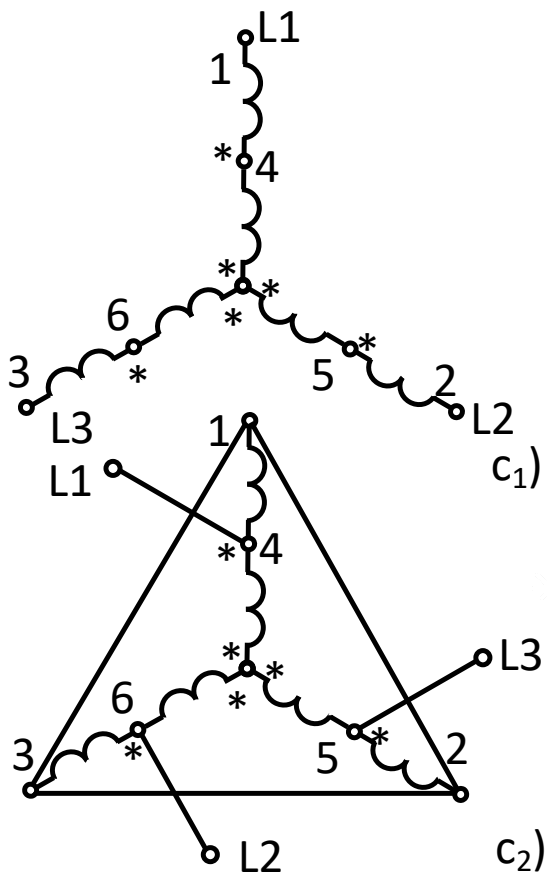


**YY**  
(dublă-stea)  
**p**  
Viteza mare



la cuplu  
constant

# Reglarea vitezei prin schimbarea numarului de poli - *conexiuni*



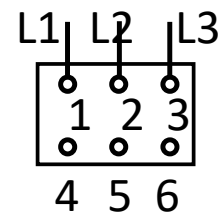
**Y**  
(stea)

**2p**  
Viteza mica

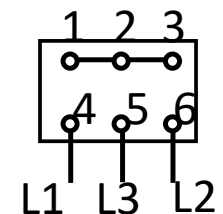
**YY**  
(dublă-stea)

**p**  
Viteza mare

Conexiuni



Conexiuni



la cuplu  
variabil

# Reglarea vitezei prin schimbarea numărului de poli - *conexiuni*

## 1. Conexiune YY/ $\Delta$ – funcționare la putere constanta

$$2p \quad P_2 = \sqrt{3}U(2I)\eta_2 \cos \varphi_2$$

$$p \quad P_1 = 3UI\eta_1 \cos \varphi_1$$

$$r_P = \frac{P_2}{P_1} = 1,15 \left( \frac{\eta_2 \cos \varphi_2}{\eta_1 \cos \varphi_1} \right)$$

$$r_M = \left( \frac{P_2}{\Omega_2} \right) / \left( \frac{P_1}{\Omega_1} \right) = \frac{P_2}{P_1} \frac{\Omega_1}{\Omega_2} = 2,3 \left( \frac{\eta_2 \cos \varphi_2}{\eta_1 \cos \varphi_1} \right)$$

# Reglarea vitezei prin schimbarea numărului de poli - *conexiuni*

## 2. Conexiune $\Delta/YY$ – funcționare la cuplu constant

$$2p \quad P_2 = 3UI\eta_2 \cos \varphi_2$$

$$p \quad P_1 = \sqrt{3}U(2I)\eta_1 \cos \varphi_1$$

$$r_P = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \frac{\eta_2 \cos \varphi_2}{\eta_1 \cos \varphi_1} \right)$$

$$r_M = \left( \frac{P_2}{\Omega_2} \right) / \left( \frac{P_1}{\Omega_1} \right) = \frac{P_2}{P_1} \frac{\Omega_1}{\Omega_2} = 1,73 \left( \frac{\eta_2 \cos \varphi_2}{\eta_1 \cos \varphi_1} \right) = 1 \div 1,4$$

# Reglarea vitezei prin schimbarea numărului de poli - *conexiuni*

## 3. Conexiune Y/YY – funcționare la cuplu variabil

2p

$$P_2 = \sqrt{3}UI\eta_2 \cos\varphi_2$$

p

$$P_1 = \sqrt{3}U(2I)\eta_1 \cos\varphi_1$$

$$r_P = \frac{1}{2} \left( \frac{\eta_2 \cos\varphi_2}{\eta_1 \cos\varphi_1} \right)$$

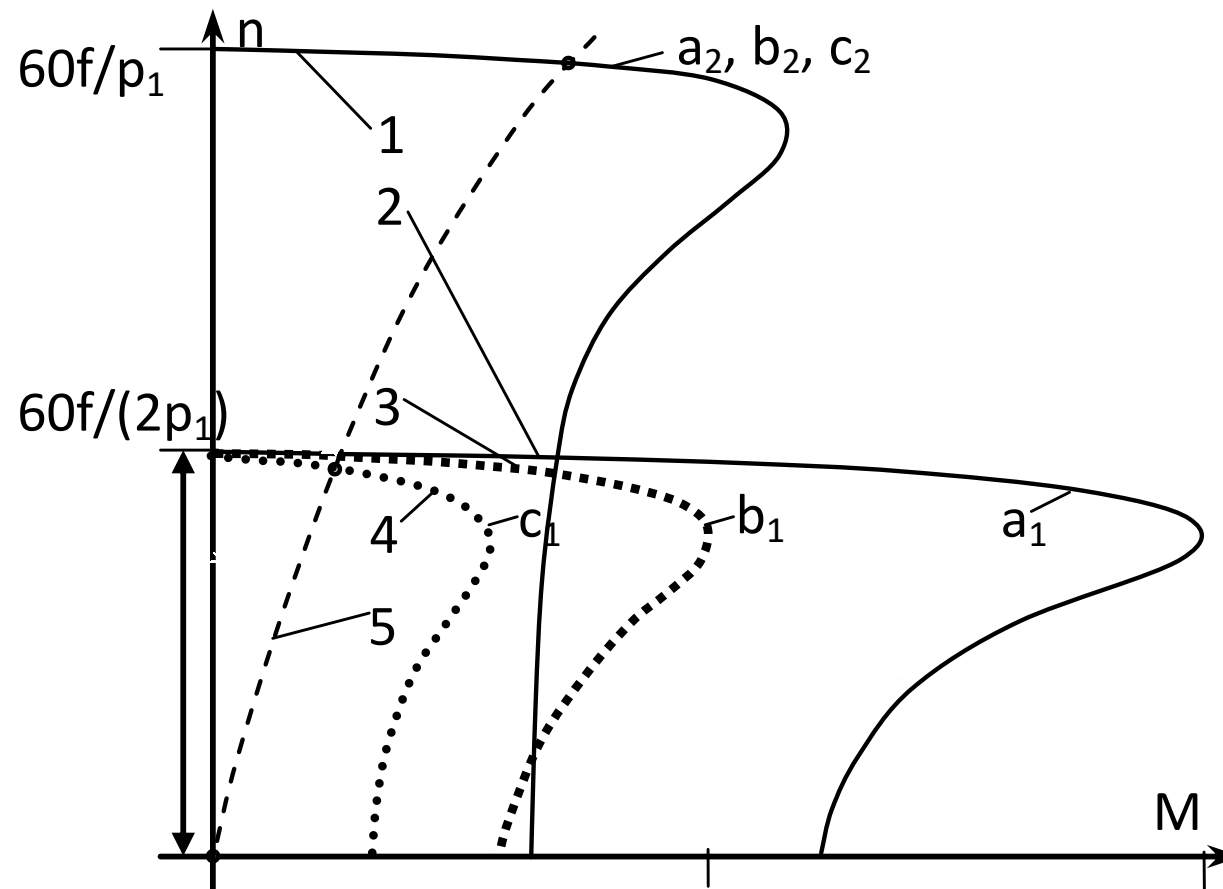
$$r_M = \frac{\eta_2 \cos\varphi_2}{\eta_1 \cos\varphi_1} \in (0,6 \div 0,8)$$

# Reglarea vitezei prin schimbarea numărului de poli - *conexiuni*

Schema	Raportul fluxurilor: $\Phi_2/\Phi_1$	Raportul inducțiilor în jug: $B_{j2}/B_{j1}$	Raportul inducțiilor în întrefier $B_{\delta 2}/B_{\delta 1}$
YY/ $\Delta$	1/1,05	1/1,05	1/0,52
$\Delta$ /YY	1/1,41	1/1,41	1/0,71
Y/YY	1/2,42	1/2,42	1/1,21

Modificarea numărului de poli aduce modificări însemnate asupra valorii fluxului și a inducțiilor în jug și în întrefier. Drept urmare, performanțele mașinii asincrone NU sunt identice pentru cele două turații.

# Reglarea vitezei prin schimbarea numărului de poli – *caracteristica mecanică*



- $a_1$  – conexiunea YY, funcționare la putere constanta
- $b_1$  – conexiunea  $\Delta$ , funcționare la cuplu constant
- $c_1$  – conexiunea Y, funcționare la cuplu variabil



Caracteristicile mecanice (1), pentru funcționarea la cele doua viteze, pun in evidență următorul fapt semnificativ: pot exista situații in care mașina asincronă să funcționeze normal la turație mică dar să nu poată dezvolta același cuplu la turație mare.

De regulă, datorită observației anterioare, la pornire se preferă conectarea mai întâi pe conexiunea cu număr mare de poli (turație mică) și apoi trecerea la număr mic de poli (turație mare).



A nu se confunda reglarea vitezei prin schimbarea numărului de poli cu *pornirea stea-triunghi!!!*

# Reglarea vitezei prin schimbarea numărului de poli

1. Se aplică NUMAI la motoarele cu rotor in scurtcircuit
2. Constă in schimbarea sensului curentului prin jumătate din fiecare fază
3. Reglarea turației se face IN TREPTE
4. Mașinile au DOUA sau PATRU turații de funcționare
5. Raportul turațiilor este de regulă  $1/2$  dar există soluții si pentru  $2/3$  sau  $3/4$



# Reglarea vitezei prin modificarea frecvenței tensiunii de alimentare

Modificarea frecvenței aduce schimbări MAJORE in valorile parametrilor mașinii asincrone

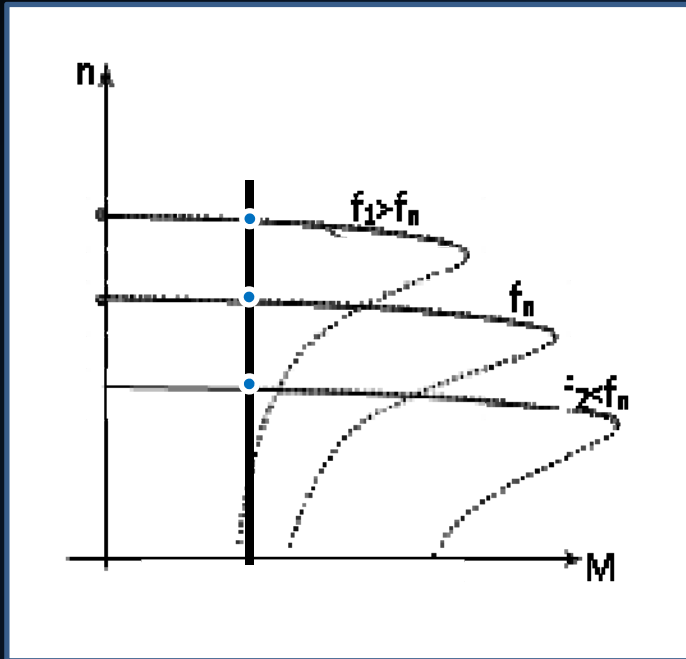
$$\left. \begin{aligned} \underline{E}_1 &= -j\omega_1 \cdot k_{w1} \cdot w_1 \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \\ \underline{U}_1 &= R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \end{aligned} \right\} \longrightarrow \Psi \approx \frac{U_1}{\omega_1} \rightarrow \frac{U_1}{f_1}$$

$$M_{emax} = \pm \frac{3U_1^2 \cdot p}{2c_1 \cdot \omega_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \pm R_1}} = M_{cr}$$

$$s_{cr} = \pm \frac{c_1 \cdot R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2}}$$



Reglarea vitezei prin modificarea frecvenței tensiunii de alimentare determină modificarea fluxului magnetic in mașină



### I. La scăderea frecvenței:

- CRESTE cuplul critic 😊
- CRESTE capacitatea de suprasarcină 😊
- CRESTE fluxul magnetic ceea ce duce la saturarea mai rapida a mașinii 😞

### II. La creșterea frecvenței:

- SCADE cuplul mașinii 😞
- SCADE cuplul critic 😞
- SCADE capacitatea de suprasarcină 😞
- SCADE fluxul magnetic ceea ce duce la funcționare in zona nesaturată 😊



Ca metodă de reglare a vitezei, modificarea frecvenței tensiunii de alimentare permite un reglaj larg de viteză atât *sub* valoarea nominală cât și *peste* valoarea nominală.

# Reglarea vitezei prin modificarea tensiunii de alimentare

$$\Psi \approx \frac{U_1}{\omega_1} \rightarrow \frac{U_1}{f_1}$$

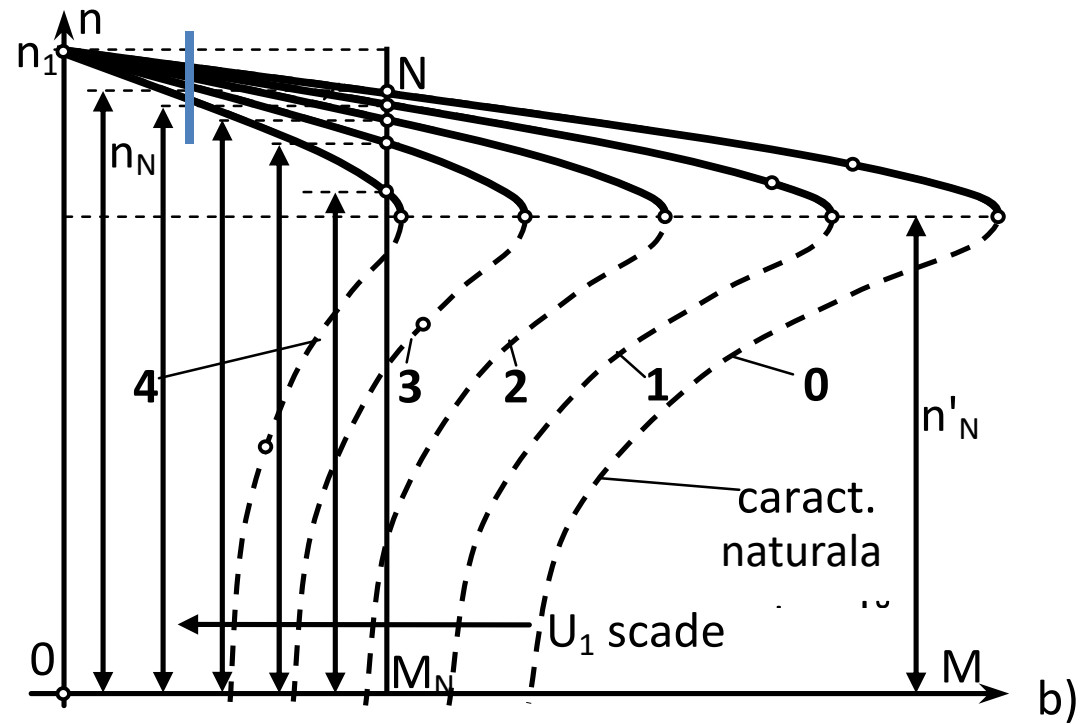
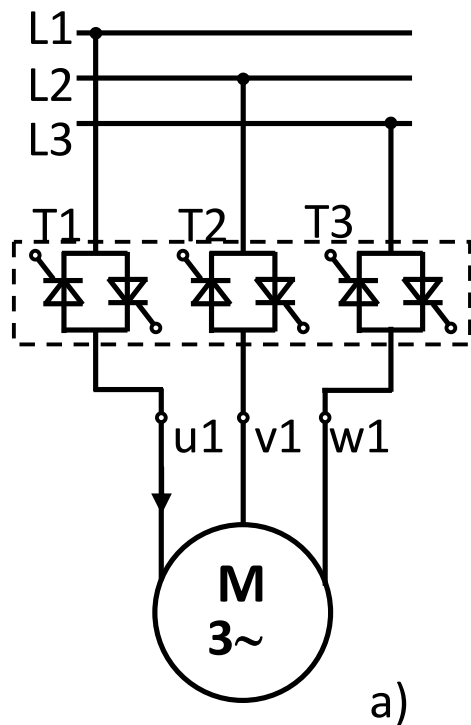
$$M_e = \frac{3U_1^2 \cdot p}{2\pi f_1} \cdot \frac{\frac{R'_2}{s}}{\left[ \left( R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \right]} \quad \text{Se modifică}$$

$$M_{emax} = \pm \frac{3U_1^2 \cdot p}{2c_1 \cdot \omega_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \pm R_1}} = M_{cr} \quad \text{Se modifică}$$

$$M_p = \frac{3U_1^2 \cdot R'_2}{\Omega_1 \left[ \left( R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \right]} \quad \text{Se modifică}$$

$$s_{cr} = \pm \frac{c_1 \cdot R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2}} \quad \text{NU se modifică}$$

# Reglarea vitezei prin modificarea tensiunii de alimentare



# Reglarea vitezei prin modificarea tensiunii de alimentare

**1. Metoda ineficientă - Reglaj de turație in limite mici si numai pentru valori sub viteza nominală**

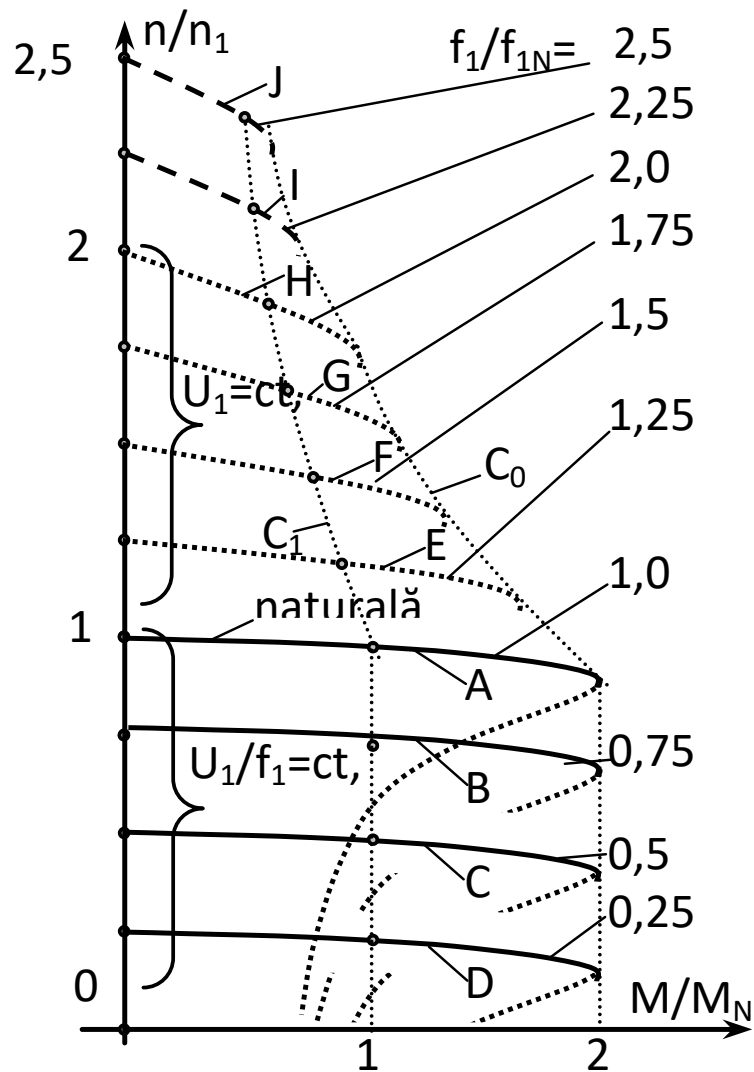


**2. Scade capacitatea de suprasarcină a motorului**

**3. La sarcini mici reglajul de viteză este aproape insesizabil**



# Reglarea vitezei prin modificarea frecvenței și tensiunii de alimentare



1. Reglaj de turație în limite foarte largi (inclusiv peste valoarea de sincronism)

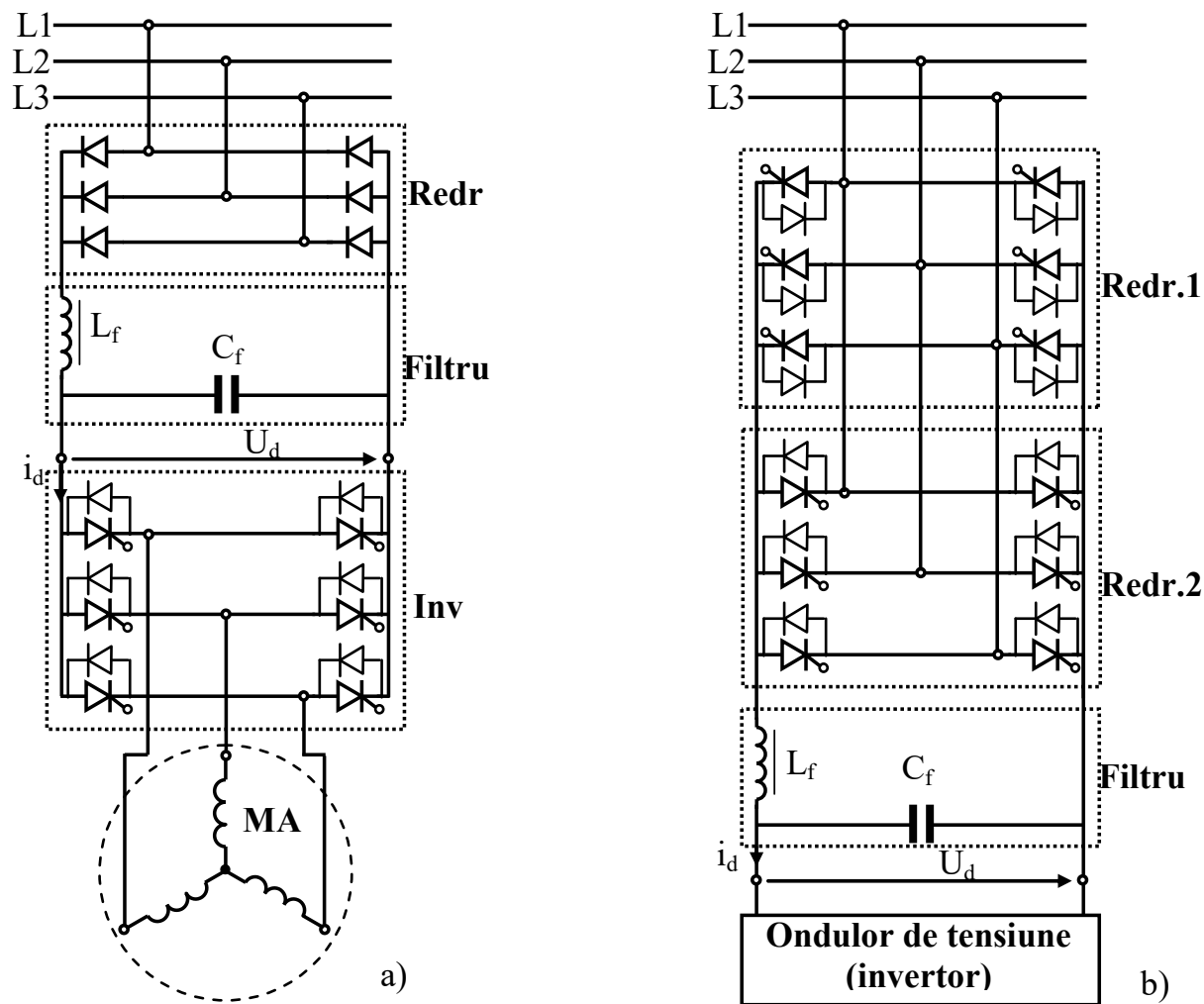
2. Raport  $U/f = \text{const.}$  până la frecvența nominală

3. Peste frecvența nominală, tensiunea  $U_1$  rămâne constantă



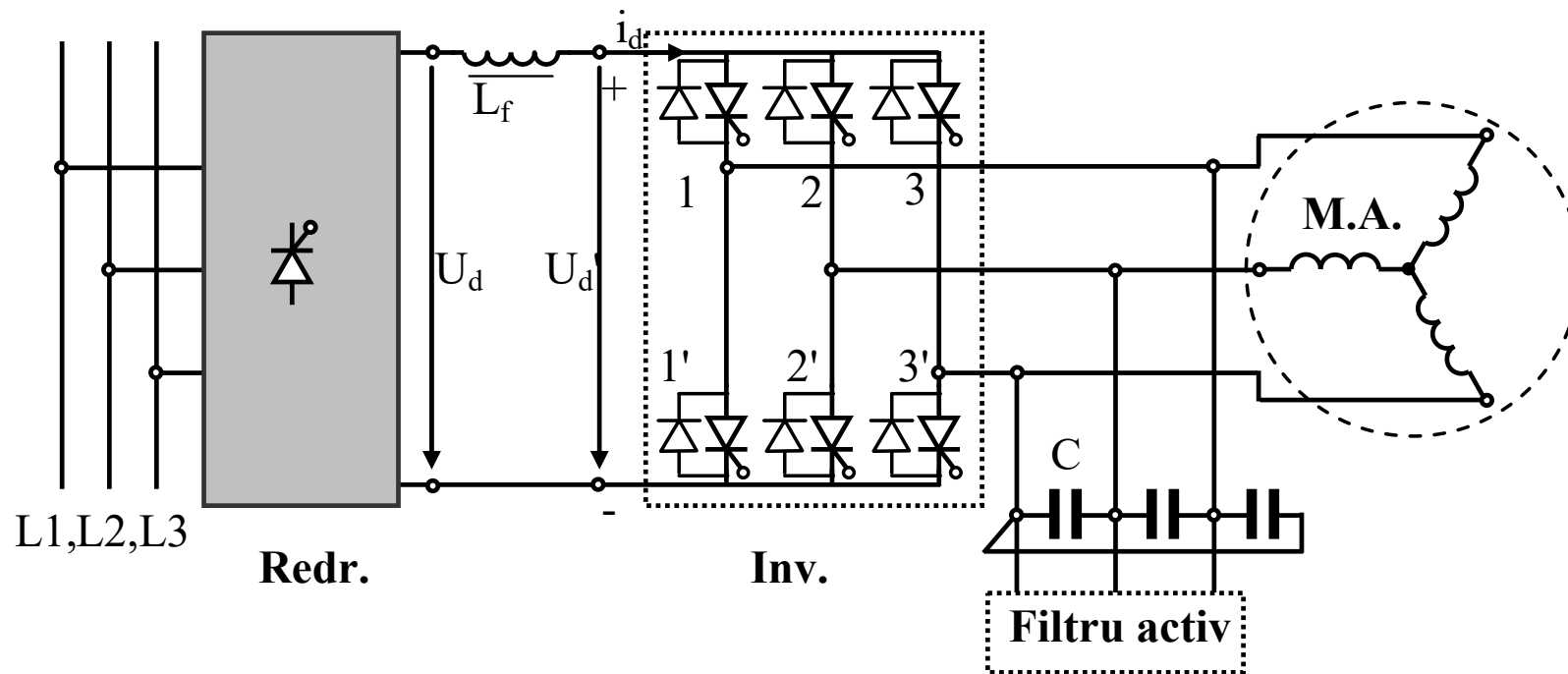
Este metoda cea mai eficientă și cea mai folosită pentru reglarea vitezei motoarelor de c.a.

# Reglarea vitezei prin modificarea frecvenței și tensiunii de alimentare



Invertoare de tensiune: a) ireversibil; b) reversibil

# Reglarea vitezei prin modificarea frecvenței și tensiunii de alimentare



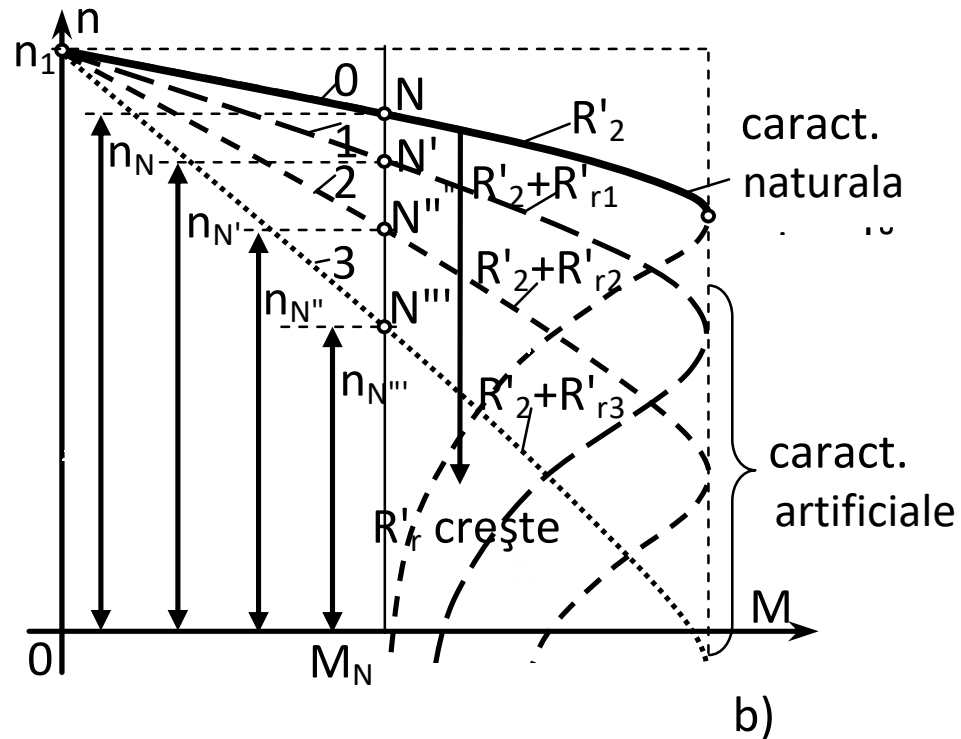
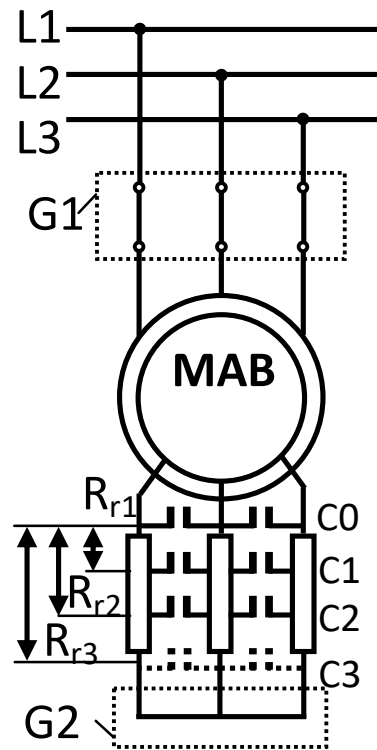
Schemă de alimentare a motorului asincron cu inverter de curent

# Reglarea vitezei prin variația rezistenței circuitului rotoric



1. Se aplică NUMAI la motoarele cu rotor bobinat
2. Rezistența introdusă în circuitul rotoric este voluminoasă pentru că trebuie dimensionată pentru funcționare de durată

# Reglarea vitezei prin variația rezistenței circuitului rotoric



# Reglarea vitezei prin variația rezistenței circuitului rotoric

1. Reglarea vitezei se poate face **NUMAI** descrescător și chiar până la oprirea mașinii

2. Metoda este eficientă la funcționarea la sarcini mari. La gol, variația vitezei este nesemnificativă

3. Capacitatea de suprasarcină rămâne neschimbată ( $M_{\max} = ct.$ ) însă alunecarea critică se modifică

4. Este o metodă cu pierderi importante pe rezistența rotorică ce duce la scăderea pronunțată a randamentului



# Regimul de frânare a motorului asincron

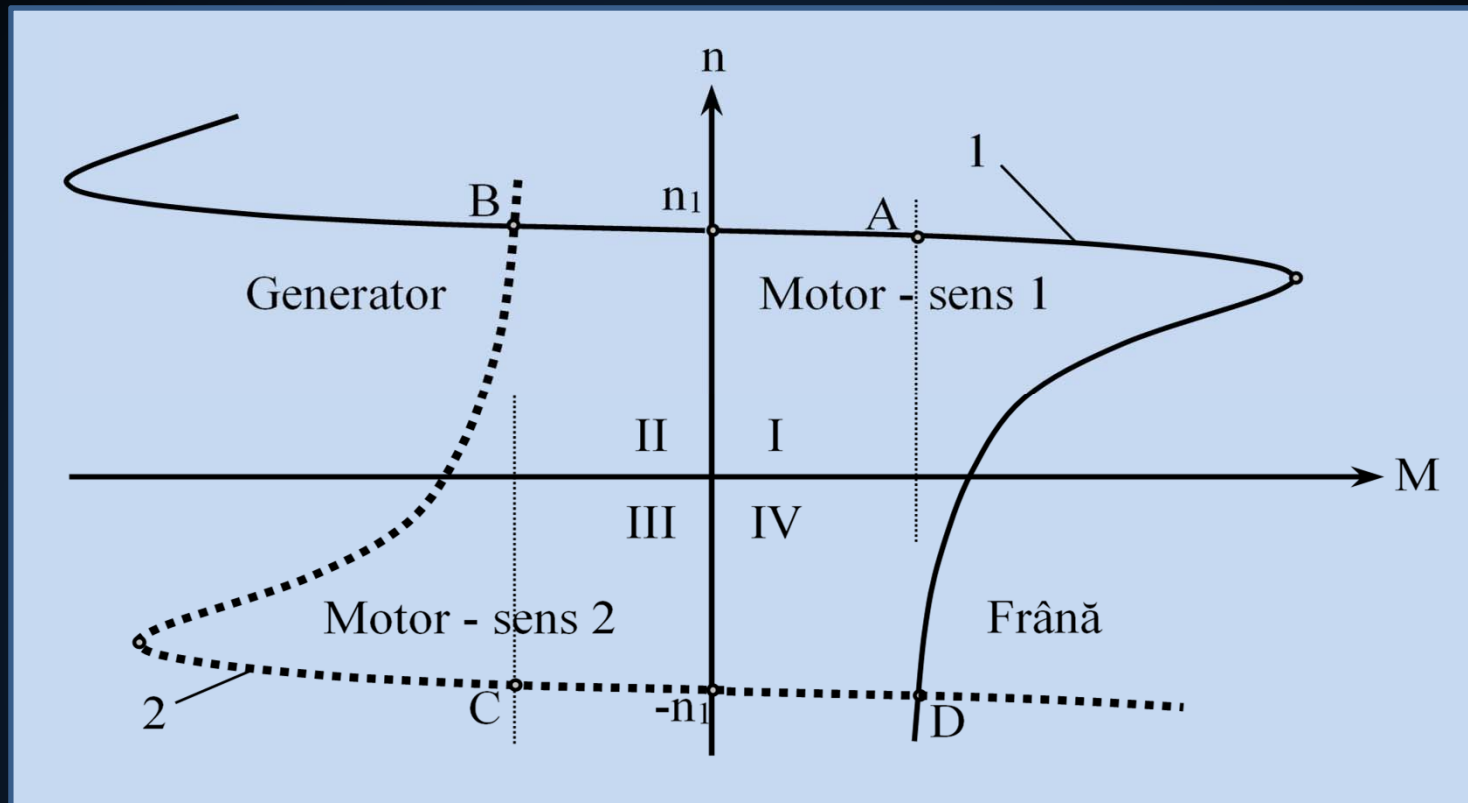


In general, regimul de frânare a unei mașini electrice desemnează un regim tranzitoriu pe parcursul căruia viteza scade, eventual până la zero.

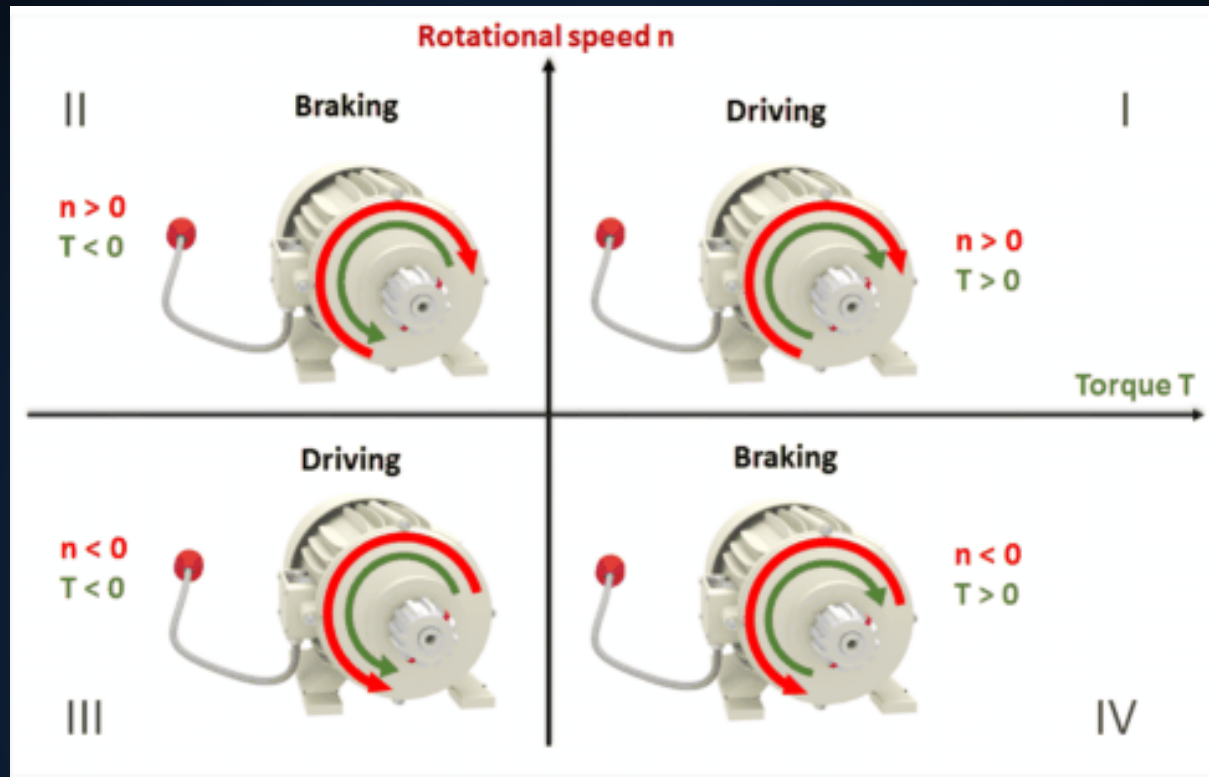
Este de asemenea acceptată și situația în care viteza este limitată prin frânare electromagnetică în tendința ei naturală de creștere.

Frânarea electromagnetică presupune că rotorul și cuplul electromagnetic al mașinii au sensuri de rotație contrare.





Caracteristica mecanică, pentru un anumit sens de rotație (de ex. sensul 1), este reprezentată de curba 1. Atât în cadranul II cât și în cadranul IV, cuplul electromagnetic dezvoltat de mașina asincronă și turația rotorului au sensuri contrare. Însă: în cadranul II alunecarea este negativă ( $s < 0$ ) și avem regim de generator. În cadranul IV, alunecarea este supraunitară ( $s > 1$ ) și avem regim de frână propriu-zisă.



Cadrantul IV reprezintă regim de frână propriu-zisă pentru mașina care funcționează ca motor în cadrantul I. Similar, regimul de motor din cadrantul III are regim de frână în cadrantul II.

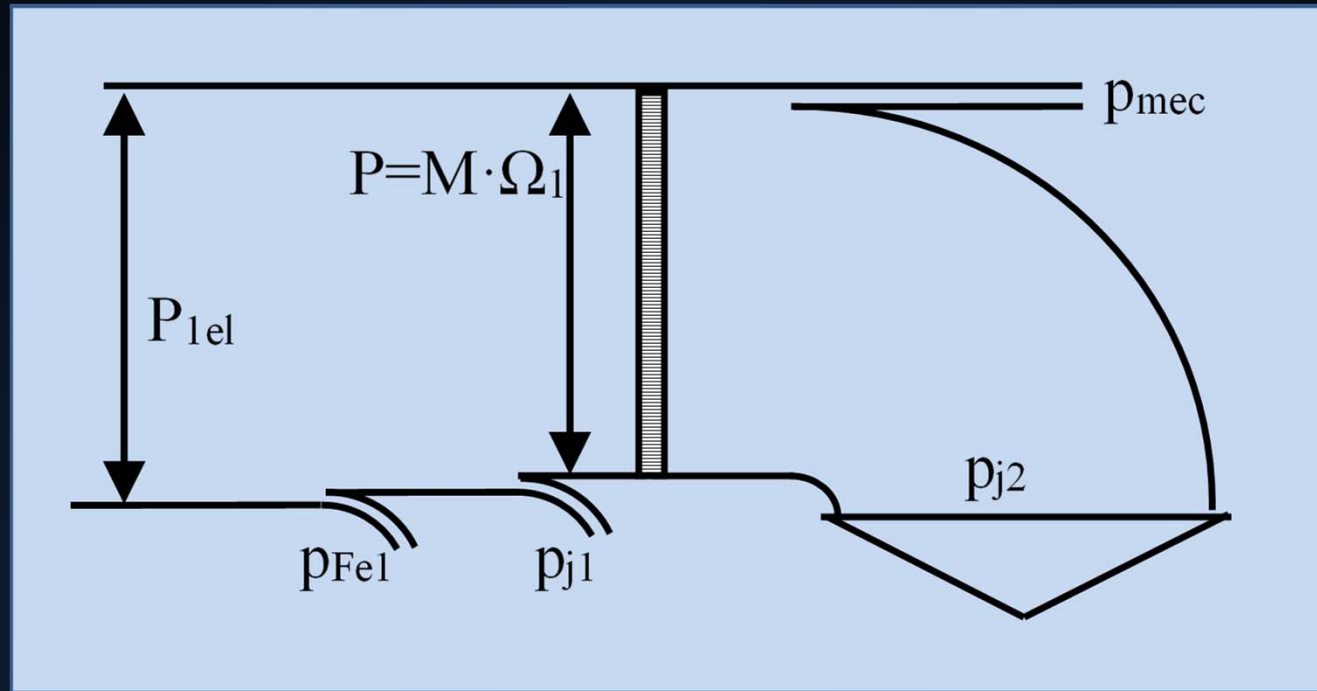


Diagrama bilanțului de puteri la funcționarea în regim de frână

În regim de frână, puterea electrică absorbită de mașina asincronă se transformă în căldură majoritar pe înfășurarea rotorică ( $p_{j2}$ ). Acest lucru se datorează creșterii pronunțate a curentului prin înfășurări, îndeosebi cea rotorică. Pentru protejarea mașinii, în regim de frână TREBUIE luate măsuri de protecție a mașinii.

# Metode de frânare



Frânare contracurent



Frânare dinamica

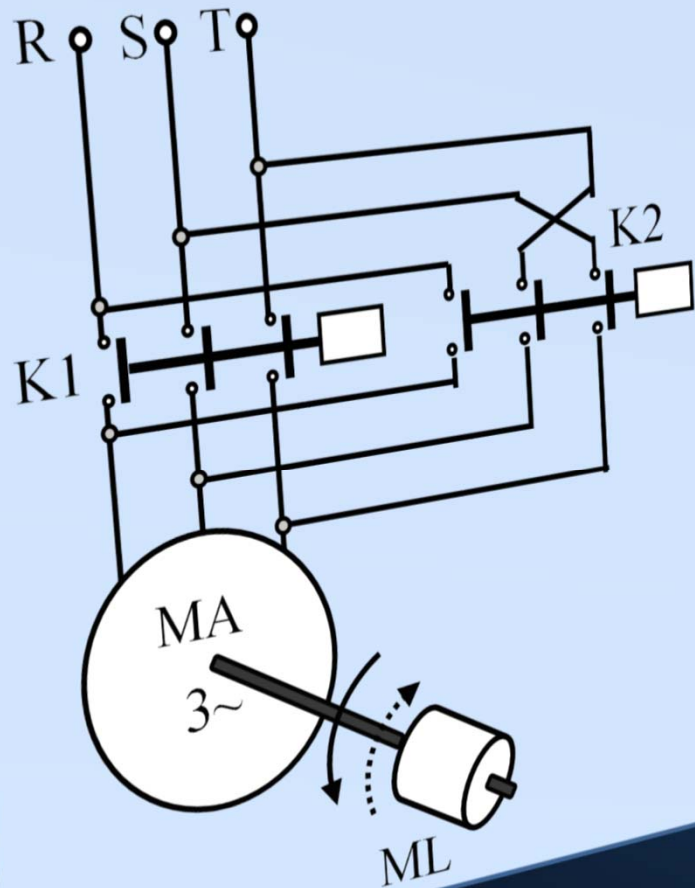
Frânare la schimbare sens rotație



Frânare suprasincrona  
(reg. generator)



## Frânarea contracurent

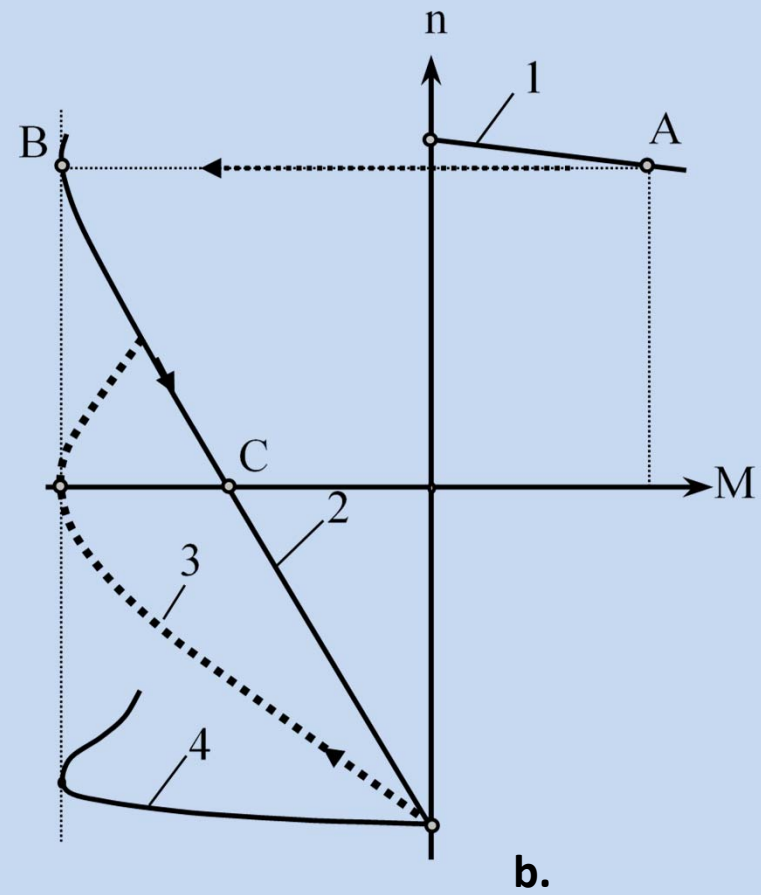
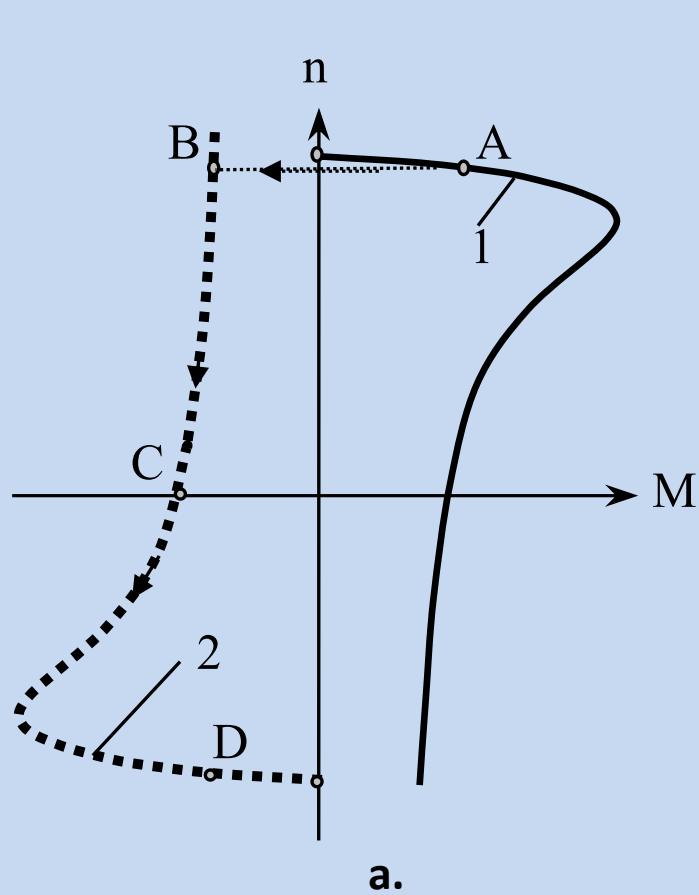


Dacă pe timpul funcționării mașinii asincrone este necesară oprirea bruscă (de urgență), se poate folosi metoda frânării contracurent.

Pentru frânare, se decuplează întrerupătorul principal K1 și se cuplează întrerupătorul K2, care inversează două faze între ele.

Inversarea a două faze înseamnă inversarea sensului de rotație a câmpului învârtitor. Rezultă sensuri contrare pentru câmpul electromagnetic respectiv turația rotorului.





Caracteristicile mecanice la funcționarea în regim de frână:

- a. MAS cu rotor în scurt-circuit
- b. MAS cu rotor bobinat



Să presupunem că motorul asincron funcționează în punctul A de pe caracteristica mecanică (fig. a). La inversarea a două faze de alimentare, sensul câmpului învârtitor și deci al cuplului electromagnetic dezvoltat de mașină se inversează și devine negativ în raport cu turația rotorului. Rezultă că punctul de funcționare „sare” din A în B, în cadranul II, respectiv pe caracteristica 2. Aceasta este caracteristica de funcționare în regim de motor, corespunzătoare sensului invers.

Cuplul electromagnetic negativ duce la frânarea mașinii, iar punctul de funcționare se deplasează din B în C, când viteza rotorului devine zero. În acest moment mașina TREBUIE decuplată de la rețea. Dacă nu este decuplată, începe să se rotească în sens invers, iar punctul de funcționare ajunge în D.



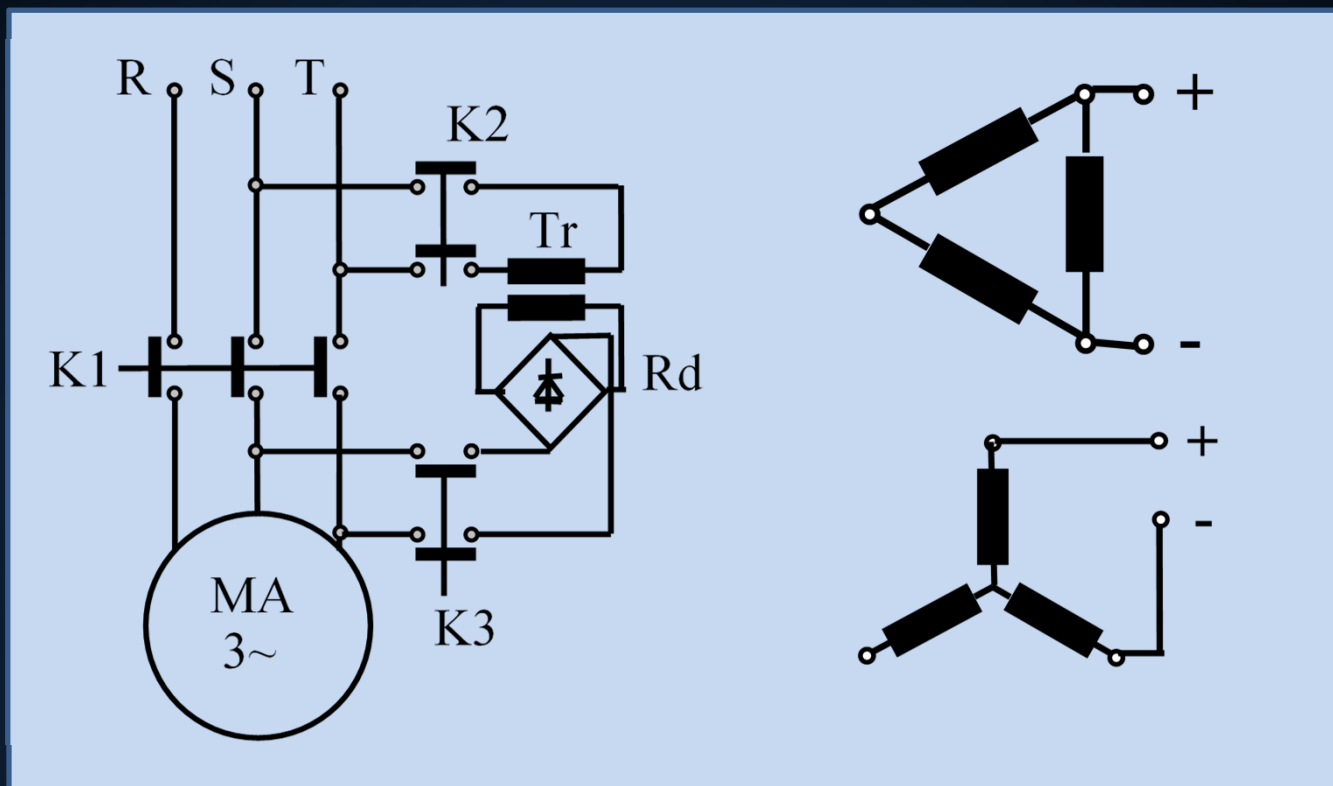
Curenții prin înfășurările mașinii cresc de 5 până la 7 ori peste valoarea nominală, ceea ce produce o încălzire excesivă a mașinii. Pentru a împiedica deteriorarea ei, trebuie luate măsuri de răcire suplimentare (de exemplu răcire forțată cu un ventilator).

In cazul mașinii asincrone cu rotor bobinat, întrucât există acces către înfășurarea rotorică, frânarea contracurent este acompaniată de introducerea unei rezistențe suplimentare, dimensionată in mod particular pentru regimul de frânare.

In momentul inversării celor doua faze, punctul de funcționare trece din A in B in mod identic celui de la mașina cu rotor in scurt-circuit (fig. b). Însă, introducerea rezistenței in circuitul rotoric determină transformarea caracteristicii naturale 4 într-o caracteristică artificială, la care punctul B coincide cu *cuplul maxim*. Rezultă o frânare mai rapidă până in punctul C.

Dacă pe timpul frânării se modifica rezistența din circuitul rotoric (de ex. caracteristica 3), se poate menține pe toată durata frânării un cuplu de valoare maximă.

## Frânarea dinamică

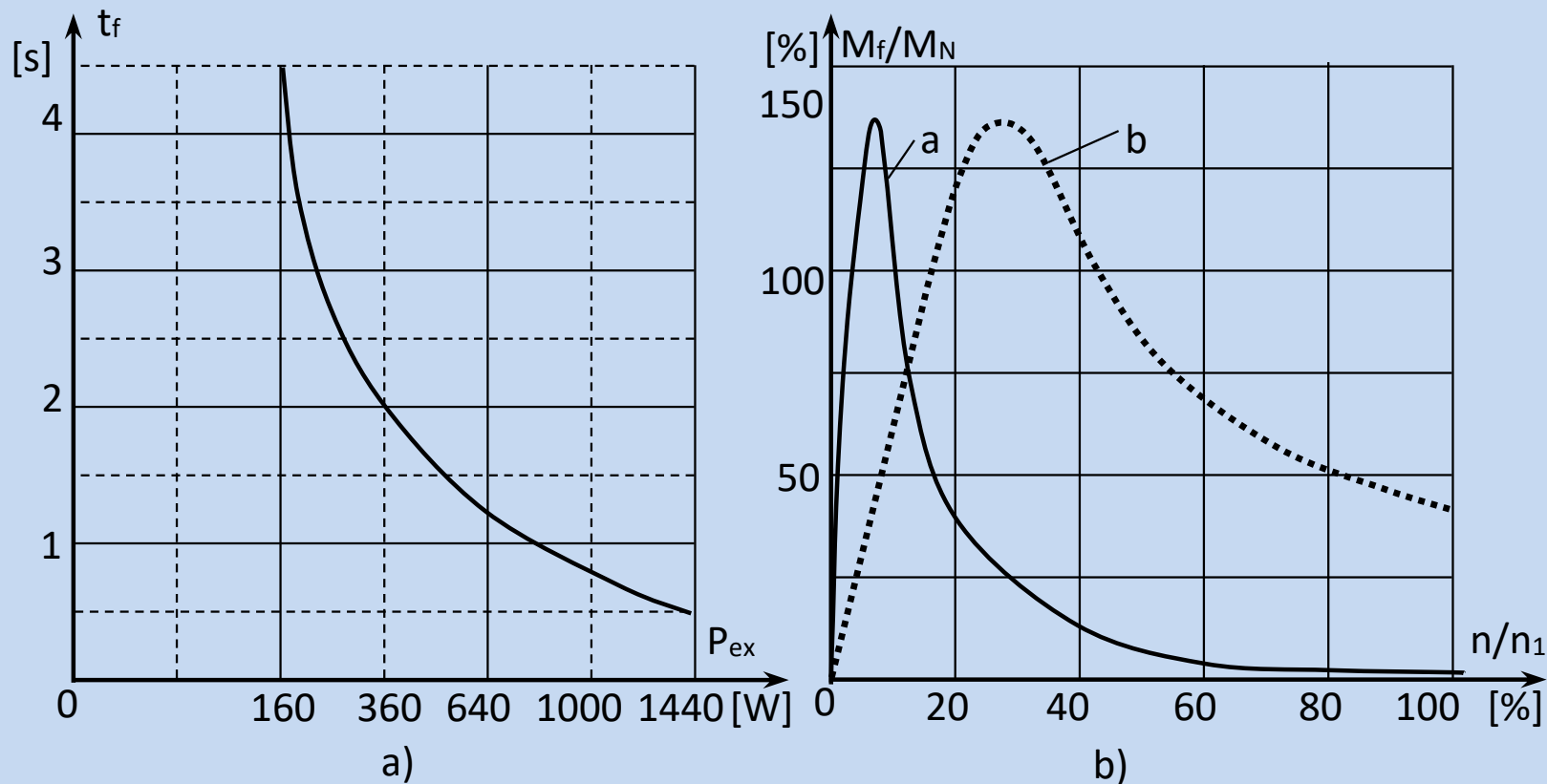


Frânarea dinamică se obține prin decuplarea motorului asincron de la rețea (deschiderea întrerupătorului K1) și conectarea la o sursă de tensiune continuă (vezi în figură cele două variante pentru conexiunile triunghi și respectiv stea), prin închiderea întrerupătoarelor K2 și K3.

Prin alimentarea înfășurării trifazate statorice de la o sursă de tensiune continuă, ia naștere în mașina asincronă un câmp magnetic fix în spațiu și constant în amplitudine. Mașina asincronă SE TRANSFORMA într-o mașină sincronă de tip inversat (statorul-inductor și rotorul-indus) în scurt-circuit ce funcționează în regim de generator. Deci cuplul electromagnetic este negativ în raport cu turația rotorului ceea ce duce la frânarea mașinii până la oprirea ei.

La această metodă NU mai apare pericolul inversării sensului de rotație dacă, la oprire, nu se întrerupe alimentarea în c.c.

Și această metodă determină creșterea pronunțată a curentului rotoric, adică este necesară, din nou, protejarea mașinii prin răcire forțată.



Curba din fig.a pune in evidență faptul că, timpul de frânare depinde de puterea de excitație. Cu cât puterea este mai mare cu atât timpul de frânare este mai mic. In fig.b se poate observa că valoarea cuplului de frânare este mai pronunțată la valori mici ale turației. Dacă se dorește creșterea cuplului de frânare către valori mai mari ale turației atunci se poate introduce o rezistență de frânare in circuitul rotoric (numai la mașinile cu rotor bobinat).



# MOTORUL MONOFAZAT

CURS 8



# CUPRINS



1

Motorul asincron monofazat – particularități

1

2

Motorul monofazat cu faza auxiliara

2

3

Motorul monofazat cu condensator de pornire

3

4

Motorul monofazat cu faza auxiliara permanenta

4

5

Motorul monofazat cu doua condensatoare

5

6

Motorul monofazat cu spira in scurt-circuit

6

7

Inversarea sensului de rotatie la motorul monofazat

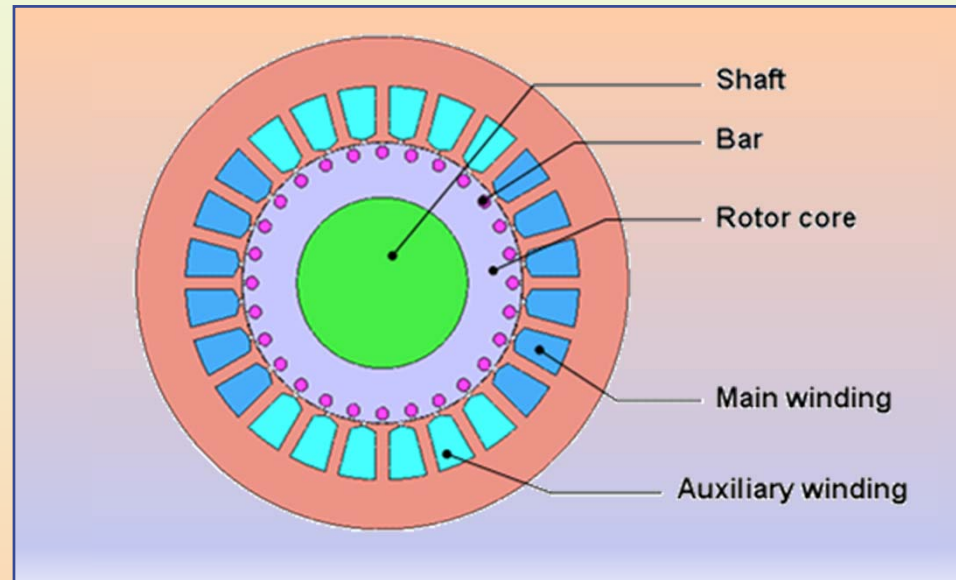
7





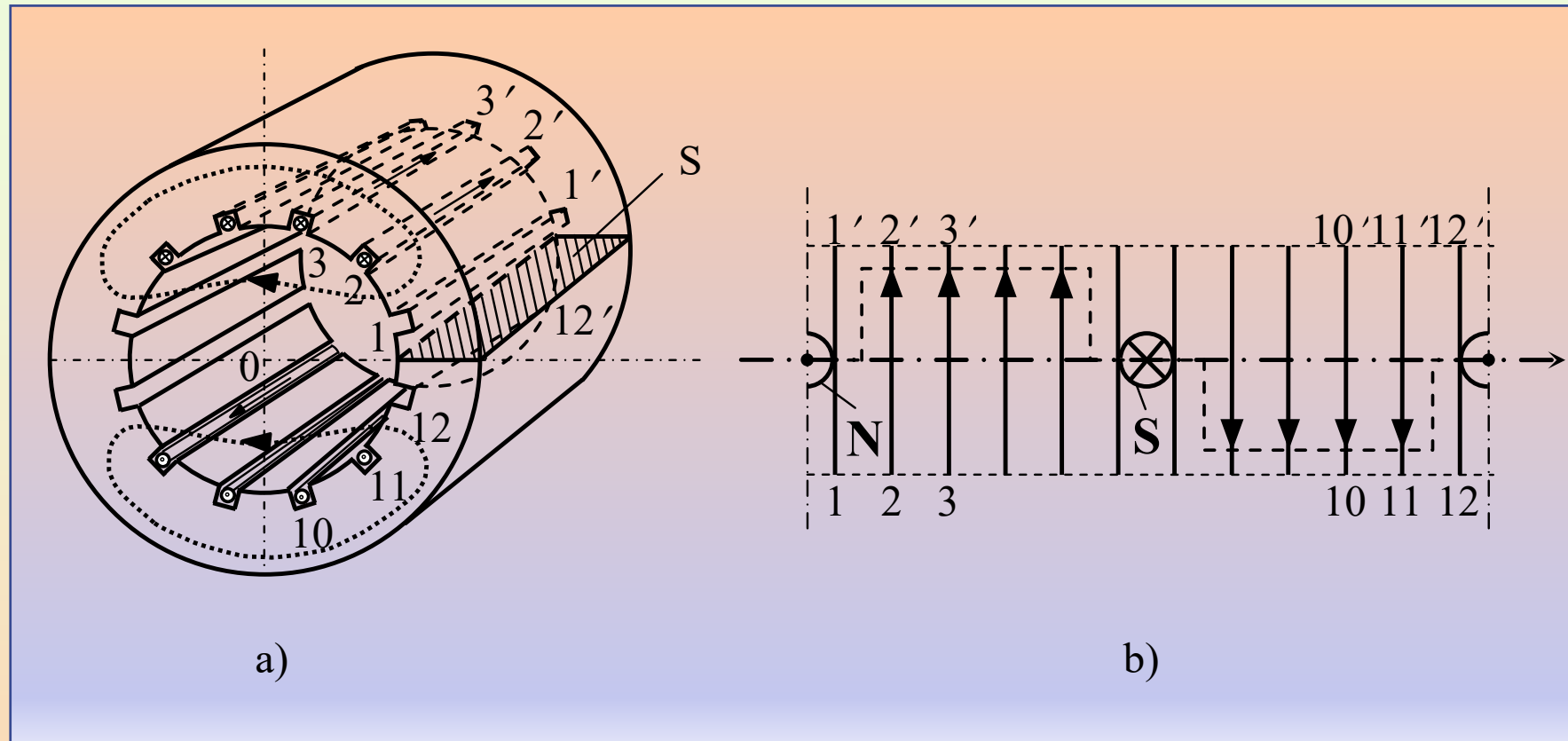


**Motorul asincron monofazat este motorul de inducție a cărui alimentare se face de la o sursă de tensiune monofazată.**



**Din punct de vedere constructiv, motorul monofazat are aceleași elemente ca și motorul trifazat: stator cu creștături uniform distribuite, rotor cu înfășurare în scurt-circuit (variantele cu rotor bobinat nu există la motorul monofazat).**

***Singurul element diferit este înfășurarea statorică.***



## Dispunerea in crestături a înfășurării principale

Înfășurarea statorică a motorului monofazat este compusă din două înfășurări de fază distincte:

- Înfășurarea principală – este plasată, de regulă, în  $2/3$  din crestăturile statorului;
- Înfășurarea auxiliară – este plasată în restul de  $1/3$  crestături.

*Defazajul spațial dintre cele două înfășurări este de  $90^\circ$  electrice.*

Expresia câmpului electromagnetic creat de o înfășurare monofazată (situația motorului cu o singura înfășurare):

$$H = H_{max} \cos p\alpha \cdot \sin \omega t \quad \leftarrow \text{câmp alternativ (pulsatoriu)}$$

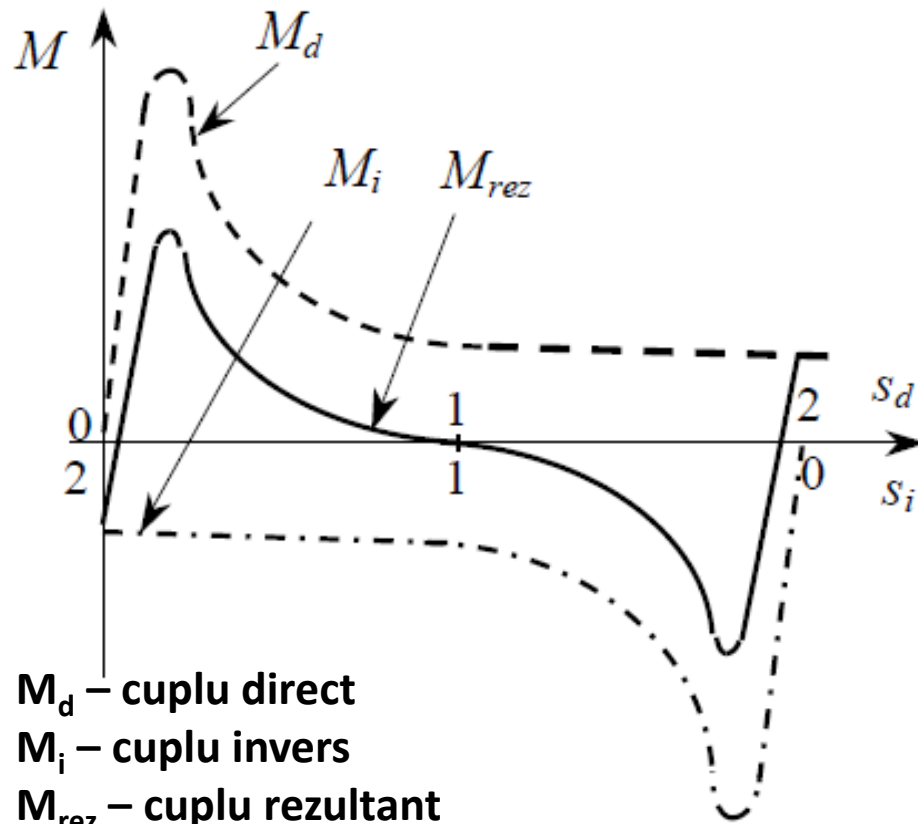
Dacă se aplică teorema lui Leblanc:

$$H = \frac{1}{2} H_{max} \cdot \sin(\omega t - p\alpha) + \frac{1}{2} H_{max} \cdot \sin(\omega t + p\alpha)$$

câmp învârtitor direct

câmp învârtitor invers

Fiecare dintre cele doua câmpuri învârtitoare creează câte un cuplu care acționează asupra rotorului in direcții opuse.



$M_d$  – cuplu direct  
 $M_i$  – cuplu invers  
 $M_{rez}$  – cuplu rezultat

Cele doua cupluri (reprezentate de curbele punctate) se compun dând naștere cuplului rezultat,  $M_{rez}$ .

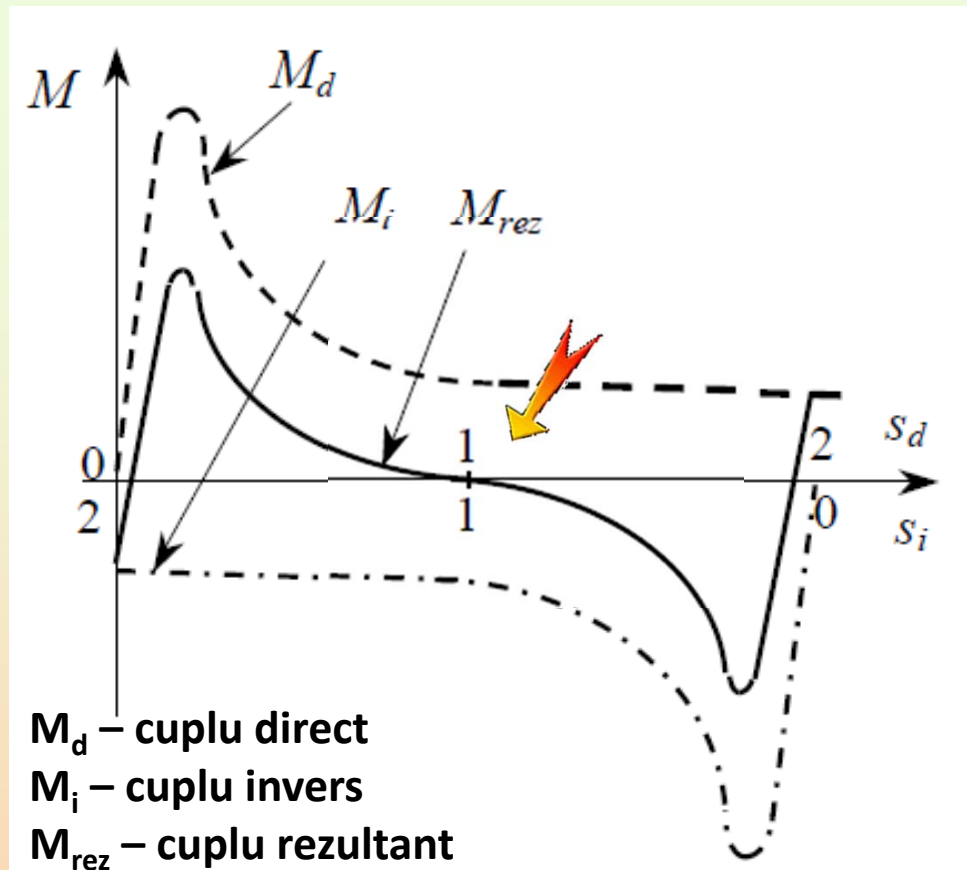
Față de câmpul direct, rotorul are o alunecare:

$$s_{dir} = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

iar față de câmpul invers, alunecarea rotorului este:

$$s_{inv} = \frac{n_1 + n}{n_1} = \frac{n_1 + n - n_1 + n_1}{n_1} = \frac{2n_1}{n_1} - \frac{n_1 - n}{n_1} = 2 - s_{dir}$$



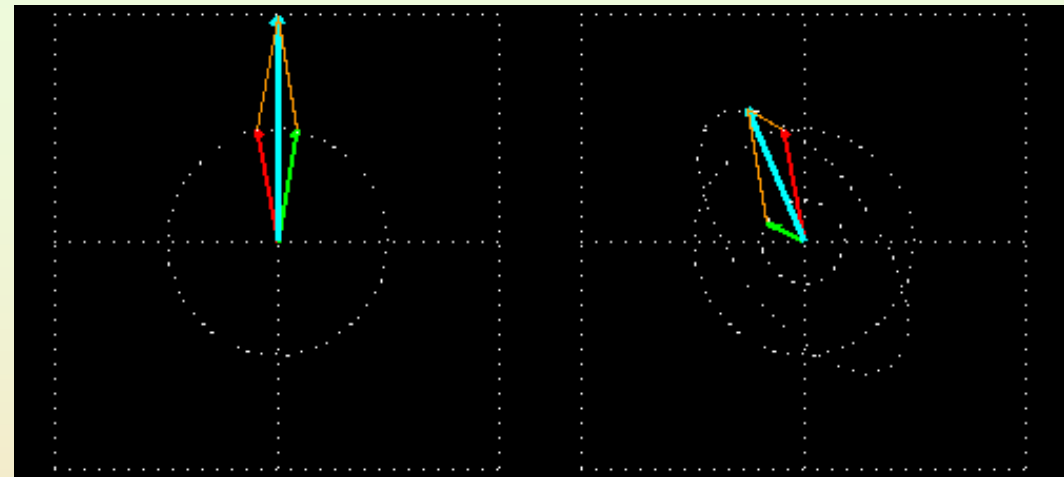
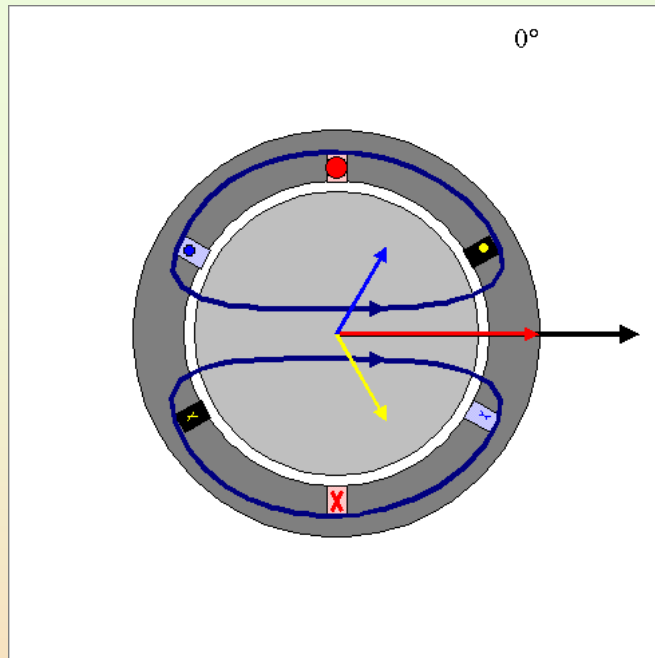


Cuplul rezultat este nul pentru  $s=1$



**Motorul monofazat (cu o singura fază) NU are cuplu de pornire**

## Câmp magnetic învârtitor circular



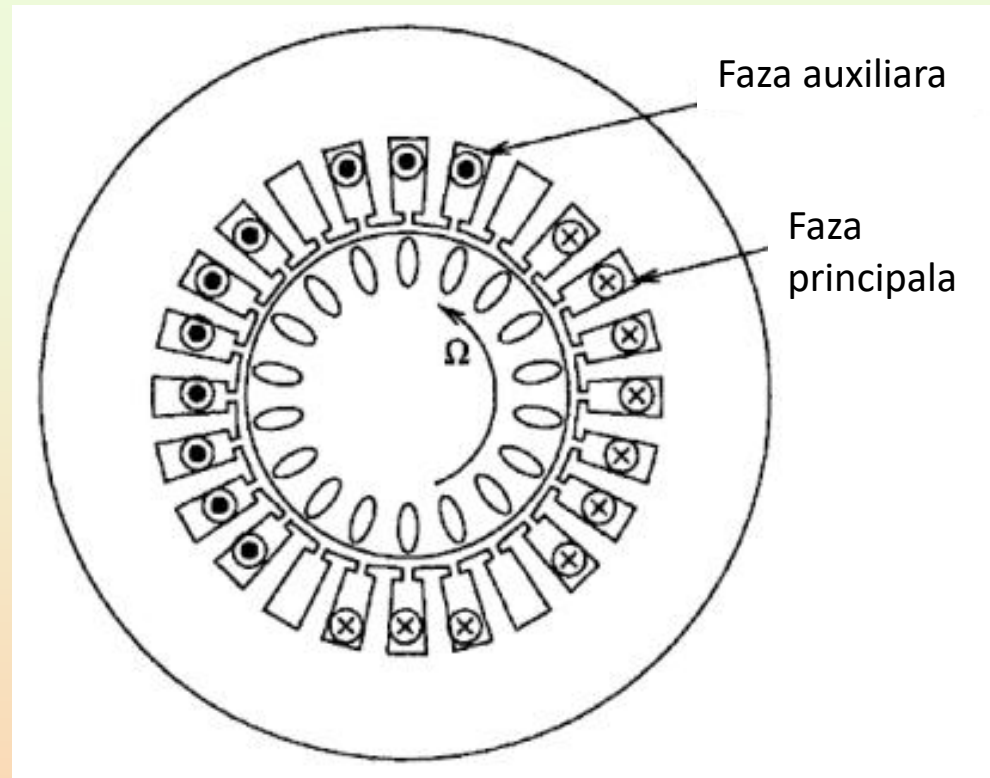
Câmp magnetic alternativ

Câmp magnetic  
învârtitor eliptic

Câmpul magnetic învârtitor circular este câmpul creat de o înfășurare polifazăată ce respectă toate condițiile de simetrie (spațială și temporală). Pentru înfășurarea trifazăată, de ex., înfășurările de fază sunt plasate la  $120^\circ$  electrice și sunt parcurse de curenți defazați, de asemenea, la  $120^\circ$ .

Atunci când condițiile de simetrie nu sunt riguros respectate, câmpul magnetic învârtitor devine unul eliptic. Orice câmp eliptic se descompune în două câmpuri învârtitoare circulare, care se rotesc în sensuri contrare (ca în cazul câmpului magnetic alternativ) dar care au amplitudini diferite. Câmpul de amplitudine mai mare determină cuplul ce rotește rotorul, iar câmpul de amplitudine mai mică generează un cuplu ce se opune mișcării rotorului.

## Motor monofazat cu faza auxiliara



Se adaugă o fază auxiliară pentru a transforma mașina monofazată într-una bifazată (polifazată) capabilă să producă un câmp învârtitor și deci un cuplu de pornire.

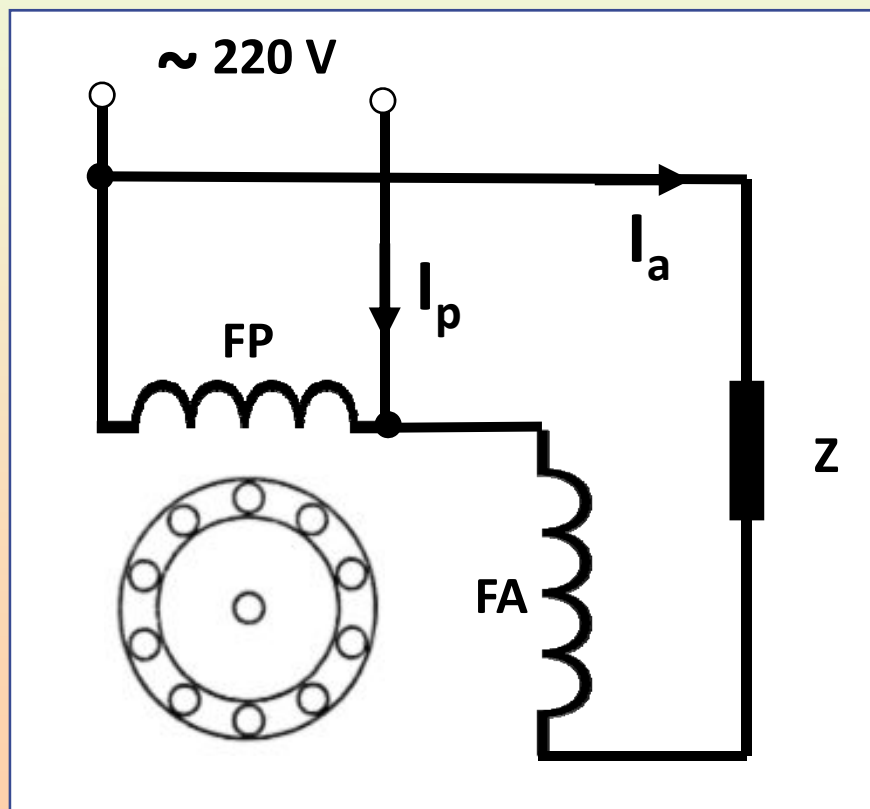


*Cele doua înfășurări sunt DEFAZATE spațial la 90° electrice*





**Întrucât sursa de alimentare pentru cele două înfășurări este unică, curenții prin cele două înfășurări TREBUIE defazați temporal (ideal la  $90^\circ$  electrice)**

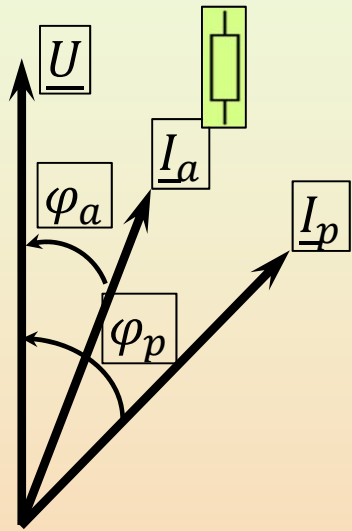


**Pentru obținerea defazării curentului prin faza auxiliara față de cel din faza principală, se introduce în circuitul fazei auxiliare o impedanță Z.**

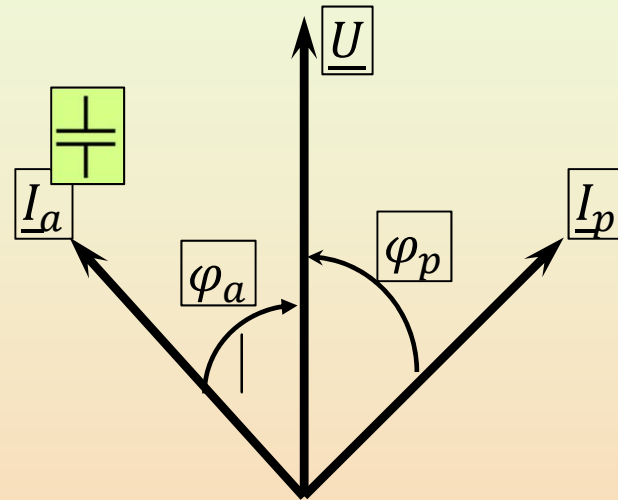
**Această impedanță defazoare poate fi constituită din:**

- a. o rezistență
- b. un condensator
- c. o bobină
- d. o combinație de rezistență + condensator

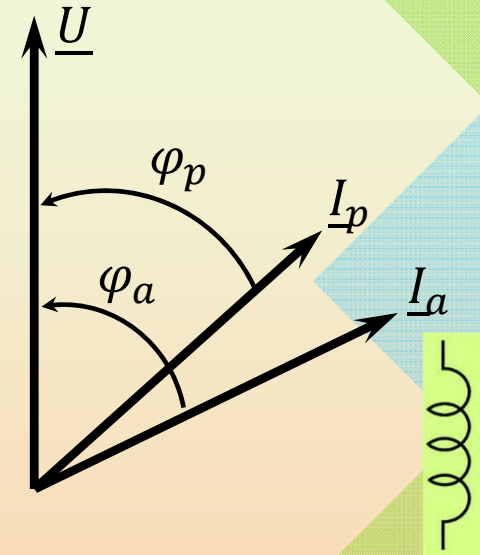
## Diagrame fazoriale



a)



b)



c)

- a) Rezistență introdusă în circuitul fazei auxiliare;
- b) Condensator introdus în circuitul fazei auxiliare;
- c) Bobină introdusă în circuitul fazei auxiliare.

a) Prezența rezistenței ca element defazor in circuitul fazei auxiliare face ca defazajul dintre tensiunea de alimentare,  $U$  si curentul  $I_a$  să fie mai mic decât defazajul dintre  $U$  si curentul prin faza principală,  $I_p$ . In acest fel apare un defazaj intre curenții prin cele doua faze. Deși este, ca valoare, departe de unghiul ideal de  $90^\circ$ , rezultă totuși un câmp eliptic si deci un cuplu de pornire.

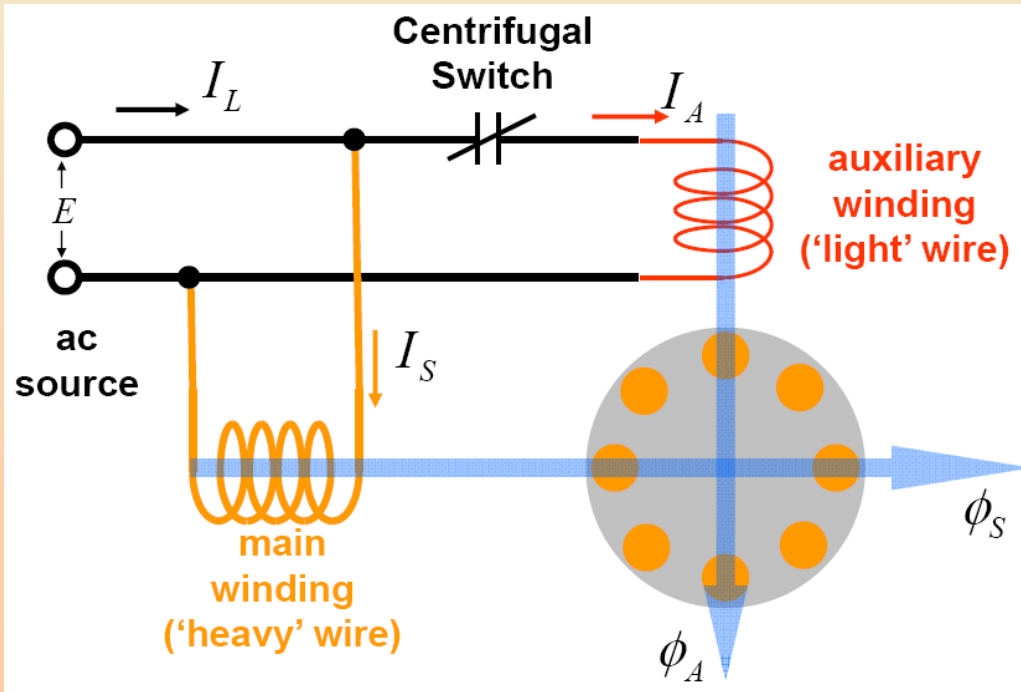
b) Condensatorul introdus ca element defazor in circuitul fazei auxiliare determină un defazaj negativ intre tensiunea de alimentare,  $U$  si curentul  $I_a$  (curentul este in avans față de tensiune). Drept urmare, defazajul dintre  $I_a$  si  $I_p$  poate atinge chiar  $90^\circ$ . Este situația cea mai favorabilă.

c) Prezența bobinei ca element defazor in circuitul fazei auxiliare determină un defazaj mai mare a curentului  $I_a$  față de tensiunea de alimentare,  $U$ . Din nou rezultă un mic defazaj intre curenții  $I_a$  si  $I_p$  ce determină un câmp eliptic.

# I. Motor cu fază auxiliară

## *Split-phase motor*

CHARACTERISTIC	NOTES
Peak Efficiency	50 to 60%
Power Factor	60 to 70%
Starting Torque	100% Full Load Torque
Noise & Vibration	120 Hz Torque Pulsations
Components	Contains Centrifugal Switch
Other	High Inrush Starting Current
Cost	Moderate



➤ Înfășurarea auxiliară este realizată din conductor mai subțire deci cu rezistență mai mare. Rezultă o defazare a curenților prin cele două faze de circa  $30^\circ$ .

➤ Faza auxiliară este folosită NUMAI la pornire după care este scoasă din circuit de către întrerupătorul centrifugal

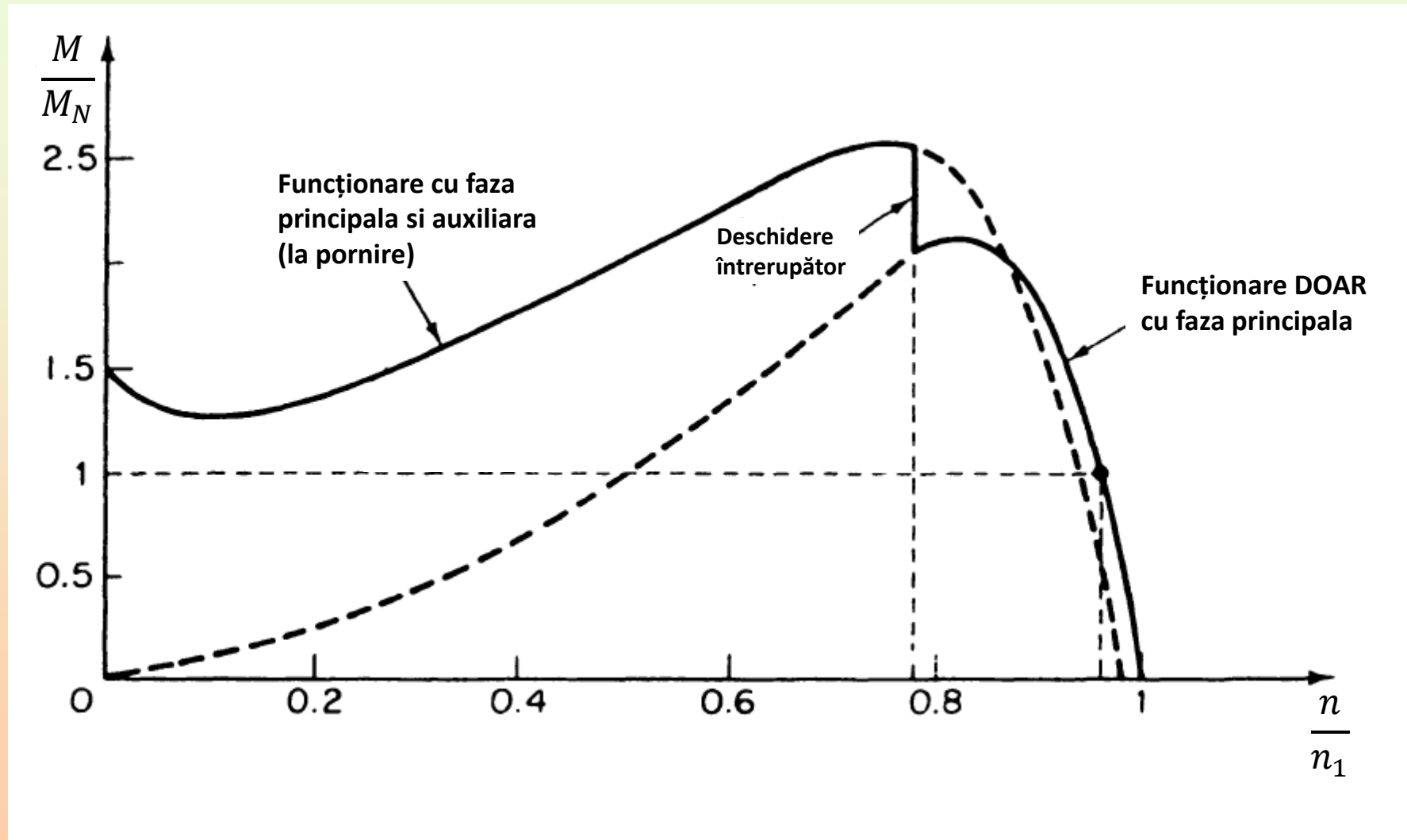
➤ Cuplu mediu de pornire

➤ Curent mare de pornire în înfășurarea auxiliară

➤ Configurația este favorabilă pentru motoare de până la 250 W



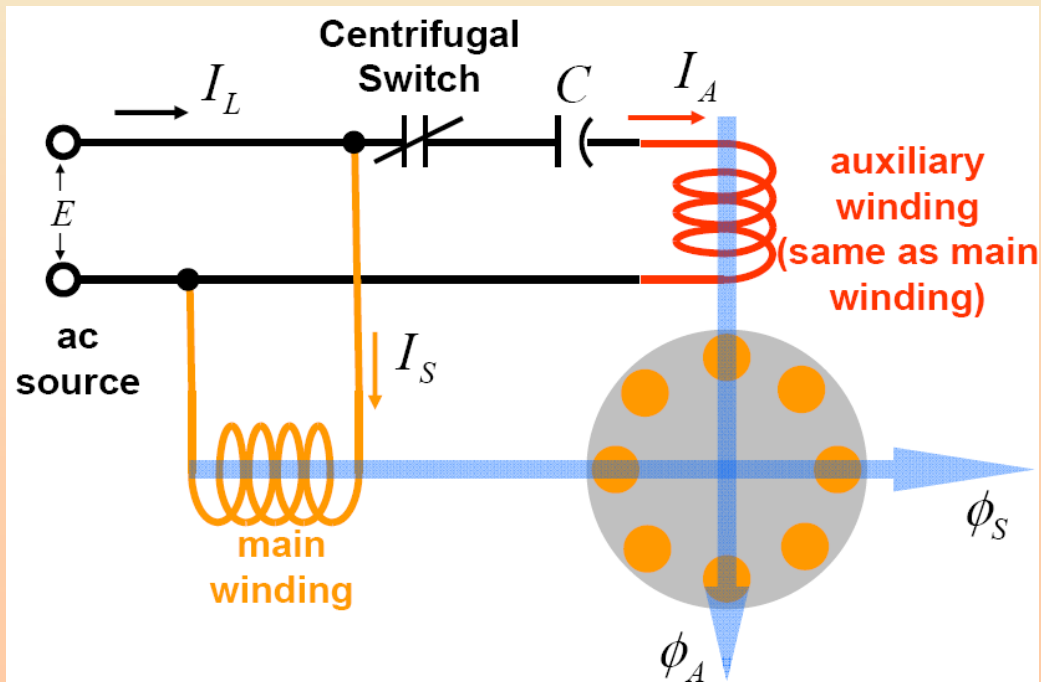
## Caracteristica $M=f(s)$ pentru motorul cu fază auxiliară



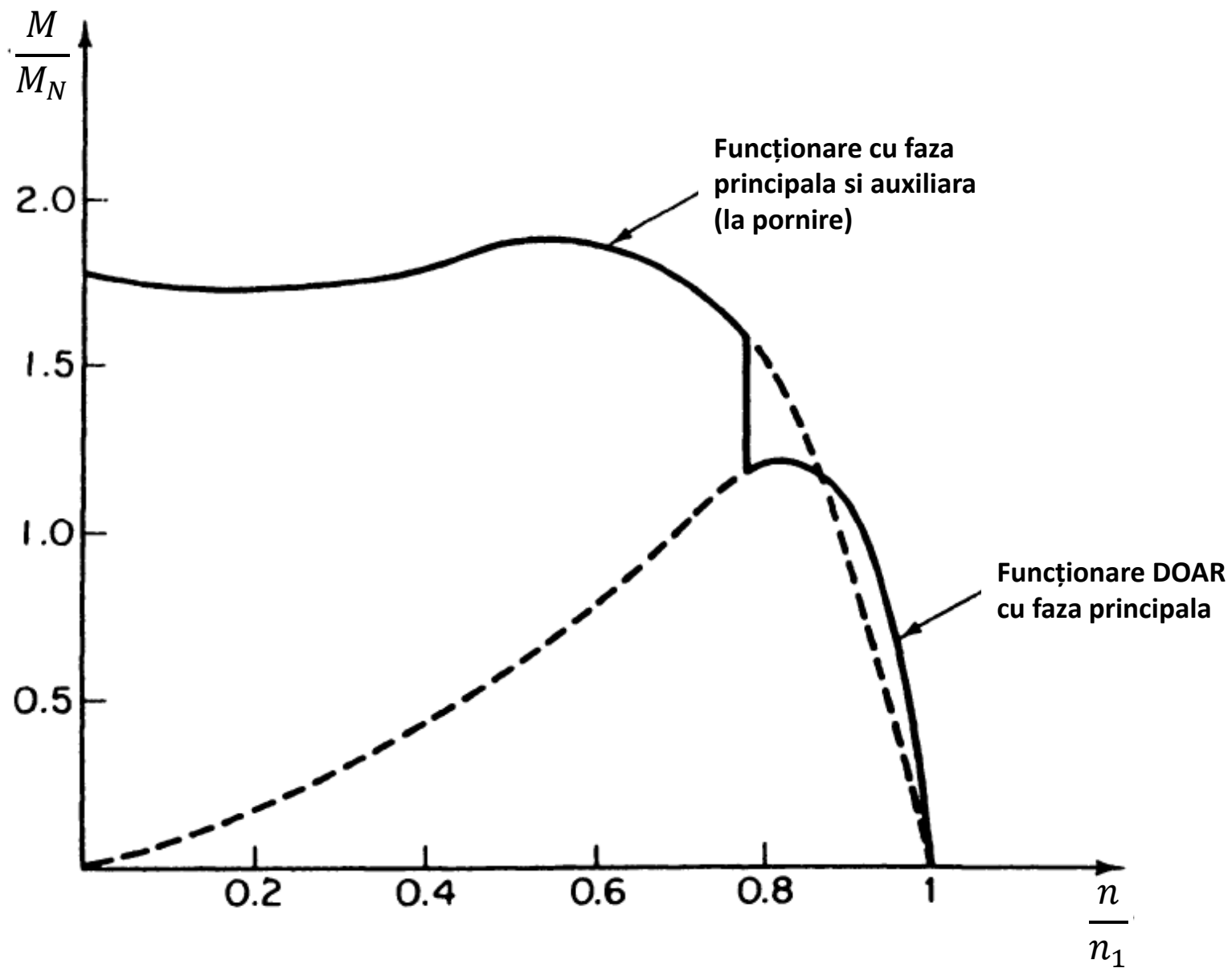
## II. Motor cu condensator de pornire

### *Capacitor-start motor*

CHARACTERISTIC	NOTES
Peak Efficiency	50 to 60%
Power Factor	60 to 70%
Starting Torque	Up to 300% Full Load Torque
Noise & Vibration	120 Hz Torque Pulsations
Components	Contains Centrifugal Switch & Capacitor (Intermittent Duty)
Other	Capacitor Controls Inrush Starting Current (Lower Than Split-Phase Type)
Cost	Slightly Higher Than Split-Phase Type



- Cele doua înfășurări sunt identice
- Defazarea curenților prin cele două faze este realizată de către condensatorul din faza auxiliară
- Valoare mare a condensatorului folosit NUMAI la pornire
- Cuplu mare de pornire
- Configurația este favorabilă pentru motoare de până la câțiva kW
- Ideal pentru aplicații de cuplu mare ca de ex. compresoare in instalații de aer condiționat



Funcționare cu faza  
principala si auxiliara  
(la pornire)

Funcționare DOAR  
cu faza principala

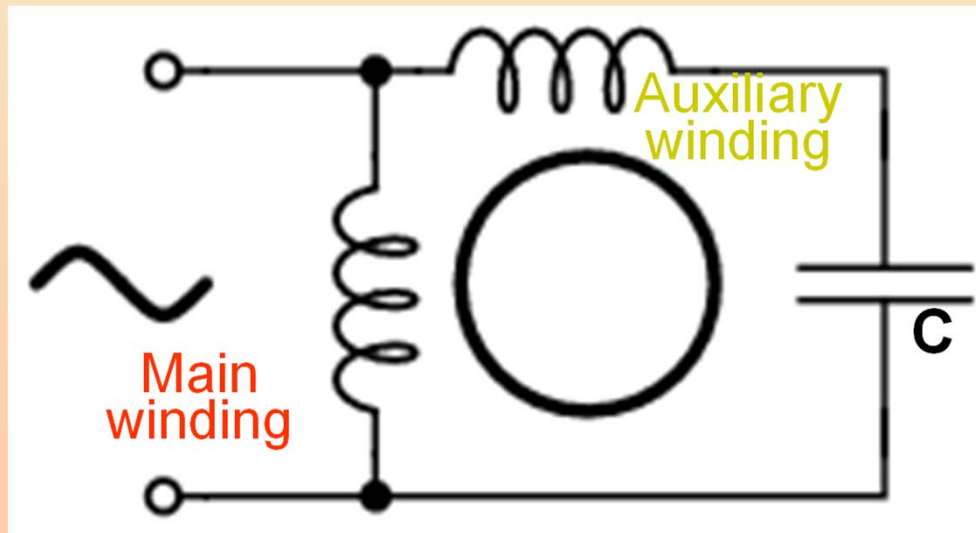
Caracteristica  $M=f(s)$  pentru motorul cu condensator de pornire



# III. Motor cu fază auxiliară permanentă

## *Permanently split capacitor motor*

CHARACTERISTIC	NOTES
Peak Efficiency	55 to 65%
Power Factor	80 to 100%
Starting Torque	50 to 80% Full Load Torque
Noise & Vibration	120 Hz Torque Pulsations Reduced
Components	Contains Capacitor (Continuous Duty)
Other	Can be used with speed control devices (not possible with SP & CSIR types)
Cost	Smallest motor for given output

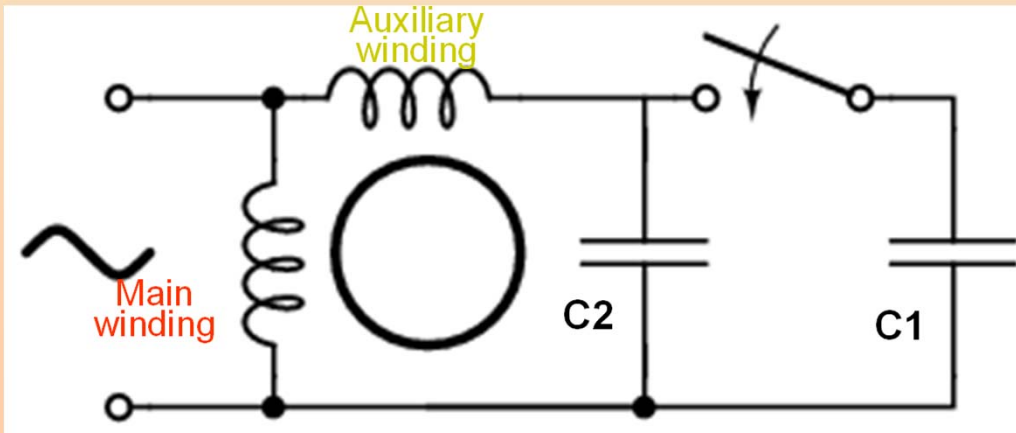


- Cele două înfășurări sunt identice
- Valoarea condensatorului este între cea favorabilă pornirii și cea favorabilă funcționării
- Curentul de pornire este mai mare
- Timpul de pornire este mai mare
- Apar pulsații de cuplu la turație nominală
- Configurația este favorabilă pentru motoare de până la 200 W
- Inversarea sensului de rotație se poate obține ușor prin trecerea condensatorului în circuitul celeilalte faze

# IV. Motor monofazat cu două condensatoare

## *Capacitor-start capacitor-run motor*

CHARACTERISTIC	NOTES
Peak Efficiency	55 to 65%
Power Factor	80 to 100%
Starting Torque	Up to 300% Full Load Torque
Noise & Vibration	120 Hz Torque Pulsations Reduced
Components	Contains Centrifugal Switch & Capacitor (Intermittent Duty). Contains 2nd Capacitor (Continuous Duty).
Other	Capacitor controls inrush starting current & run capacitor simulates 2-phase operation.
Cost	The best of the single-phase motor types. Exceptionally quiet. Most expensive motor design type.



➤ Înfășurarea auxiliară RĂMÂNE conectată permanent in circuit

➤ Se folosesc două condensatoare: unul pentru pornire, C1 (ce este scos din circuit cu un întrerupător centrifugal) și altul pentru funcționare, C2.

➤  $C1 > C2$

➤ Este configurația cea mai performantă pentru motoare monofazate

➤ Configurația este favorabilă pentru motoare de ordinul kW

# V. Motor cu spira in scurtcircuit

## *Shaded-pole motor*

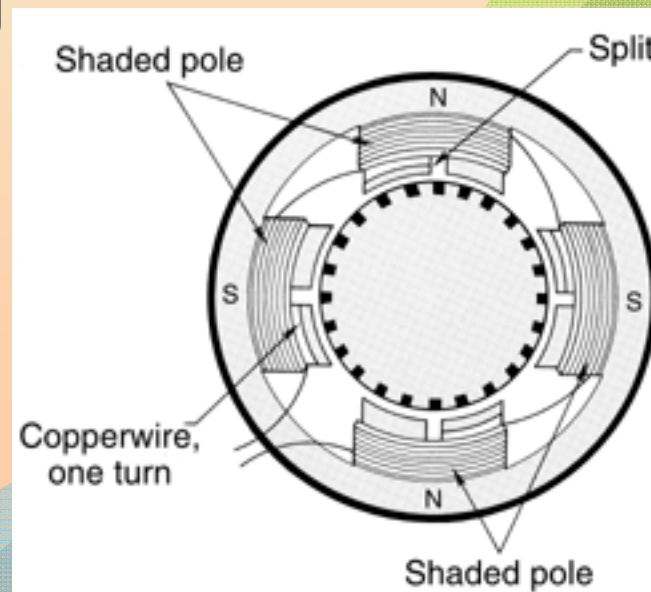
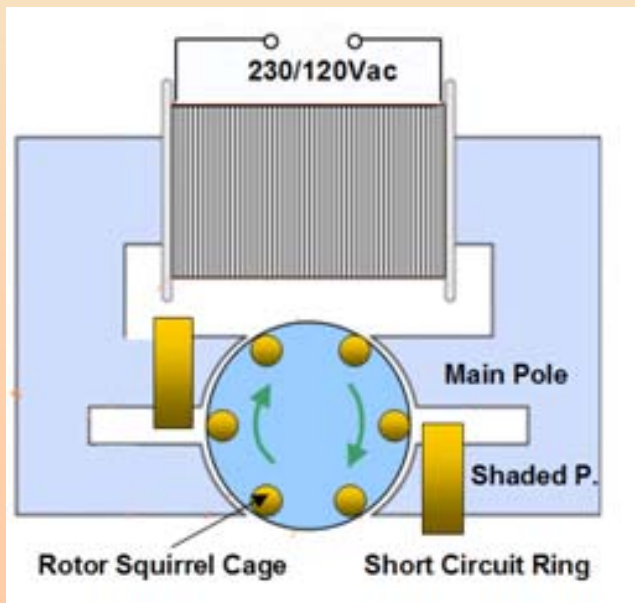
CHARACTERISTIC	NOTES
Peak Efficiency	20 to 40%
Power Factor	50 to 60%
Starting Torque	40 to 50% full load torque plus third harmonic dip
Noise & Vibration	120 Hz torque pulsations plus winding harmonics
Components	No additional components needed
Other	Can be used with speed control devices (not possible with SP & CSIR types)
Cost	Cheapest of all single-phase motors

➤ Motor asincron monofazat cu poli APARENȚI pe stator si înfășurare de tip CONCENTRAT

➤ Fiecare pol statoric are o spiră in scurt-circuit ce îmbrățișează cca 1/3 din pol

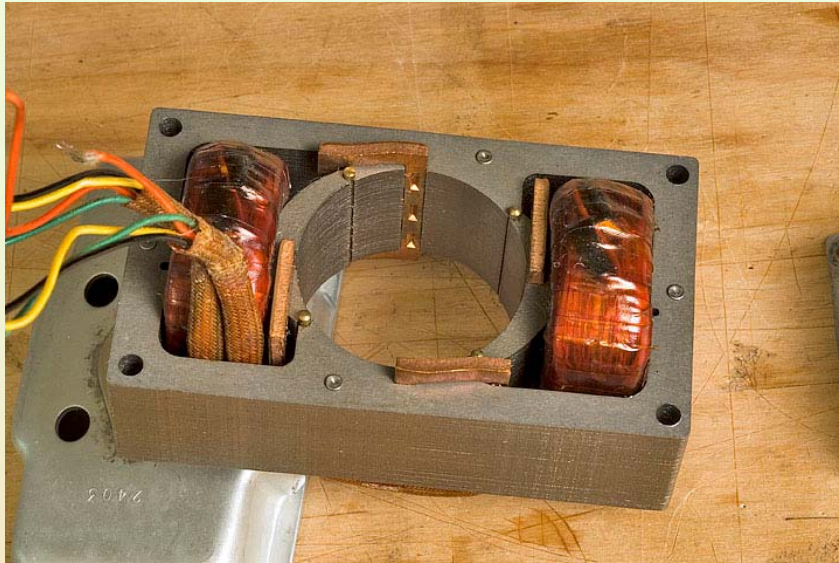
➤ Motorul are de obicei un singur sens de rotație

➤ Fiabilitate mare; performanțele cele mai slabe dintre motoarele asincrone monofazate





Motor cu spira in sc cu doua bobine inductoare



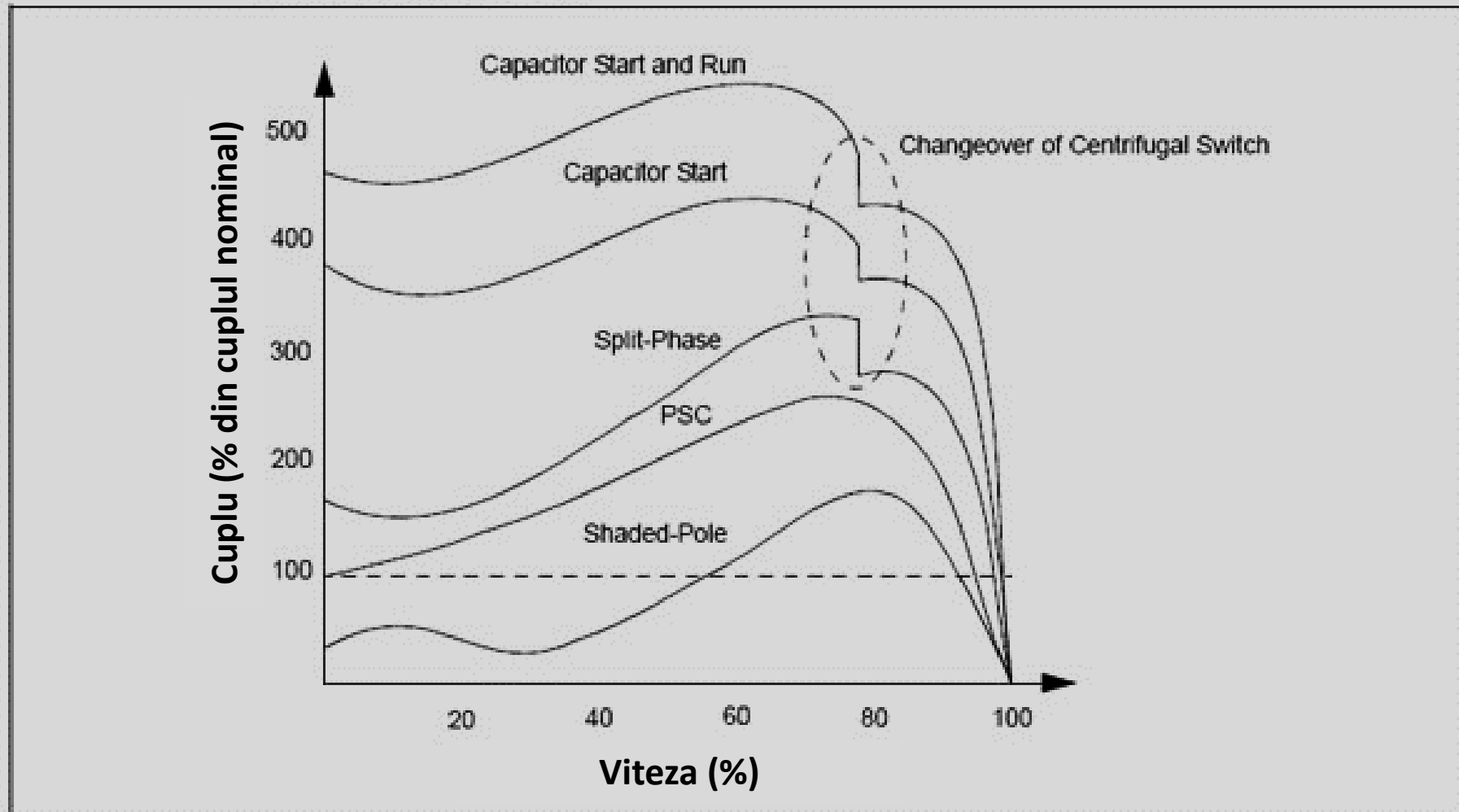
Motor cu spira in sc cu o singura bobina inductoare



Motor cu spira in sc cu P=1kW

MOTOR TYPE	SPLIT-PHASE	CAPACITOR-START	PERMANENTLY SPLIT CAPACITOR	CAPACITOR START-CAPACITOR RUN	SHADED POLE
<b>DESCRIPTION</b>	Start winding connected in parallel with main winding, connection controlled by centrifugal switch or relay.	Identical to the split-phase design except includes the addition of a capacitor in series with the start winding circuit.	Start winding permanently connected in parallel to main winding with a continuous duty capacitor in the circuit at all times.	Combination of capacitor-start and PSC type motor. Start winding permanently connected in parallel to main winding with a continuous duty capacitor in the circuit at all times and capacitor in series with the start winding circuit.	Single main winding with shading coils for providing starting torque.
<b>HP RANGE</b>	1/6 to 1	1/4 to 2	1/100 to 1	3/4 to 20	1/1000 to 1/4
<b>TYPICAL RATED SPEED (60 HZ)</b>	860, 1140, 1725, 3450	860, 1140, 1725, 3450	1050, 1625, 3250	1725, 3450	1050, 1550, 3100
<b>EFFICIENCY RANGE</b>	50 to 60%	50 to 60%	55 to 65%	55 to 65%	20 to 40%
<b>POWER FACTOR</b>	60 to 70%	60 to 70%	80 to 100%	80 to 100%	50 to 60%
<b>STARTING TORQUE (% OF FULL LOAD)</b>	100%	Up to 300%	50 to 80%	Up to 300%	40 to 50%
<b>TYPICAL APPLICATION</b>	Suitable for frequent starting of fans in both direct and belt driven units.	All-purpose motor for high starting torque, low starting current used in both direct and belt driven units.	Intended for direct drive models and applications requiring speed control.	All-purpose motor for high starting torque, low starting current used mainly in larger belt driven units.	Suitable for direct drive low power fans and multi-speed applications.
<b>ADVANTAGES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Good starting torque.</li> <li>b. Medium efficiency.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. High starting torque.</li> <li>b. Lower starting current than split phase design.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. High running efficiency.</li> <li>b. Capable of multi-speed operation.</li> <li>c. Can be used with speed control devices (i.e., triacs).</li> <li>d. Quietest of all small induction motors.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. High starting torque.</li> <li>b. Lower starting current than split-phase design.</li> <li>c. Available in larger HP sizes than capacitor-start or PSC motor types.</li> <li>d. High running efficiency.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Inexpensive to manufacture.</li> <li>b. Multi-speed operation.</li> <li>c. Compact.</li> </ul>
<b>DISADVANTAGES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Not suited for high starting torque loads.</li> <li>b. Not applicable for speed control.</li> <li>c. High starting current</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. More expensive than split-phase design.</li> <li>b. Not applicable for speed control.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Low starting torque.</li> <li>b. Speed varies more under load.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Most expensive single-phase motor type.</li> <li>b. Not applicable for speed control.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Low efficiency.</li> <li>b. Low starting torque.</li> </ul>

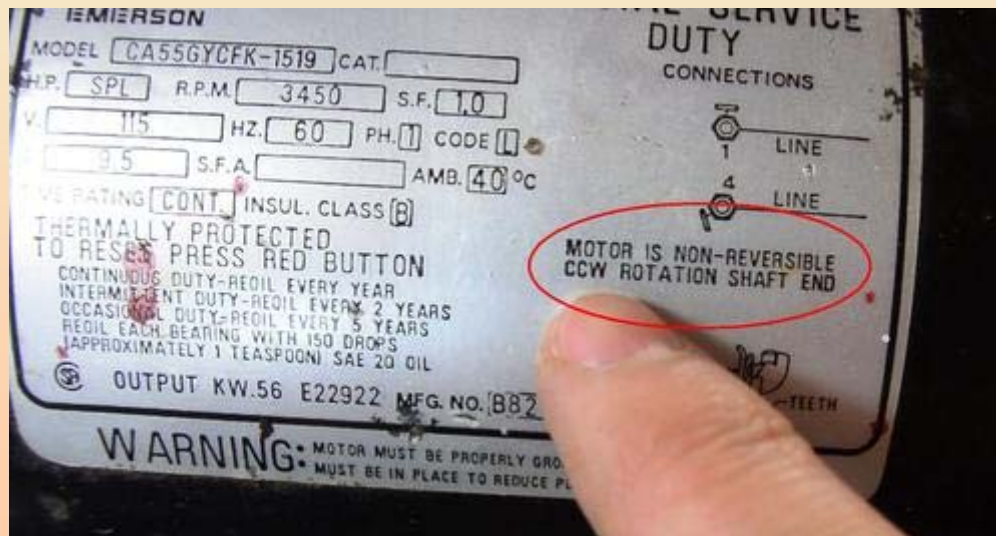
## Curbele $M=f(s)$ pentru diverse tipuri de motoare asincrone monofazate



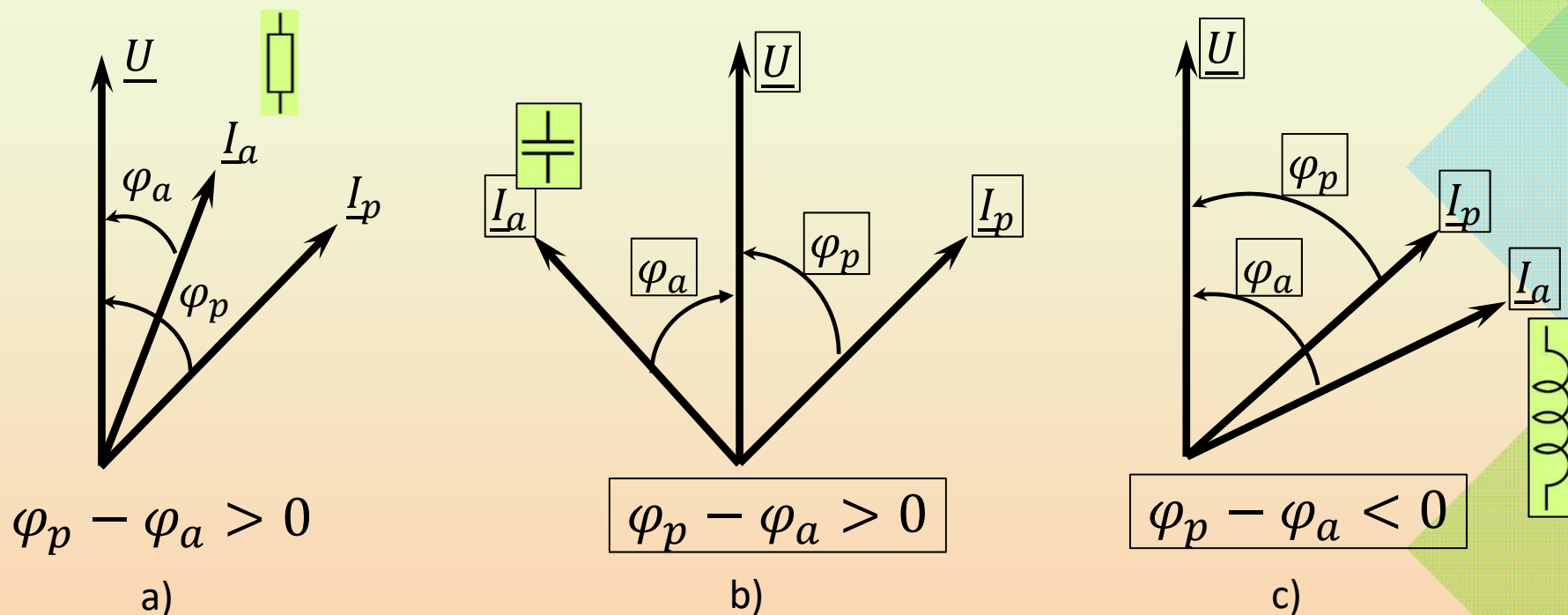


# Inversarea sensului de rotație la motorul asincron monofazat

1. Schimbarea sensului curentului prin una dintre cele doua faze (fie prin faza principală fie prin faza auxiliară). Pentru acest lucru este necesar ca mașina să aibă scoase la borne toate cele 4 capete ale înfășurărilor).

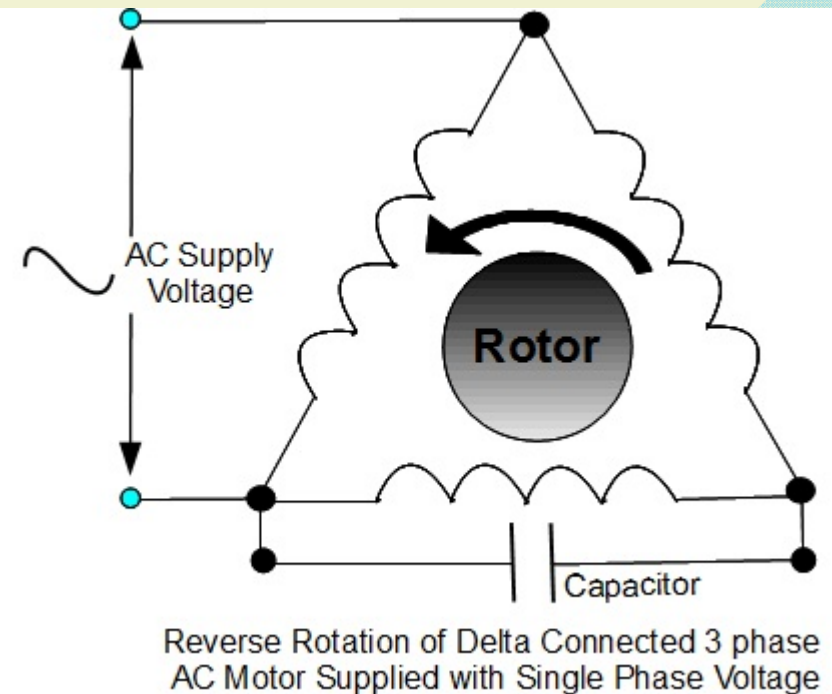
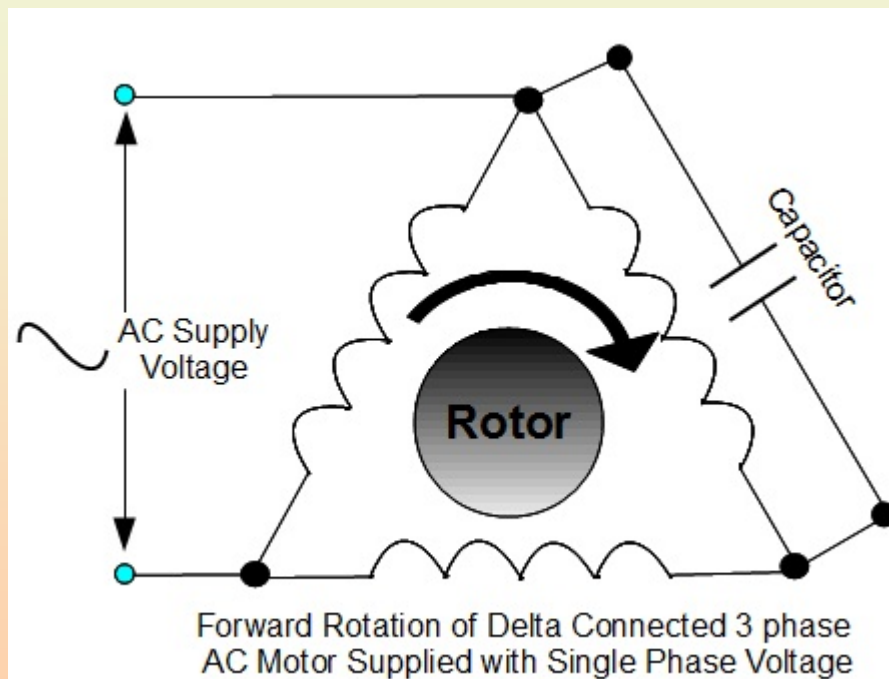


## 2. Prin schimbarea defazorului (un condensator sau o rezistență folosite ca element defazor se înlocuiesc cu o bobină).



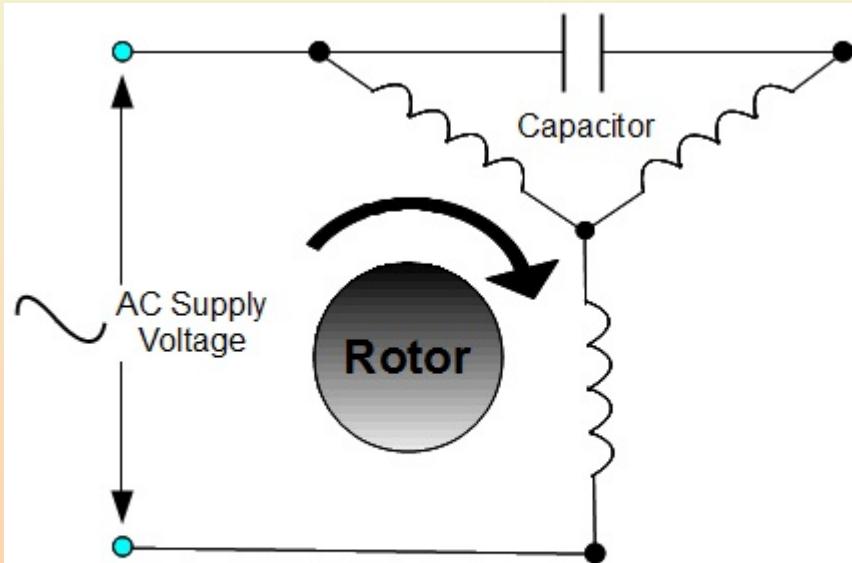
Se remarcă din diagramele fazoriale că defazajul produs de prezența rezistenței sau a condensatorului este pozitiv iar în cazul bobinei, acesta este negativ. Drept consecință, introducerea unui condensator sau a unei rezistențe ca element defazor determină un anumit sens de rotație, iar introducerea bobinei determină un sens de rotație invers.

## Funcționarea mașinii trifazate (având conexiunea $\Delta$ ) conectată la o sursă monofazată

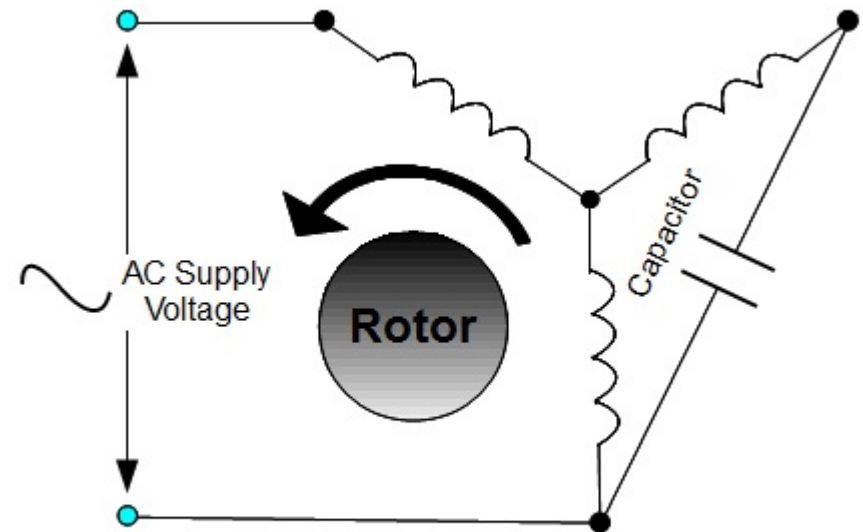




# Funcționarea mașinii trifazate (având conexiunea Y) conectată la o sursă monofazată



Forward Rotation of Star Connected 3 phase AC Motor Supplied with Single Phase Voltage



Reverse Rotation of Star Connected 3 phase AC Motor Supplied with Single Phase Voltage

# Funcționarea mașinii trifazate conectată la o sursă monofazată

Orice mașină asincronă trifazată poate funcționa și dacă este alimentată de la o sursă de tensiune monofazată. Pentru aceasta este suficientă conectarea a două dintre borne la rețeaua monofazată și introducerea unei impedanțe defazoare (de ex. un condensator) între una dintre cele două borne alimentate și cea de-a treia bornă rămasă liberă.

## Consecințe:

- scade puterea mașinii cu cel puțin  $1/3$
- scade viteza rotorului (crește alunecarea)
- scade randamentul
- scade capacitatea de suprasarcină
- scade cuplul de pornire
- crește înclinarea caracteristicii mecanice (viteza scade mai repede odată cu creșterea sarcinii)
- scade factorul de putere

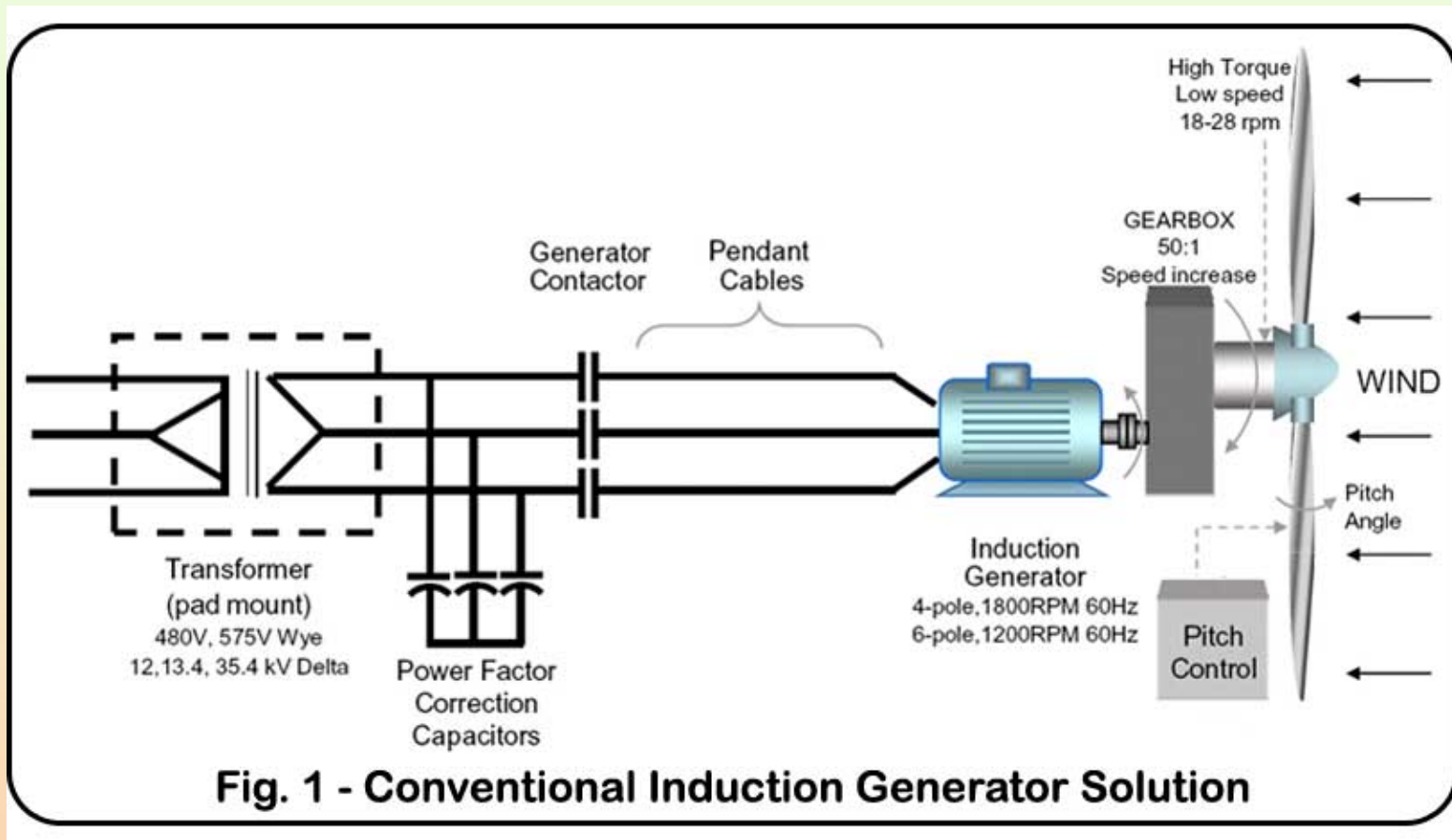




# Generatorul Asincron



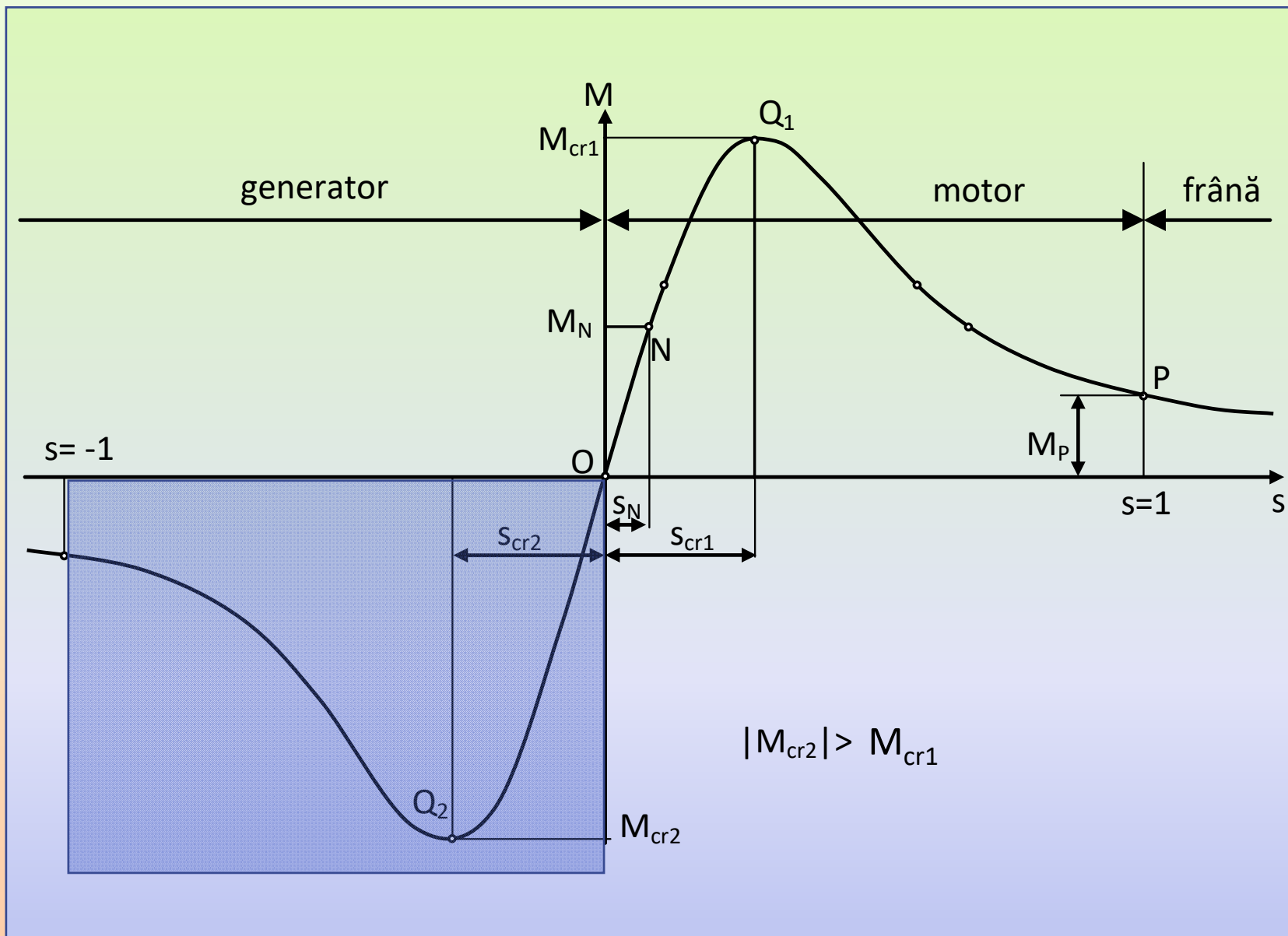




Sistem de producere a energiei electrice, bazat pe forța vântului, cu generator asincron

**La funcționarea mașinii asincrone in regim de generator au loc următoarele fenomene:**

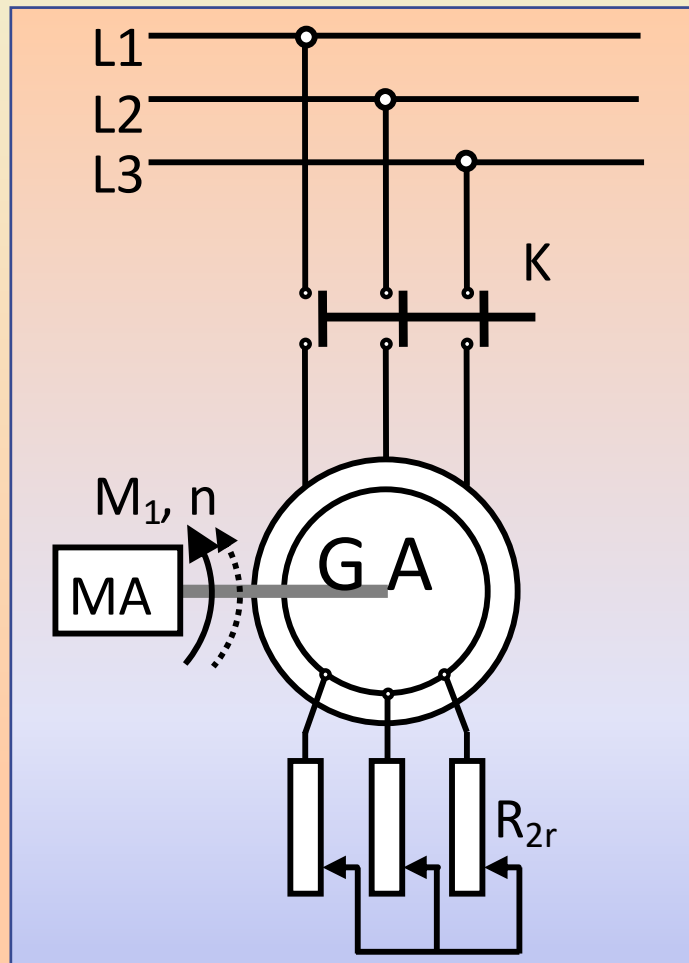
- 1. Mașina este antrenată din exterior si primește energie mecanică pe la arbore respectiv furnizează energie electrică pe la borne;**
- 2. Viteza rotorului este MAI MARE decât viteza de sincronism. Prin urmare:  $n > n_1$  si  $s < 0$ ;**



Funcționarea in regim de generator este reprezentată de curba din cadranul 3.



# Generatorul asincron conectat la rețea

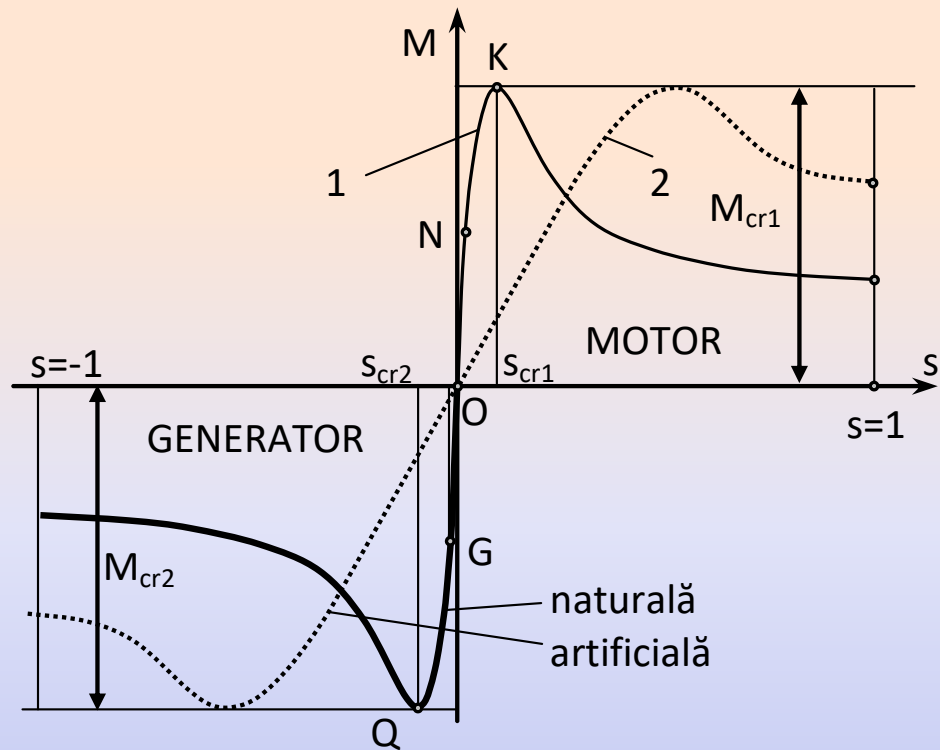


1. Mașina asincronă funcționează ca generator conectat la rețea atunci când viteza rotorului este **MAI MARE** decât viteza de sincronism.

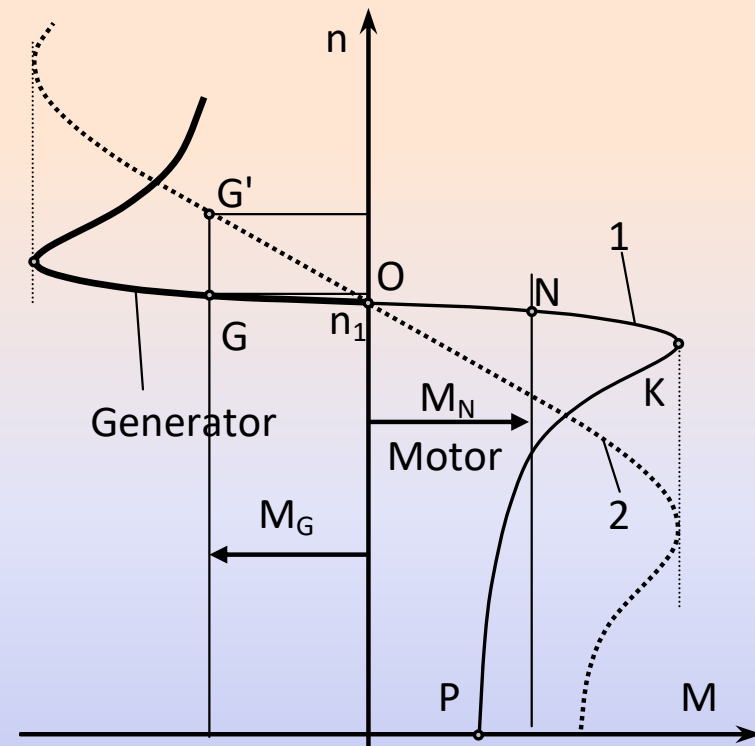
2. Generatorul asincron **ABSOARBE** putere reactivă de la rețea.

3. Puterea furnizată rețelei **CREȘTE** odată cu turația mașinii.

4. Tensiunea și frecvența la bornele generatorului rămân constante, indiferent de viteză, și egale cu cele ale rețelei.



Caracteristica  $M=f(s)$

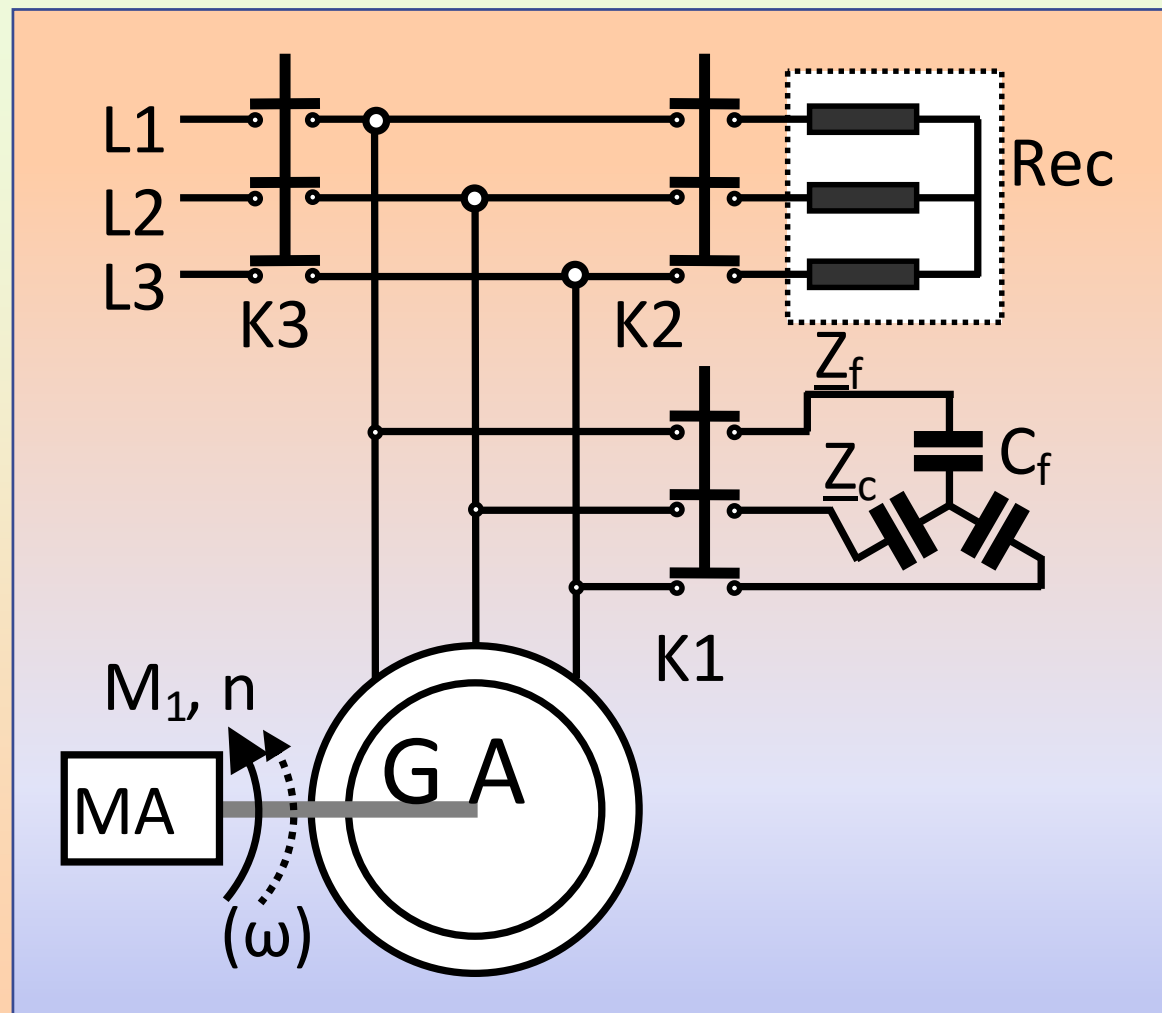


Caracteristica mecanică  $n=f(M)$

Caracteristicile artificiale (2) se pot obține NUMAI la mașinile cu rotor bobinat, prin modificarea rezistenței conectată în rotor.

Creșterea rezistenței rotorice permite ca, odată cu creșterea vitezei de rotație să mențină cuplul electromagnetic dezvoltat (cuplu ce se opune mișcării rotorului) la aceeași valoare (vezi punctele G și G' de pe caracteristica mecanică).

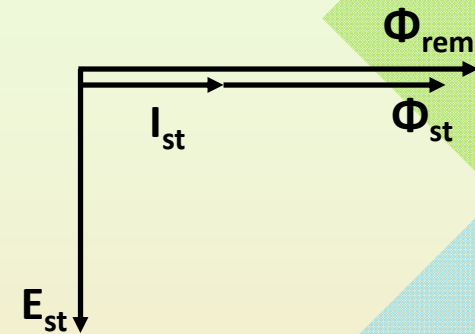
# Generatorul asincron independent



Funcționarea mașinii asincrone ca generator independent (rețea locală sau funcționare individuală) este posibilă numai dacă mașina are posibilitatea să se „amorseze”.



**Amorsare** → { **Magnetism remanent**  
**Baterie de condensatoare**



Fenomenul de *amorsare* înseamnă apariția tensiunii la bornele generatorului odată cu rotirea rotorului. Acest lucru este posibil NUMAI dacă există un magnetism remanent în circuitul magnetic rotoric (rămas de la o funcționare anterioară a mașinii).

Când rotorul este rotit, câmpul magnetic remanent devine unul învârtitor, variabil, și conform legii inducției electromagnetice, induce o tensiune  $E_{st}$  în înfășurarea statorică (aceasta este defazată cu  $90^\circ$  în urma fluxului remanent  $\Phi_{rem}$ ).

Prezența bateriei de condensatoare închide circuitul statoric și determină apariția unui curent  $I_{st}$ . Acesta este defazat în avans față de tensiunea  $E_{st}$  cu un unghi de  $90^\circ$  (situația ideală).

Curentul astfel creat, mic ca valoare întrucât și tensiunea indusă de câmpul remanent este mică, creează un flux, colinar cu curentul  $I_{st}$  dar și cu fluxul remanent,  $\Phi_{rem}$ .

Cele două fluxuri se adună rezultând un flux general în mașină mai mare. Se induce deci o tensiune mai mare. Curentul  $I_{st}$  crește și odată cu el, din nou fluxul  $\Phi_{st}$ . Fenomenul se repetă până la stabilizare.

***Rolul condensatorului:***

- 1. Defazează curentul  $I_{st}$  în avans față de tensiunea indusă astfel încât fluxul creat de înfășurarea statorică să se ADUNE cu fluxul remanent.**
- 2. Furnizează energie reactivă mașinii asincrone pentru magnetizarea circuitului magnetic.**

***Particularități de funcționare:***

- 1. Mașina poate trece în regim de generator și la viteze mai mici decât viteza de sincronism, în funcție de valoarea bateriei de condensatoare.**
- 2. Tensiunea și frecvența la bornele generatorului sunt variabile în funcție de turația rotorului.**



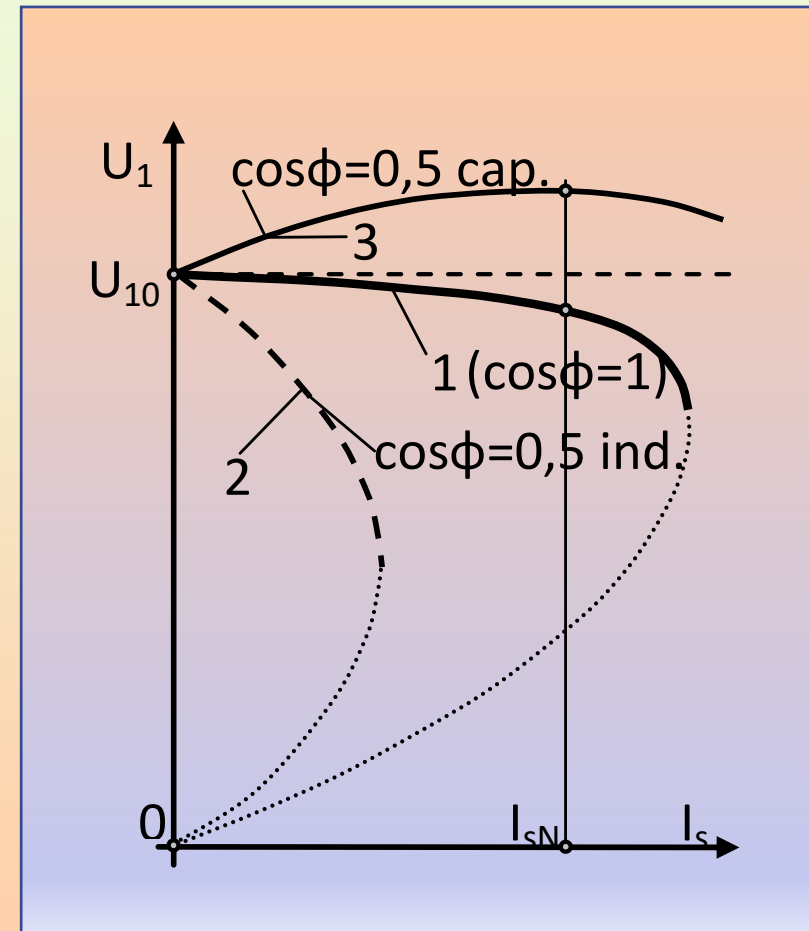
## Caracteristici externe

Variația tensiunii la bornele generatorului asincron autonom este puternic influențată de natura sarcinii (respectiv factorul ei de putere).

- Pentru sarcini puternic inductive, căderea de tensiune este extrem de accentuată și trebuie compensată prin creșterea turației generatorului (dacă acest lucru este posibil).

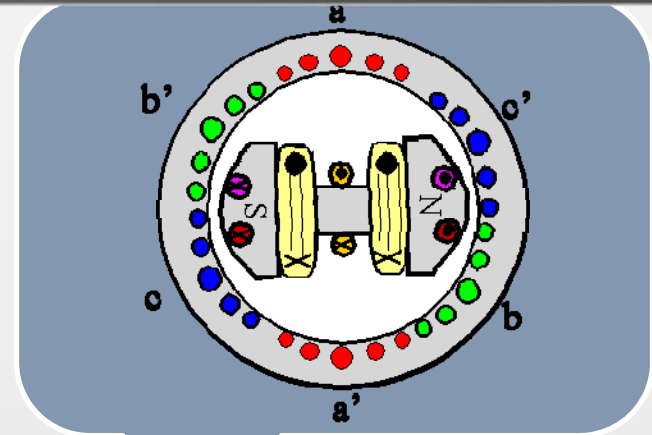
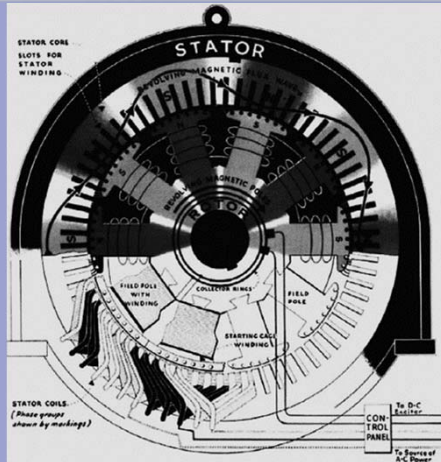
- La sarcini active (caracterizate doar de rezistența  $R$ ), căderea de tensiune este rezonabilă.

- În cazul sarcinilor capacitive, are loc o creștere a tensiunii la borne.



<i>Generator asincron conectat la rețea</i>	<i>Generator asincron independent</i>
<b>Tensiune constantă la borne</b>	<b>Tensiune variabilă la borne</b>
<b>Frecvență constantă</b>	<b>Frecvență variabilă</b>
<b>Cedează putere activă și absoarbe putere reactivă</b>	<b>Amorsare Baterie de condensatoare</b>
<b>Puterea activă cedată este proporțională cu viteza</b>	<b>Puterea activă cedată este proporțională cu viteza</b>





Curs 9

**Mașina sincronă**

SUBMIT





# CUPRINS

- 1 Elemente constructive
- 2 Sisteme de excitație
- 3 Principiul și ecuațiile de funcționare ale generatorului sincron



# ELEMENTE CONSTRUCTIVE

## STATOR

Partea fixa a mașinii

1

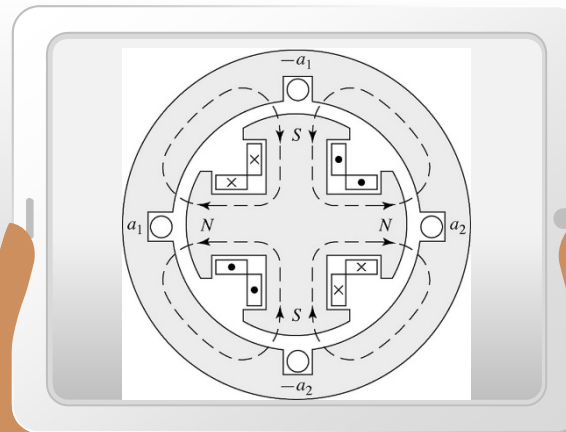
## ROTOR

Partea mobilă a mașinii

2

*Sistem de  
excitație*

3

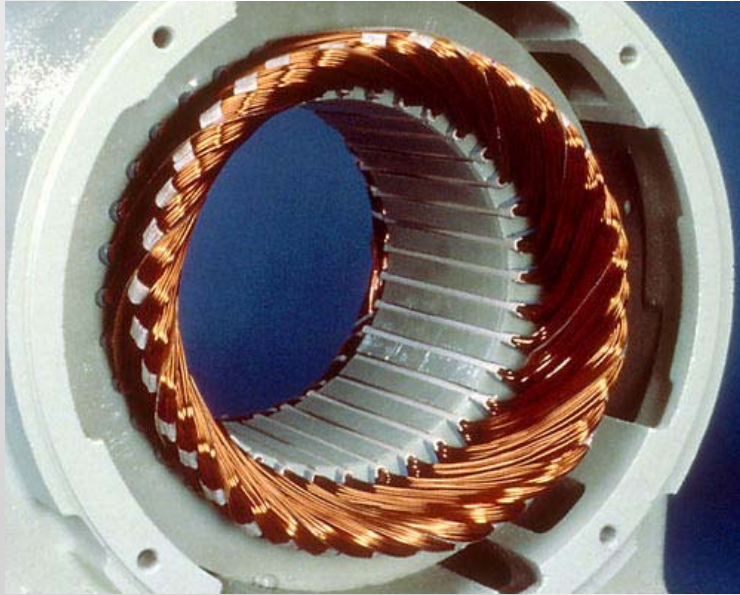


## Accesorii

Carcasa, lagăre și  
capace laterale, ax,  
tălpi de susținere,  
cutie de borne

# Elemente constructive

## Stator

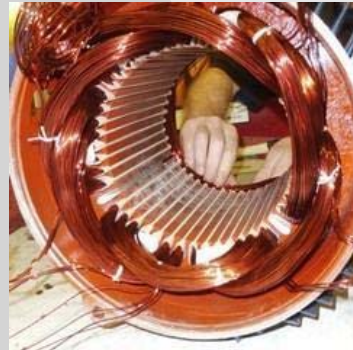


Statorul mașinii sincrone este identic cu cel al mașinii asincrone.

- circuitul magnetic este realizat din tole împachetate axial;
- către întrefier sunt creștături uniform distribuite;
- înfășurarea statorică, realizată din conductor de cupru, este de tip repartizat.



**Miez  
magnetic**



**Infasurare**

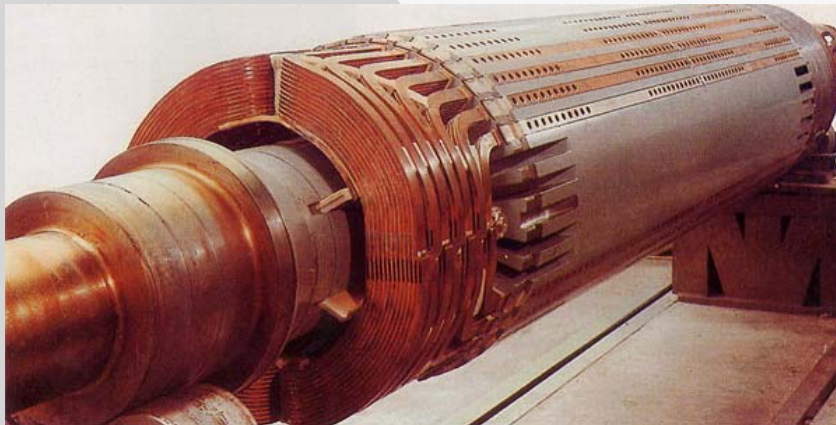
De regulă, statorul este INDUSUL mașinii sincrone.

## *Elemente constructive*

Rotorul mașinii sincrone poate fi construit în două variante: rotor cilindric (sau cu poli înecați) și rotor cu poli aparenti.

Rotorul cilindric are creștături (similare celor de pe stator) în care este plasată o înfășurare de tip repartizat.

Rotorul cu poli aparenti este prevăzut cu piese feromagnetice (asemănătoare cu polii inductori de la mașina de c.c.) pe care sunt plasate înfășurări de tip concentrat.



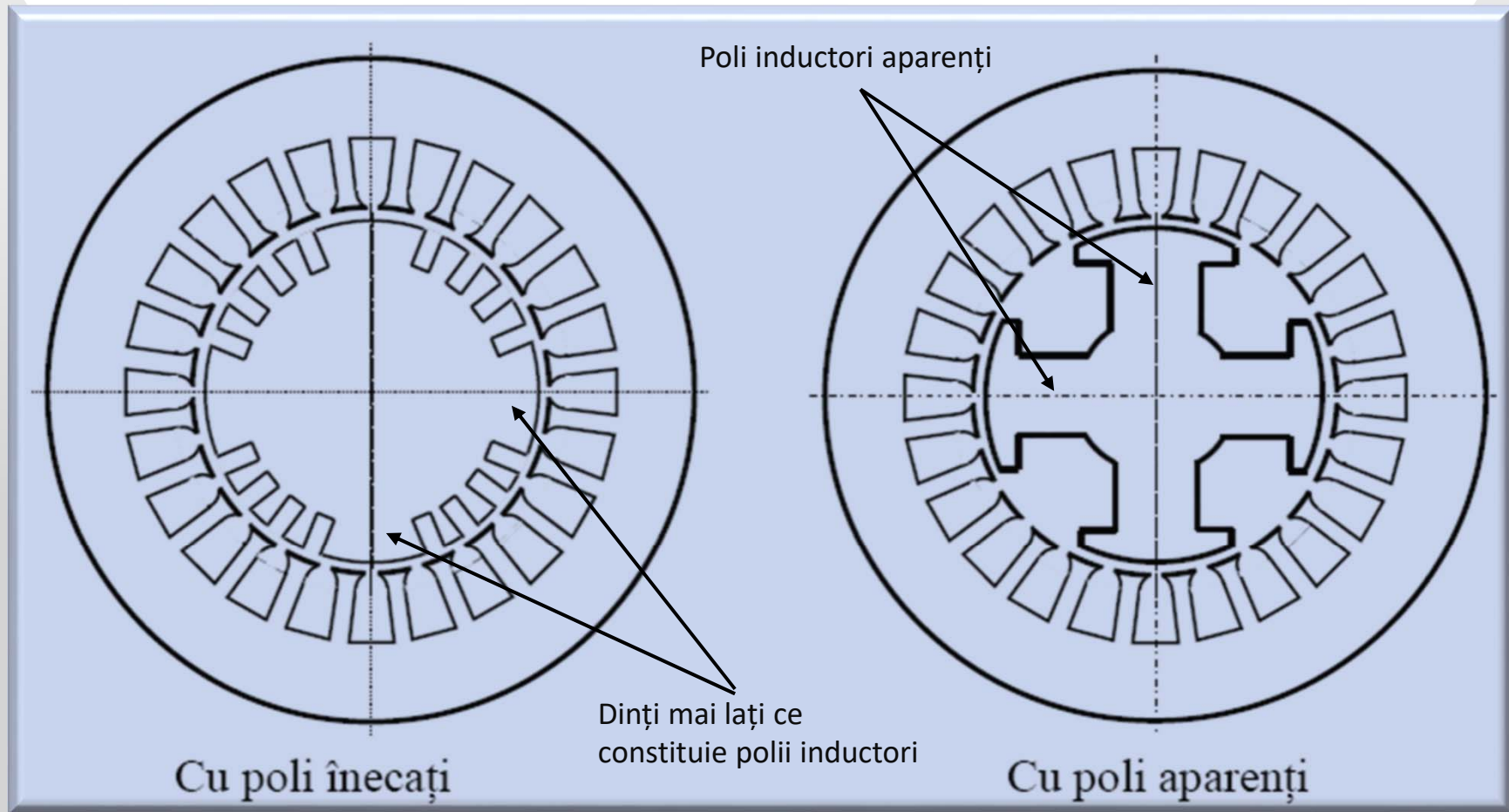
Rotor cu poli inecati



Rotor cu poli aparenti

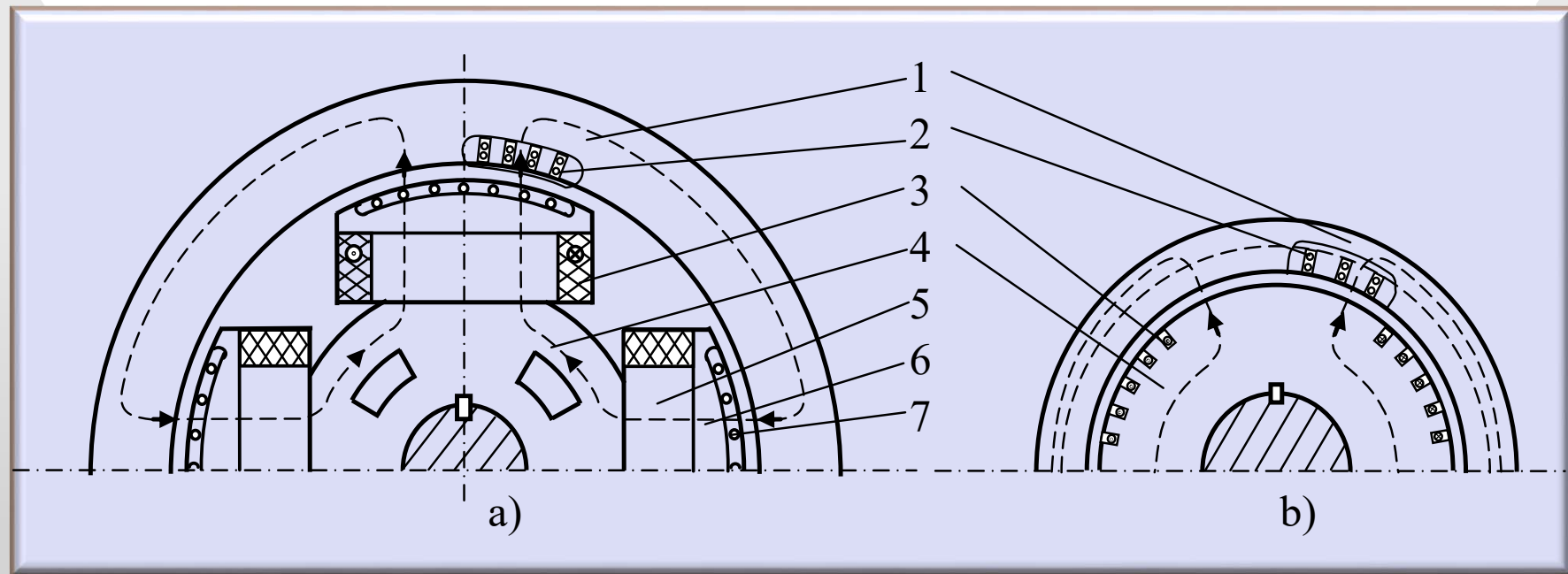


## Tipuri de mașini sincrone



- **Masina cu poli inecati – are intrefier cvasi-constant**
- **Masina cu poli aparenti – are intrefier variabil**

## Tipuri de mașini sincrone



**Elemente constructive de bază ale mașinilor sincrone:  
a) cu poli aparenti, b) cu poli înecați.**

**1. Jug statoric, 2. Înfășurare statorică (indusă), 3. Înfășurare rotorică (inductoare), 4. Jug rotoric, 5. Pol rotoric, 6. Piesă polară, 7. Înfășurare de pornire/amortizare**

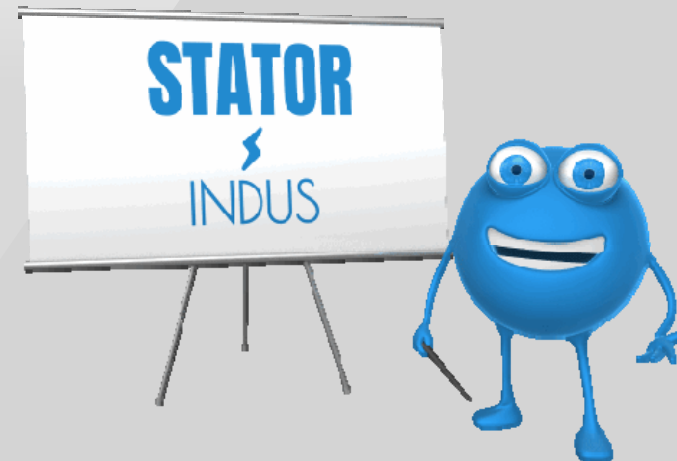
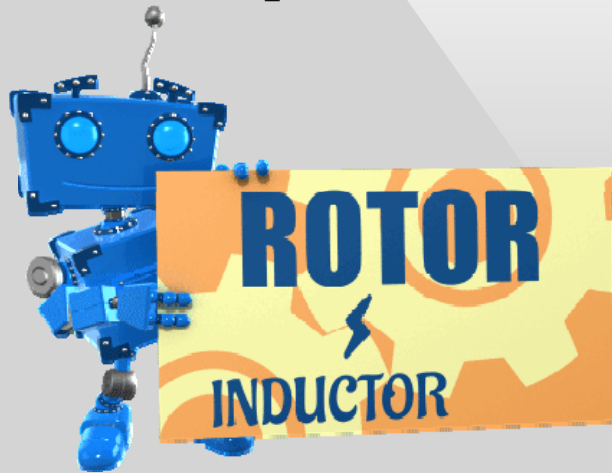


## Înfășurarea rotorică

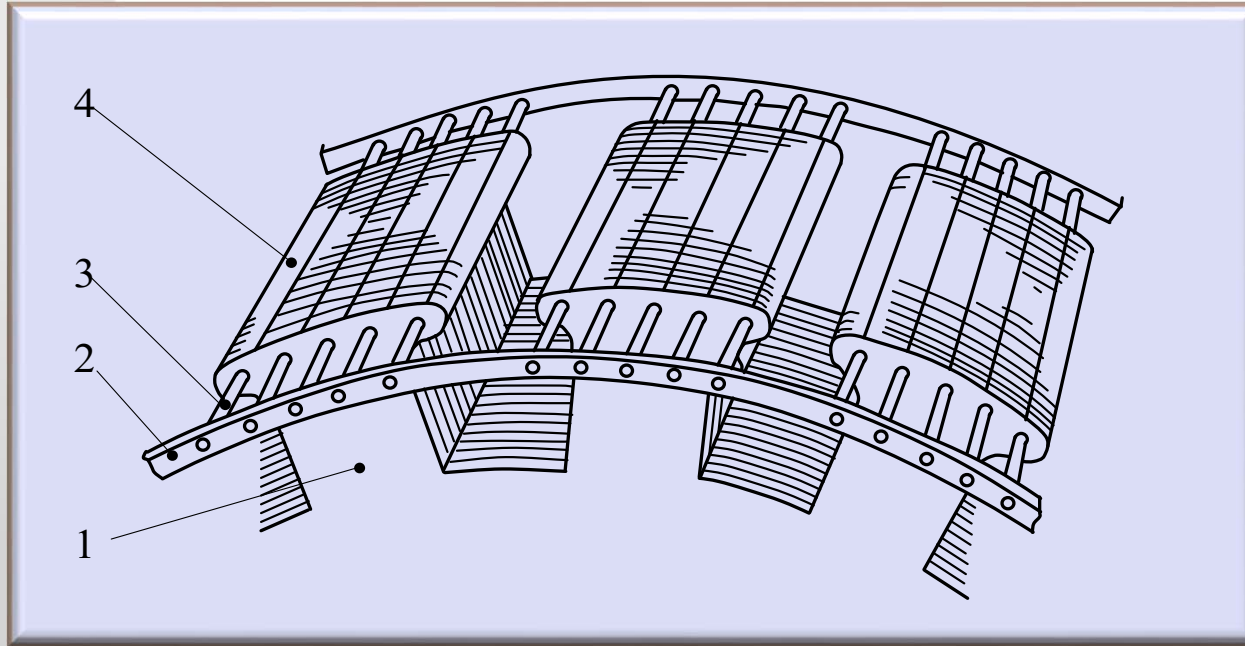
Indiferent de tipul de rotor, înfășurarea rotorică este alimentată în curent continuu. Drept urmare ea creează un câmp magnetic *constant* ca amplitudine și *fix* în spațiu.

Sensul curenților prin înfășurări determină polaritatea alternantă a polilor mașinii.

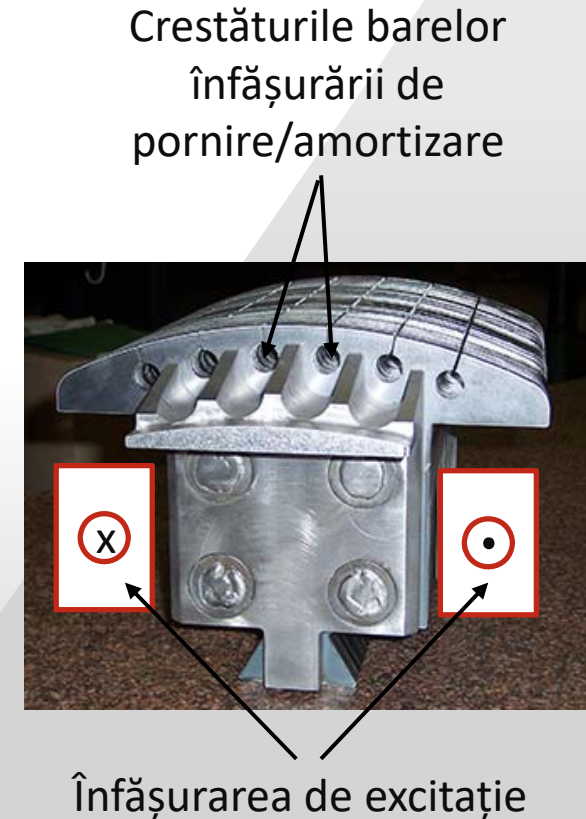
Câmpul creat de înfășurarea rotorică reprezintă câmpul inductor iar rotorul reprezintă inductorul mașinii.



## Înfășurarea de pornire (de amortizare)



1- Miez pol rotoric, 2 – Inel de scurtcircuitare,  
3 – Bară de colivie, 4 – Piesă polară



Înfășurarea de pornire este plasată în creștături practicate în piesele polare ale polilor inductori rotorici. Ea permite pornirea mașinii sincrone în asincron atunci când funcționează ca motor.

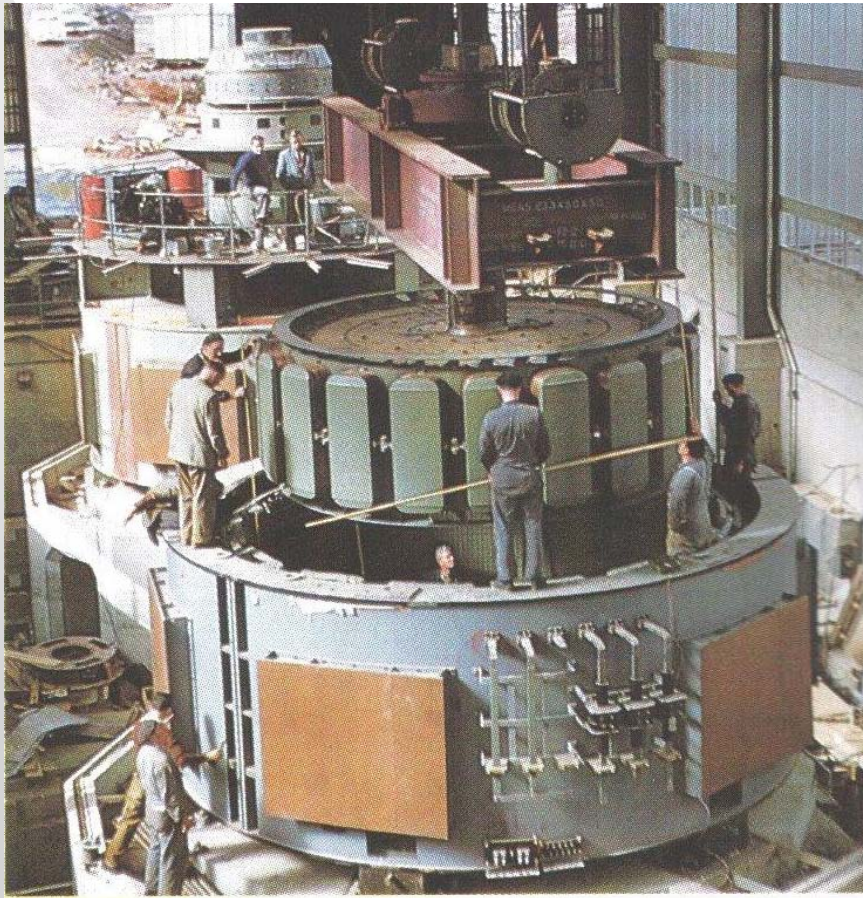
Joacă rol și de înfășurare de amortizare atât în regim de motor cât și de generator.



## Tipuri de generatoare sincrone

Generator sincron utilizat in termocentrale  
(agentul de antrenare este aburul)

### Turbogenerator



### Hidrogenerator

Generator sincron utilizat in  
hidrocentrale (agentul de antrenare este  
apa)

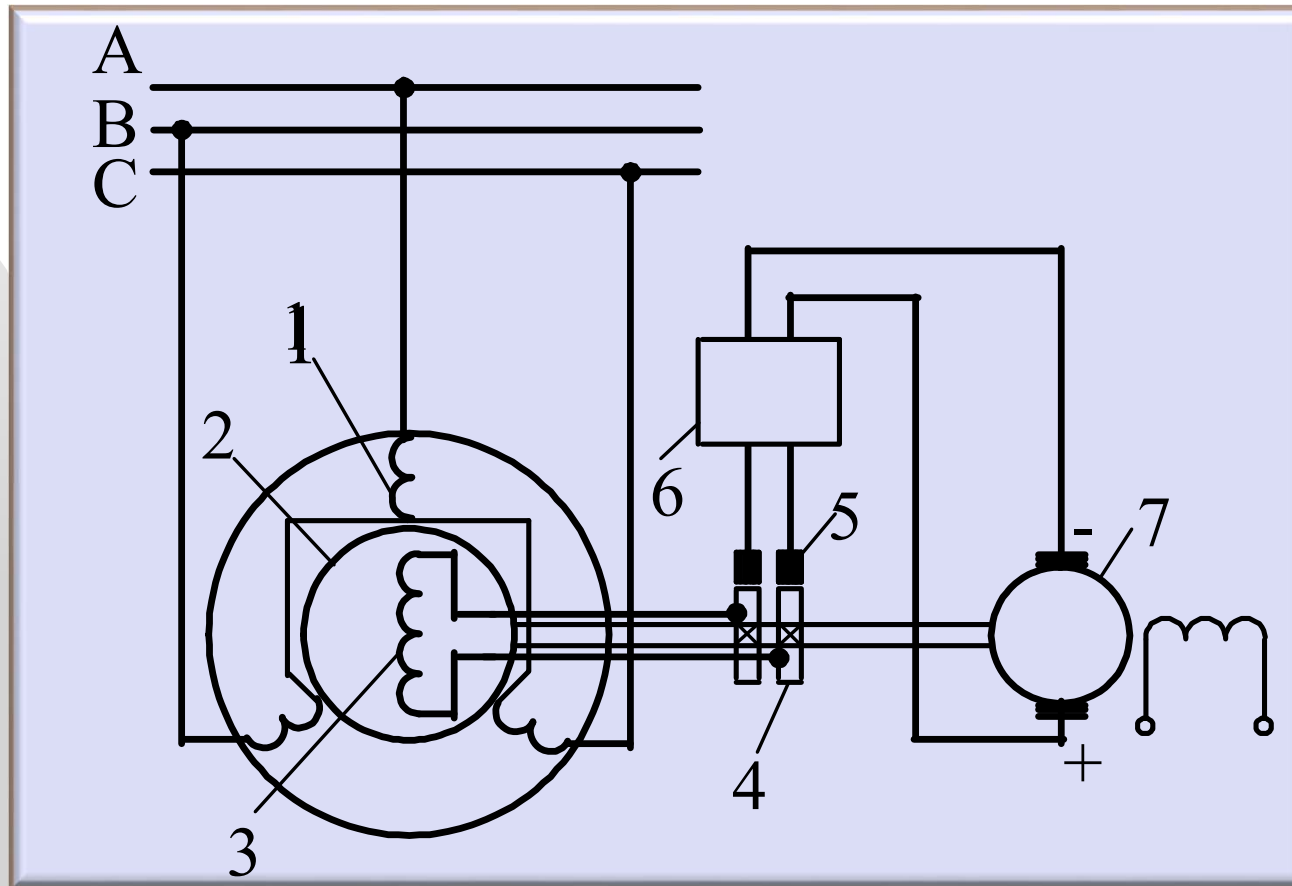


## *Sisteme de excitație*

Sistemul de excitație este cel de-al treilea element vital al mașinii sincrone.

El furnizează tensiunea continuă necesară alimentării înfășurării inductoare, rotorice.

## *Sisteme de excitație cu excitatrice*



- 1. Înfășurare statorică, 2. Rotor generator sincron, 3. Înfășurare de excitație, 4. Inele rotorice, 5. Perii, 6. Regulator de tensiune, 7. Excitatoare.**

## *Sisteme de excitație cu excitatrice*

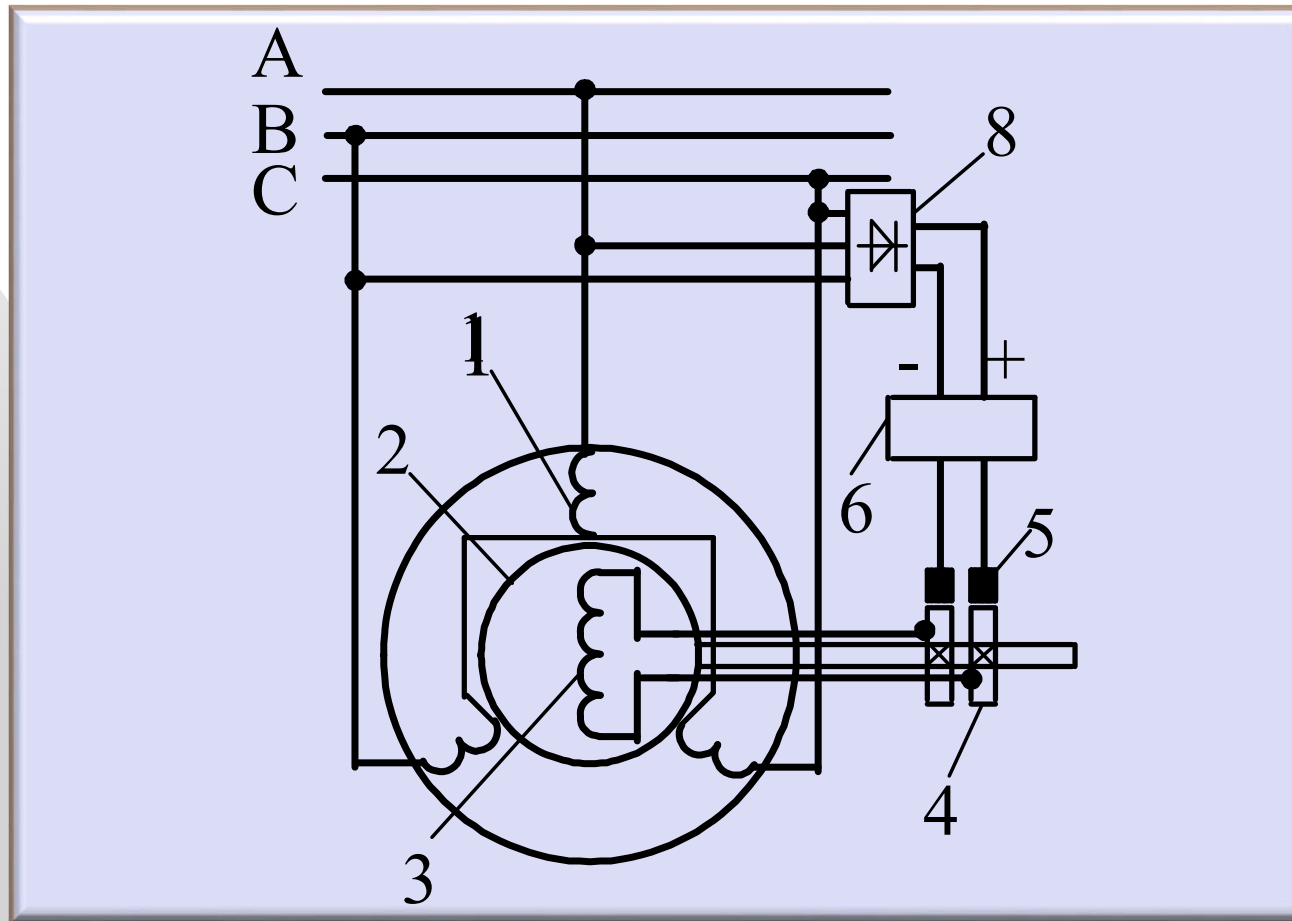
Sursa de tensiune continuă este reprezentată de un generator de c.c. (cu excitație separată sau derivație). Acesta este fixat pe axul mașinii sincrone.

Alimentarea înfășurării rotorice a generatorului sincron se face prin intermediul sistemului inele(4)-perii(5).

Regulatorul de tensiune (6) comandă menținerea sau modificarea curentului de excitație în funcție de nevoile sistemului de acționare.



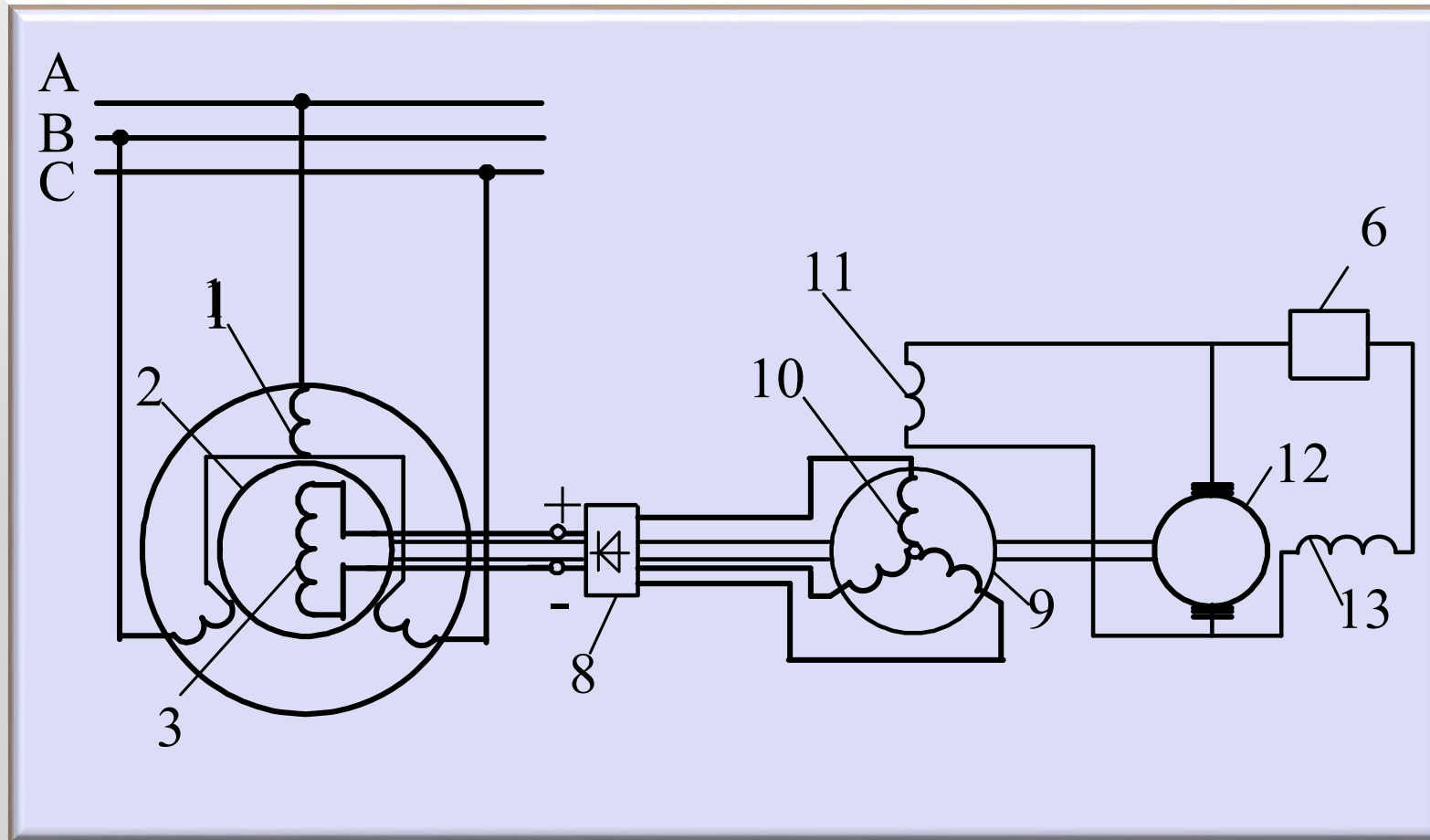
## Sisteme de excitație cu redresor



**1. Înfășurare statorică, 2. Rotor generator sincron, 3. Înfășurare de excitație, 4. Inele rotorice, 5. Perii, 6. Regulator de tensiune, 8. Redresor.**

Atunci când mașina sincronă este conectată la o rețea, tensiunea continuă necesară înfășurării statorice este obținută simplu, prin redresarea tensiunii rețelei.

## Sisteme de excitație cu excitatrice și subexcitatrice



1.Înfășurare statorică, 2. Rotor generator sincron, 3. Înfășurare de excitație, 6. Regulator de tensiune, 8. Redresor, 9. Rotor excitatoare, 10. Înfășurare indusă a excitatoarei, 11. Înfășurare de excitație a excitatoarei, 12.Subexcitatoare, 13. Înfășurare de excitație a subexcitatoarei.

## *Sisteme de excitație cu excitatrice si subexcitatrice*

Sistemul de excitație este format din doua mașini plasate pe axul mașinii sincrone:

- un generator de c.c cu excitație derivație (12) – reprezintă subexcitatricea;
- un generator sincron in construcție inversată : excitația (11) este plasată pe stator iar înfășurarea indusă (10), de c.a., este plasată pe rotor. Acesta reprezintă excitatricea.

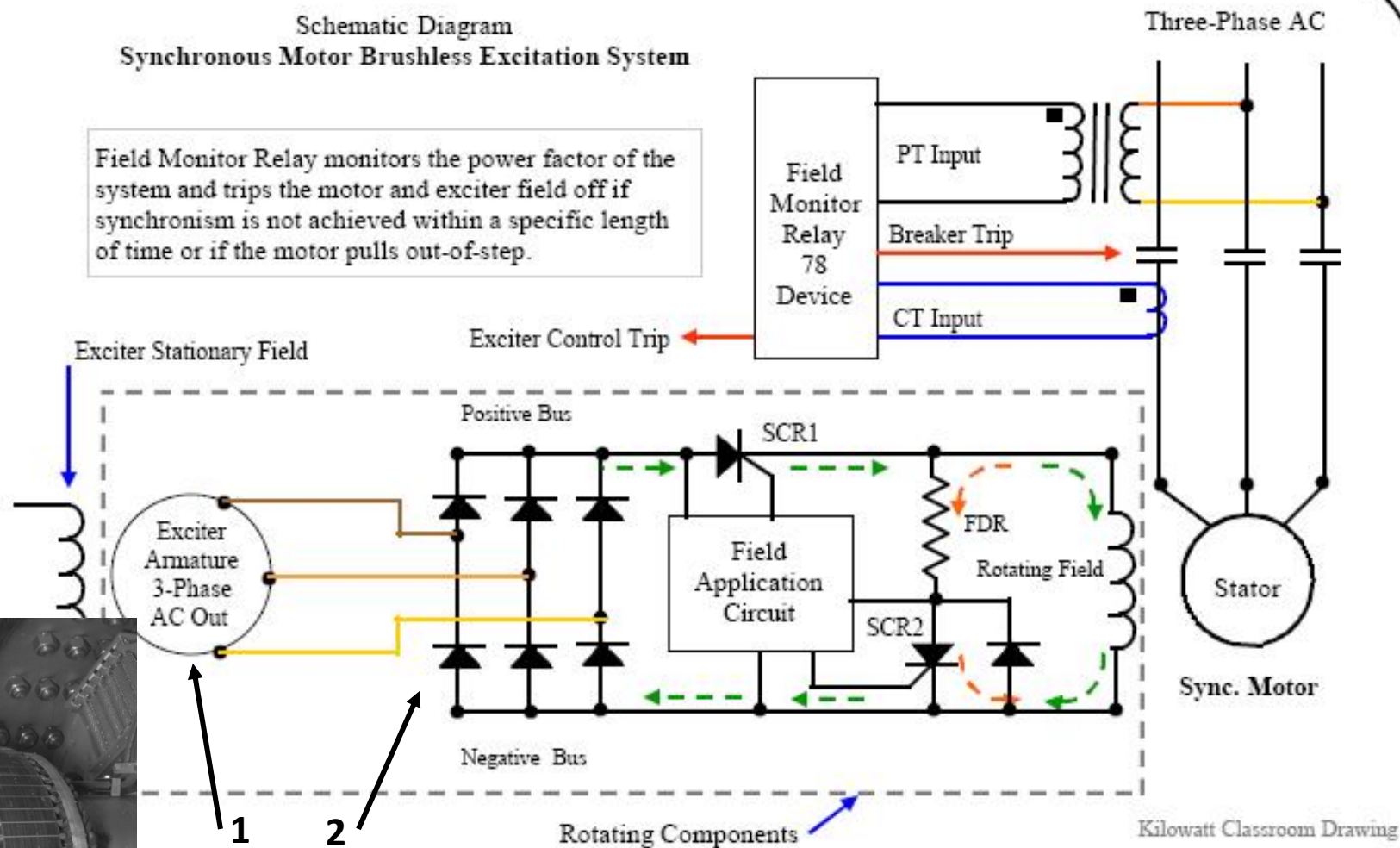
Subexcitatricea produce tensiunea continuă necesară alimentării excitației excitatricei. Tensiunea rezultată la bornele indusului excitatricei (care este o tensiune trifazată) este redresată si aplicată excitației generatorului sincron.

Comanda curentului de excitație a generatorului sincron țintă se face de pe circuitul de excitație al subexcitatricei, adică pe un circuit de curent mic.

# Sisteme de excitație fără perii (brushless)

Schematic Diagram  
Synchronous Motor Brushless Excitation System

Field Monitor Relay monitors the power factor of the system and trips the motor and exciter field off if synchronism is not achieved within a specific length of time or if the motor pulls out-of-step.



Sistem de excitație fără perii cu diode rotative și excitatoare sincronă în construcție inversată

## *Sisteme de excitație fără perii (brushless)*

Pe axul mașinii sincrone principale se află o a doua mașină sincronă (de putere mai mică) în construcție inversată: înfășurarea de c.c. este plasată pe stator iar înfășurarea trifazată pe rotor – poziția 1 pe slide-ul anterior.

Această mașină va funcționa în regim de generator sincron producând o tensiune la bornele înfășurării trifazate aflată pe rotor.

Tensiunea alternativă trifazată este apoi redresată de puntea redresoare 2 care este plasată de asemenea pe rotor.

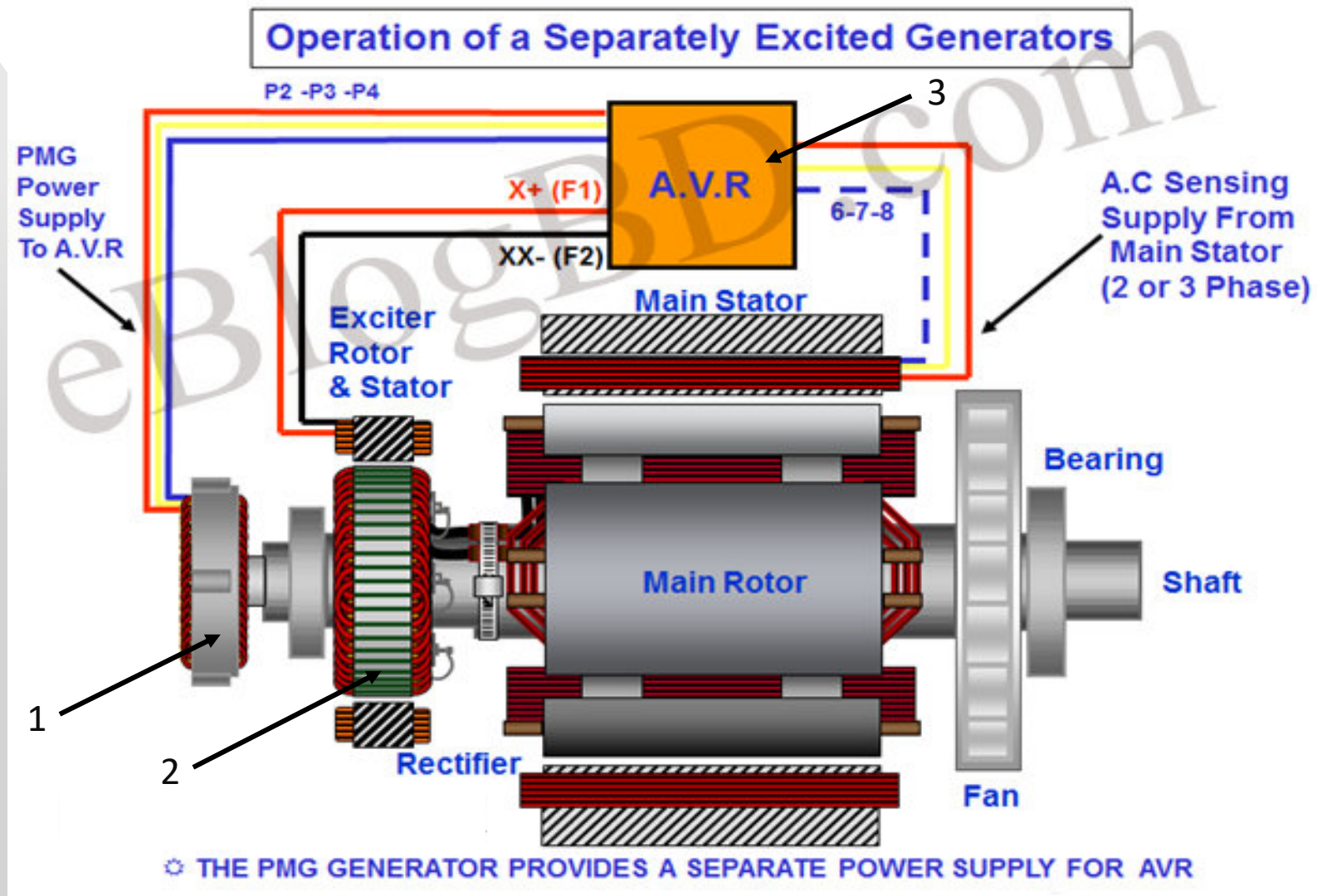
Tensiunea continuă astfel obținută alimentează înfășurarea de excitație a mașinii sincrone din acționarea electrică principală.

În această structură nu mai există inele și perii pentru alimentarea excitației mașinii sincrone principale.



*Această soluție necesită existența unei surse externe de c.c.*

# Sisteme de excitație cu doua mașini sincrone



PMG(1)-generator sincron cu magneți permanenți; Exciter rotor&stator(2)-excitatricea principală (mașină sincronă inversată); AVR(3)-regulator automat de tensiune.



## *Sisteme de excitație cu doua mașini sincrone*

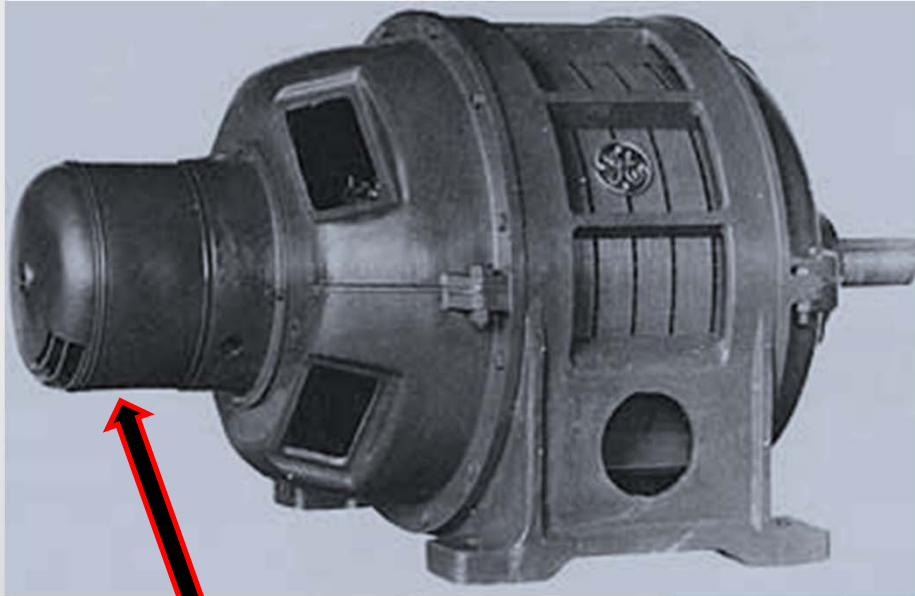
Sistemul de excitație este format din doua mașini plasate pe axul mașinii sincrone:

- un generator sincron cu magneți permanenți (1). Aceasta furnizează o tensiune cu care se alimentează „regulatorul automat de tensiune” (3).
- un generator sincron (2), în construcție inversată (cu excitație pe stator) ce reprezintă excitatricea propriu-zisă. Excitația acestuia este alimentată de la regulatorul de tensiune, iar el furnizează tensiunea pentru alimentarea generatorului sincron țintă.

Este necesar, în plus, un sistem de redresare format dintr-o punte de diode (deoarece sunt plasate pe rotor se mai numesc „dioda rotitoare”).

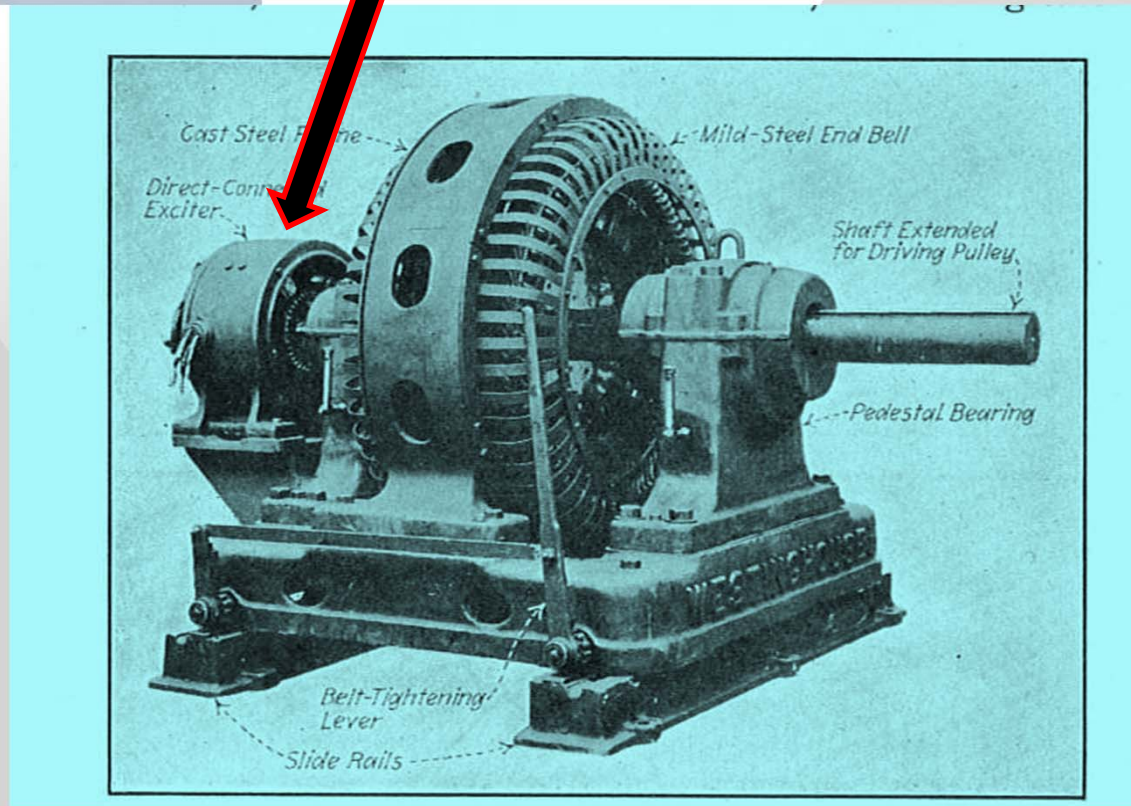


*Această soluție elimină existența unei surse externe de c.c.*

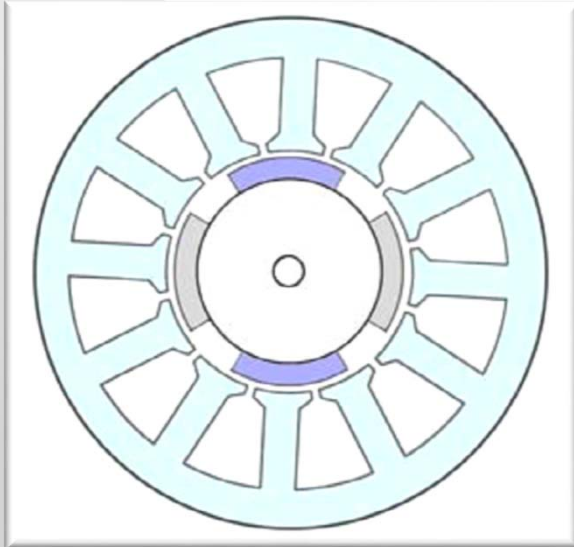


**Excitatrice incorporata**

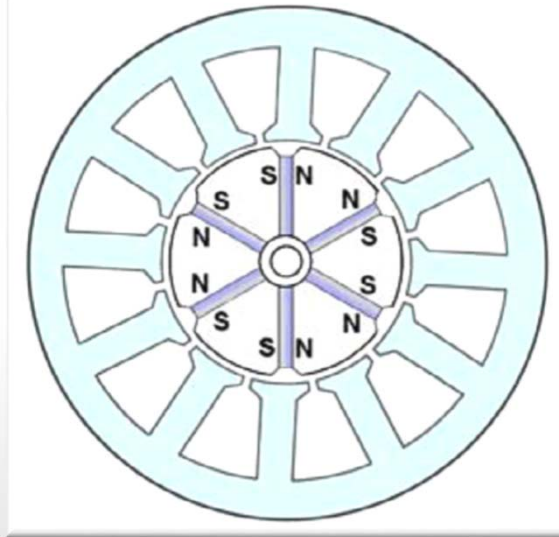
**Excitatrice separata**



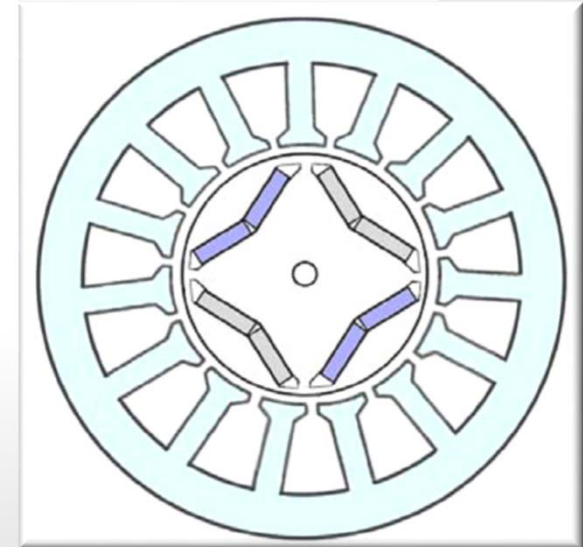
## *Sisteme de excitație cu magneți permanenți*



**Surface mounted  
(pe suprafață)**



**Spoke PMs  
(tip spiță)**



**Interior PMs  
(interiori)**

Sistemul inductor electromagnetic este înlocuit cu magneți permanenți. Soluția este viabilă pentru mașini de putere mică și medie.

# Regimuri de funcționare



Generator

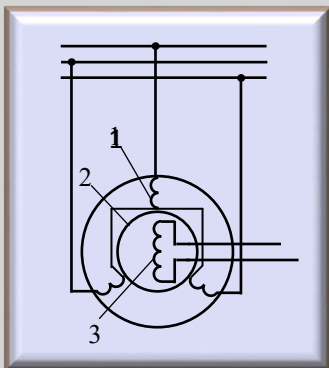
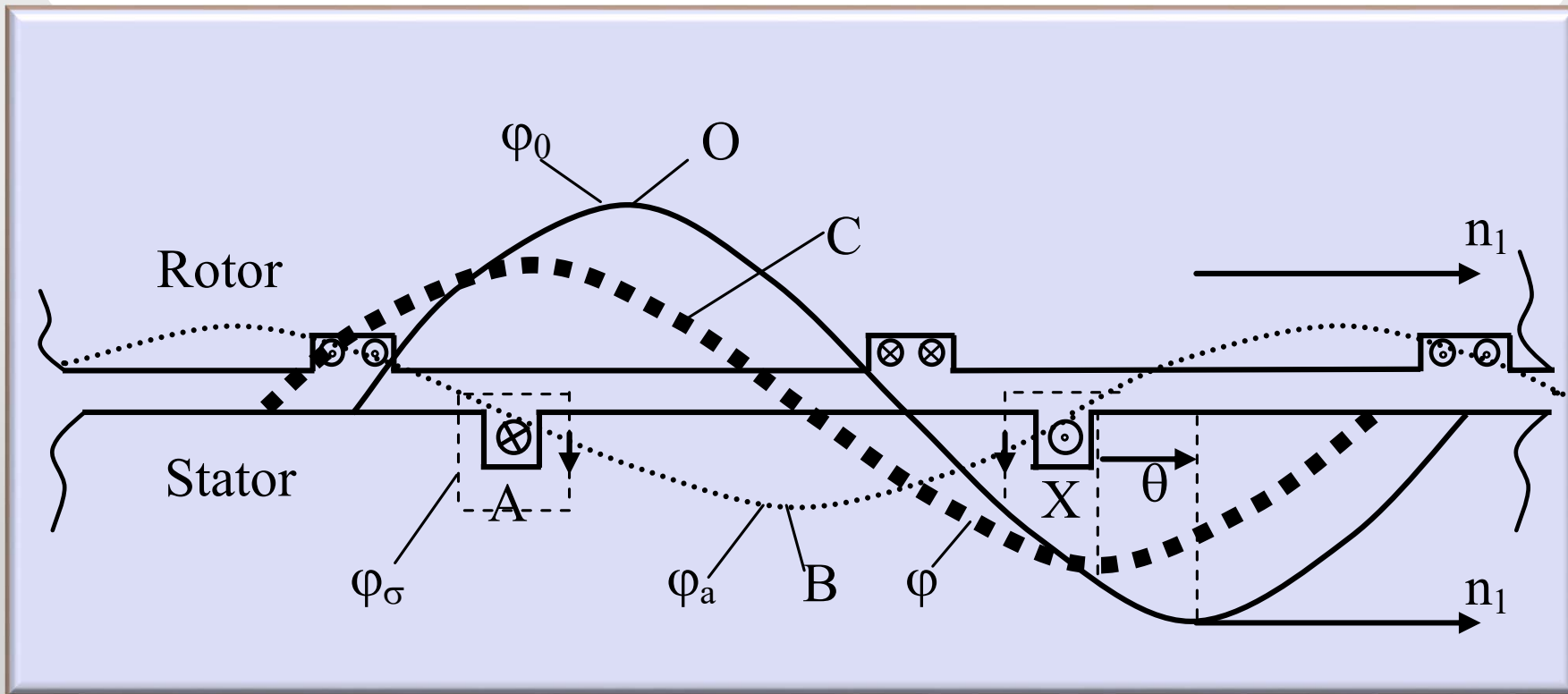


Motor

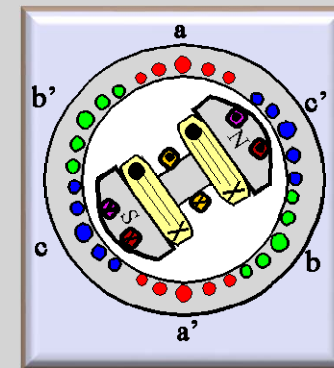


Compensator

# Principiul si ecuațiile de funcționare ale generatorului sincron cu poli înecați



- $\varphi_0$  - flux inductor
- $\varphi_a$  - flux de reacție
- $\varphi$  - flux rezultat
- $\varphi_\sigma$  - flux de dispersie



## ***Principiul de funcționare***

- 1. Prin alimentarea înfășurării de excitație de pe rotor de la o sursă de tensiune continuă ia naștere un câmp magnetic inductor, fix în spațiu și constant ca amplitudine -  $\Phi_0$**
- 2. Antrenarea rotorului de către agentul sau mașina de antrenare transformă câmpul inductor fix într-unul învârtitor, deci variabil pentru înfășurarea statorică.**
- 3. Conform legii inducției electromagnetice, în înfășurarea statorică se induce tensiune (apare la bornele mașinii un sistem trifazat de tensiuni).**
- 4. Dacă la bornele statorului se conectează o sarcină, prin înfășurarea statorică se stabilește un sistem trifazat de curenți. Acest sistem creează un câmp de reacție, ce este un câmp învârtitor -  $\Phi_a$**
- 5. Cele două câmpuri, inductor și de reacție, se rotesc în același sens și cu aceeași viteză. Ele se compun dând naștere câmpului rezultat -  $\Phi$**
- 6. Decalajul unghiular dintre câmpul inductor și câmpul rezultat reprezintă UNGHIUL INTERN  $\theta$  al mașinii**



**1+2. Câmp magnetic învârtitor in întrefier (creat pe cale mecanică prin rotirea rotorului):**

$$b_0(\alpha, t) = B_1 \sin(\omega t - p\alpha)$$

- unde fluxul fascicular al acestui câmp are expresia:

$$\varphi_0 = \Phi_{01} \sin \omega t$$

**3. Tensiunea indusă in înfășurarea statorică (defazată in urma fluxului cu  $\pi/2$ )**

$$\begin{aligned} e_{0A} &= -w_1 \cdot k_{w1} \cdot \frac{d\varphi_0}{dt} = -w_1 \cdot k_{w1} \cdot \omega \cdot \Phi_{01} \cos \omega t = \\ &= 2\pi f \cdot w_1 \cdot k_{w1} \cdot \Phi_{01} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned}$$

- având valoarea efectivă

$$E_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot w_1 \cdot k_{w1} \cdot \Phi_{01} = 4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot k_{w1} \cdot \Phi_{01}$$

**4a. Se conectează la bornele generatorului o sarcină activ-inductivă ( ce determină defazajul  $\beta$ )**

$$i_A = \sqrt{2} \cdot I_a \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \beta\right)$$

- Analog pentru fazele BY si CZ

$$\begin{cases} e_{0B} = E_0\sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_{0C} = E_0\sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad \begin{cases} i_B = I_a\sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \beta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_C = I_a\sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \beta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases}$$

4b. Sistemul trifazat de curenți produce un câmp magnetic învârtitor (de reacție)

$$b_a(\alpha, t) = B_{a1} \sin\left(\omega t - p\alpha - \frac{\pi}{2} - \beta\right)$$

- fluxul fascicular al acestui câmp

$$\varphi_a = \phi_{a1} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \beta\right)$$

- si tensiunea indusă in înfășurarea statorică

$$e_a = -w_1 \cdot k_{w1} \cdot \frac{d\varphi_a}{dt} = E_a\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \pi - \beta)$$

- având valoarea efectivă

$$E_a = 4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot k_{w1} \cdot \phi_{a1}$$

5. Fluxul rezultat

$$\underline{\phi} = \underline{\phi}_0 + \underline{\phi}_a$$

## Diagrama fazorială

$\Phi_0$  - flux inductor

$\Phi_a$  - flux de reacție

$\Phi$  - flux rezultat

$E_0$  - tensiunea indusa de fluxul inductor

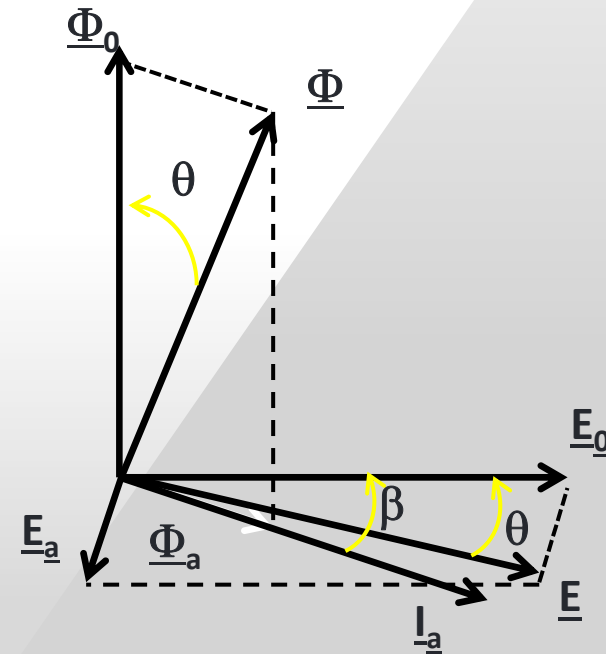
$E_a$  - tensiunea indusa de fluxul de reacție

$E$  - tensiunea indusa rezultanta

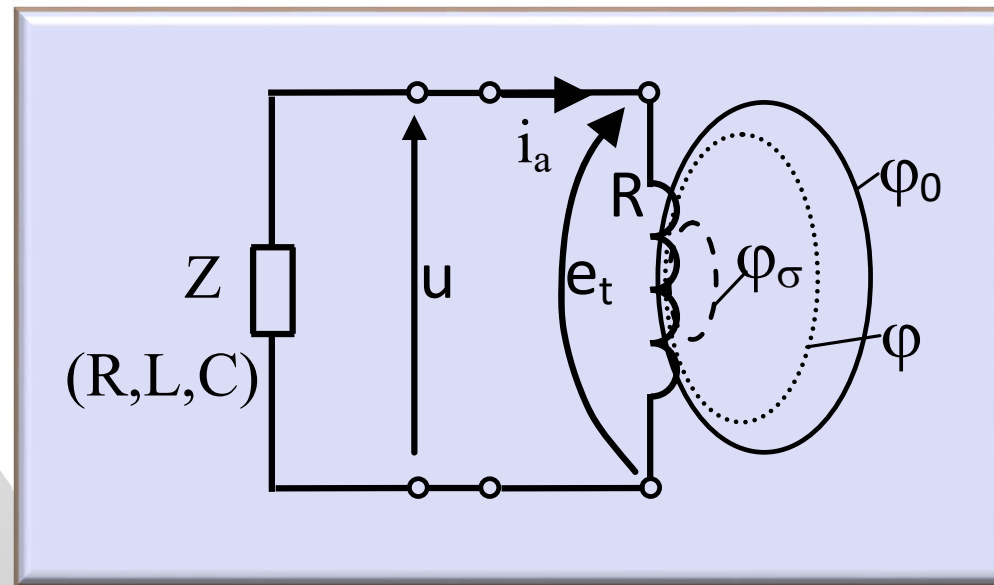
$I_a$  - curentul statoric

$\theta$  - unghiul intern

$\beta$  - unghiul de defazaj dictat de tipul sarcinii



## Schema echivalentă



$$u + R \cdot i_a = e_t$$

unde  $e_t$  este tensiunea indusă de  $\phi_0$ ,  $\phi_a$  și  $\phi_\sigma$

$$u + R \cdot i_a = -w_1 \cdot k_{w1} \cdot \frac{d\phi_0}{dt} - L_a \cdot \frac{di_a}{dt} - L_\sigma \cdot \frac{di_a}{dt}$$

$$\underline{U} + R \cdot \underline{I}_a = -j\omega \cdot w_1 \cdot k_{w1} \cdot \frac{\phi_0}{\sqrt{2}} - j\omega \cdot L_a \cdot \underline{I}_a - j\omega \cdot L_\sigma \cdot \underline{I}_a$$

dar 
$$j\omega \cdot w_1 \cdot k_{w1} \cdot \frac{\underline{\Phi}_0}{dt} = -\underline{E}_0$$

$$\underline{U} + R \cdot \underline{I}_a + j(\omega \cdot L_a + \omega \cdot L_\sigma)\underline{I}_a = \underline{E}_0$$

dar 
$$\omega \cdot L_a = X_a$$

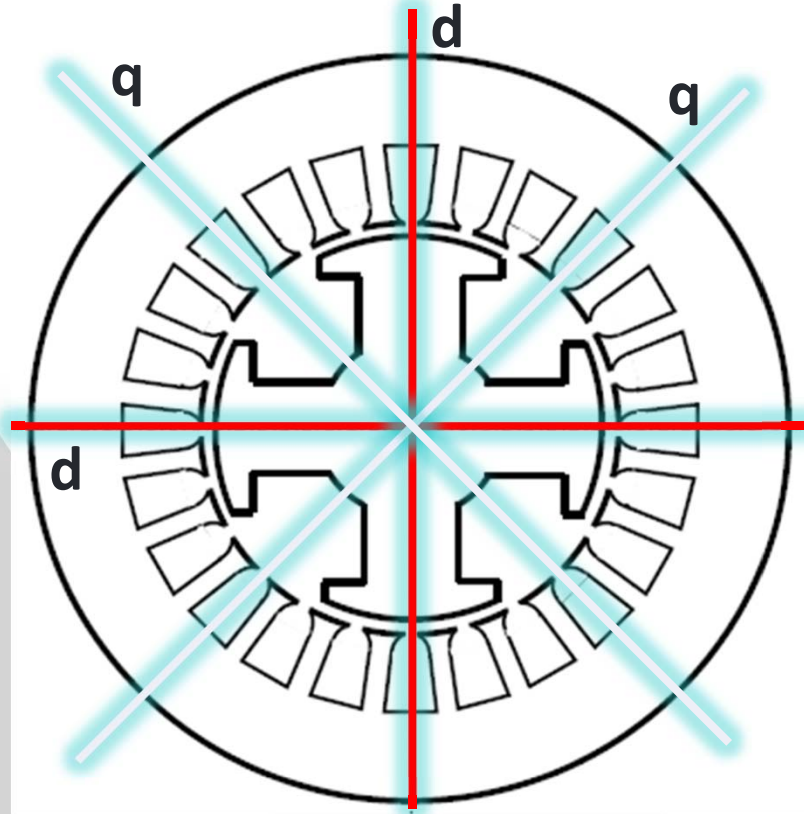
$$\omega \cdot L_\sigma = X_\sigma$$

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + R \cdot \underline{I}_a + j(X_a + X_\sigma)\underline{I}_a$$

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + R \cdot \underline{I}_a + jX_s \cdot \underline{I}_a$$

unde  $X_s = X_a + X_\sigma$  reprezintă reactanța sincronă a mașinii

## *Principiul si ecuațiile de funcționare ale generatorului sincron cu poli aparenti*

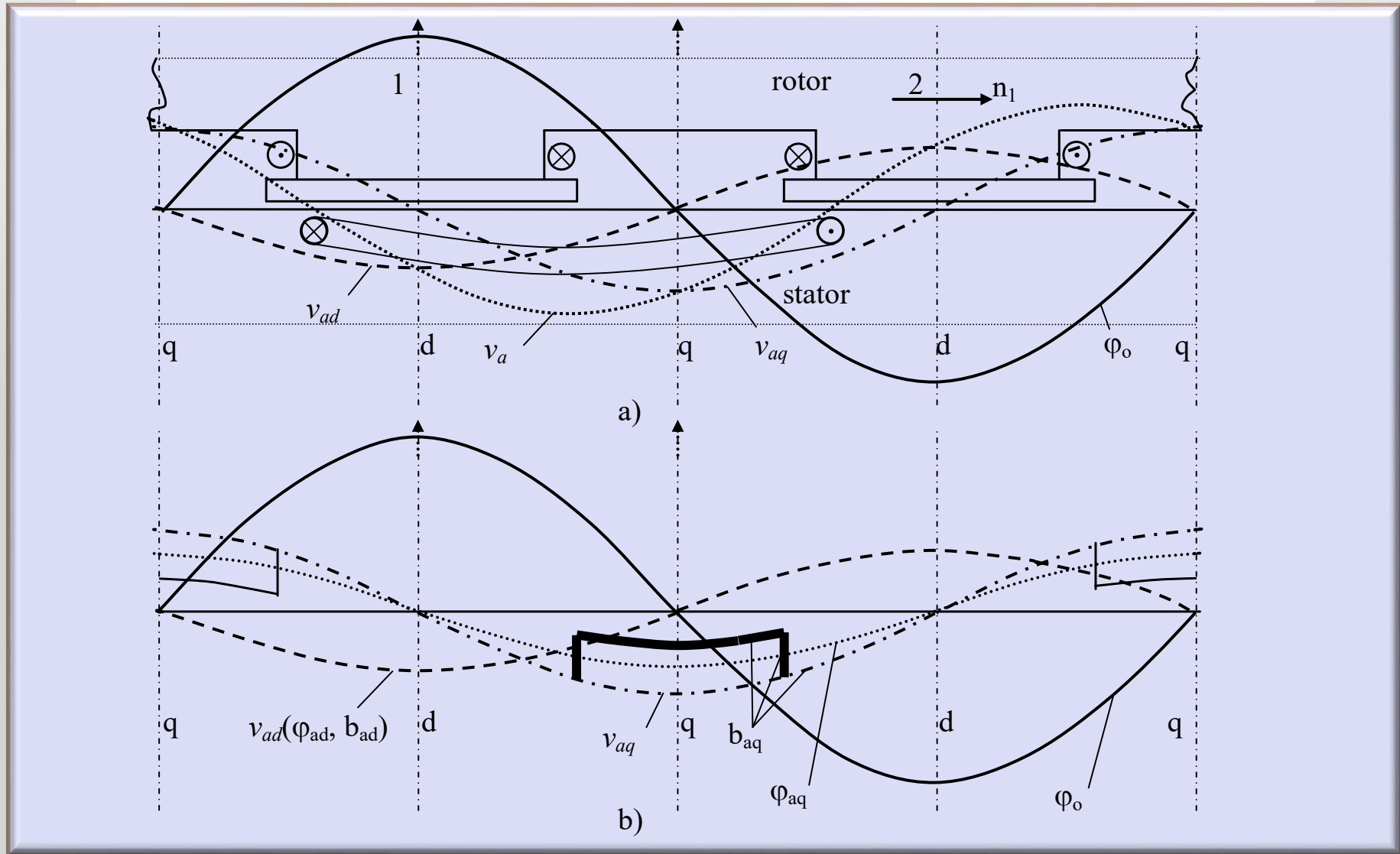


**Există două tipuri de axe de simetrie:**

- **Axa d – axa longitudinală (axa polilor)**
- **Axa q – axa transversală (axa interpolară)**



# Generator sincron cu poli aparenti funcționând în sarcină activ-inductivă



## ***Principiul de funcționare***

I. Ca și în cazul generatorului cu poli înecați, câmpul inductor induce tensiune în înfășurarea rotorică. Câmpul de reacție, caracterizat de această dată de tensiunea magnetică  $v_a$ , este de asemenea o undă sinusoidală. Datorită neuniformității întrefierului, câmpul din întrefier nu este sinusoidal dar poate fi descompus după cele două axe de simetrie, în două componente sinusoidale,  $\varphi_{ad}$  și  $\varphi_{aq}$

II. Câmpurile magnetice din întrefier, create de cele două unde sunt diferite. Distribuția fluxului  $\varphi_{ad}$  este aproximativ sinusoidală în timp ce fluxul  $\varphi_{aq}$  este mult diminuat în axa interpolară (aproape de valoarea zero – zona îngroșată de pe figură).

1. Prin rotirea rotorului (a cărui înfășurare este alimentată în c.c.), câmpul magnetic fix devine unul învârtitor; inducția în întrefier și fluxul fascicular au expresiile (identice cazul anterior):

$$b_0(\alpha, t) = B_1 \sin(\omega t - p\alpha) \qquad \varphi_0 = \Phi_{01} \sin \omega t$$

2. Conform legii inducției electromagnetice, tensiunea indusă într-o fază statorică este defazată în urma fluxului cu  $\pi/2$ :

$$e_{0A} = E_0 \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

3. Dacă se conectează la bornele generatorului o sarcină *activ-inductivă*, atunci curentul statoric este defazat în urma tensiunii induse cu un unghi de defazaj  $\beta$ :

$$i_{0A} = \sqrt{2} \cdot I_a \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \beta\right)$$

4. Acest curent (in fapt sistem trifazat de curenți prin cele trei faze statorice) creează un câmp de reacție învârtitor. Întrucât întrefierul este neuniform, acest câmp se poate exprima prin intermediul tensiunii magnetice de reacție, a cărei variație este sinusoidală:

$$v_a(\alpha, t) = V_{am} \sin\left(\omega t - p\alpha - \frac{\pi}{2} - \beta\right)$$

Câmpul de reacție se rotește în *același sens* și cu *aceeași viteză* ca și câmpul inductor creat de rotor.

Curba de variație a inducției magnetice este însă foarte diferită de cea a tensiunii magnetice întrucât expresia inducției ține cont de lățimea întrefierului:

$$b_a(\alpha, t) = \mu_0 \cdot \frac{v_a(\alpha, t)}{\delta(\alpha)}$$

Unda sinusoidală a tensiunii magnetice se poate descompune, după cele două axe de simetrie d și q, în două componente de asemenea sinusoidale.

$$v_a = v_{ad} + v_{aq}$$

respectiv componentele de inducție  $b_{ad}$  și  $b_{aq}$ . Componenta  $b_{ad}$  păstrează o variație sinusoidală dar componenta  $b_{aq}$  are în axa q o cădere aproape de zero a amplitudinii datorită lățimii mari a întrefierului.

Descompunerea tensiunii magnetice în cele două componente după axele d și q poate fi interpretată ca o înlocuire a înfășurării de fază (având  $w_1$  spire) cu două înfășurări de fază echivalente (fiecare având tot  $w_1$  spire) care sunt parcurse de curenții  $i_{ad}$  și  $i_{aq}$  și creează fluxurile  $\varphi_{ad}$  și  $\varphi_{aq}$ . În acest caz se poate scrie:

$$w_1 \cdot i_a = w_1 \cdot i_{ad} + w_1 \cdot i_{aq} \quad i_a = i_{ad} + i_{aq}$$

## Ecuatiile de funcționare

Pentru o fază statorică, ecuația de tensiuni este:

$$u + R \cdot i_a = e_t$$

sau exprimând fiecare componentă de tensiune indusă (corespunzătoare fluxului inductor, fluxurilor create de fiecare componentă de curent statoric și fluxului de dispersie):

$$u + R \cdot i_a = -w_1 \cdot k_{w1} \cdot \frac{d\varphi_0}{dt} - L_{ad} \cdot \frac{di_{ad}}{dt} - L_{aq} \cdot \frac{di_{aq}}{dt} - L_\sigma \cdot \frac{di_a}{dt}$$

Se trece la scrierea în complex simplificat:

$$\underline{U} + R \cdot \underline{I}_a = -j\omega \cdot w_1 \cdot k_{w1} \cdot \frac{\varphi_0}{\sqrt{2}} - j\omega \cdot L_{ad} \cdot \underline{I}_{ad} - j\omega \cdot L_{aq} \cdot \underline{I}_{aq} - j\omega \cdot L_\sigma \cdot \underline{I}_a$$

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{ad} + \underline{I}_{aq}$$



dar:  $j\omega \cdot w_1 \cdot k_{w1} \cdot \frac{\phi_0}{dt} = -\underline{E}_0$  reprezintă tensiunea indusă de către fluxul inductor

întrucât:  $\omega \cdot L_{ad} = X_{ad}$        $\omega \cdot L_{aq} = X_{aq}$        $\omega \cdot L_{\sigma} = X_{\sigma}$

Ecuția de tensiuni devine:

$$\underline{U} + R \cdot \underline{I}_a + jX_{ad}\underline{I}_{ad} + jX_{aq}\underline{I}_{aq} + jX_{\sigma}\underline{I}_a = \underline{E}_0$$

$$\underline{U} + R \cdot \underline{I}_a + j(X_{ad} + X_{\sigma})\underline{I}_{ad} + j(X_{aq} + X_{\sigma})\underline{I}_{aq} = \underline{E}_0$$

$$\underline{U} + R \cdot \underline{I}_a + jX_d\underline{I}_{ad} + jX_q\underline{I}_{aq} = \underline{E}_0$$

unde  $X_d = X_{ad} + X_{\sigma}$  reprezintă reactanța sincronă longitudinală a mașinii

$X_q = X_{aq} + X_{\sigma}$  reprezintă reactanța sincronă transversală a mașinii

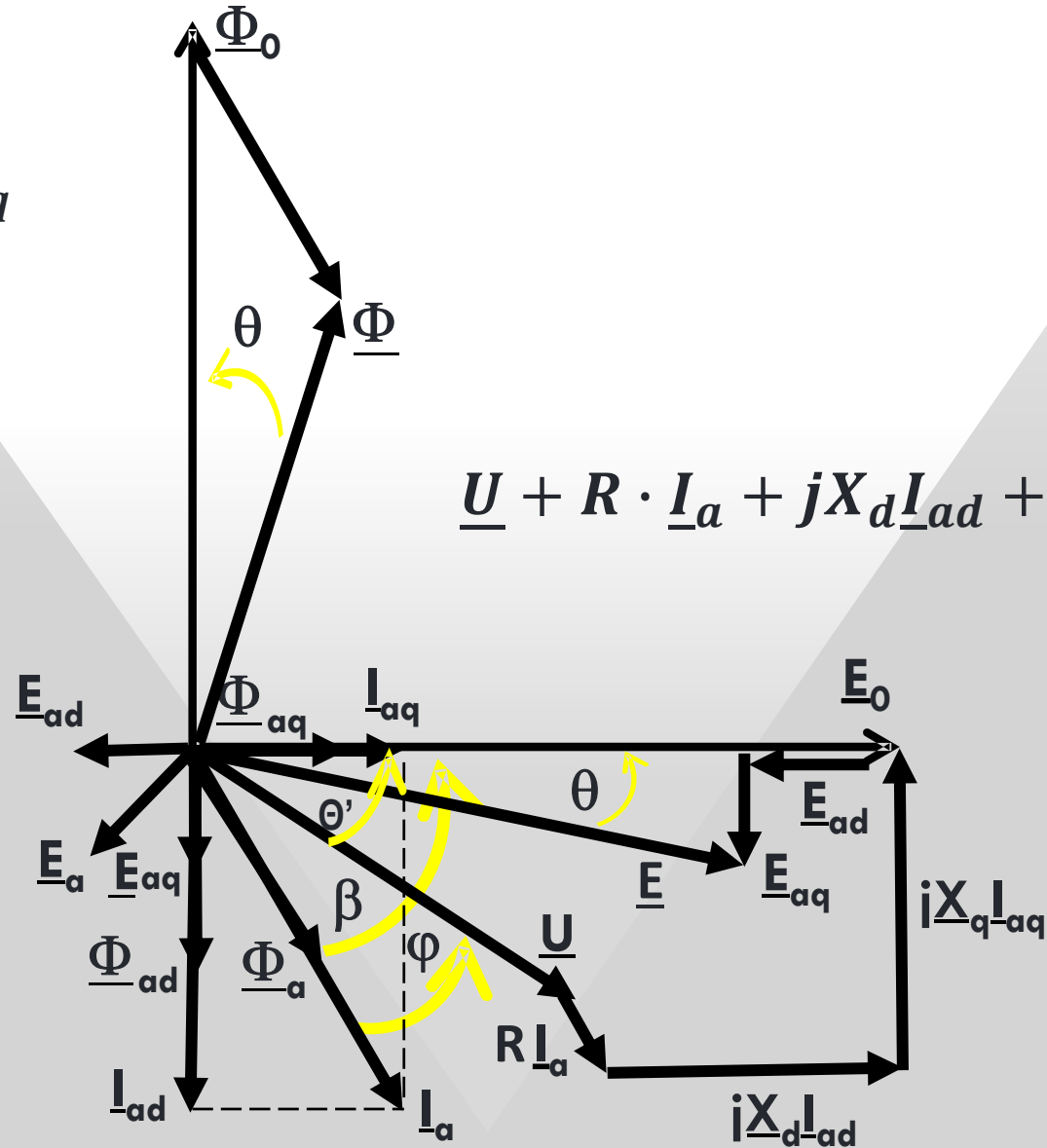
# Diagrama fazorială

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{ad} + \underline{I}_{aq}$$

$$\underline{E}_a = \underline{E}_{ad} + \underline{E}_{aq}$$

$$\underline{E} = \underline{E}_0 + \underline{E}_a$$

$$\underline{U} + R \cdot \underline{I}_a + jX_d \underline{I}_{ad} + jX_q \underline{I}_{aq} = \underline{E}_0$$



$\Phi_0$  - flux inductor

$\Phi_a$  - flux de reacție ce se descompune în cele două componente după axele d și q

$\Phi$  - flux rezultat

$E_0$  - tensiunea indusă de fluxul inductor

$E_a$  - tensiunea indusă de fluxul de reacție – se descompune în componente după axele d și q

$E$  - tensiunea indusă rezultantă

$I_a$  - curentul statoric cu cele două componente  $I_{ad}$  și  $I_{aq}$

$\theta$  - unghiul intern (între tensiunea indusă rezultantă,  $E$  și tensiunea indusă  $E_0$  de către fluxul inductor. Același unghi este și între  $\Phi_0$  și  $\Phi$ )

$\beta$  - unghiul de defazaj dictat de tipul sarcinii

$\varphi$  - unghiul de defazaj dintre tensiunea la borne și curentul prin înfășurarea statorică (desemnează factorul de putere și este variabil cu valoarea curentului de excitație)



- **Stator – indus**
- **Rotor – inductor**
- **Poli înecați**
- **Poli aparenti**
- **Sistem de excitație pentru c.c.**
- **Unghi intern**
- **Axa  $d$ ; axa  $q$**



[www.TeamEngineering.org](http://www.TeamEngineering.org)

[www.LearnEngineering.org](http://www.LearnEngineering.org)

# CURS 10

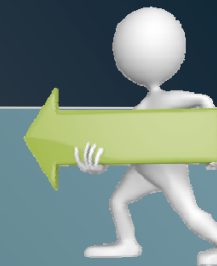
Puterea si cuplul electromagnetic la mașina sincronă  
Generatorul sincron



# CUPRINS

01

Expresia puterii si cuplului  
electromagnetic



02

Caracteristica unghiulara



03

Generatorul sincron autonom



04

Generatorul sincron conectat la  
rețea



05

Cuplarea in paralel a generatoarelor  
sincrone



# Deducerea expresiilor puterii si cuplului electromagnetic

Dacă in ecuația de tensiuni neglijam căderea de tensiune pe rezistența înfășurării statorice, adică:

$$\underline{U} + \underline{R} \cdot \underline{I}_a + jX_d \underline{I}_{ad} + jX_q \underline{I}_{aq} = \underline{E}_0 \quad \underline{R} \cdot \underline{I}_a \cong 0$$

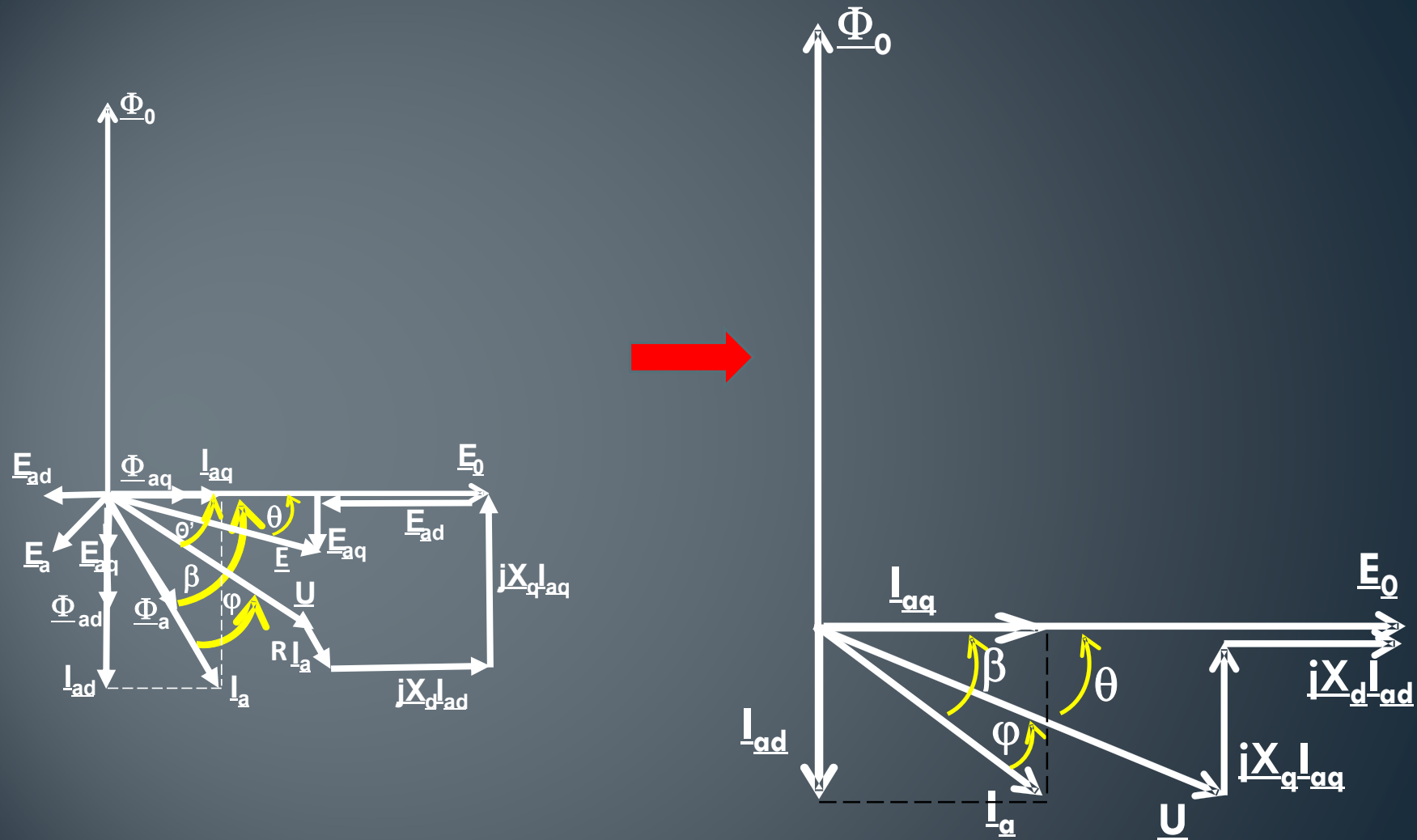

atunci ecuația simplificata devine:

$$\underline{U} + jX_d \underline{I}_{ad} + jX_q \underline{I}_{aq} = \underline{E}_0$$

iar in diagrama fazorială simplificată:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta = \theta' \\ E \cong U \end{array} \right.$$

# Diagrama fazorială (simplificata) a mașinii sincrone cu poli aparenti



Expresia generală pentru determinarea puterii electromagnetice produse în mașina sincronă este:

$$P_e = 3EI_a \cos(\widehat{E, I_a})$$

Din diagrama fazorială simplificată, unghiul dintre tensiunea indusă rezultantă  $E$  și curentul statoric  $I_a$  este  $\varphi$ , deci:

$$P_e = 3UI_a \cos \varphi$$

dar  $\varphi = \beta - \theta$

rezultă:  $P_e = 3UI_a \cos(\beta - \theta)$

respectiv:  $P_e = 3UI_a \cos \beta \cos \theta + 3UI_a \sin \beta \sin \theta$



Tot din diagrama fazorială, componentele curentului  $I_a$  au expresiile:

$$I_a \cos \beta = I_{aq}$$

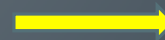
$$I_a \sin \beta = I_{ad}$$

Înlocuind în expresia anterioară, se obține:

$$P_e = 3UI_{aq} \cos \theta + 3UI_{ad} \sin \theta$$

Însă:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sin \theta = \frac{X_q I_{aq}}{U} \\ \cos \theta = \frac{E_0 - X_d I_{ad}}{U} \end{array} \right.$$



$$U \sin \theta = X_q I_{aq}$$

$$U \cos \theta = E_0 - X_d I_{ad}$$

adică:  $I_{aq} = \frac{U \sin \theta}{X_q}$  și  $I_{ad} = \frac{E_0 - U \cos \theta}{X_d}$

Deci:  $P_e = \frac{3U^2 \sin \theta \cos \theta}{X_q} + 3U \frac{E_0 - U \cos \theta}{X_d} \sin \theta$

$$P_e = \frac{3U^2 \sin \theta \cos \theta}{X_q} - \frac{3U^2 \sin \theta \cos \theta}{X_d} + \frac{3UE_0 \sin \theta}{X_d}$$

dar:  $\sin \theta \cos \theta = \frac{1}{2} \sin 2\theta$



$$P_e = \frac{3UE_0}{X_d} \sin \theta + \frac{3U^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta$$

$$\text{I. } P'_e = \frac{3UE_0}{X_d} \sin \theta$$

- componenta principală: depinde atât de excitație cât și de tensiunea la borne

$$\text{II. } P''_e = \frac{3U^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta$$

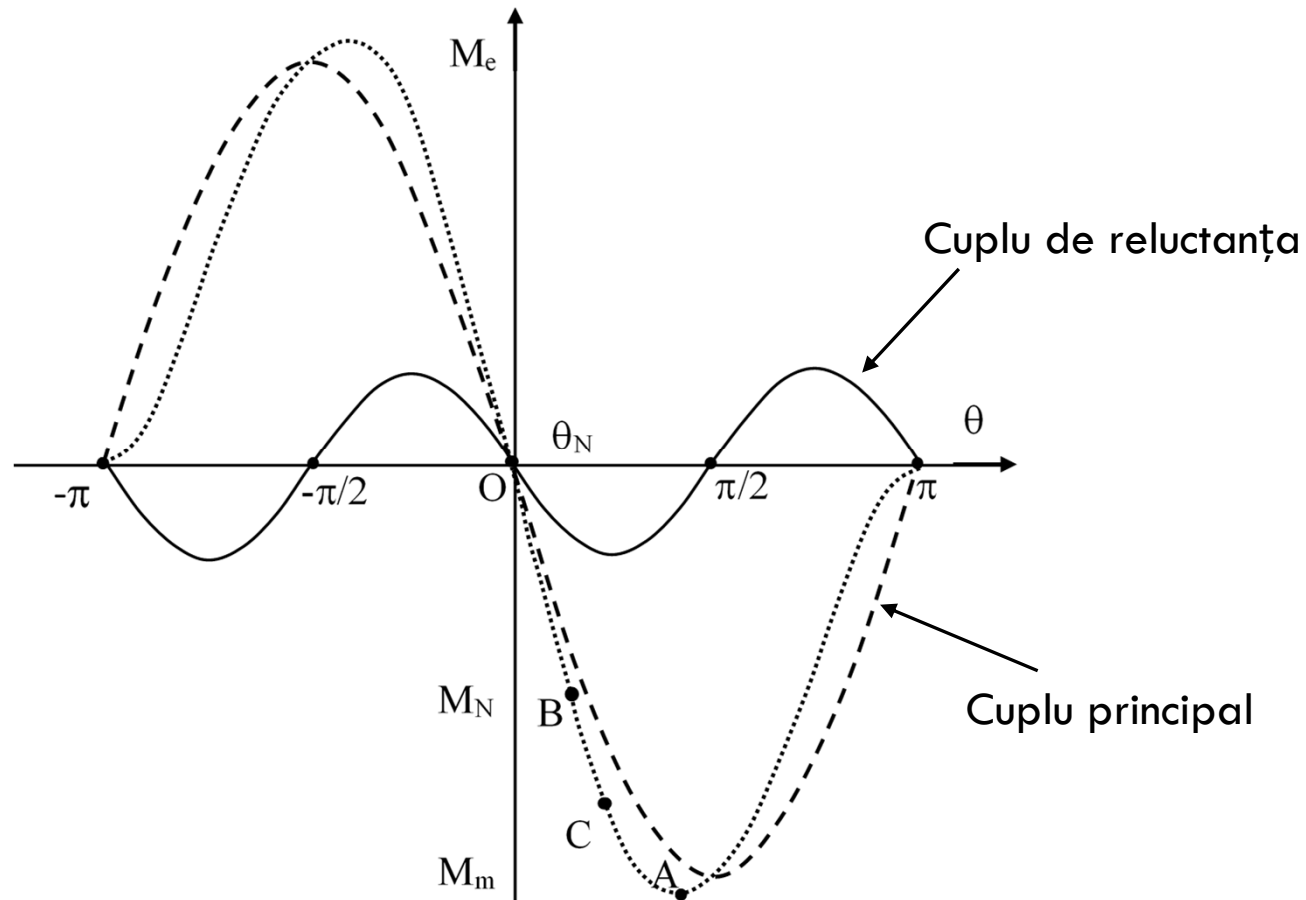
- componenta secundară (de reluctanță): există în absența excitației și este cu atât mai mare cu cât diferența dintre reactanțele sincrone longitudinală și transversală este mai mare

$$M_e = \frac{3}{\Omega} \left[ \frac{UE_0}{X_d} \sin \theta + \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \right]$$



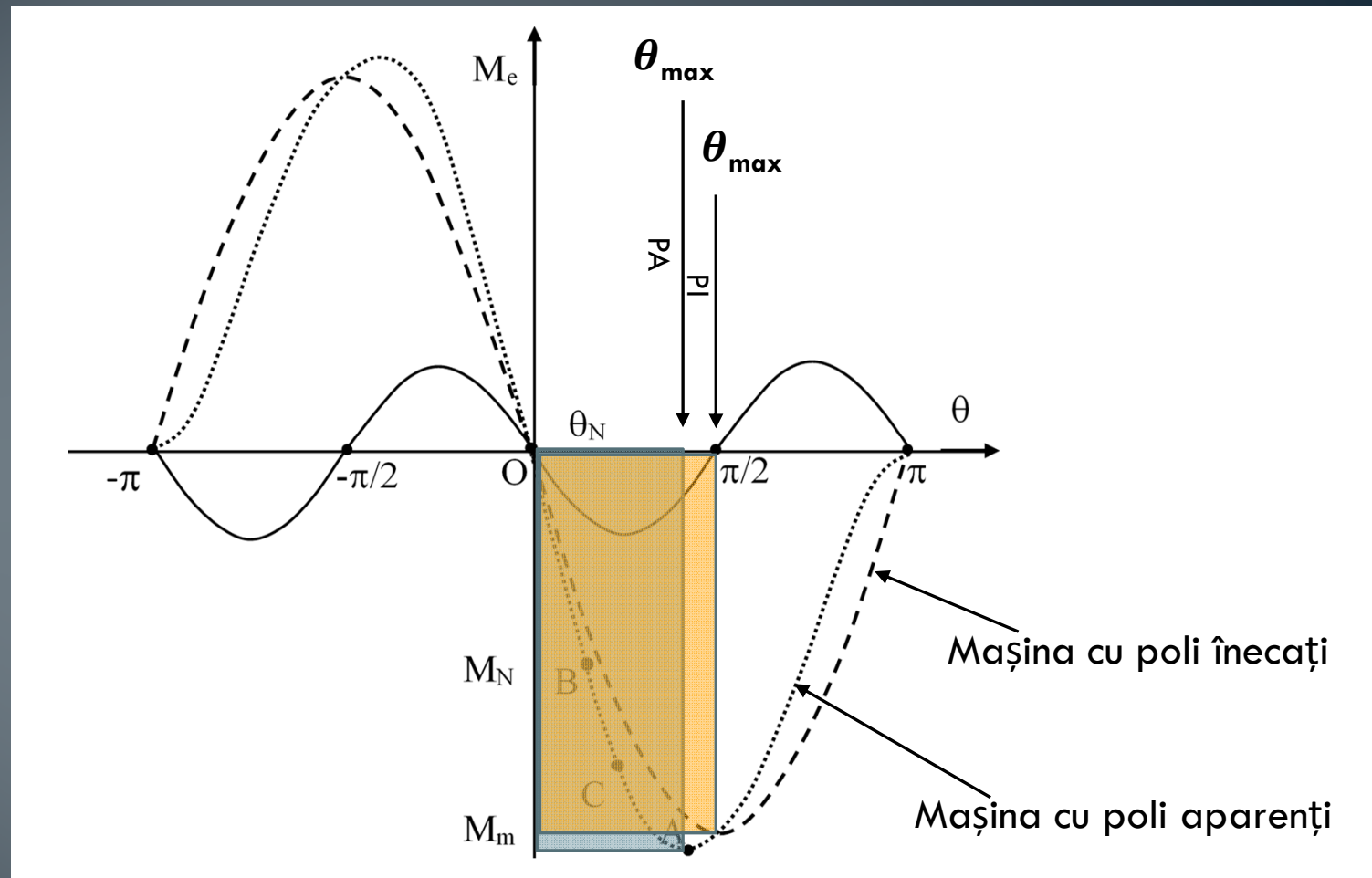
În cazul mașinii cu poli înecați,  $X_d = X_q = X_s$ . Există DOAR componenta principală de putere respectiv cuplu.

# Caracteristica unghiulară



1.  $\theta > 0$  – funcționare în regim de generator (câmpul inductor este defazat **ÎNAINTEA** câmpului rezultat)
2.  $\theta < 0$  – funcționare în regim de motor (câmpul inductor este defazat **ÎN URMA** câmpului rezultat)
3.  $\theta = 0$  – funcționare la gol

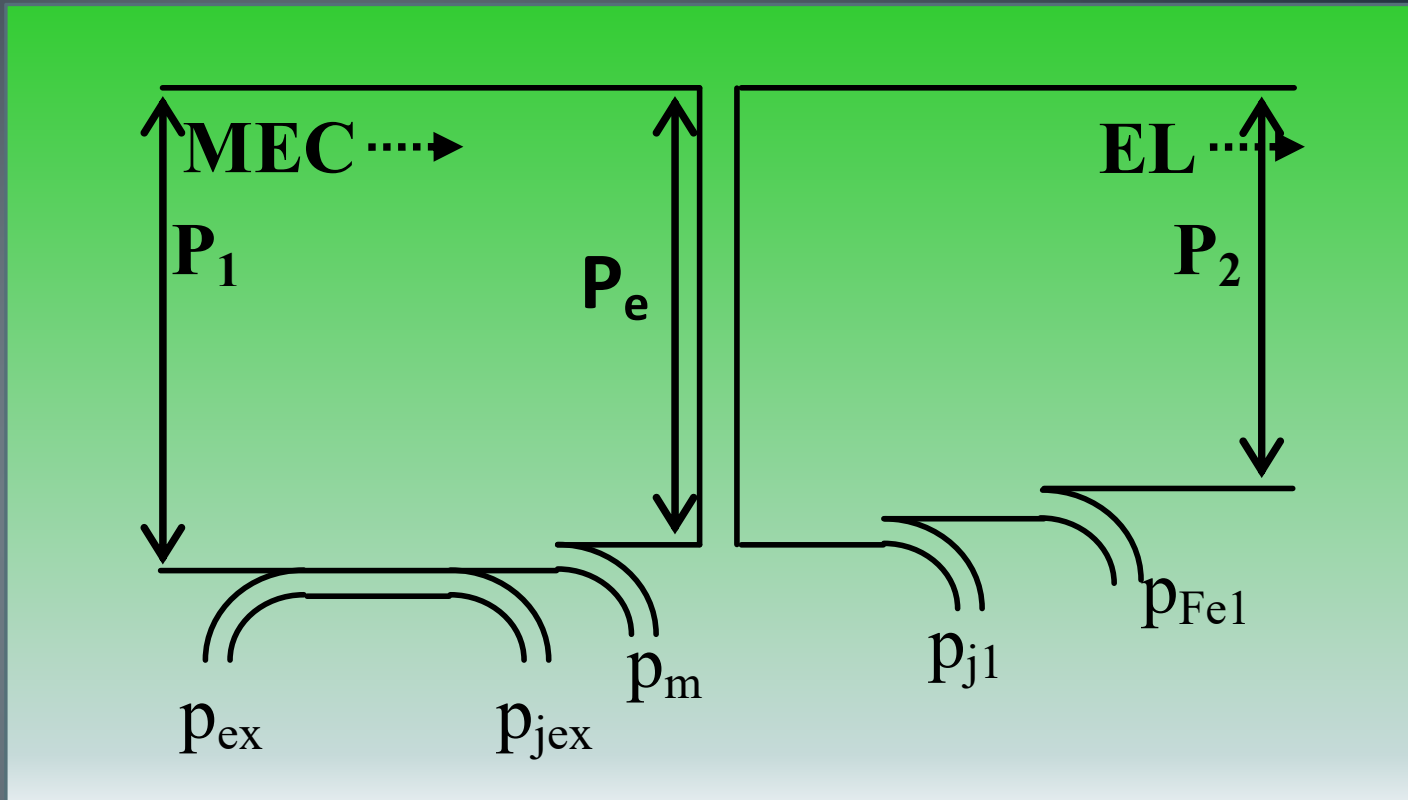
# Caracteristica unghiulara



Zona de funcționare stabila (ca generator sau motor) este pentru

$$\theta < \theta_{max}$$

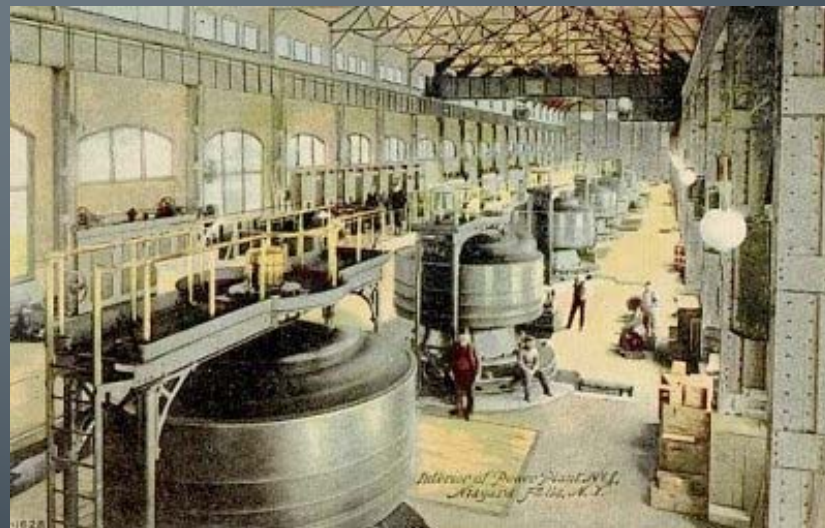
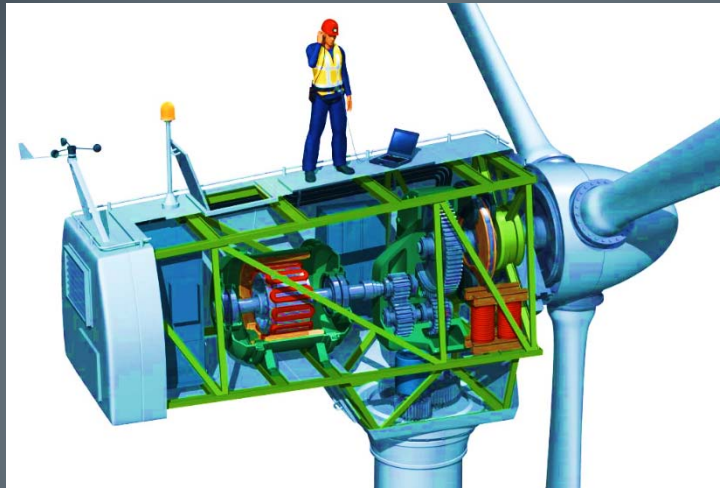
# Diagrama echilibrului de puteri



- $P_1$  – puterea mecanică furnizată generatorului
- $P_2$  – puterea electrică disponibilă la bornele generatorului
- $P_e$  – putere electromagnetică la nivelul întrefierului
- $p_{Fe1}$  – pierderile în fier (în stator)
- $p_{j1}$  – pierderi Joule în înfășurarea statorică
- $p_m$  – pierderi mecanice
- $p_e$  – pierderi în excitație (de tip Joule)

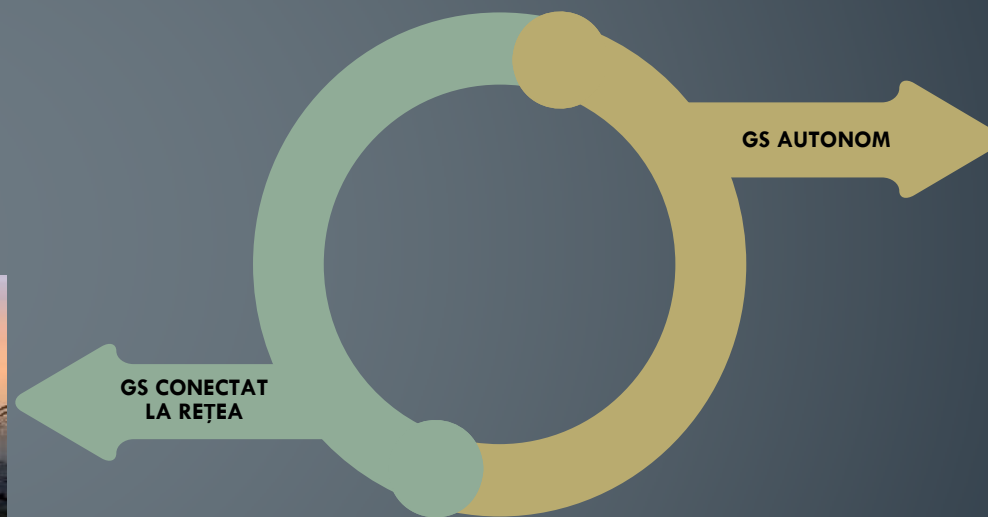
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum p}$$

# Generatorul sincron



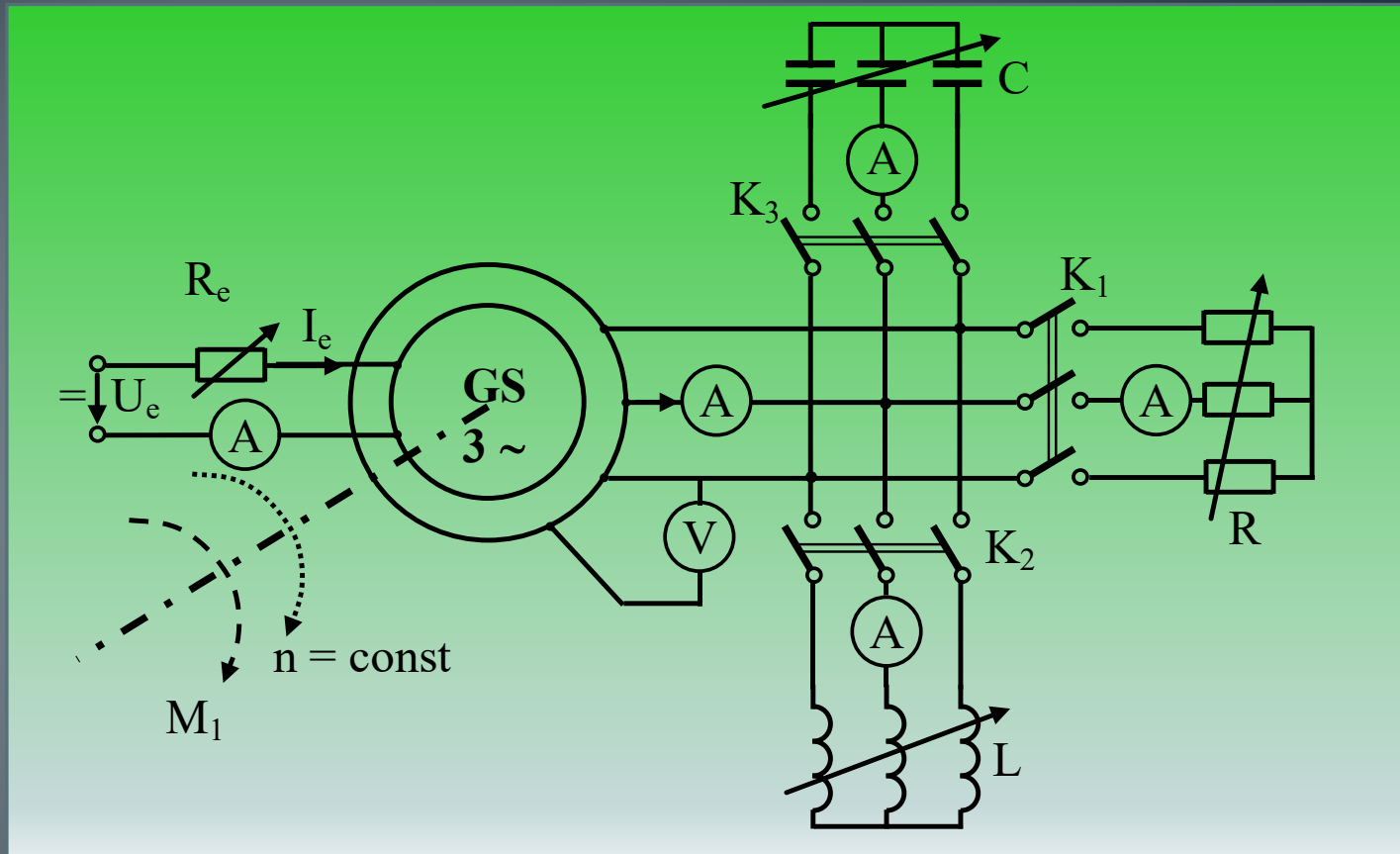


# TIPURI DE FUNCȚIONARE





# I. Generator sincron autonom



Este generatorul care alimentează una sau mai multe sarcini independente sau chiar o rețea locală de distribuție.

# Caracteristici de funcționare

Acestea pun în evidență modul de variație a două mărimi electrice atunci când celelalte sunt menținute la valoare constantă.

Mărimile electrice care particularizează funcționarea generatorului sincron sunt:

$E_0$  – tensiunea indusă la mersul în gol;

$U$  – tensiunea la bornele generatorului la funcționarea în sarcină;

$I_a$  – curentul prin înfășurarea statorică (curent de sarcină);

$I_e$  – curentul de excitație (curentul prin înfășurarea rotorica);

$P_1$  – puterea mecanică absorbită de generator de la mașina de antrenare;

$P_2$  – puterea electrică disponibilă la bornele generatorului;

$\Theta$  - unghiul intern;

$\cos\varphi$  - factorul de putere;

$f$  – frecvența tensiunii la bornele generatorului.

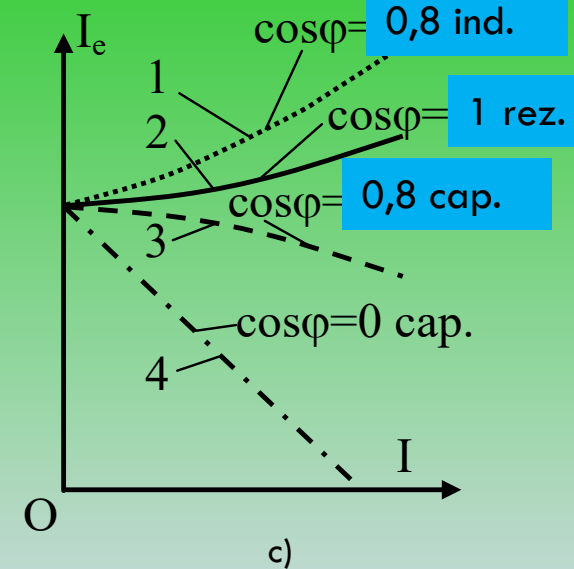
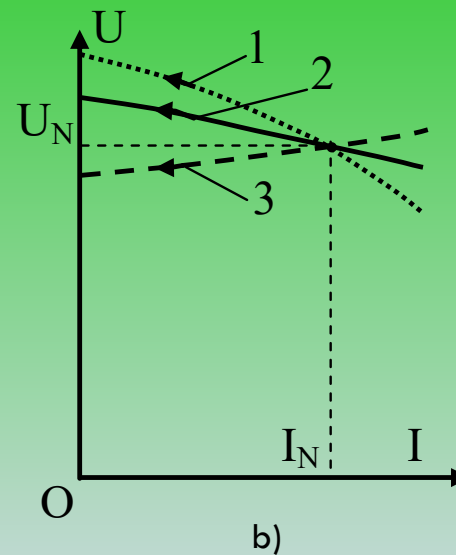
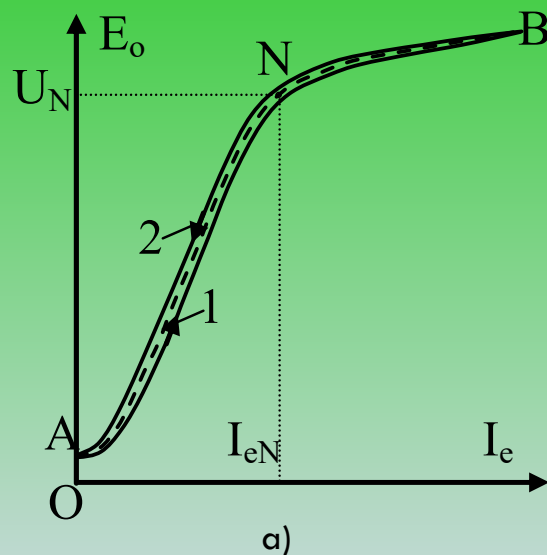


## Cele mai importante caracteristici de funcționare:

a) Caracteristica de funcționare în gol  $E_0 = f(I_e)$ ,  $n = \text{const.}$ ,  $I_a = 0$

b) Caracteristica externă  $U = f(I_a)$ ,  $n = \text{const.}$ ,  $I_e = \text{const.}$ ,  $\cos\varphi = \text{const.}$

c) Caracteristica de reglaj  $I_e = f(I_a)$ ,  $n = \text{const.}$ ,  $U_a = \text{const.}$ ,  $\cos\varphi = \text{const.}$



1 - sarcina inductiva; 2 – sarcina rezistiva; 3 – sarcina capacitiva.

**Cele mai importante caracteristici de funcționare sunt:**

**a) Caracteristica de funcționare in gol indică modul de variație a tensiunii induse in înfășurarea statorică la modificarea curentului de excitație.**

**Ea se trasează la turație constantă și, evident, curent de sarcină nul. Modul de variație reproduce caracteristica de magnetizare a circuitului magnetic.**

**b) Caracteristica externă este caracteristica definitorie a oricărui generator electric. Ea arată modul de variație a tensiunii la borne atunci când variază sarcina (adică curentul statoric).**

**Atunci când sarcina are un caracter activ (curba 2) sau activ-inductiv (curba 1), tensiunea la bornele generatorului SCADE odată cu creșterea sarcinii. Această scădere este cuantificată de mărimea numită „variație de tensiune”, a cărei expresie este:**

$$\Delta u_N = \frac{E_0 - U_N}{U_N}$$

**Dacă sarcina are un caracter capacitiv (curba 3), tensiunea la bornele generatorului CRESTE odată cu creșterea sarcinii.**



c) Caracteristica de reglaj arată cum trebuie modificat curentul de excitație astfel încât, atunci când sarcina variază, tensiunea la bornele generatorului să rămână **CONSTANTA**.

Evident, curentul de excitație trebuie crescut odată cu sarcina, dacă aceasta are caracter activ sau activ-inductiv, respectiv trebuie scăzut pentru sarcini capacitive.



# Particularitățile funcționării autonome

- Generatorul sincron autonom poate funcționa la orice turație și anume turația impusă de mașina sau agentul de acționare. Frecvența tensiunii generate va fi însă dependentă de turația rotorului.

$$f = \frac{p \cdot n}{60}$$

- Caracteristica externă pune în evidență faptul că, pentru sarcini active sau activ-inductive, tensiunea la bornele generatorului SCAD. Pentru menținerea ei CONSTANTĂ trebuie MĂRIT curentul de excitație (așa cum se vede pe caracteristica de reglaj,  $I_e = f(I_a)$ ).

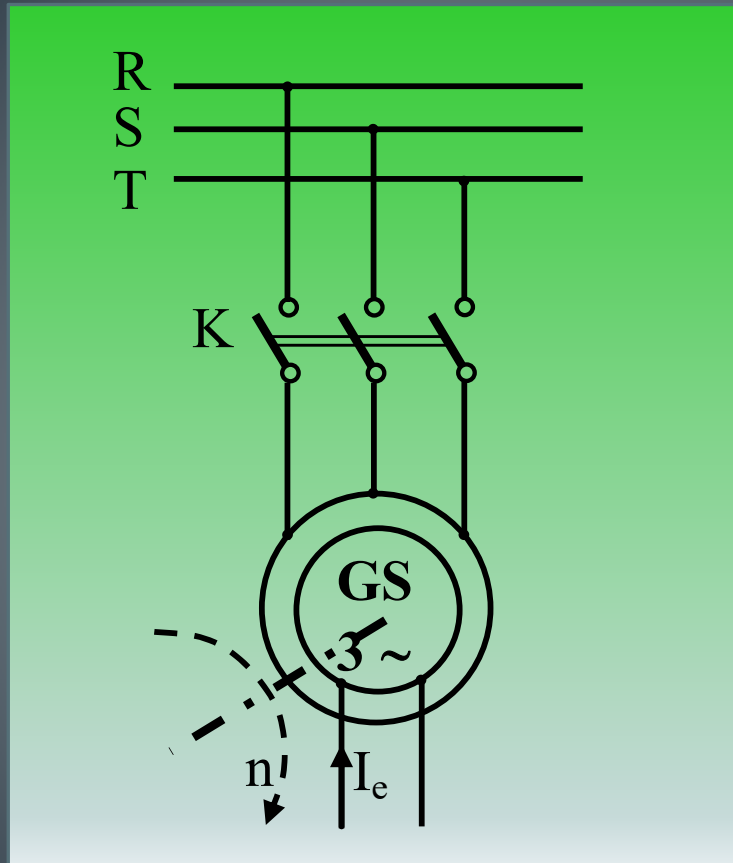






- a) Generatorul sincron autonom poate funcționa la **ORICE** turație
  
- b) **TENSIUNEA** la bornele mașinii variază odată cu turația
  
- c) **FRECVENȚA** tensiunii de la borne variază odată cu turația

## II. Generator sincron conectat la rețea (funcționare în paralel)



Atunci când generatorul sincron este conectat la o rețea de transport și distribuție a energiei electrice, el funcționează în paralel pe acea rețea, respectiv în paralel cu alte generatoare sincrone conectate la acea rețea.

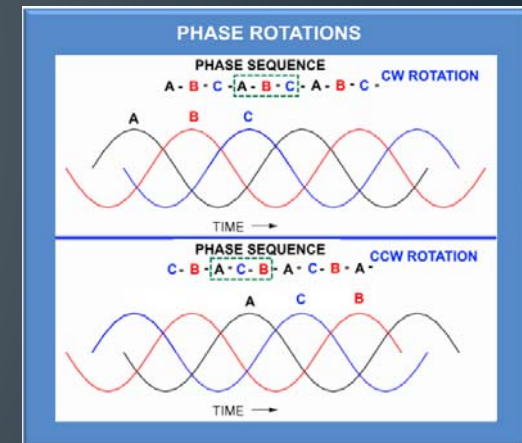
Închiderea întrerupătorului K, de cuplare a generatorului la rețea, nu se poate face decât dacă energia electrică produsă de generator este compatibilă cu cea a rețelei.

Cu alte cuvinte, înainte de închiderea întrerupătorului K, trebuie îndeplinite anumite condiții denumite *condiții de cuplare în paralel*.

## II. Funcționarea in paralel pe o rețea

### *Condiții de cuplare in paralel*

1. Egalitatea valorilor efective ale TENSIUNILOR (rețelei si generatorului)
2. Egalitatea FRECVENȚELOR tensiunilor
3. Aceeași ordine de succesiune a fazelor
4. Același tip de variație a tensiunilor (de preferință sinusoidală)

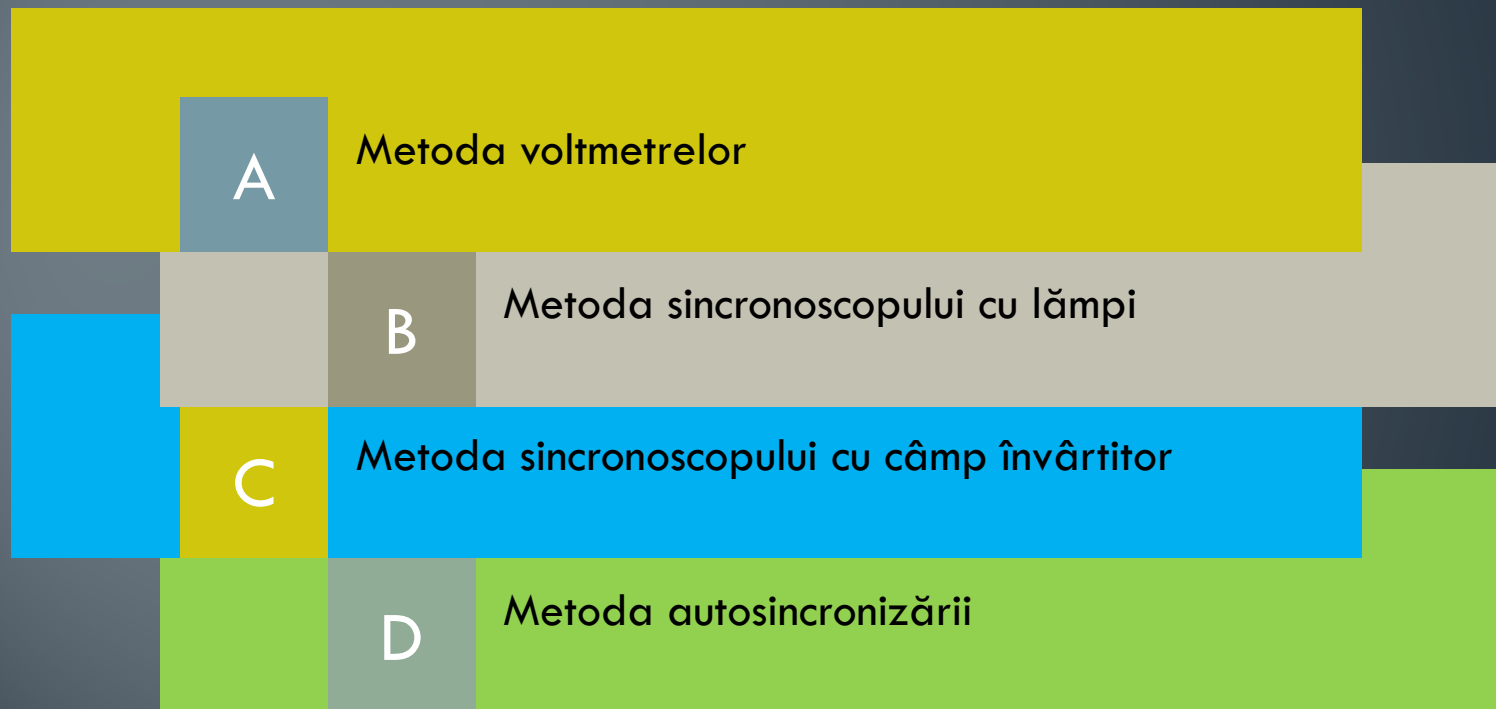


**Momentul cuplării: când tensiunile sunt in fază**



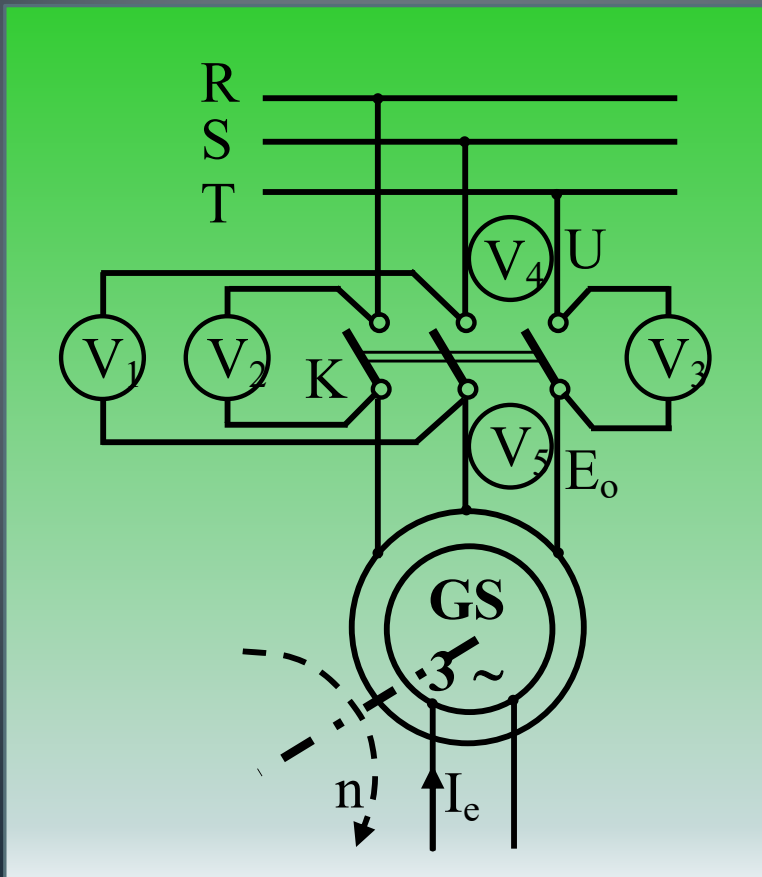
# METODE DE SINCRONIZARE

Realizarea condițiilor de cuplare în paralel a generatoarelor sincrone reprezintă operația de „sincronizare”.



## A. Metoda voltmetrelor

Această metodă presupune utilizarea DOAR a 5 voltmetre pentru verificarea condițiilor. Voltmetrele V1, V2 și V3 sunt montate pe bornele omoloage ale întrerupătorului K. Voltmetrele V4 și V5 măsoară tensiunea rețelei respectiv tensiunea produsă de generatorul sincron.



1. V4 și V5 indică aceeași valoare
2. Acele voltmetrelor V1, V2 și V3 oscilează încet (o oscilație la 3-4 secunde) – asta înseamnă că frecvențele celor două tensiuni sunt apropiate
3. Acele voltmetrelor oscilează simultan în același sens (adică succesiunea fazelor este aceeași pentru generator și rețea)



4. Moment conectare : când acele voltmetrelor ajung la valoarea zero

In cazul in care una sau mai multe condiții nu sunt îndeplinite, trebuie modificate mărimile generatorului sincron după cum urmează:

1'. Dacă tensiunile  $V_4$  și  $V_5$  nu sunt egale: *Se modifică tensiunea  $V_5$  prin modificarea turației generatorului sau prin modificarea curentului de excitație.*

2'. Dacă acele voltmetrelor  $V_1$ - $V_3$  nu oscilează foarte rar: *Frecvența tensiunii generatorului se modifica prin modificarea turației.*

3'. Dacă acele voltmetrelor nu oscilează toate in același sens, simultan: *Se inversează două faze la bornele întrerupătorului  $K$ , fie de la generator fie de la rețea.*

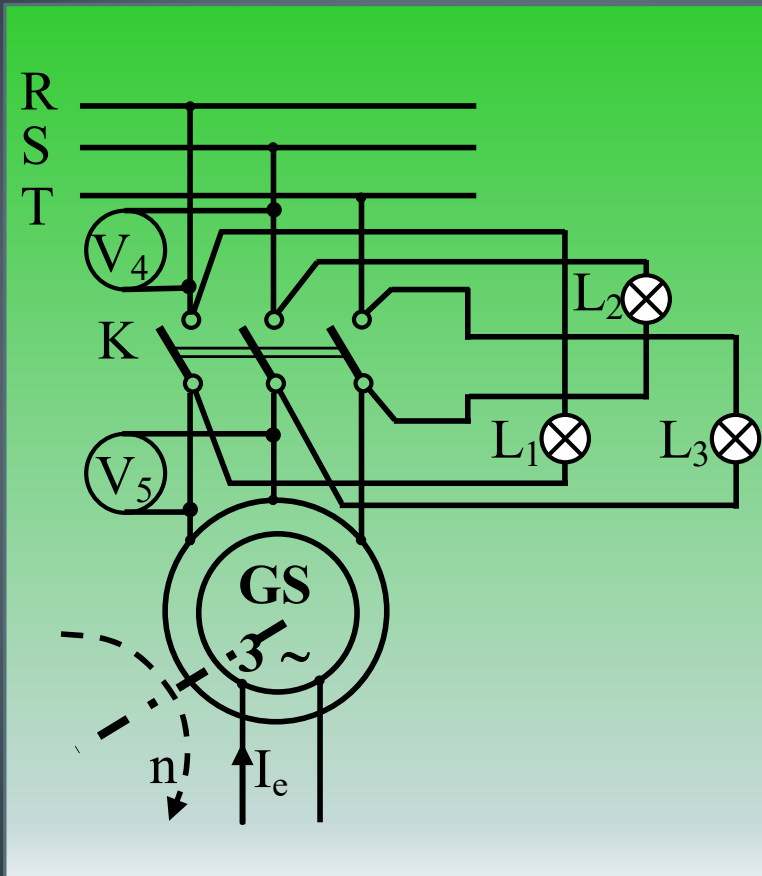


*Îndeplinirea condițiilor presupune o modificare simultană a turației și curentului de excitație ale generatorului.*



## B. Metoda sincronoscopului cu lămpi

Sincronoscopul cu lămpi este un dispozitiv simplu ce are 3 „becuri” montate în forma de triunghi echilateral. Unul din becuri este montat la bornele omoloage ale unei faze iar celelalte două sunt montate la borne din faze diferite



1. V4 și V5 indică aceeași valoare

2. Lămpile L1, L2 și L3 se aprind și se sting încet (o dată la 3-4 secunde)

3. Lămpile se aprind și sting **SUCCESIV** (senzația vizuală este de „foc învârtitor”)



4. Moment conectare: când lampa L1 se stinge

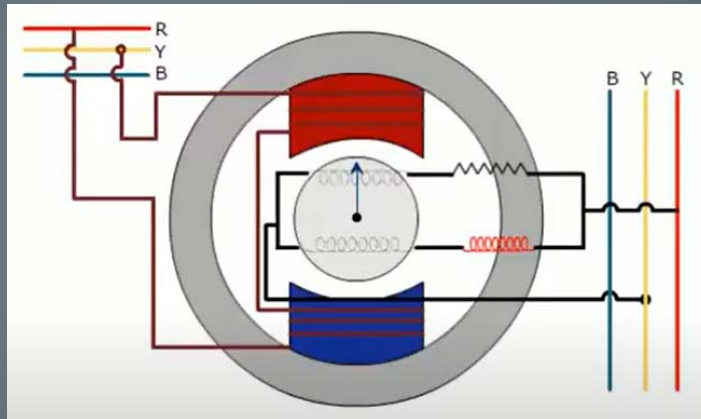
1'. Tensiunea  $V_5$  se modifică din turație și din curentul de excitație

2'. Frecvențele se aduc la aceeași valoare din turație

3'. Se inversează două faze la generator sau rețea

## C. Metoda sincronoscopului cu câmp învârtitor

Sincronoscopul cu câmp învârtitor este un dispozitiv asemănător unui motor asincron cu rotor bobinat. El este prevăzut cu DOI poli aparenti pe stator, pe care sunt plasate două bobine înseriate în așa fel încât să formeze poli de polaritate opusă. Rotorul este prevăzut cu creștături uniform distribuite în care sunt plasate două înfășurări defazate la  $90^\circ$ . În plus, pe una din fazele rotorice este înseriată o rezistență iar pe cealaltă o inductanță astfel încât să apară un defazaj al curenților ce străbat cele două înfășurări rotorice.



Înfășurarea de pe stator este conectată la două faze ale generatorului ce urmează a fi conectat în paralel. Fazele omoloage ale rețelei sunt conectate la înfășurările de pe rotor. Aceste înfășurări creează un câmp magnetic învârtitor care interacționează cu câmpul alternativ creat de înfășurarea statorică. Drept urmare, rotorul se rotește într-un sens sau celălalt, lucru pus în evidență de acul indicator ce este solidar cu rotorul.

## C. Metoda sincronoscopului cu câmp învârtitor

Rotirea rotorului arată că există o diferență de frecvență între cele două tensiuni (ale generatorului și ale rețelei). Cu cât viteza de rotație este mai mare, cu atât diferența de frecvență este mai mare.

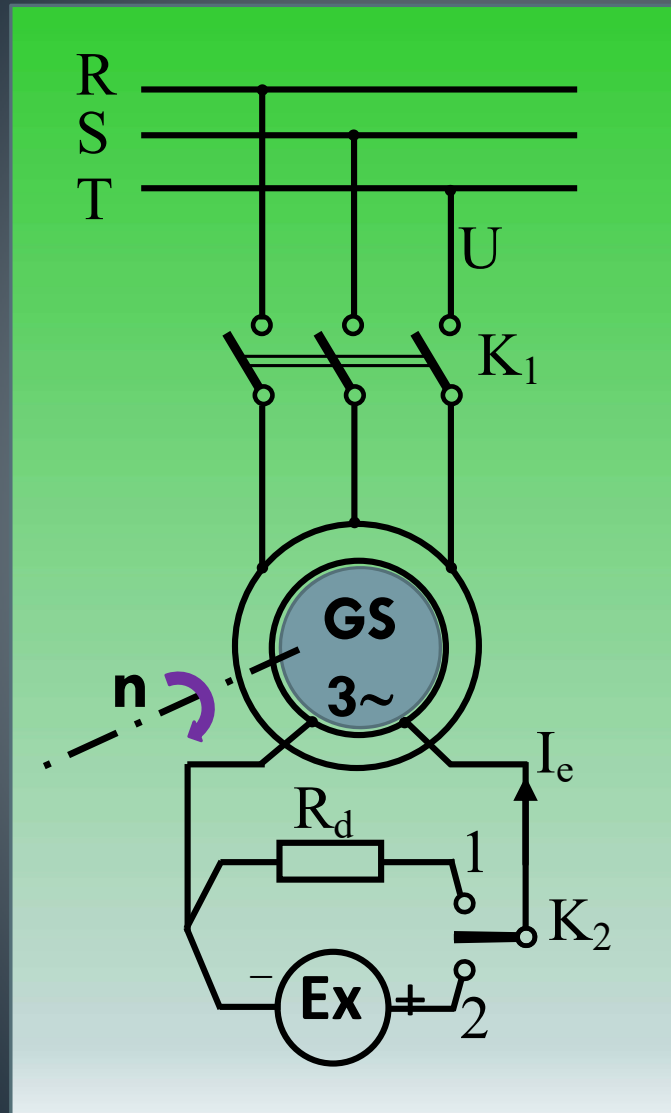
Modificând turația generatorului se obține încetinirea rotirii acului indicator.

Cuplarea generatorului la rețea se face în momentul în care acul ajunge în dreptul punctului marcat corespunzător orei 12, adică atunci când defazajul dintre tensiuni este zero.



Aparatele moderne sunt de tip digital având și posibilitatea indicării valorii tensiunilor generatorului și rețelei.

## D. Metoda autosincronizării



1. Se conectează înfășurarea de excitație pe o rezistență de protecție – K2 poziția 1
2. Se antrenează generatorul până la o turație apropiată de sincronism
3. Se conectează K1
4. Se conectează excitația – K2 pe poziția 2
5. Apar oscilații ale rotorului după care mașina se sincronizează



Metoda se poate aplica NUMAI dacă, în prealabil, s-a creat aceeași succesiune a fazelor (pentru generator și rețea).

## Consecințe ale nerespectării condițiilor de cuplare in paralel

1. Tensiunile NU sunt egale: la cuplare apar curenți de egalizare (componente inductive) ce au un efect magnetizant (demagnetizant) asupra generatorului. Efectele sunt destul de mici.
2. Frecvențele NU sunt egale: pot apărea cupluri puternice de accelerare sau frânare cu solicitări mecanice puternice
3. Tensiunile NU sunt in fază: apar curenți de egalizare ce creează solicitări electrodinamice importante respectiv șocuri de cuplu (accelerare sau decelerare bruscă a mașinii sincrone).
4. Succesiune diferită a fazelor: **INACCEPTABIL.**





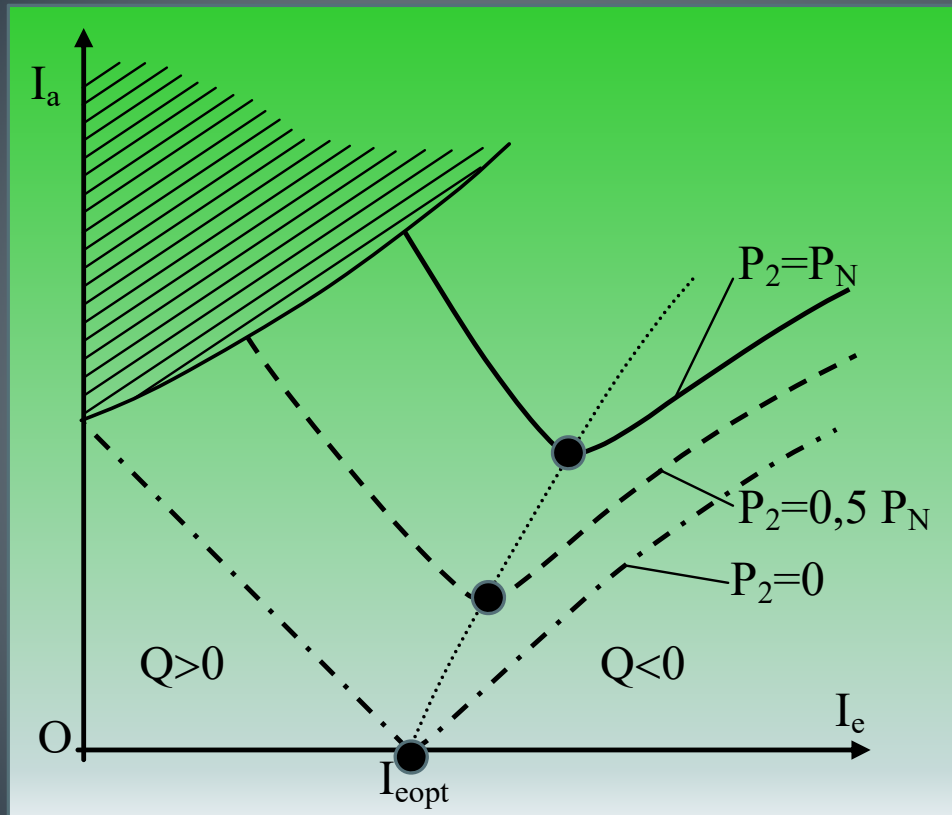


- a) Generatorul sincron conectat la rețea poate funcționa NUMAI la sincronism
  
- b) TENSIUNEA la bornele mașinii este constantă si egală cu tensiunea rețelei
  
- c) FRECVENȚA la bornele mașinii este constantă si egală cu frecvența rețelei





## Funcționarea la putere constantă și curent de excitație variabil

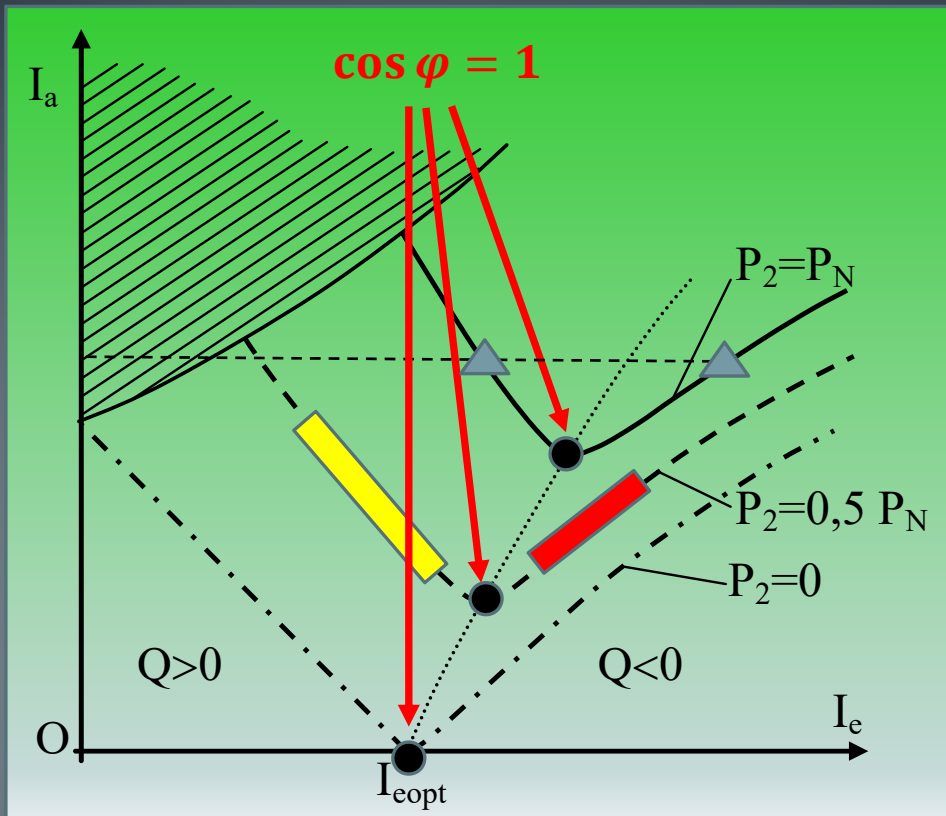


Curbele in V

Acest tip de funcționare arată dependența  $I_a = f(I_e)$  atunci când mașina funcționează la putere furnizată constantă.

Se obțin așa numitele „curbe in V” pentru diverse valori ale puterii  $P_2$ .

Punctul de funcționare situat în vârful curbelor (punctul cu valoarea minimă pentru  $I_a$ ) se numește punct de funcționare la curent de excitație optim.



Curbele in V

1. Funcționare la  $I_{eopt}$ : Factor de putere unitar; mașina furnizează putere activă rețelei
2. Funcționare la  $I_e < I_{eopt}$ : Comportare inductivă; mașina furnizează putere activă rețelei dar absoarbe putere reactivă █
3. Funcționare la  $I_e > I_{eopt}$ : Comportare capacitivă; mașina furnizează putere activă rețelei precum și putere reactivă █

## Funcționarea la putere constantă si curent de excitație variabil

- comentarii -

1. Generatorul sincron poate furniza aceeași putere (tensiunea menținându-se constanta la borne) pentru diverse valori ale curentului din înfășurarea statorică.
2. Situația cea mai favorabilă corespunde unei valori minime a curentului  $I_a$ , ce se obține pentru așa numitul curent de excitație optim,  $I_{eopt}$ .
3. Opțiunea de funcționare la  $I_e > I_{eopt}$  poate fi justificată de necesitatea furnizării in rețea si a unei componente reactive de energie. Soluția este utilă pentru îmbunătățirea factorului de putere in rețea.
4. Funcționare la  $I_e < I_{eopt}$  este o opțiune dezavantajoasă întrucât mașina funcționează la un curent statoric mai mare si in plus absoarbe putere reactivă din rețea.





**Caracteristica unghiulara**



**Unghi intern pozitiv**



**Curent de excitație optim**



**Curbe in V**



**Sincronizare la rețea**





# Motorul sincron

Curs 11



# Cuprins

» Principiul de funcționare

» Caracteristici de funcționare

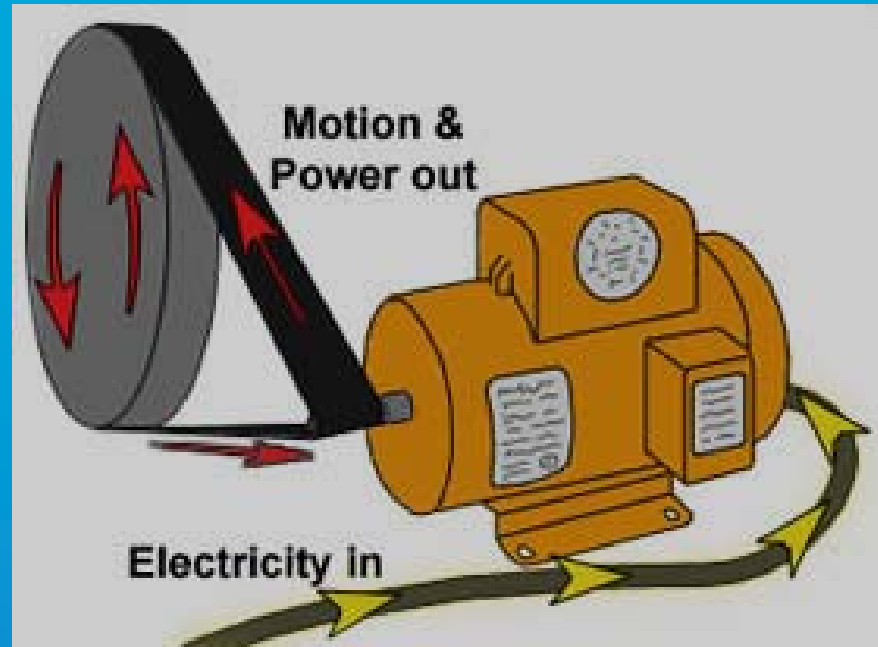
» Pornirea motorului sincron



» Stabilitatea motorului sincron

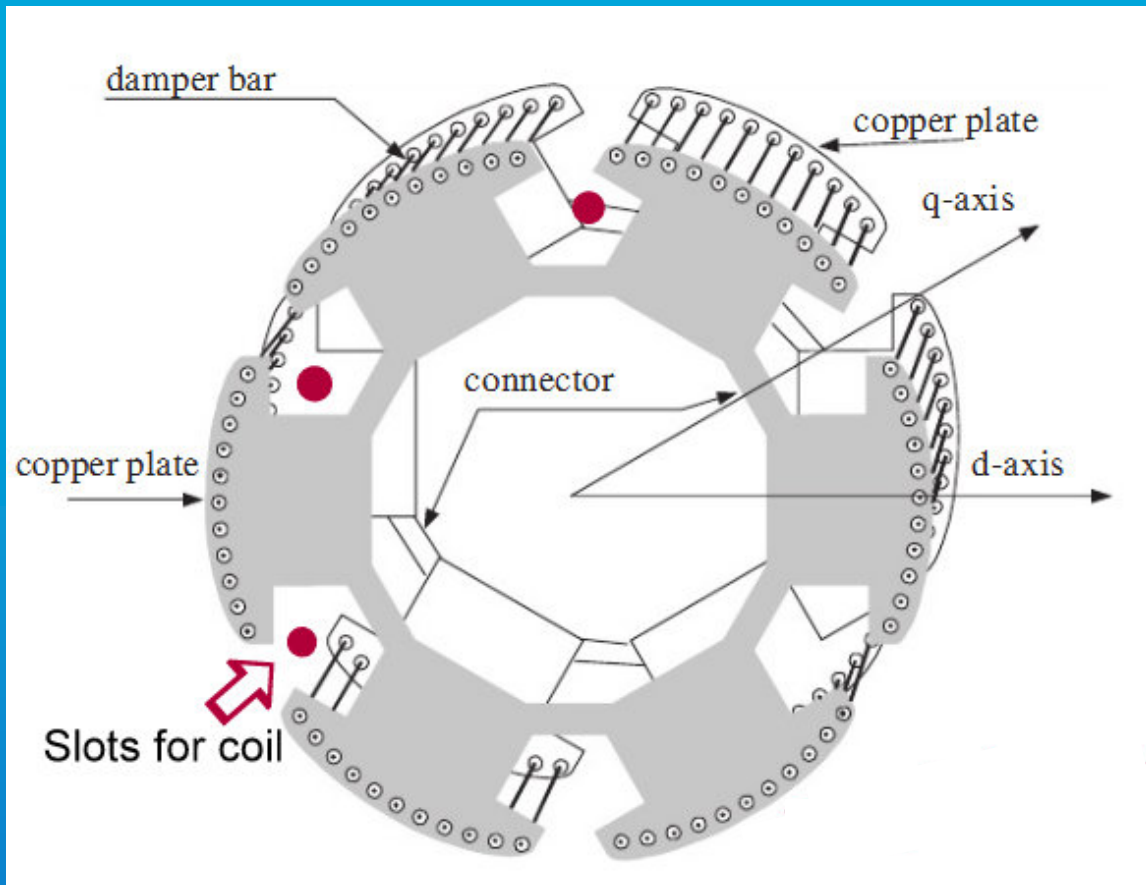
» Frânarea motorului sincron





**În regim de motor, mașina absoarbe energie electrică pe la borne și furnizează energie mecanică la ax.**

**Prin urmare, în regim de motor, mașina sincronă este conectată la o rețea de energie electrică.**



*Element constructiv important*  
**Înfășurare de pornire/amortizare**

**Înfășurare de pornire/amortizare este o înfășurare opțională ce apare în construcția mașinilor sincrone (există mașini sincrone la care această înfășurare NU este prezentă). Ea are însă un rol determinant atunci când mașina este destinată să funcționeze în regim de motor.**

**In cazul mașinii sincrone cu poli aparenti, sunt practicate crestături in piesele polare ale polilor inductori rotorici, in care sunt plasate bare de Cu sau Al, scurtcircuitate la capete (construcția este similară înfășurării in scurtcircuit de la mașina asincronă).**

**La mașina cu poli înecați, in istmurile crestăturilor rotorice sunt plasate pene feromagnetice. Acestea formează, de asemenea, o structură in scurtcircuit.**

**Cele două structuri descrise formează înfășurarea de pornire a mașinii sincrone funcționând in regim de motor.**

**Ele joacă, de asemenea, si rol de înfășurare de amortizare in ambele regimuri de funcționare a mașinii sincrone.**

**Această înfășurare NU joacă nici un rol atâta vreme cât mașina funcționează la sincronism (viteza relativă dintre câmpul învârtitor si rotor este zero, prin urmare nu se induc tensiuni si nu apar curenți).**

# Principiul de funcționare

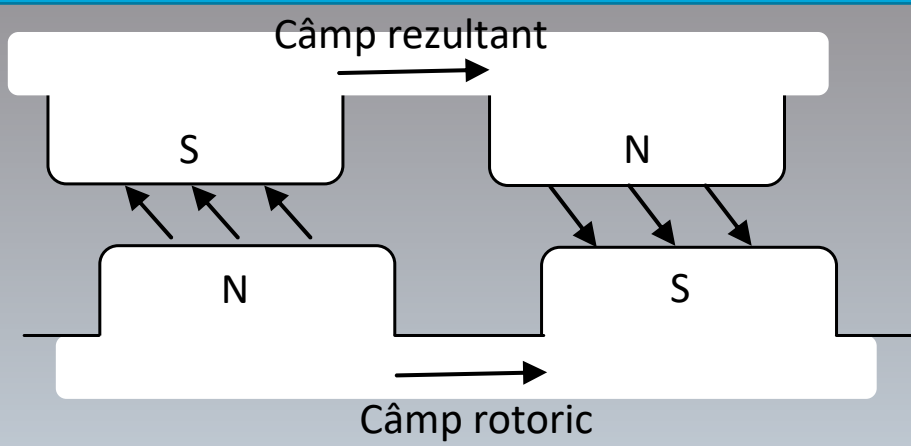
1. Se alimentează înfășurare statorică de la o sursă de tensiune trifazată. Prin urmare, ia naștere un câmp magnetic învârtitor (creat pe cale electrică).

2. Rotorul (a cărui înfășurare este alimentată și produce câmpul inductor fix în spațiu) se rotește cu viteza de sincronism a câmpului creat de înfășurarea statorică (condiție obligatorie), și în același sens cu acesta. Astfel cele două câmpuri magnetice, rotorice și statorice, se rotesc cu aceeași viteză.

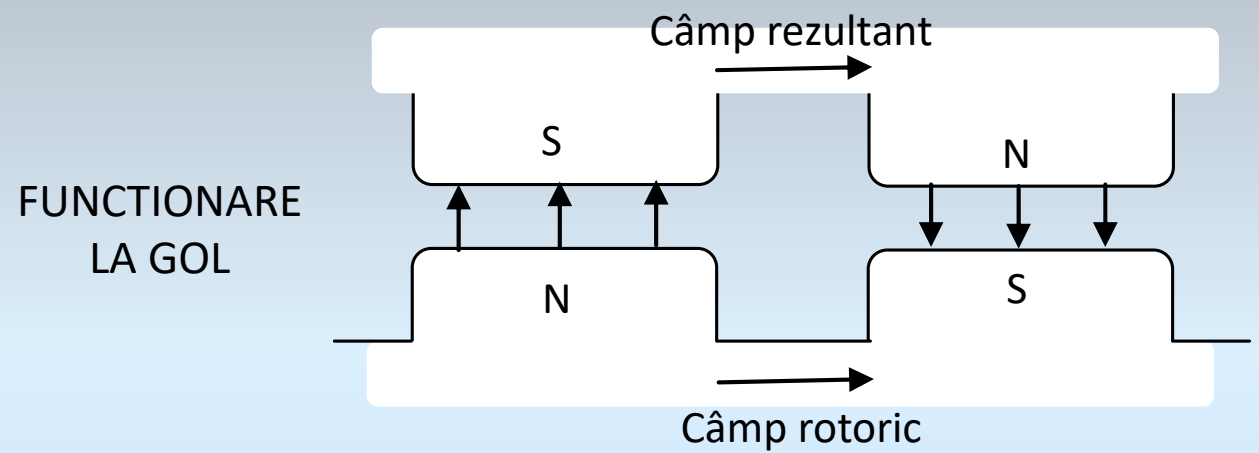
3. Cele două câmpuri magnetice învârtitoare se cuplează magnetic: polii de polaritate opusă se plasează față în față. Cuplul de atracție mutuală dintre polii de polaritate opusă determină rotirea rotorului și funcționarea mașinii în regim de motor.

4. Câmpul magnetic rezultat „conduce”, în regim de motor, câmpul magnetic rotorice de excitație (unghiul intern este negativ).

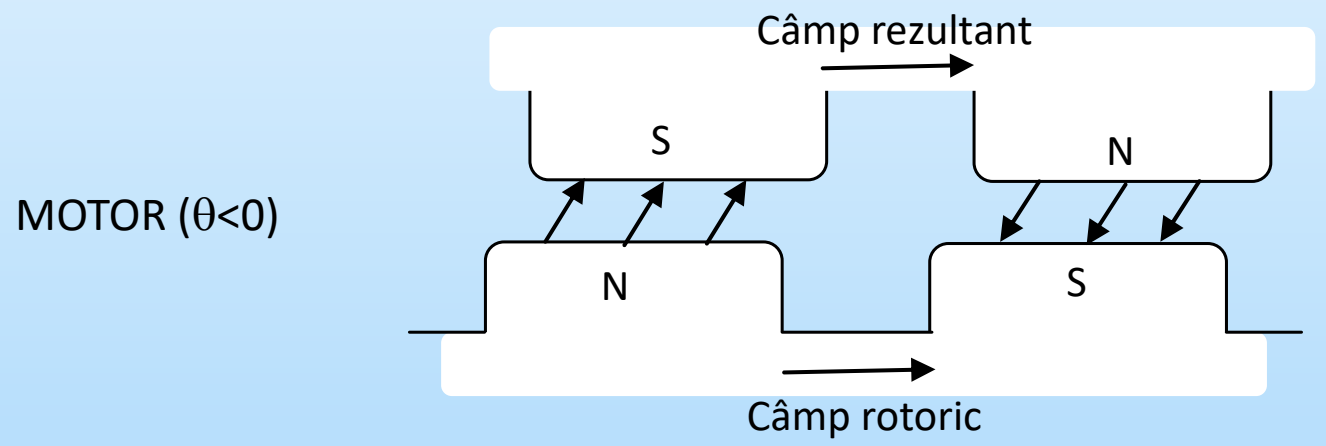




GENERATOR ( $\theta > 0$ )



FUNCTIONARE  
LA GOL



MOTOR ( $\theta < 0$ )

**Expresia puterii electromagnetice dezvoltate de motorul sincron:**

$$P_e = \frac{3UE_0}{X_d} \sin \theta + \frac{3U^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta$$

**Componenta principala a puterii electromagnetice:**

$$P'_e = \frac{3UE_0}{X_d} \sin \theta$$

**Componenta secundară (de reluctanță) a puterii electromagnetice ce apare numai la mașina cu poli aparenti:**

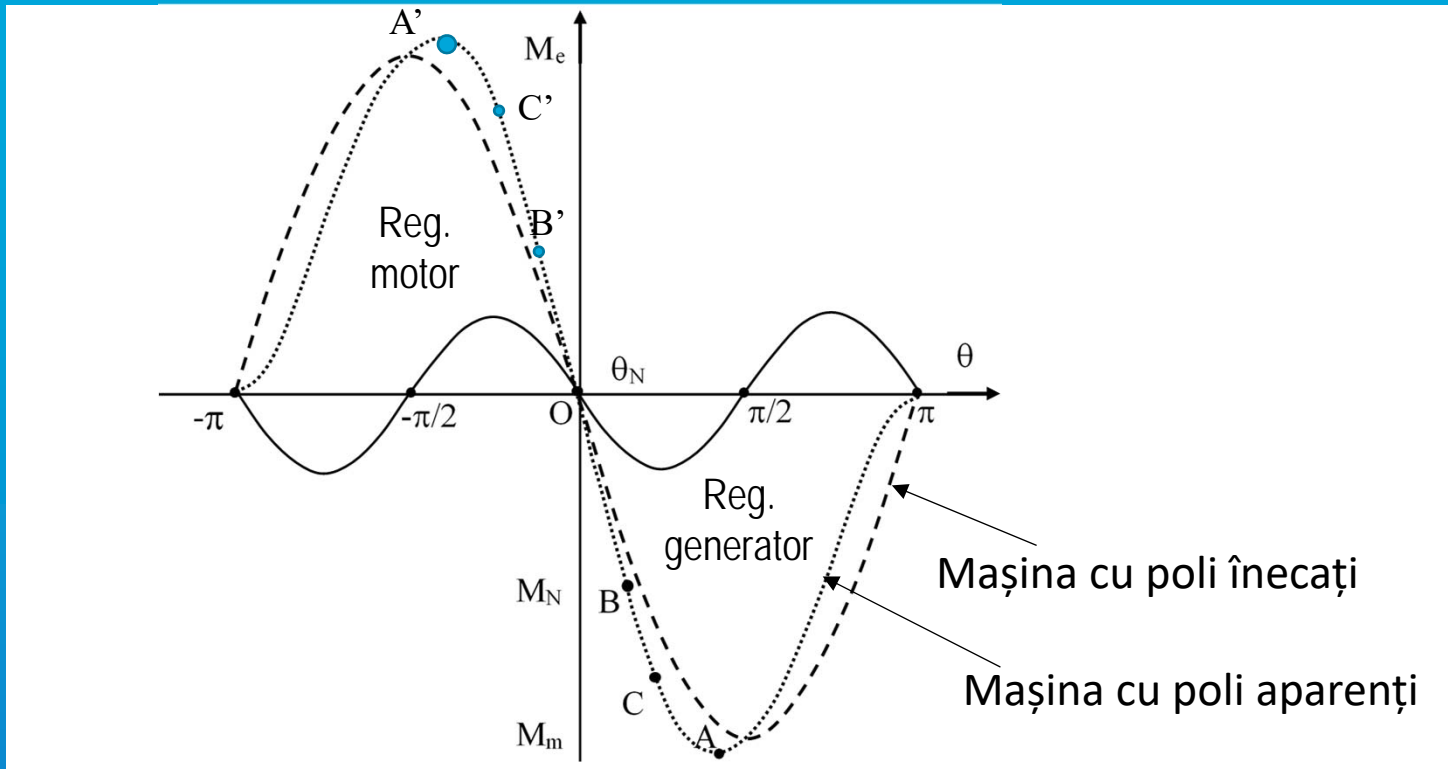
$$P''_e = \frac{3U^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta$$

**Expresia cuplului electromagnetic dezvoltat de motorul sincron:**

$$M_e = \frac{3}{\Omega} \left[ \frac{UE_0}{X_d} \sin \theta + \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \right]$$



## Caracteristica $M_e=f(\theta)$



Zona de funcționare în regim de motor este situată în cadranul II ( $M_e > 0$  și  $\theta < 0$ )

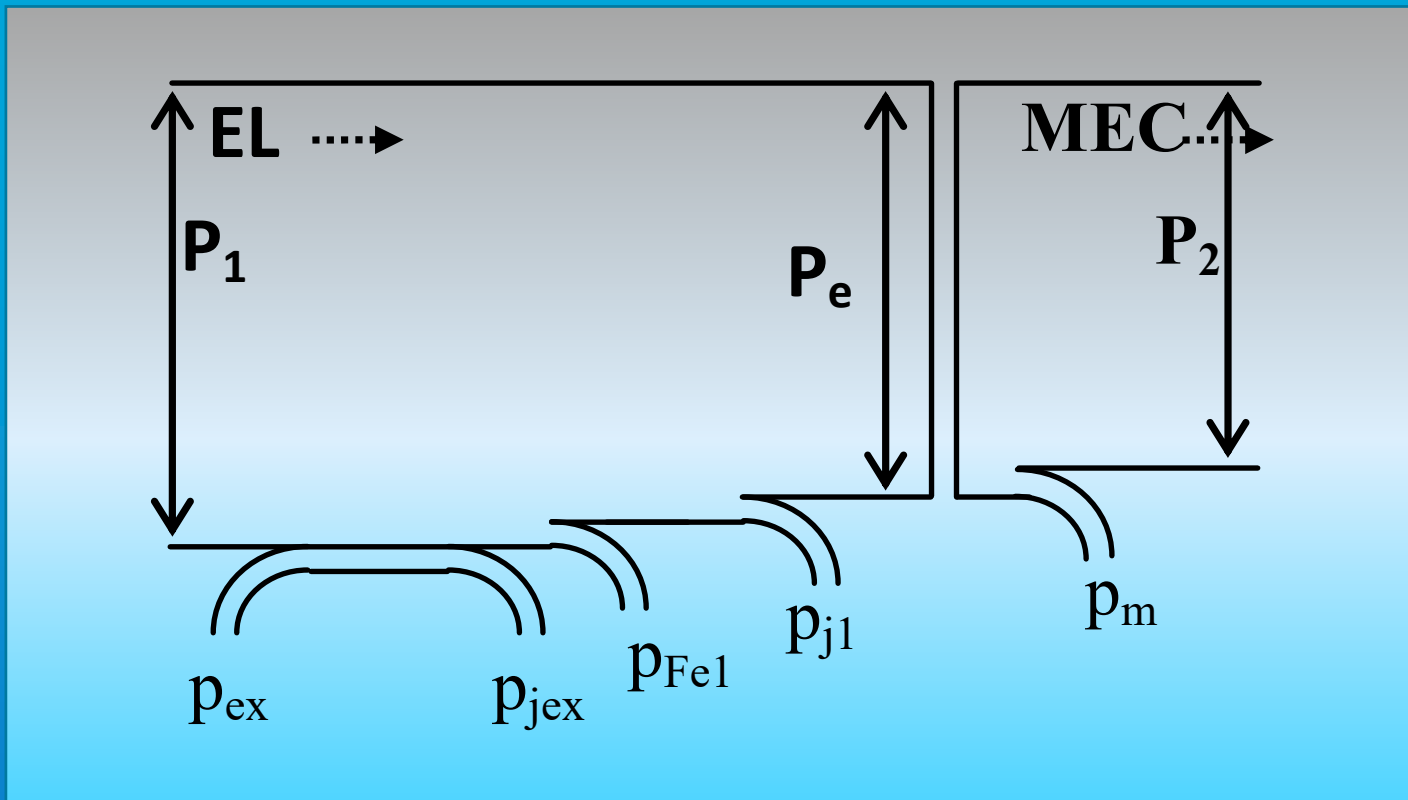
Pentru mașina cu poli aparenti, de exemplu, B' reprezintă un punct de funcționare ce poate fi cel nominal, C' este un punct de funcționare la suprasarcină, iar A' este punctul de funcționare la cuplu maxim. Dincolo de punctul A' mașina iese din sincronism.

8



Funcționarea mașinii sincrone în regim de **motor**, la **gol**, **supraexcitat**, constituie regimul de **COMPENSATOR SINCRON**. El are drept scop îmbunătățirea factorului de putere al rețelei la care este conectată mașina sincronă.

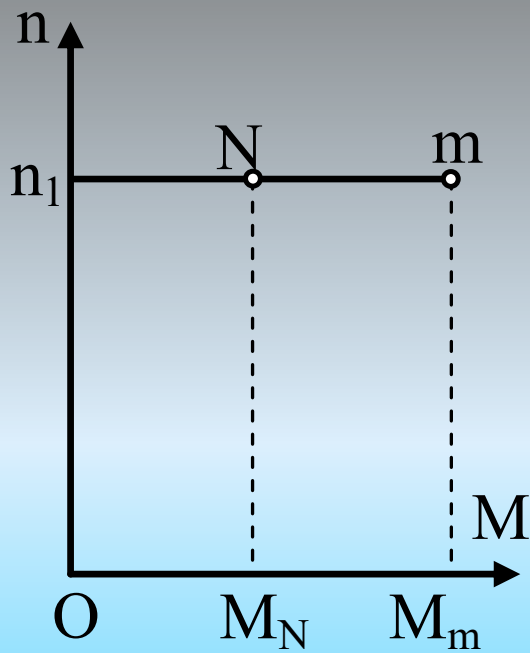
# Diagrama bilanțului de puteri



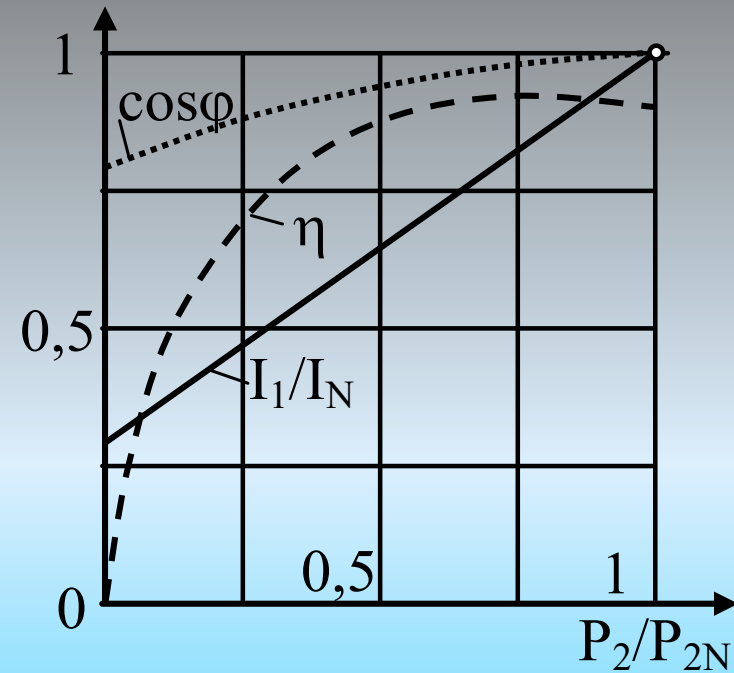
$P_1$ -puterea electrică absorbită;  $P_e$ -puterea electromagnetică;  $P_2$ -puterea mecanică la ax;  
 $p_{jex}$ - pierderi în înfășurarea de excitație;  $p_{Fe1}$ -pierderi în fierul statoric;  $p_{j1}$ -pierderi în înfășurarea statorică;  $p_m$ -pierderi mecanice.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum p}{P_1}$$

# Caracteristicile de funcționare ale motorului sincron



a.



b.

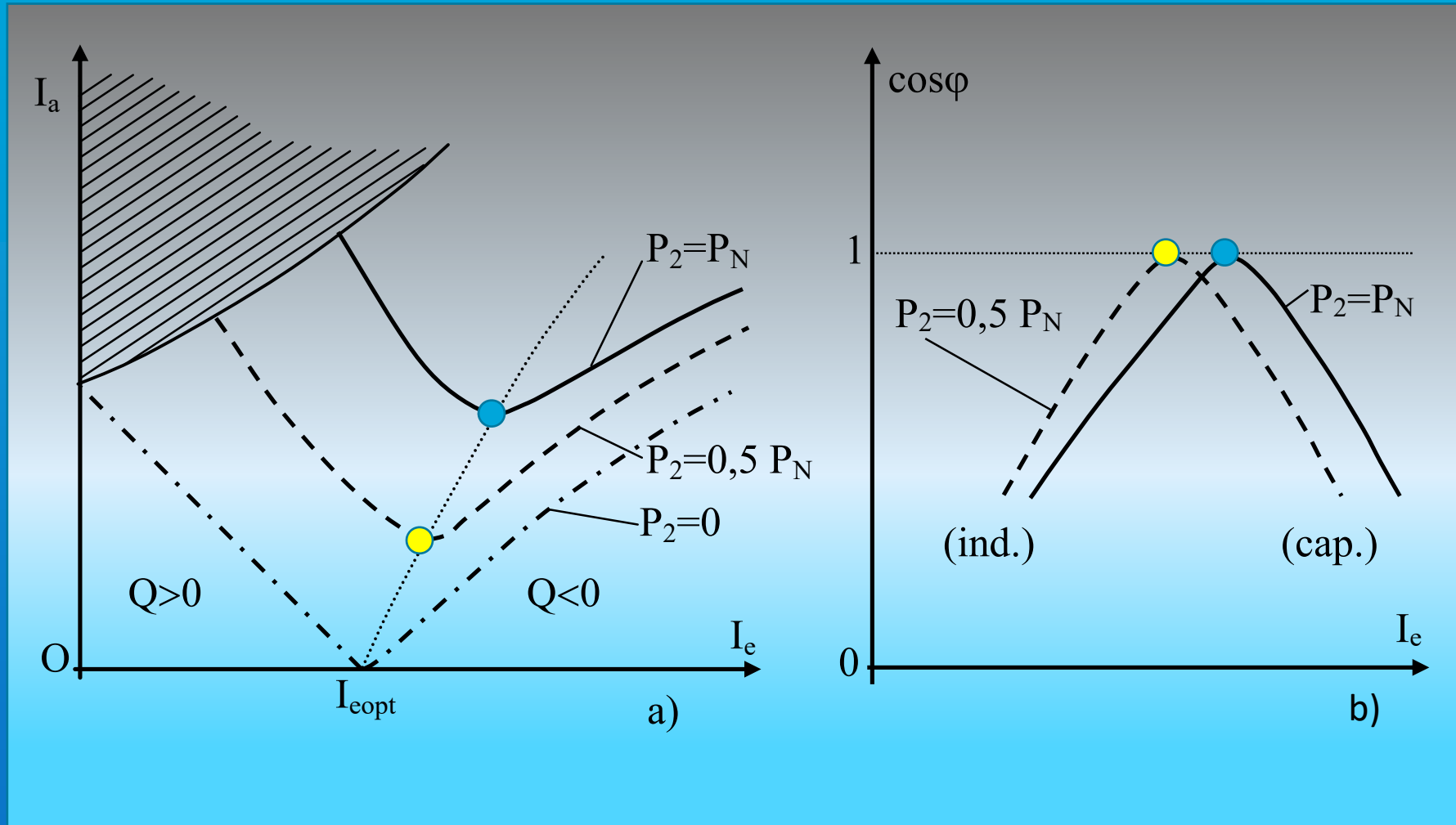
- a. Caracteristica mecanică
- b. Caracteristici de performanță

**Caracteristica mecanică este o dreaptă care subliniază faptul că motorul sincron își menține turația constantă indiferent de variația sarcinii între limitele „zero-cuplu maxim”.**

**Caracteristica factorului de putere evidențiază că motorul sincron poate funcționa și la factor de putere unitar.**

# Caracteristicile in "V"

- funcționare la putere constanta si curent de excitație variabil -



**Când motorul sincron funcționează la putere electrică absorbită CONSTANTĂ, variația curentului de excitație,  $I_e$ , plasează punctul de funcționare pe o curba în formă de V (fig. a).**

**Funcționarea optimă a mașinii (adică la un curent minim prin înfășurarea statorică), are loc la curentul de excitație  $I_{eopt}$ .**

**Dacă valoarea curentului de excitație este peste  $I_{eopt}$  (funcționare supraexcitată), mașina sincronă furnizează rețelei de alimentare putere reactivă.**

**Dacă valoarea curentului de excitație este sub  $I_{eopt}$  (funcționare subexcitată), mașina sincronă absoarbe din rețeaua de alimentare putere reactivă.**

**Funcționarea la curent de excitație optim  $I_{eopt}$  determină un factor de putere unitar (fig. b).**

**Pentru toate cele trei situații de funcționare (optimală, supraexcitată și subexcitată), motorul sincron absoarbe din rețea putere activă.**



# Pornirea motorului sincron



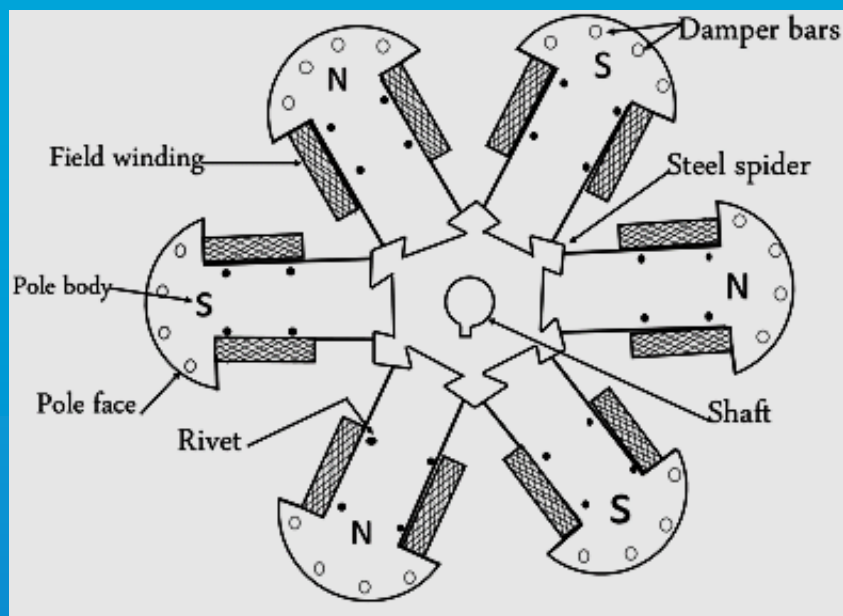
Întrucât mașina sincronă dezvoltă cuplu electromagnetic NUMAI la sincronism, motorul sincron NU are cuplu de pornire.

**A. Pornirea cu motor de antrenare (se antrenează mașina sincronă până în apropierea sincronismului; se îndeplinesc condițiile de cuplare în paralel; se sincronizează mașina și se trece în regim de motor).**

**B. Pornirea cu frecvență și tensiune variabile**

**C. Pornirea în asincron**

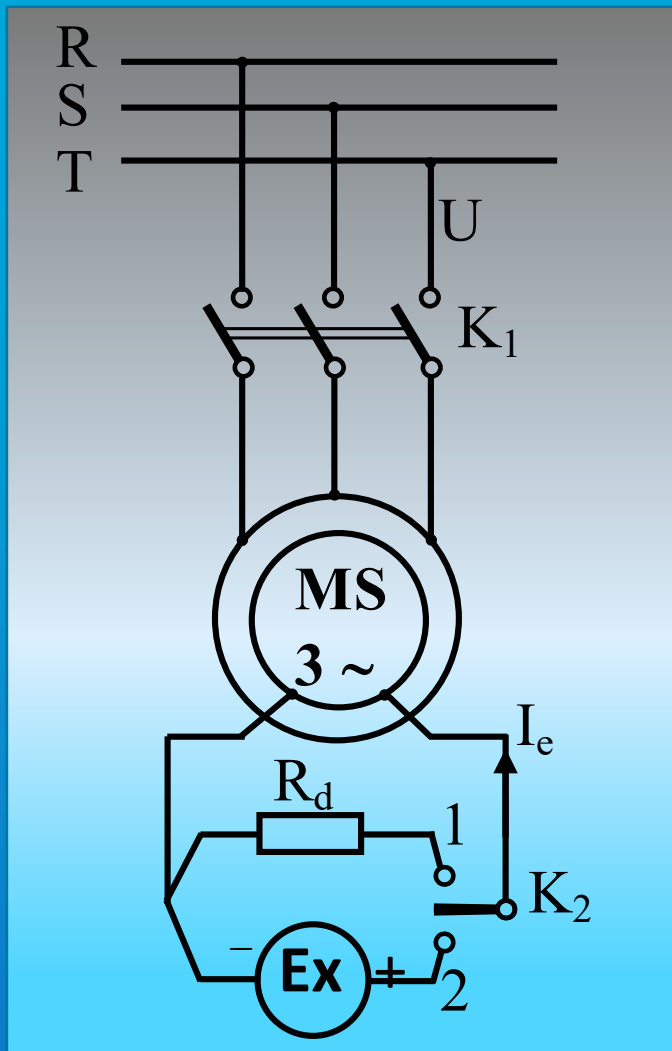
# Pornirea in asincron



**Pentru a putea fi pornită in asincron, mașina sincronă TREBUIE sa aibă înfășurare de pornire.**

**Prin alimentarea înfășurării statorice de la rețea si apariția câmpului învârtitor, sunt create condițiile similare existente in motorul asincron.**

**Problema suplimentară ce trebuie rezolvată constă in protejarea înfășurării inductoare de pe polii rotorici si respectiv a sursei de alimentare a acesteia (excitatricea) întrucât, conform legii inducției electromagnetice, si in această înfășurare se induc tensiuni care pot distruge fie înfășurarea fie excitatricea. In acest scop, este OBLIGATORIE deconectarea înfășurării rotorice de la sursa de alimentare cu c.c.**



Pentru protecție se conectează înfășurarea de excitație pe o rezistență (special calculată)  $R_d$ . Aceasta trebuie să asigure un curent care să nu deterioreze înfășurarea de excitație.

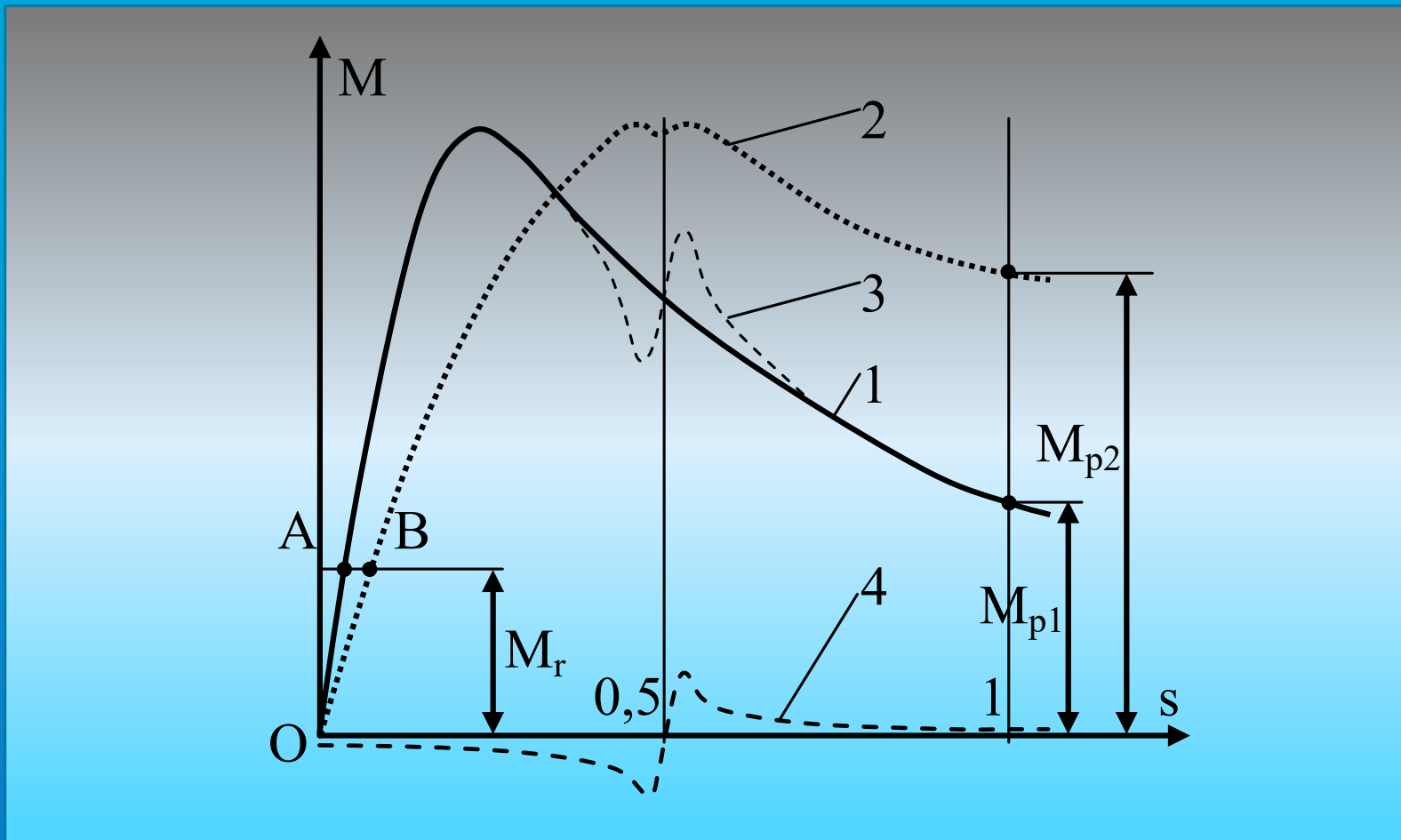
Pornirea se face în următorii pași:

1. Se decuplează înfășurarea de excitație de la sursa de tensiune continuă și se cuplează pe rezistența  $R_d$  ( $K_2$  pe poziția 1).
2. Se alimentează înfășurarea statorică (se închide  $K_1$ ).
3. Mașina sincronă pornește ca motor asincron accelerând până la cca. 95% din turația de sincronism.
4. Se conectează înfășurarea de excitație la sursa de c.c. (Ex. -  $K_2$  pe poziția 2). Mașina se sincronizează (turația crește până la sincronism) și funcționează ca motor sincron.



Sincronizare poate fi însoțită de oscilații care sunt influențate de: valoarea vitezei rotorului la care se cuplează excitația; valoarea unghiului intern la momentul cuplării; momentul de inerție al sistemului; valoarea cuplului rezistent la arbore.

# Caracteristica de pornirea in asincron



1. Curba de pornire (funcționare) in asincron

2. Curba de pornire in asincron pentru colivie de pornire de rezistență mare

3. Curba rezultanta (1+4)

4. Curba cuplului monoaxial creat de înfășurarea de excitație conectata in s.c.

**La pornirea in asincron, punctul de funcționare se deplasează pe caracteristica 1 (este caracteristica  $M=f(s)$  a unei mașini asincrone) până in punctul A.**

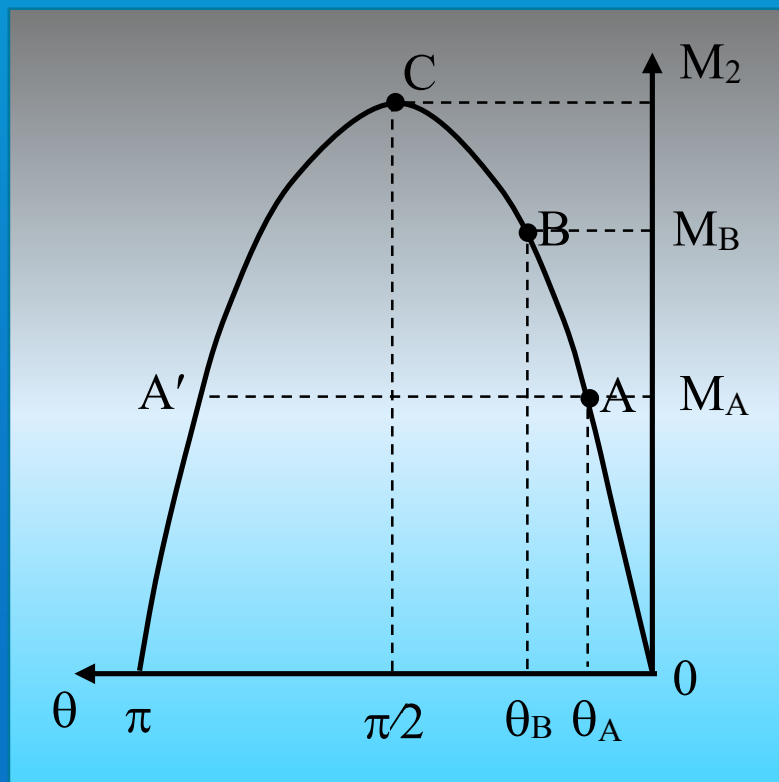
**Dacă rezistența coliviei de pornire are o valoare mare, atunci caracteristica  $M=f(s)$  este descrisă de curba 2. Se observă, cuplul de pornire este mai mare, deci este o soluție potrivită pentru porniri in sarcină grea. Punctul de funcționare evoluează până in B.**

**Pe perioada pornirii in asincron, in înfășurarea rotorică (de excitație) se induc tensiuni. Este necesar ca rezistența  $R_d$ , pe care este conectată înfășurarea de excitație, să limiteze curentul ce se stabilește prin înfășurarea de excitație. In acest fel, cuplul monoaxial generat (curba 4) nu influențează semnificativ procesul de pornire.**

**Uneori, dacă acest cuplu monoaxial este prea mare, este posibilă fixarea funcționării mașinii sincrone la o turație egală cu jumătatea turației de sincronism. In acest caz trecerea in sincronism nu mai este posibilă.**

## *Funcționare la putere variabilă și curent de excitație constant a mașinii sincrone – Stabilitate și oscilații*

- a) *Stabilitate statică – capacitatea mașinii de a funcționa normal la trecerea dintr-o stare staționară în alta (modificarea puterii la borne, în cazul generatorului sau modificarea cuplului rezistent la arbore, în cazul motorului)*

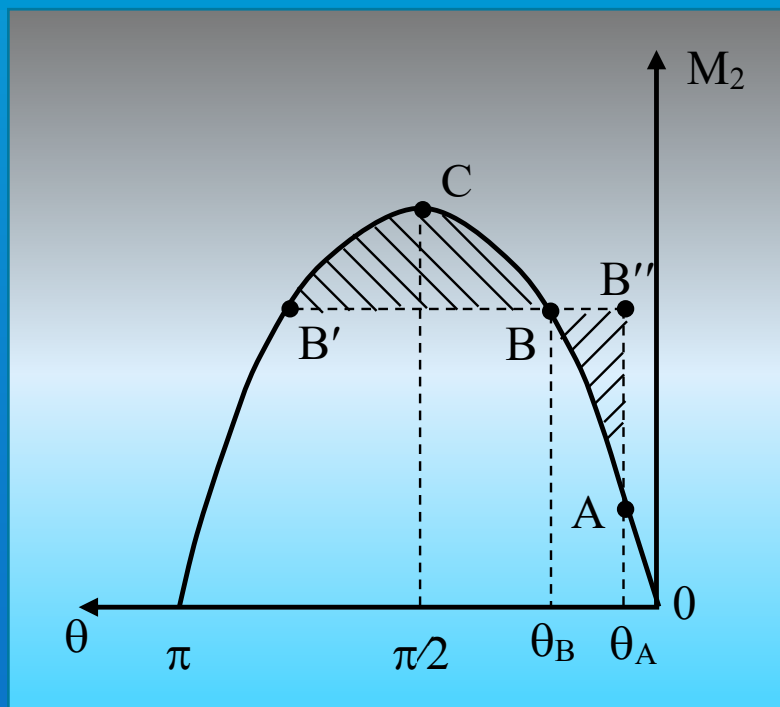


*Dacă are loc o majorare a cuplului rezistent la arbore, mașina trece din punctul de funcționare A în punctul B mărirându-și unghiul intern. Stările intermediare de funcționare sunt staționare.*



## *Funcționare la putere variabilă și curent de excitație constant a mașinii sincrone – Stabilitate și oscilații*

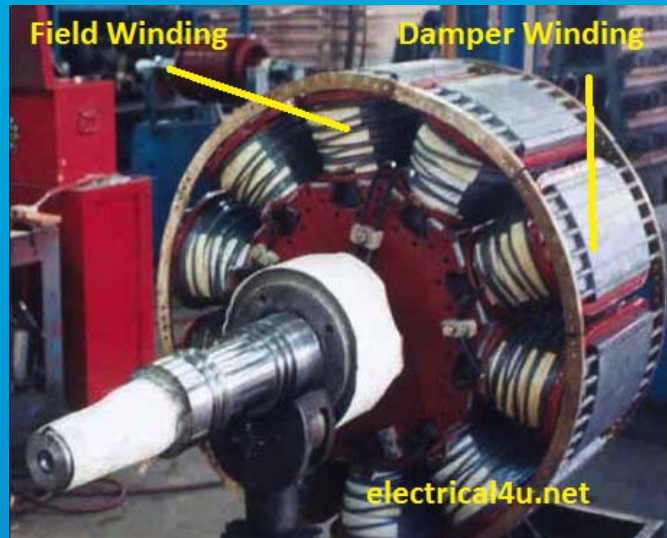
### *b) Stabilitate dinamică - capacitatea mașinii de a funcționa normal la variații bruște a sarcinii (înfășurare de amortizare)*



*O variație bruscă a sarcinii la arbore determină, datorită inerției, depășirea punctului B. Stabilirea funcționării în B are loc după niște oscilații în jurul lui B, oscilații ce sunt amortizate de înfășurarea de amortizare.*

*Este posibilă chiar depășirea punctului C, punctul limită de stabilitate, fără ca mașina să decroșeze. Acest lucru are loc doar dacă aria suprafeței  $ABB''$  este mai mică decât aria  $CBB'$ .*

## Rolul înfășurării de amortizare

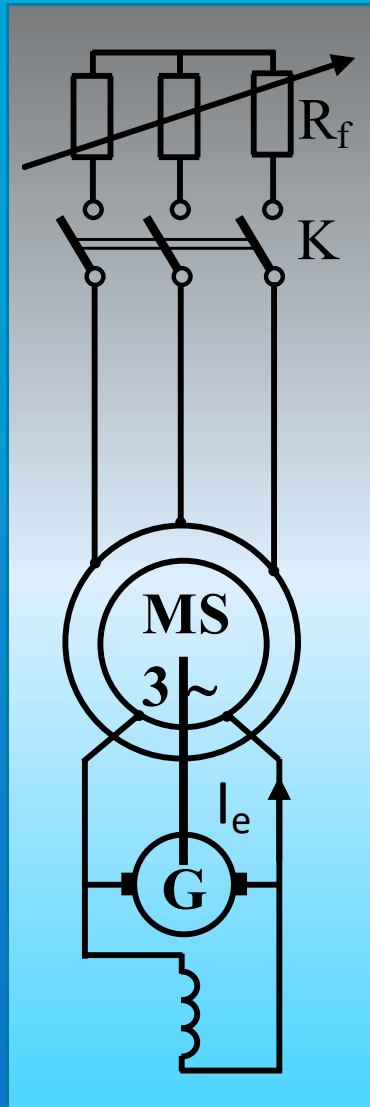


*In timpul funcționării la sincronism, întrucât viteza rotorului este egală cu viteza câmpului învârtitor statoric, nu se induce tensiuni în înfășurarea de amortizare deoarece nu există viteză relativă între înfășurare și câmp. Practic, înfășurarea de amortizare NU joacă nici un rol.*

*Să presupunem că, în timpul funcționării în regim de motor, cuplul mecanic rezistent la arbore crește brusc. Efectul constă în scăderea turației sub valoarea de sincronism. În acest moment mașina funcționează ca una asincronă. Drept urmare, se induce tensiuni în înfășurarea de amortizare, apar curenți și respectiv un cuplu electromagnetic ce accelerează mașina, din nou, până la turația de sincronism (mașina funcționează ca motor asincron). Ea revine la funcționarea de mașină sincronă eventual după câteva oscilații în jurul vitezei de sincronism (adică creșteri și scăderi ale vitezei peste și sub viteza de sincronism din ce în ce mai mici până la anulare).*

*Situația este identică dacă, în timpul funcționării în regim de motor, cuplul mecanic rezistent la arbore scade brusc. Apare o creștere a turației peste valoarea de sincronism. Mașina funcționează ca una asincronă, dar în regim de generator. Cuplul electromagnetic produs are efect de frânare a mașinii. Aceasta revine la turația de sincronism putând, de asemenea, să apară eventuale oscilații.*

# Frânarea motorului sincron



**1. Frânarea se utilizează ca regim de funcționare doar pentru oprirea controlată a mașinii (într-o perioadă de timp impusă).**

**2. Se deconectează mașina de la rețea și se conectează pe o rezistență de frânare (valoarea rezistenței determină timpul de frânare). Excitația RĂMÂNE conectată.**

**3. Frânarea este optimă dacă rezistența scade odată cu viteza mașinii (astfel cuplul de frânare se menține la o valoare ridicată).**

**4. Frânarea reprezintă, de fapt, o funcționare în regim de generator pe baza inerției mașinii.**



**Unghi intern negativ**



**Lipsa cuplu pornire**



**Înfășurare de pornire/amortizare**



**Pornire in asincron**



**Compensator sincron**

## Introduction



**You Tube** learnchannel

[www.Learnchannel-TV.com](http://www.Learnchannel-TV.com)

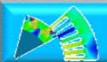
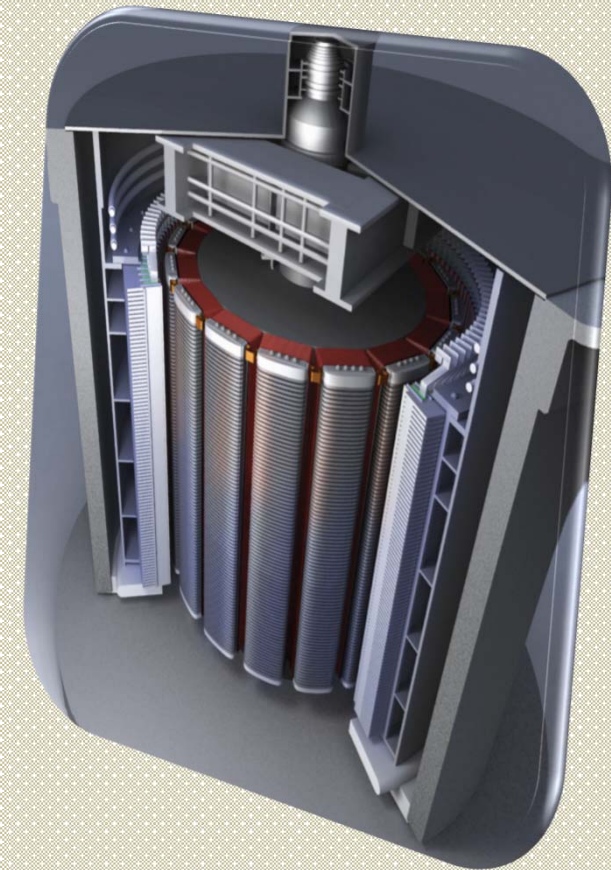
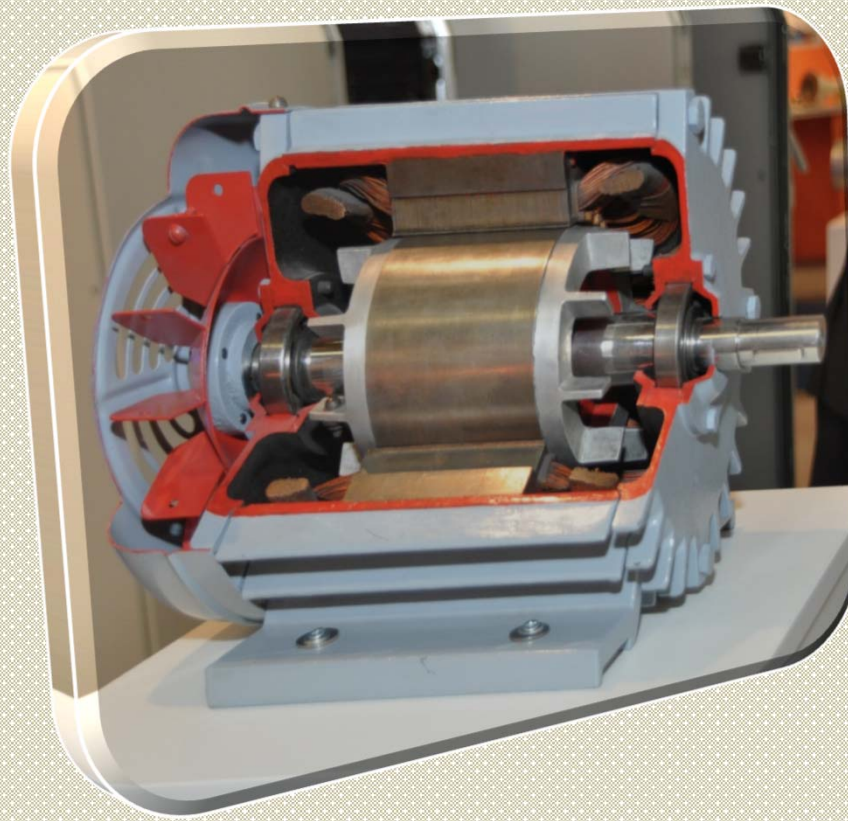


# Mașina Asincronă

vs.

CURS 12

# Mașina sincronă





# Definiție

**MAS**

Mașina de CA a cărei viteză de rotație este ÎNTOTDEAUNA DIFERITA de viteză de sincronism

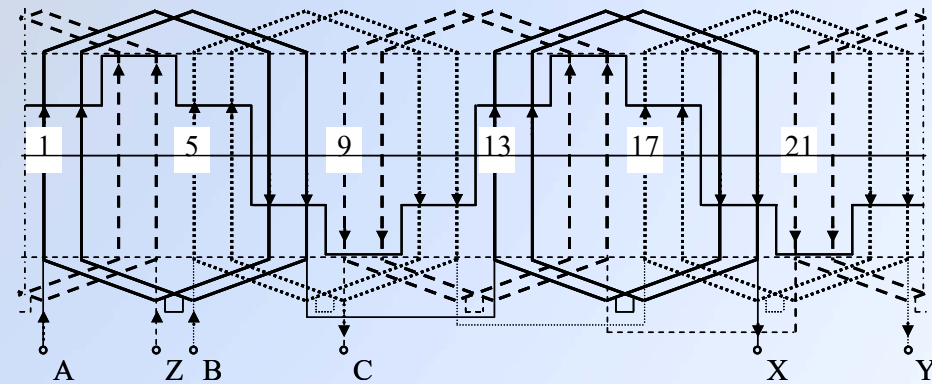
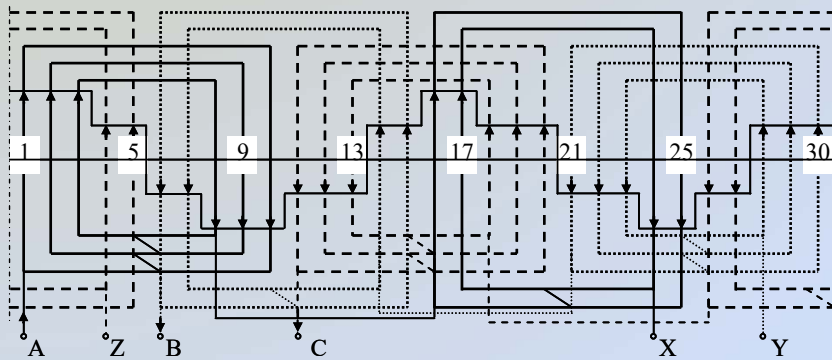
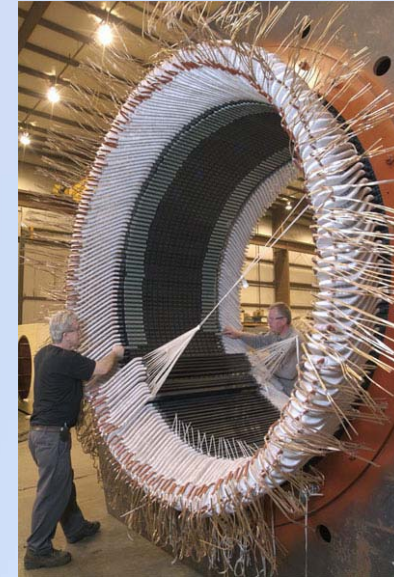
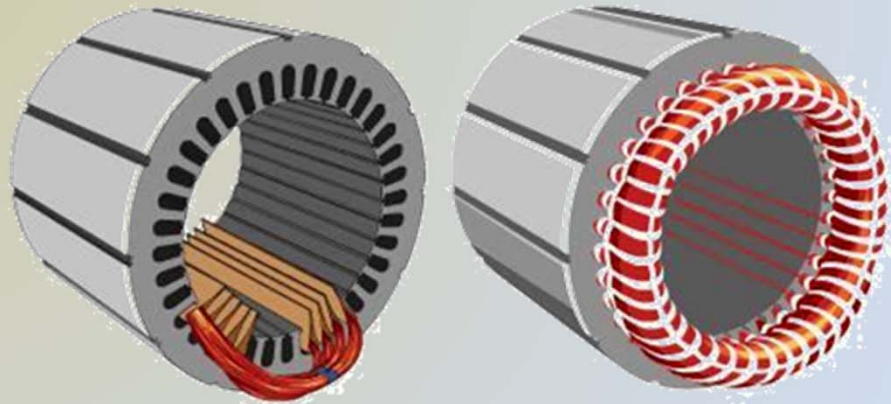
**MS**

Mașina de CA a cărei viteză de rotație este ÎNTOTDEAUNA EGALA cu viteză de sincronism

# Construcție stator

MAS

MS



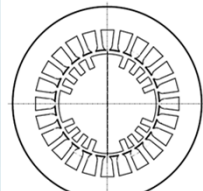


# Construcție rotor

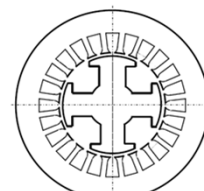
MAS



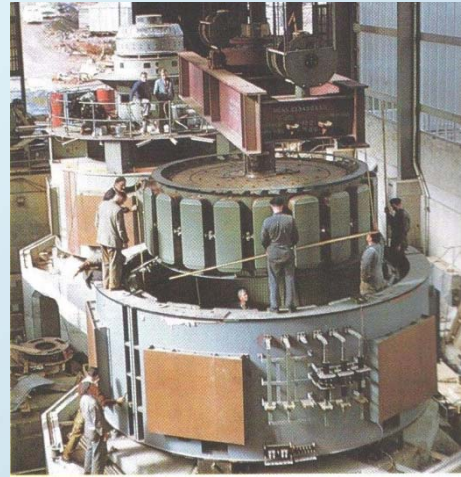
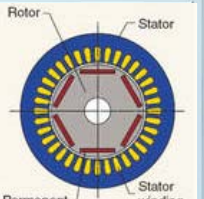
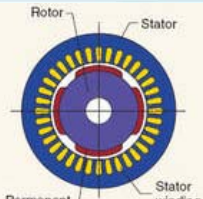
MS



Cu poli inecați



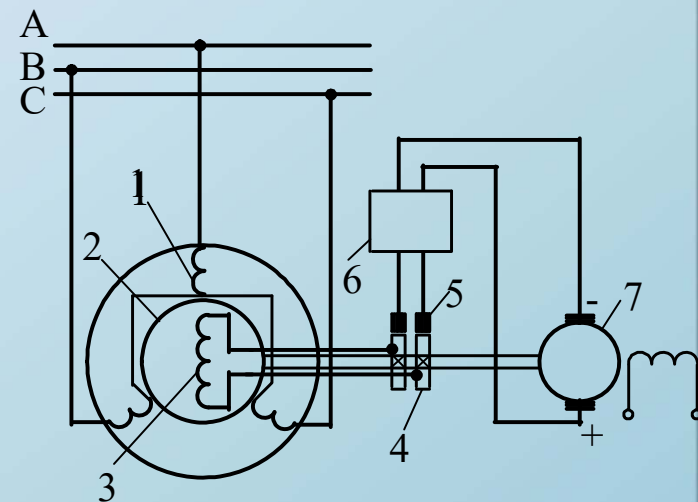
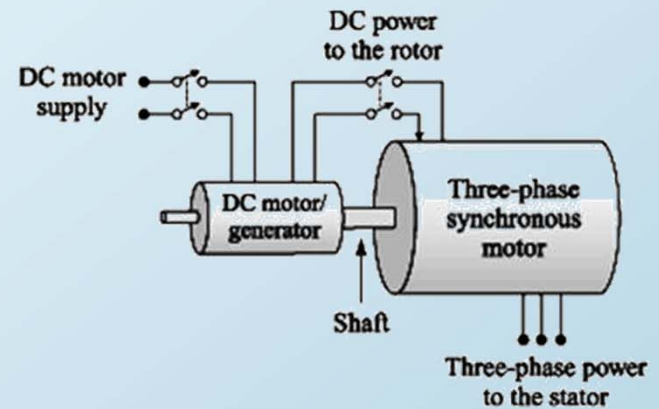
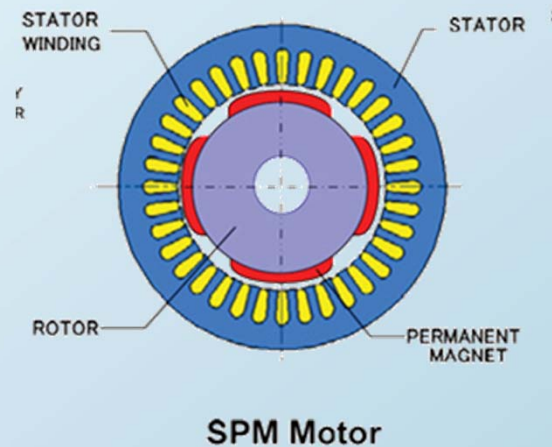
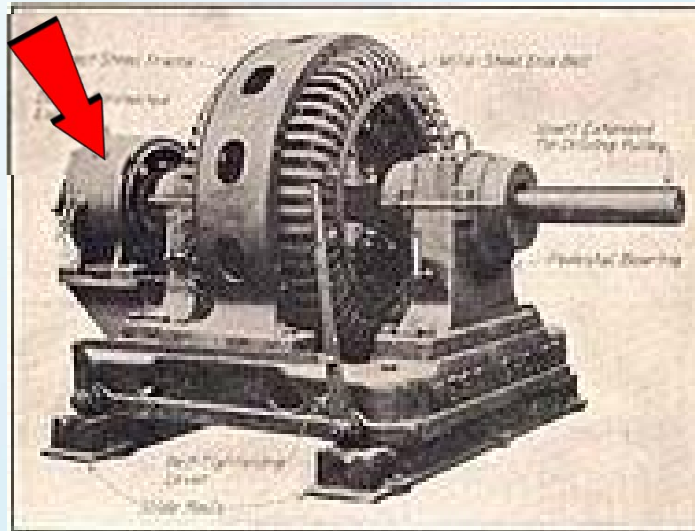
Cu poli apleți



# Sistem excitație

MAS

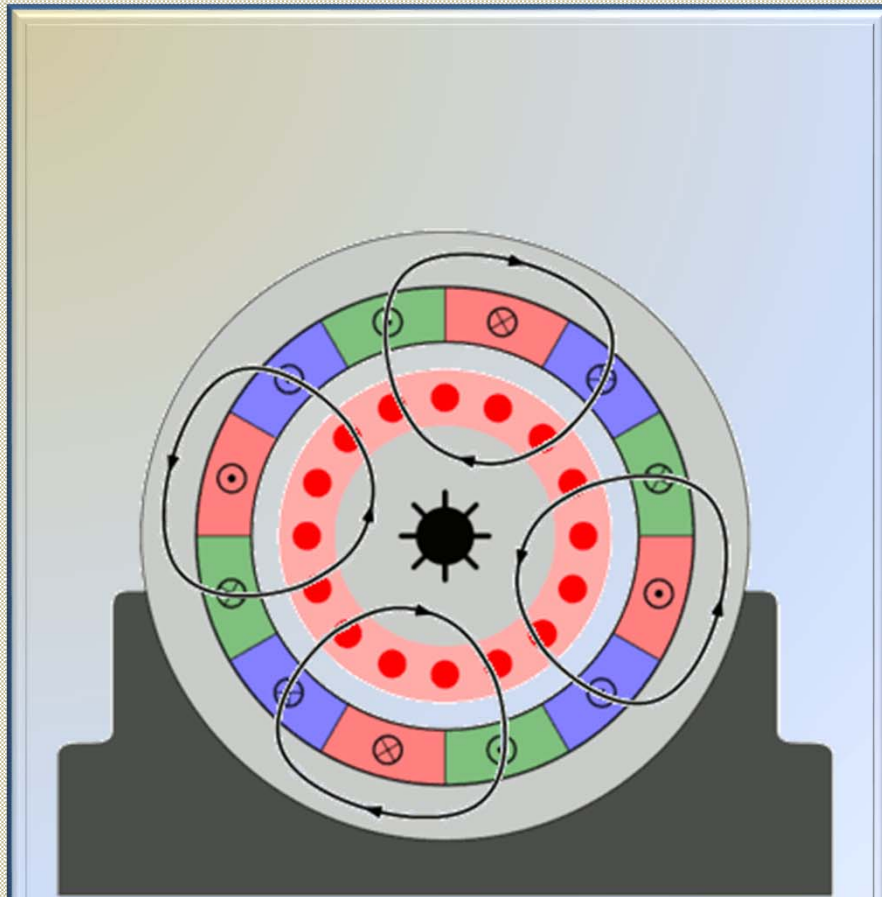
MS





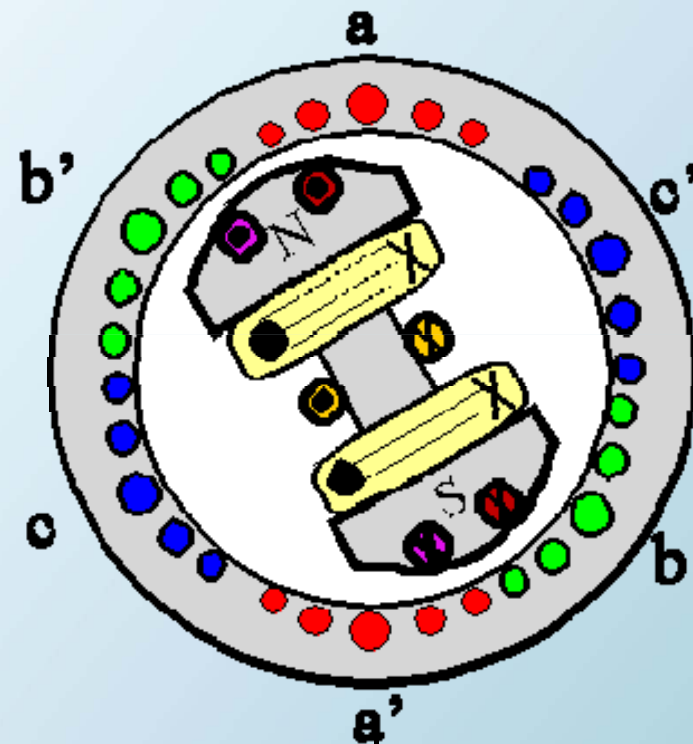
# Producere câmp magnetic învârtitor

MAS



Câmp magnetic învârtitor produs pe cale ELECTRICA

MS



Câmp magnetic învârtitor produs pe cale MECANICA

# Principiu de funcționare

## MAS

1. Producere câmp magnetic învârtitor (câmp inductor) pe cale electrică
2. Conform legii inducției electromagnetice → tensiune indusa in inf. ROTORICA
3. Apariția curentului in inf. rotorică
4. Interacțiune câmp-curent → cuplu electromagnetic

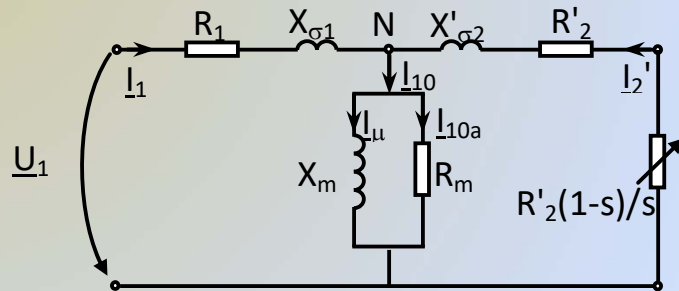
## MS

1. Producere câmp magnetic învârtitor (câmp inductor) pe cale mecanică
2. Conform legii inducției electromagnetice → tensiune indusă in inf. STATORICĂ
3. Câmp de reacție produs de infasurarea statorică
4. Cuplu de atracție mutuală între cele doua câmpuri



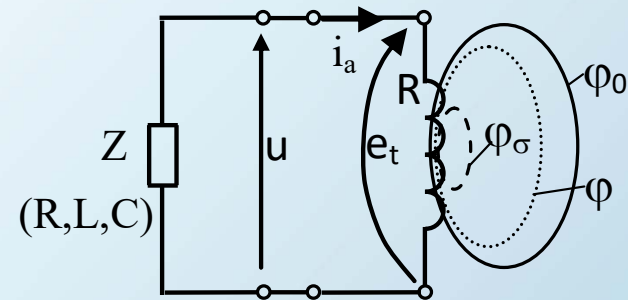
# Schema echivalenta, ecuații de circuit

MAS



$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ 0 = \frac{R'_2}{s} \underline{I}'_2 + jX'_{\sigma 2} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{E}_1 \\ \underline{I}_{1\mu} = \underline{I}_{10} = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 \end{cases}$$

MS



MS-pi

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + R \cdot \underline{I}_a + jX_s \cdot \underline{I}_a$$

MS-pa

$$\underline{U} + R \cdot \underline{I}_a + jX_d \underline{I}_{ad} + jX_q \underline{I}_{aq} = \underline{E}_0$$

# Expresia cuplului electromagnetic

MAS

$$M_e = \frac{3U_1^2 \cdot R'_2}{s \cdot \Omega_1 \left[ \left( R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \right]}$$

$$M_{emax} = \pm \frac{3U_1^2}{2c_1 \cdot \Omega_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \pm R_1}}$$

$$M_p = \frac{3U_1^2 \cdot R'_2}{\Omega_1 \left[ \left( R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \right]}$$

MS

MS-pi

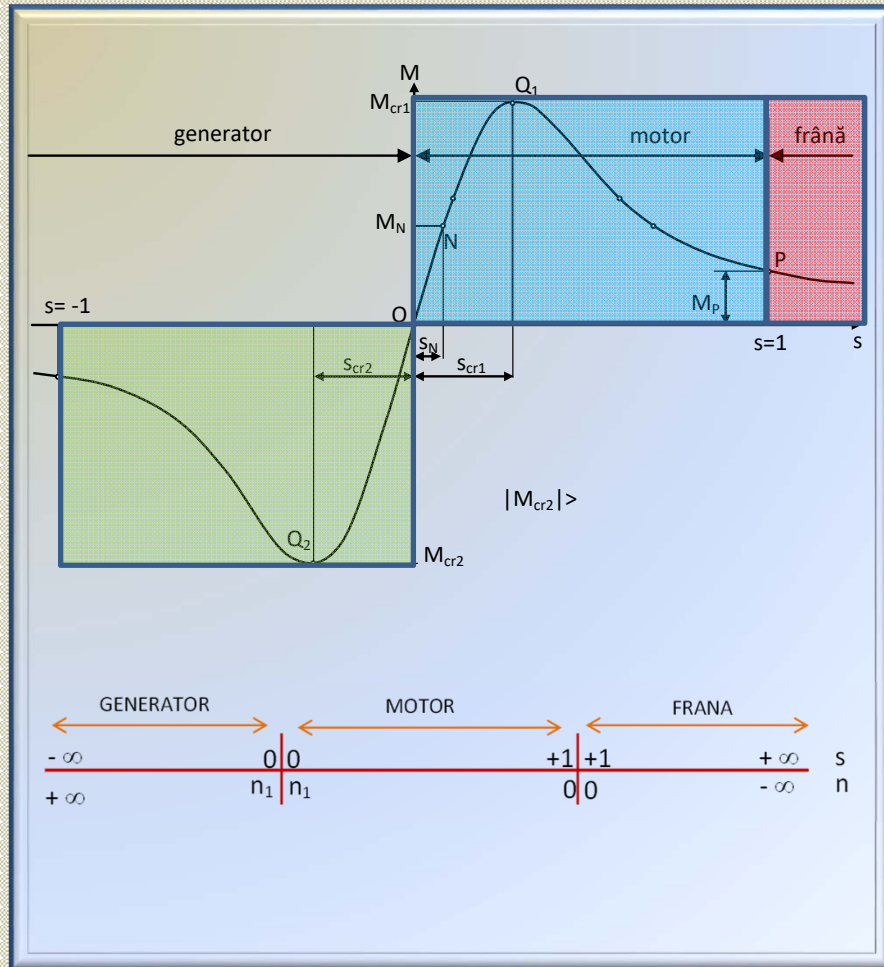
$$M_e = \frac{3}{\Omega} \cdot \left[ \frac{UE_0}{X_s} \sin \theta \right]$$

MS-pa

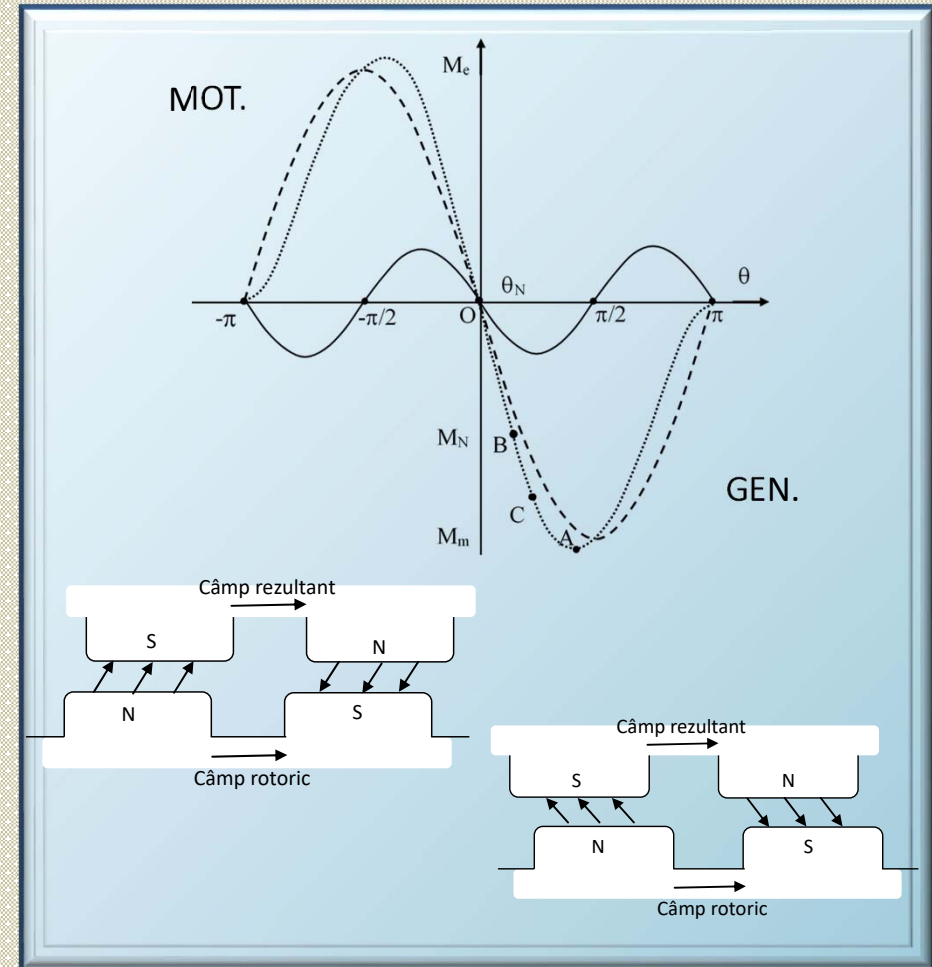
$$M_e = \frac{3}{\Omega} \left[ \frac{UE_0}{X_d} \sin \theta + \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \right]$$

# Caracteristica de cuplu

## MAS

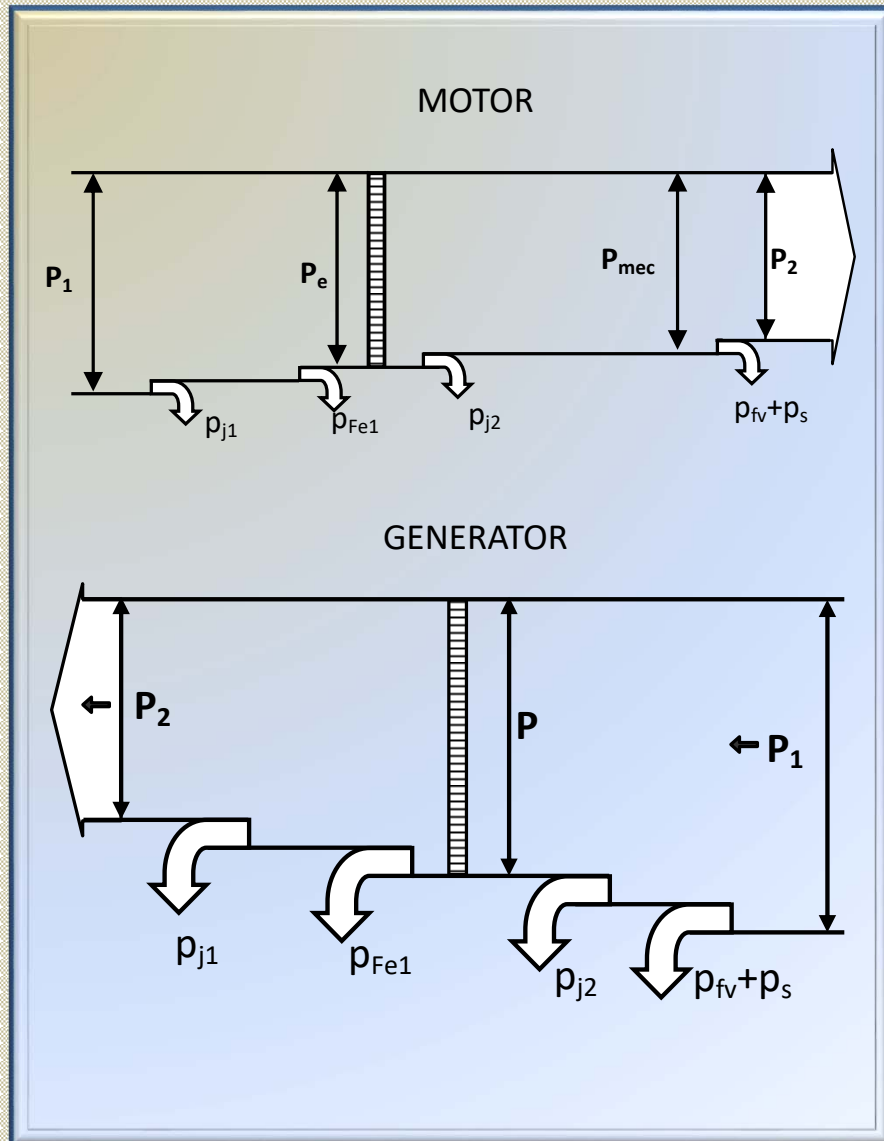


## MS

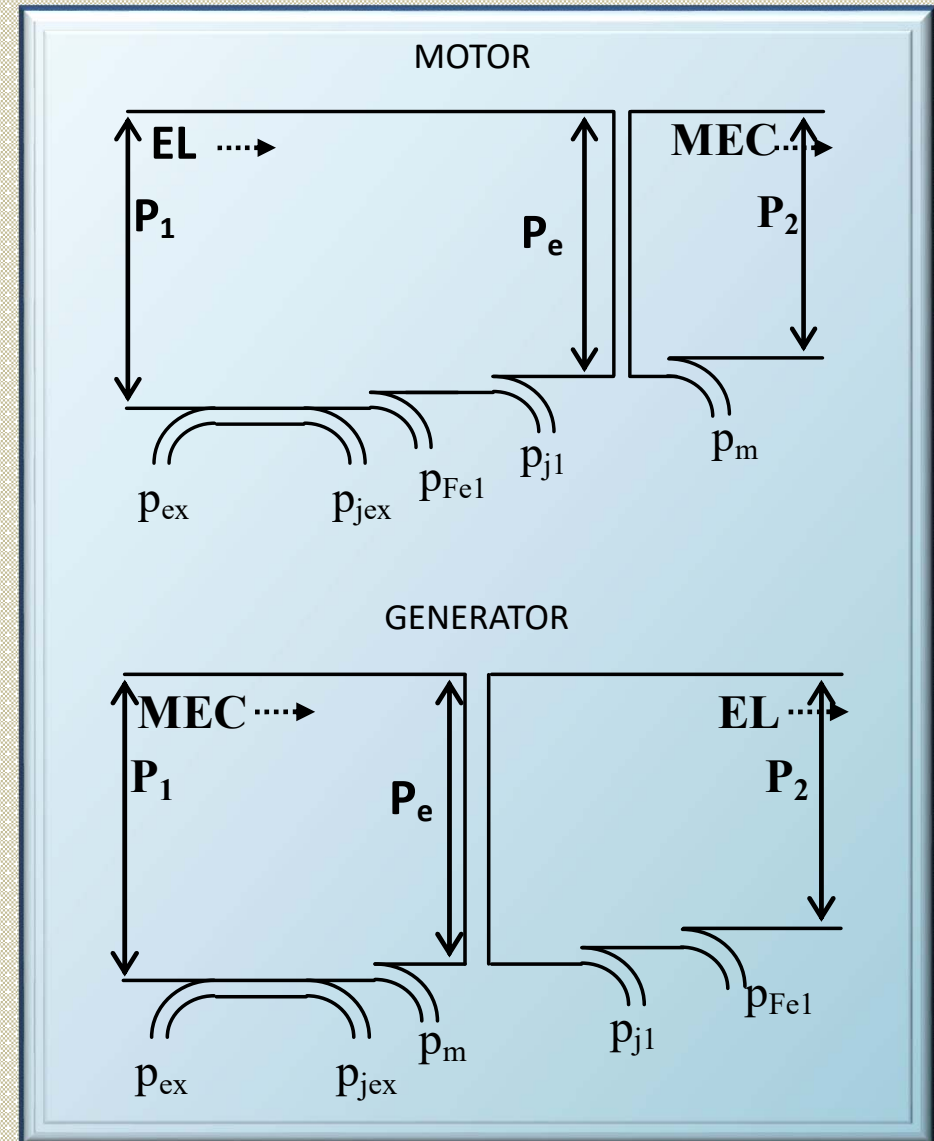


# Bilanțul puterilor

MAS



MS

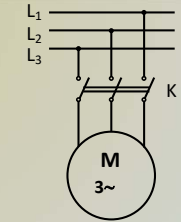
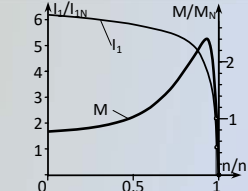




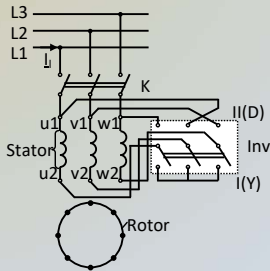
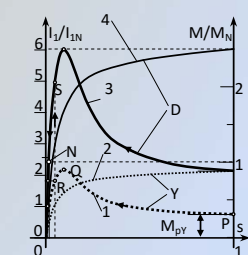
# Pornirea in regim de motor

## MAS

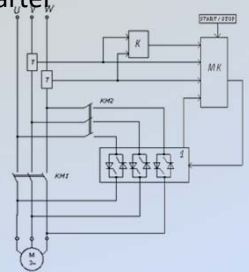
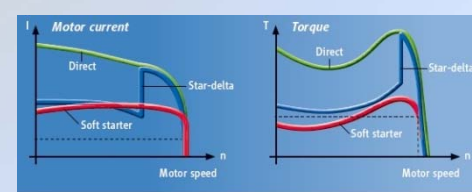
1. Direct

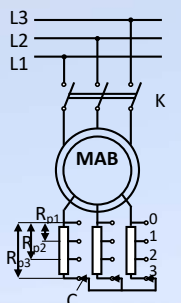
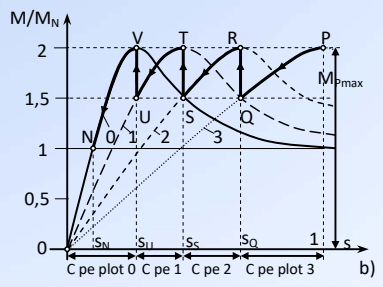
2. Y / Δ

3. Softstarter

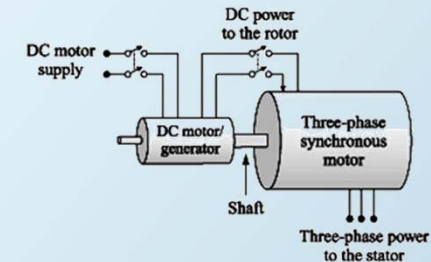



4. Cu Rp

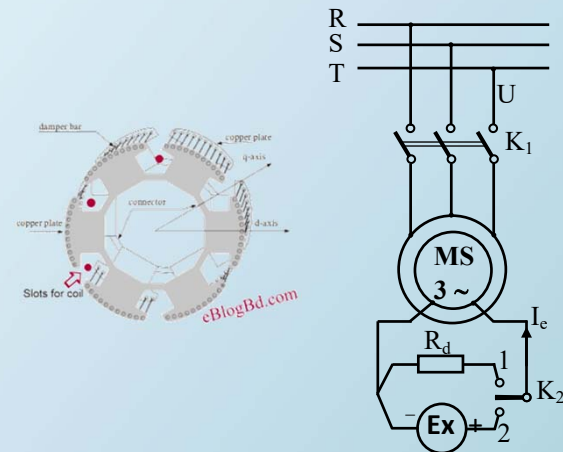



## MS

1. Cu motor de antrenare



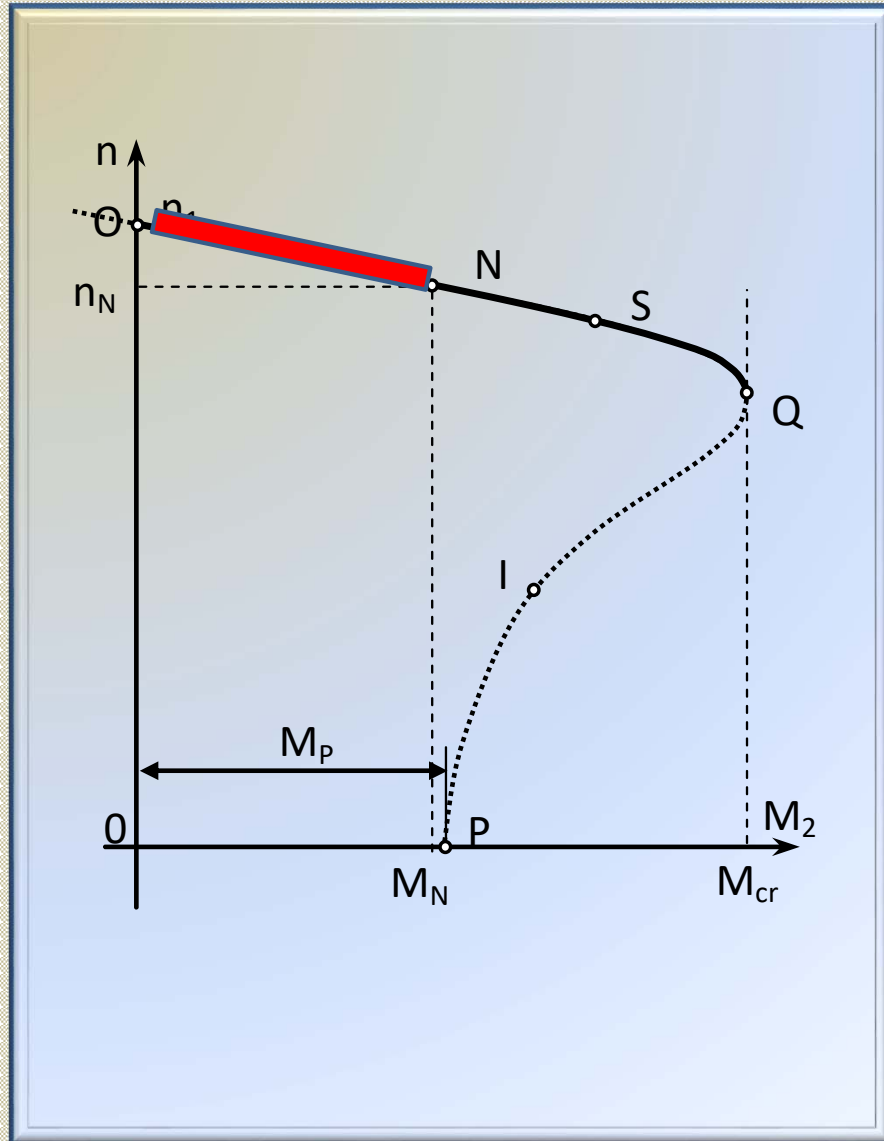
2. In asincron



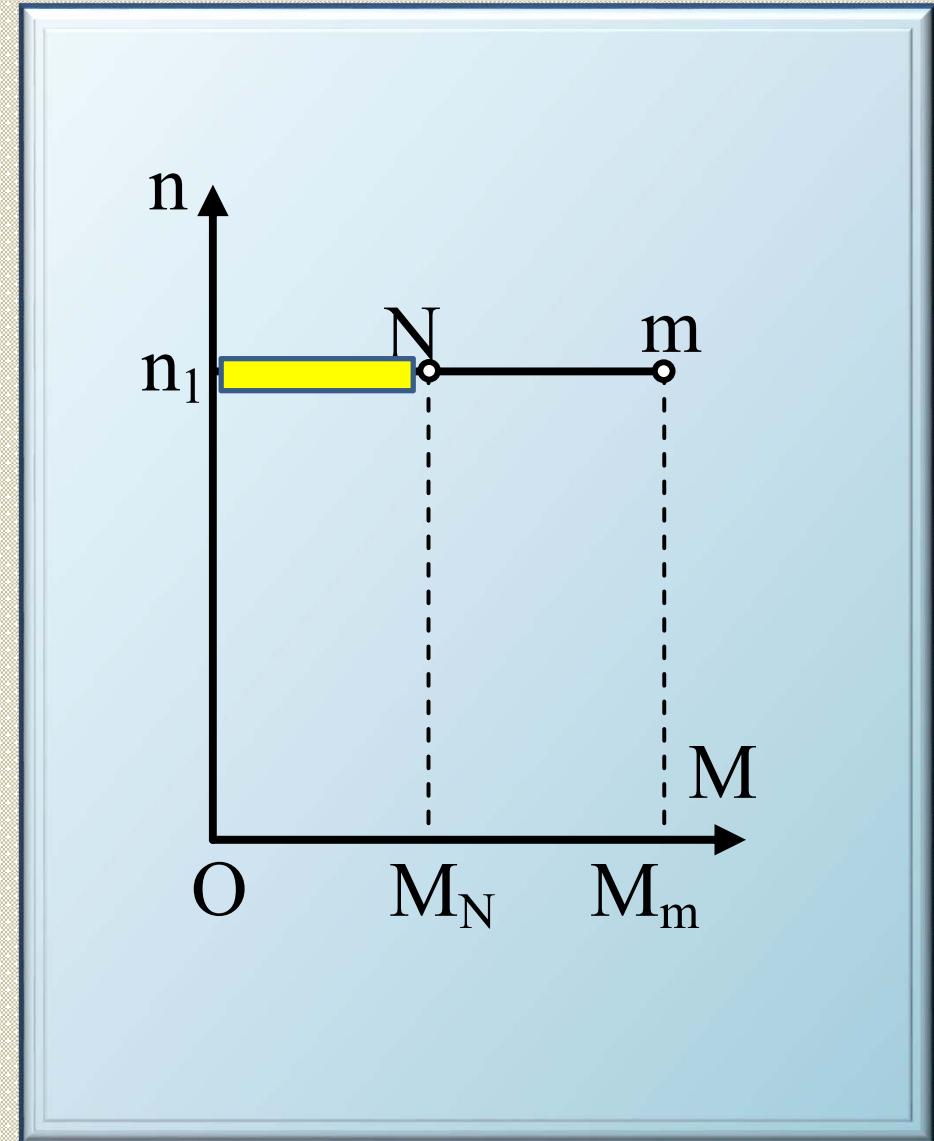
3. Cu U si f variabile

# Característica mecánica

MAS



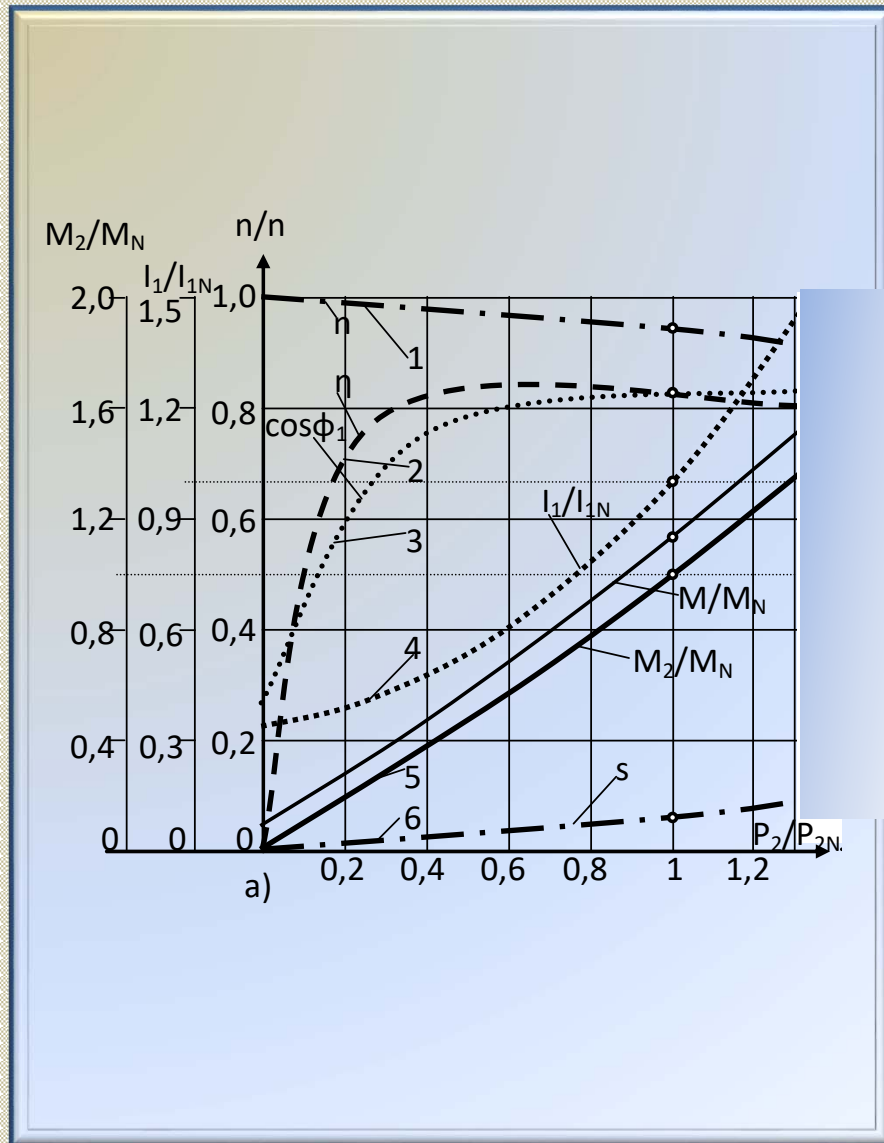
MS



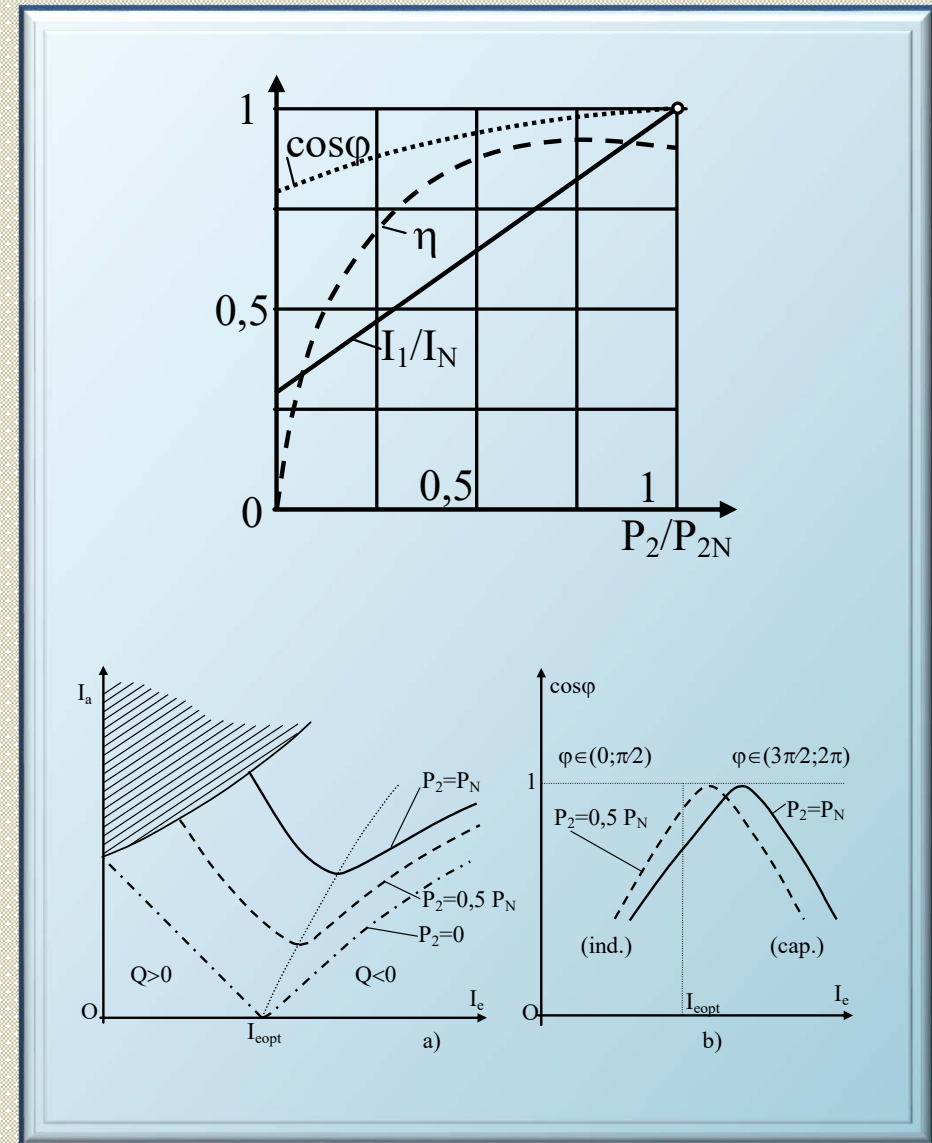


# Caracteristici de funcționare

MAS



MS



# Reglarea vitezei

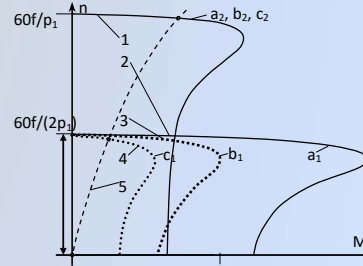
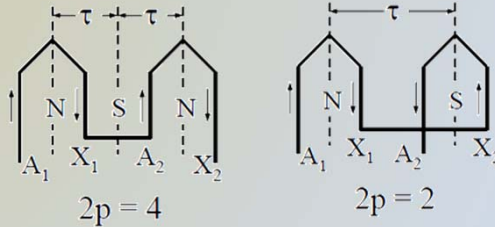
## MAS

## MS

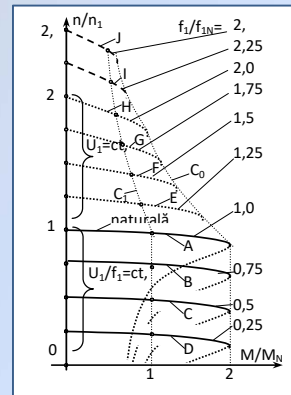
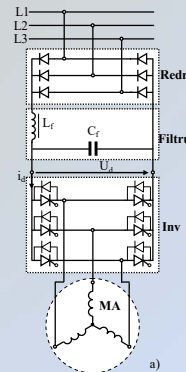
$$n = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (1 - s)$$

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$$

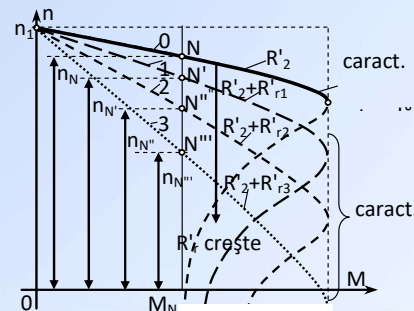
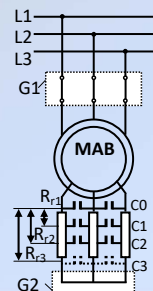
1. Dahlander



2. U si f - variabile

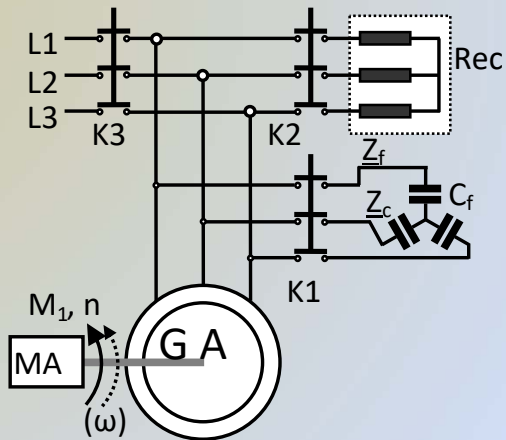


3. R in circ. rotoric



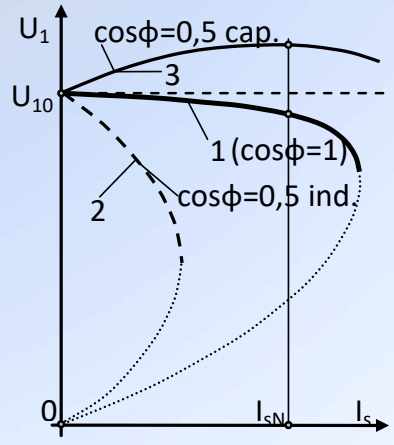
# Funcționare ca generator autonom

## MAS

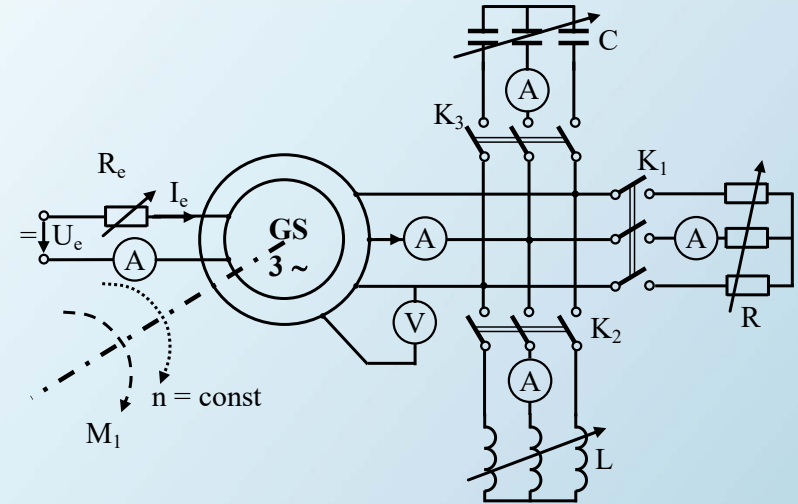


Amorsare → { Magnetism remanent  
Baterie de condensatoare

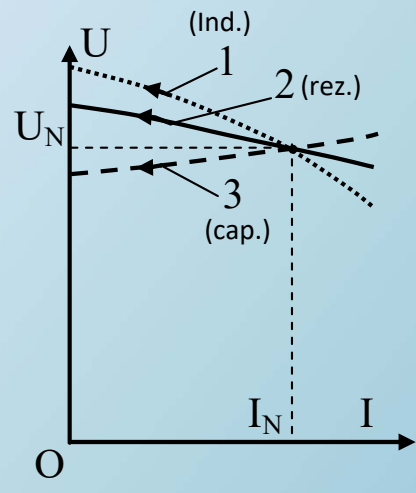
- Tensiune variabilă la borne
- Frecvență variabilă
- Amorsare
- Baterie de condensatoare
- Puterea activă cedată este proporțională cu viteza



## MS

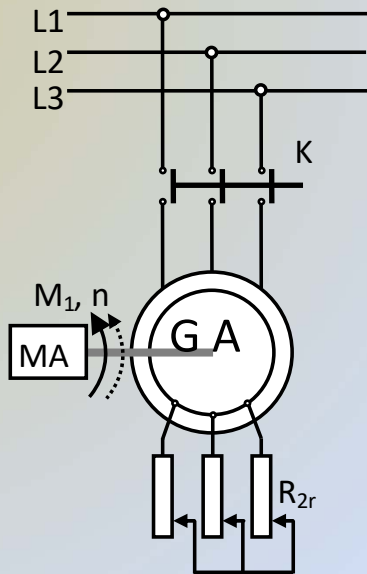


- Tensiune variabilă la borne
- Frecvență variabilă
- Generatorul sincron autonom poate funcționa la ORICE turație
- Puterea activă cedată este proporțională cu viteza



# Funcționare ca generator conectat la rețea

## MAS



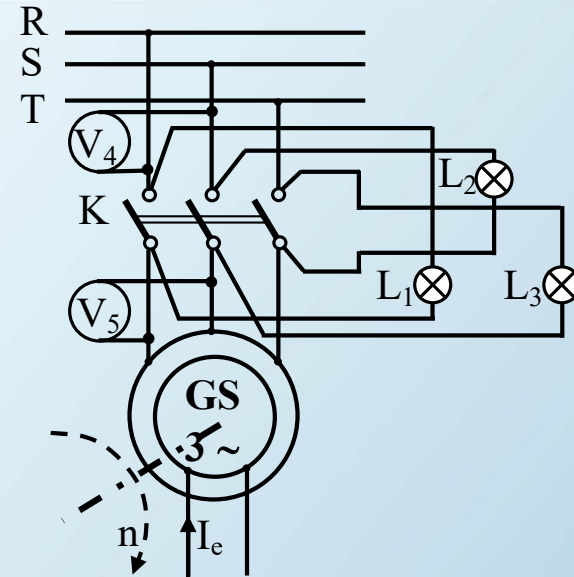
**Tensiune constantă la borne**

**Frecvență constantă**

**Cedează putere activă și absoarbe  
putere reactivă**

**Puterea activă cedată este  
proporțională cu viteza**

## MS



**Tensiune constantă la borne**

**Frecvență constantă**

**Cedează putere activă și absoarbe  
sau cedează putere reactivă**

**Funcționarea are loc la turație  
constantă (de sincronism)**



**PRODUCATOR,  
SCENARIST,  
REGIZOR**

