



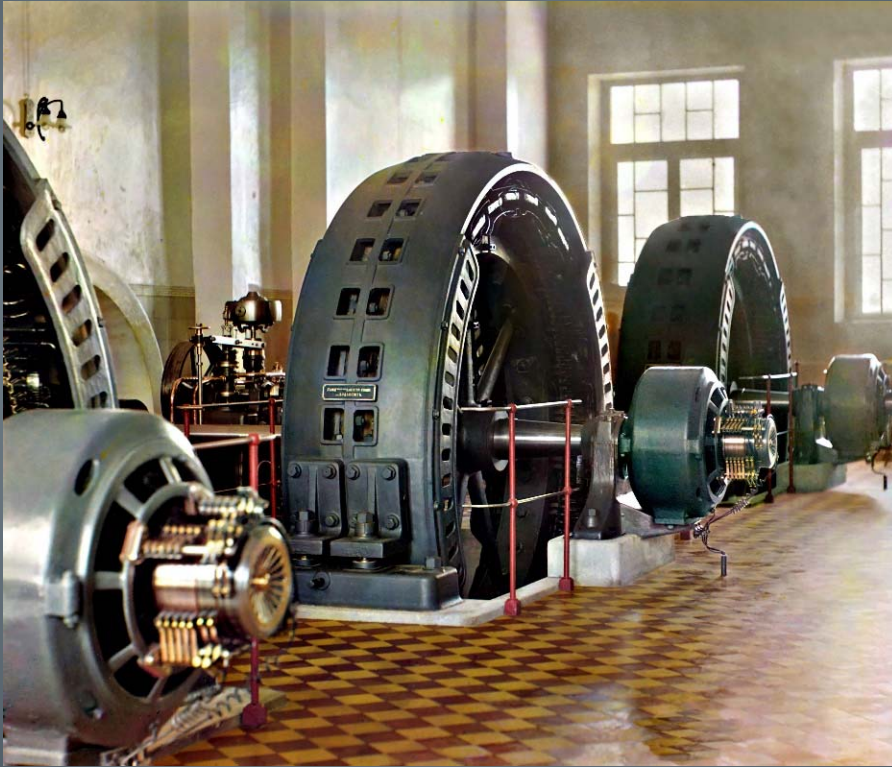
MASINI ELECTRICE



Conf Leonard Livadaru
Universitatea Tehnica Gh Asachi Iasi
2024-2025



ELECTRIC ENERGY GENERATION



HYDRO POWER PLANTS

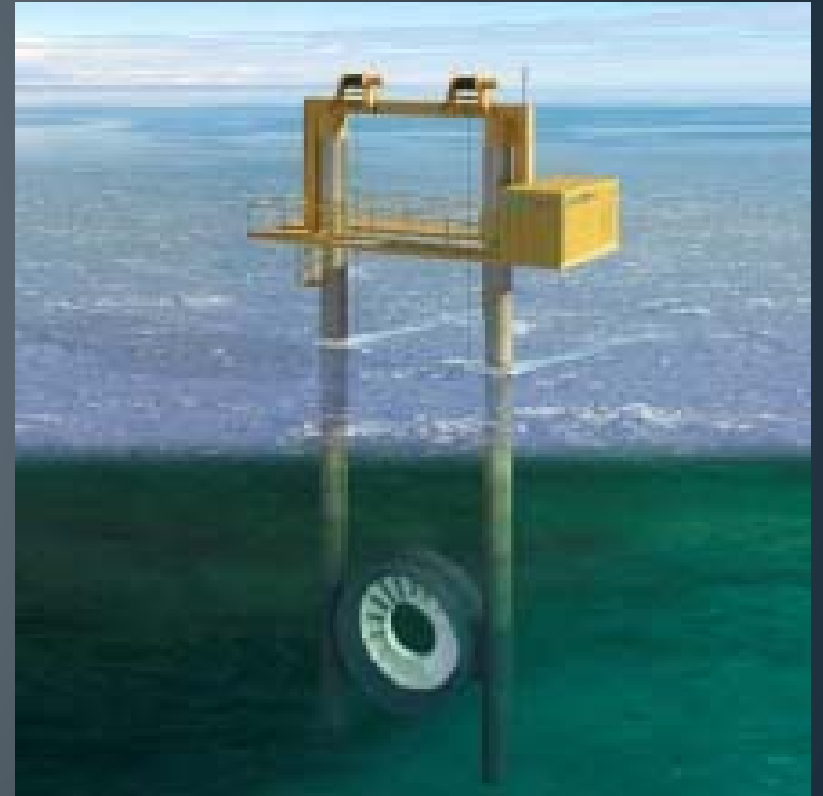
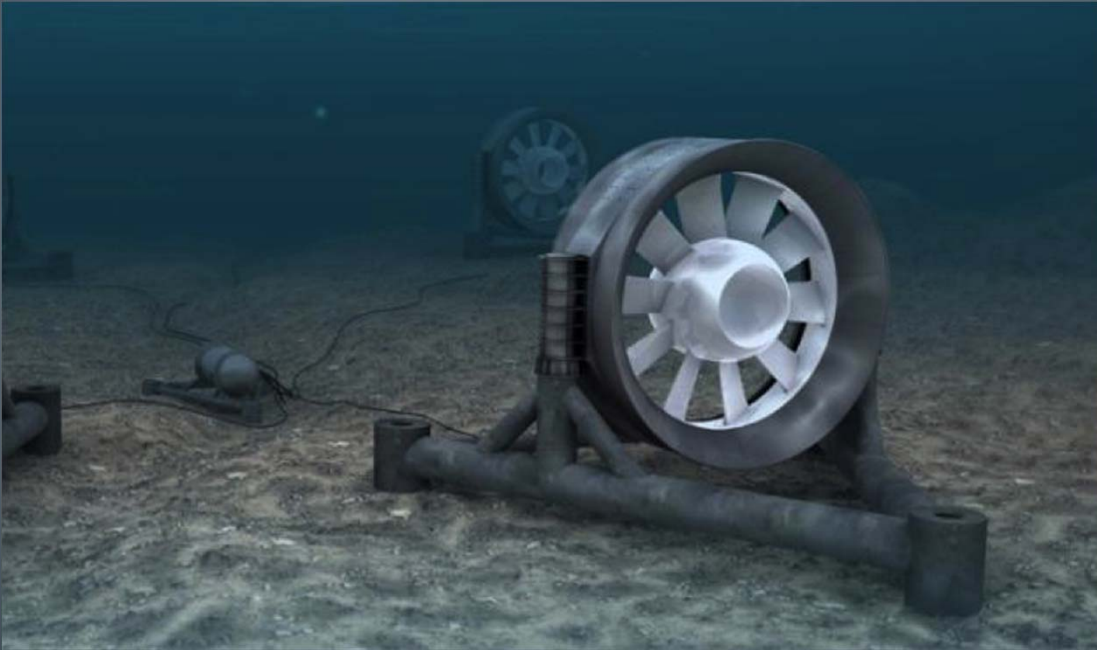


ELECTRIC ENERGY GENERATION



COAL POWER PLANTS

ELECTRIC ENERGY GENERATION



MARINE CURRENTS

ELECTRIC ENERGY GENERATION



WIND FARMS





ELECTRIC CAR

TRAMWAY





MAGLEV

TGV



SEGWAY | ninebot



SEGWAY



KLOOK



VECTRIX



APPLIANCES





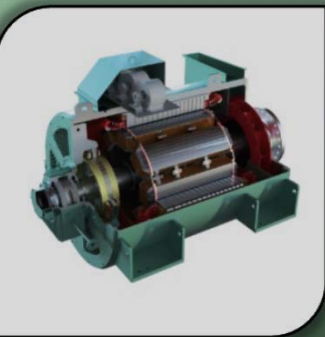
MACHINE TOOLS



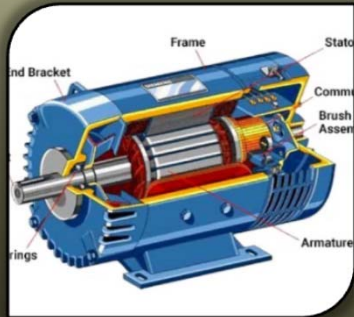
Cuprins general:



1. Mașina asincronă



2. Mașina sincronă



3. Mașina de curent continuu



4. Transformatorul electric



5. Mașini speciale

Noțiuni generale de electromagnetism

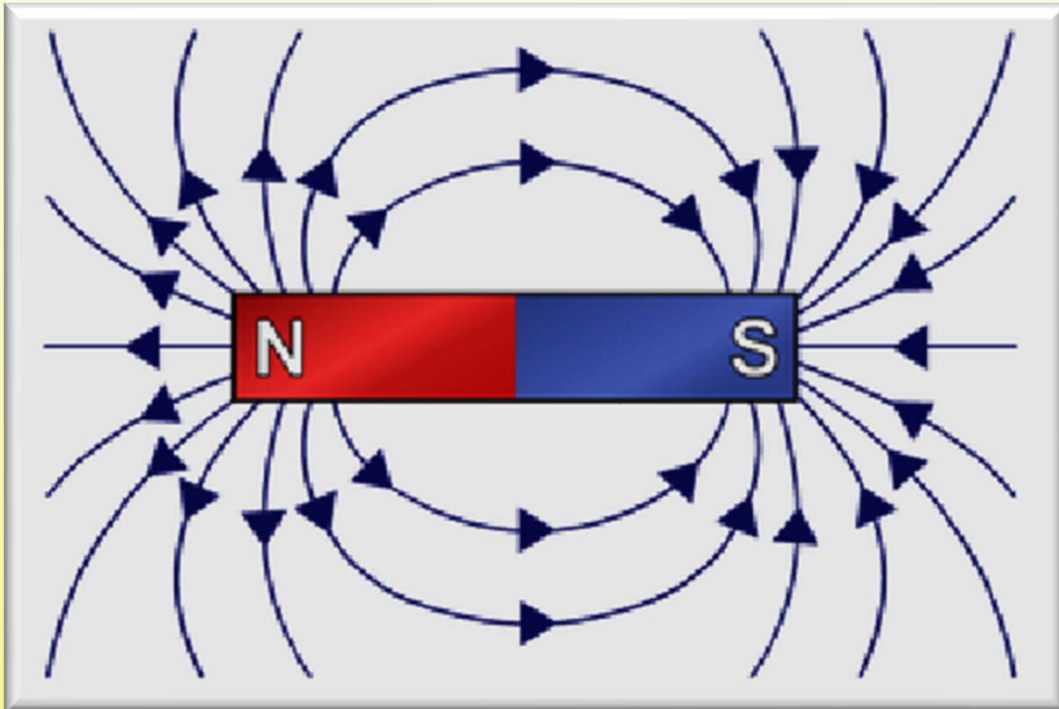


Surse de câmp magnetic

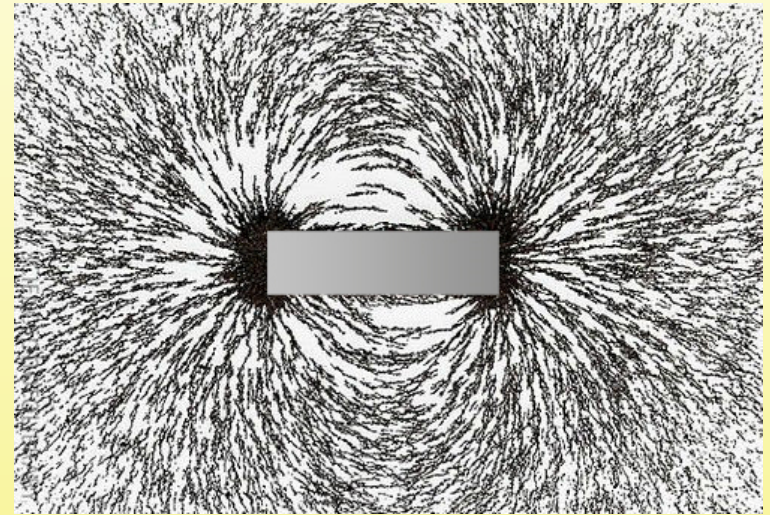
Bobine parcurse
de curent electric
(*electromagneți*)

Magneți
permanenți

Sensul liniilor de câmp create de un magnet permanent



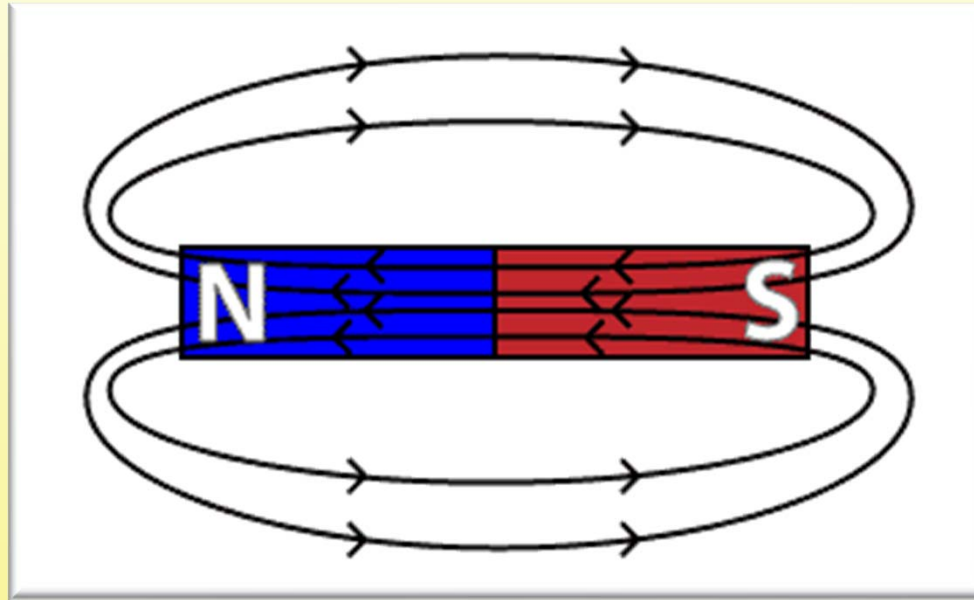
Reprezentare convențională



Reprezentare reală

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 magnet permanent



Liniile câmpului magnetic formează ÎNTOTDEAUNA curbe (trasee) închise. Acest lucru este o consecință a legii fluxului magnetic care, în forma locală, este exprimată de relația:

$$\int_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

Câmpul magnetic creat de un conductor parcurs de curent

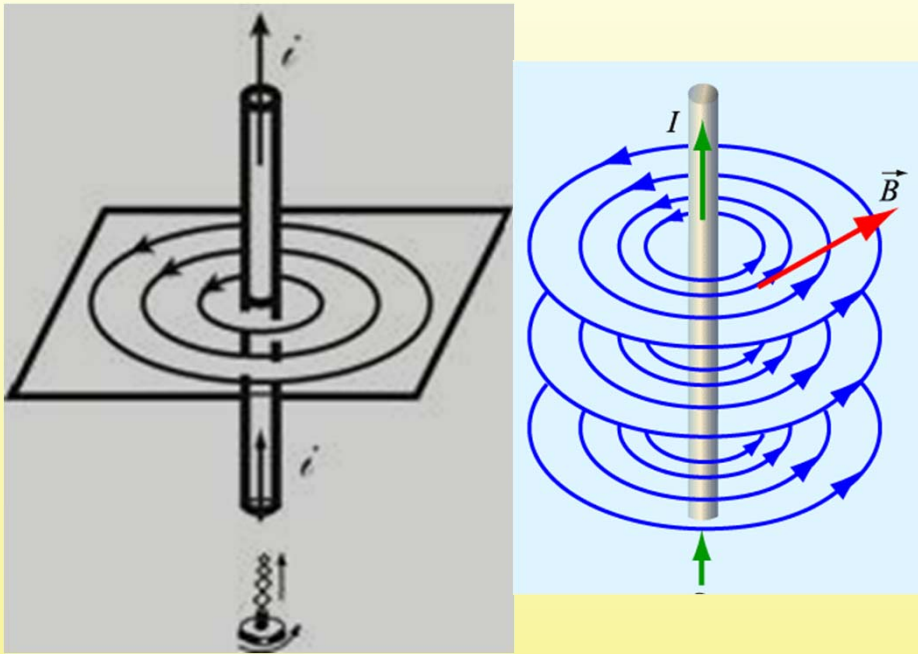


Fig. 1

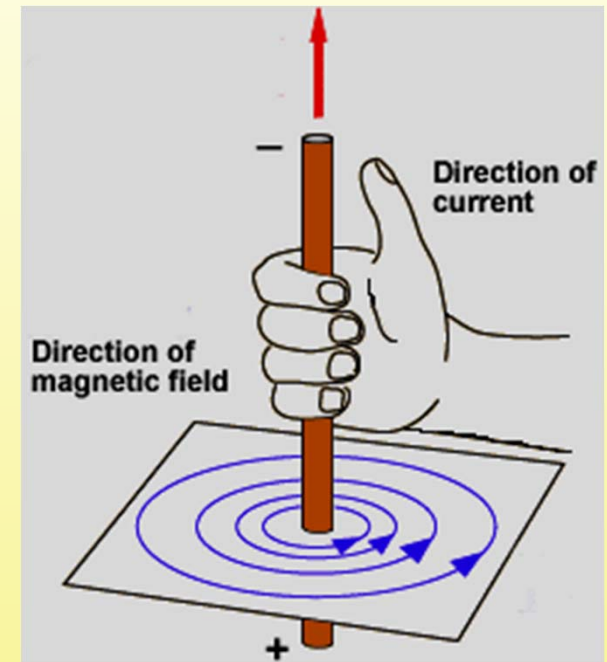
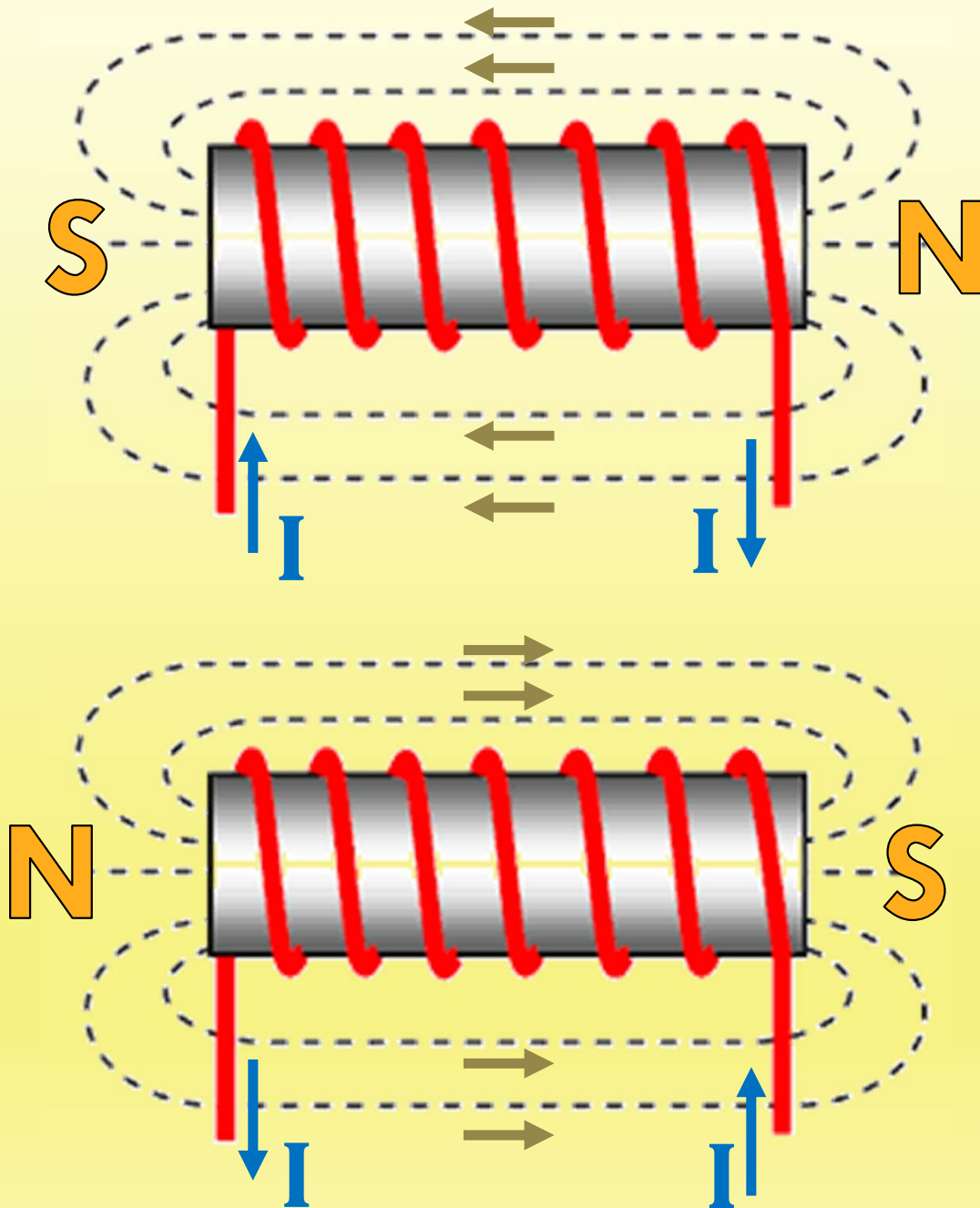


Fig. 2

Orice conductor parcurs de curent (alternativ sau continuu) creează în jurul său un câmp magnetic.

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 determina mișcarea lui în sensul curentului ce străbate conductorul) - fig. 1, sau de regula mâinii drepte – fig. 2.

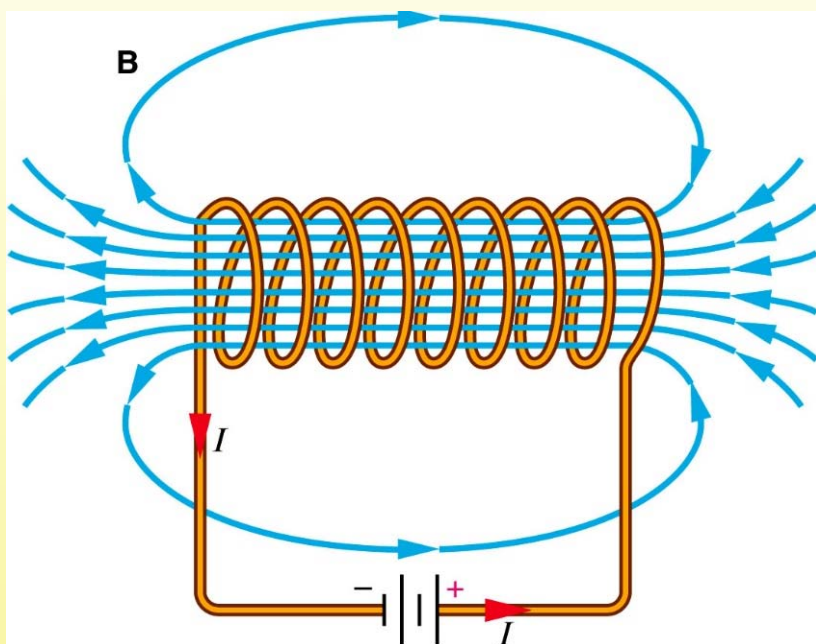
Sensul liniilor de câmp create de o bobină parcursă de curent



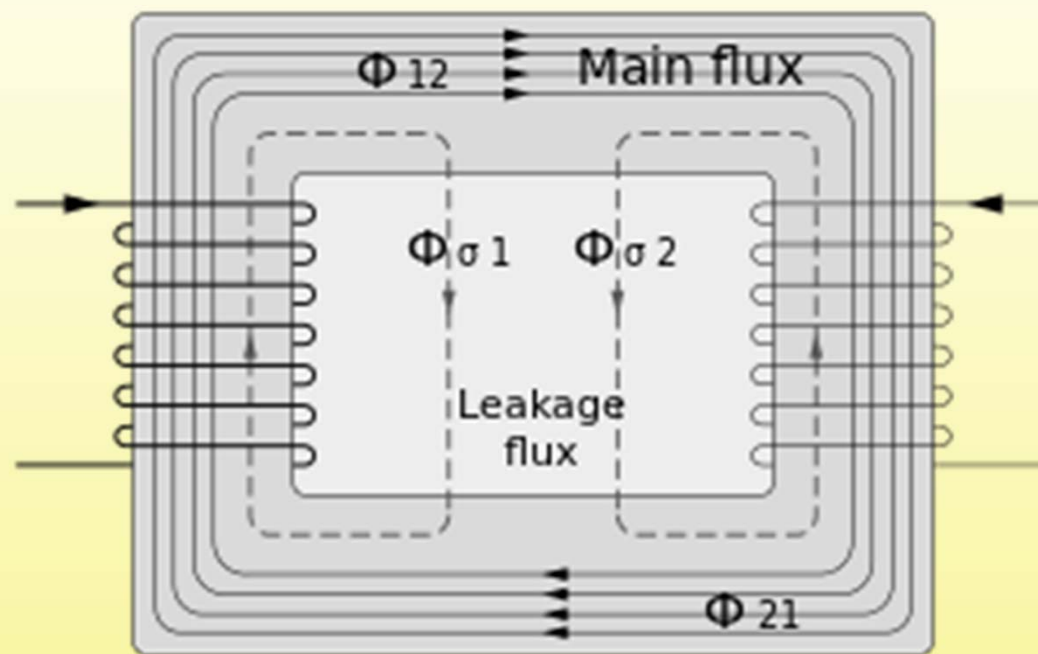
Atunci când o bobină (un solenoid) este parcursă de curent electric (indiferent dacă este c.c. sau c.a.) apare un câmp magnetic ale cărei linii se închid similar celor produse de un magnet permanent.

Sensul curentului prin spirele solenoidului determină polaritatea câmpului magnetic creat de acesta.

Convențional, liniile de câmp **ies** din polul N și **intră** în polul S.



Bobină fără miez magnetic



Bobină plasată pe un miez magnetic

Prezența unui miez magnetic duce la două consecințe importante:

- „intensifică” câmpul magnetic rezultat în secțiunea miezului;
- „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

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

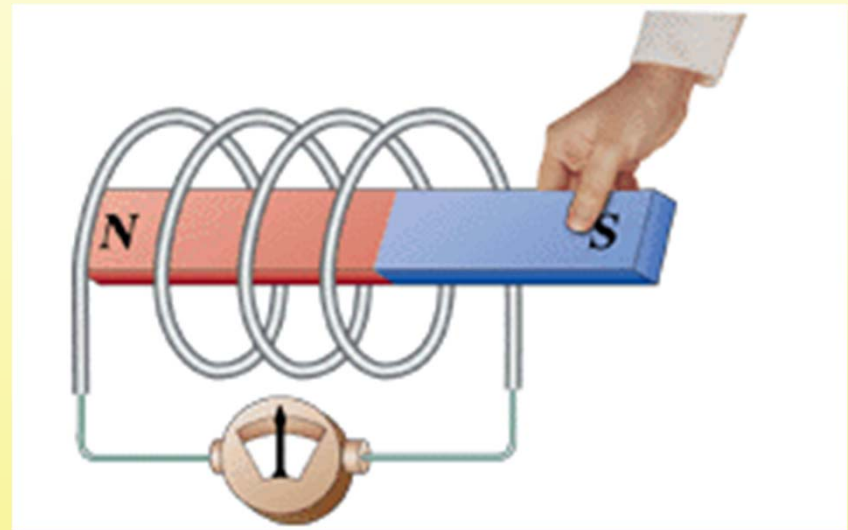
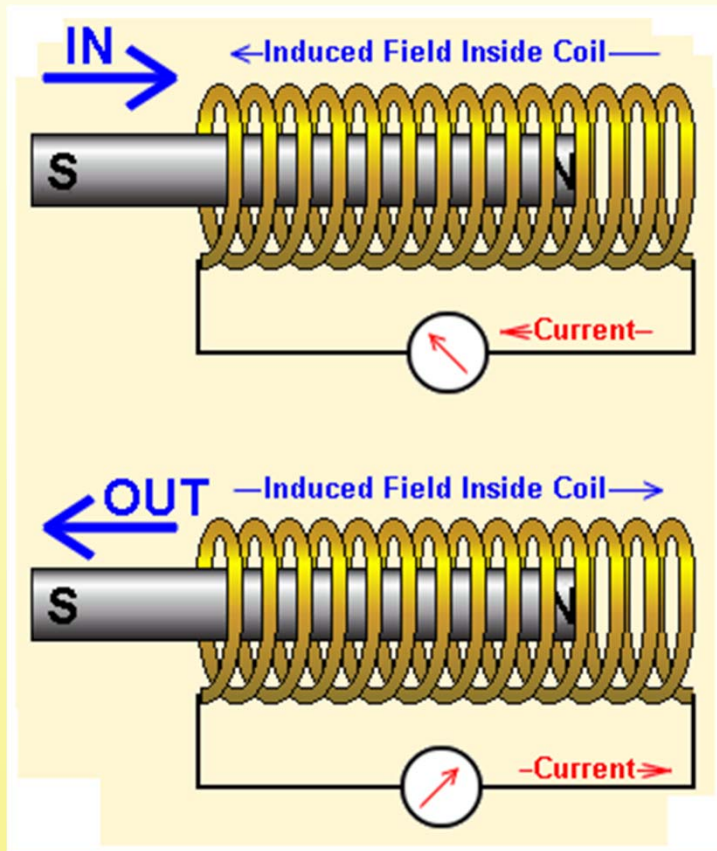
Modalități de obținere a unei tensiuni induse

1. Bobină fixă + câmp magnetic în mișcare (eventual variabil).

2. Câmp magnetic fix + bobină în mișcare.

3. Bobină în mișcare + câmp magnetic în mișcare (eventual variabil) + viteză relativă nenulă între cele două elemente în mișcare.

Bobina fixa – câmp magnetic în mișcare

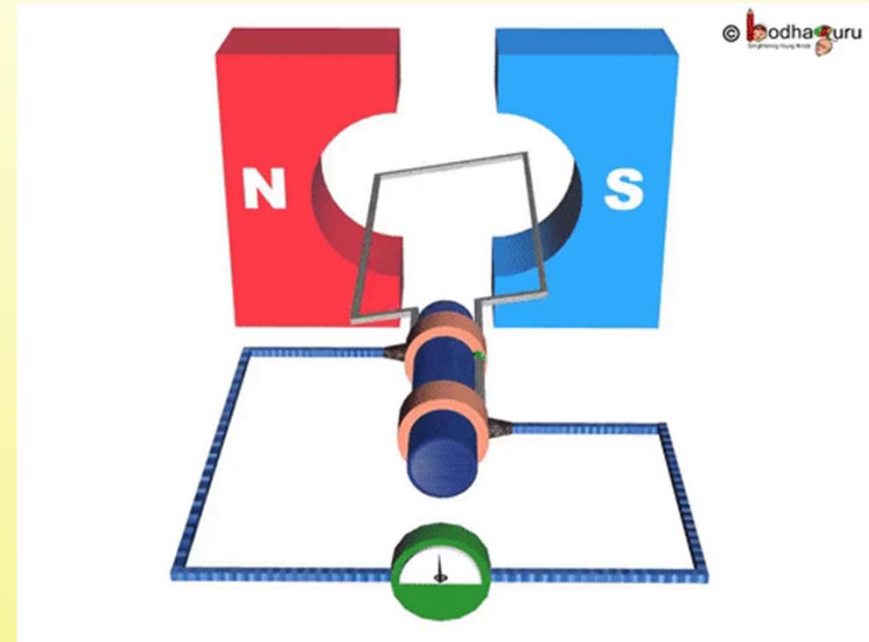
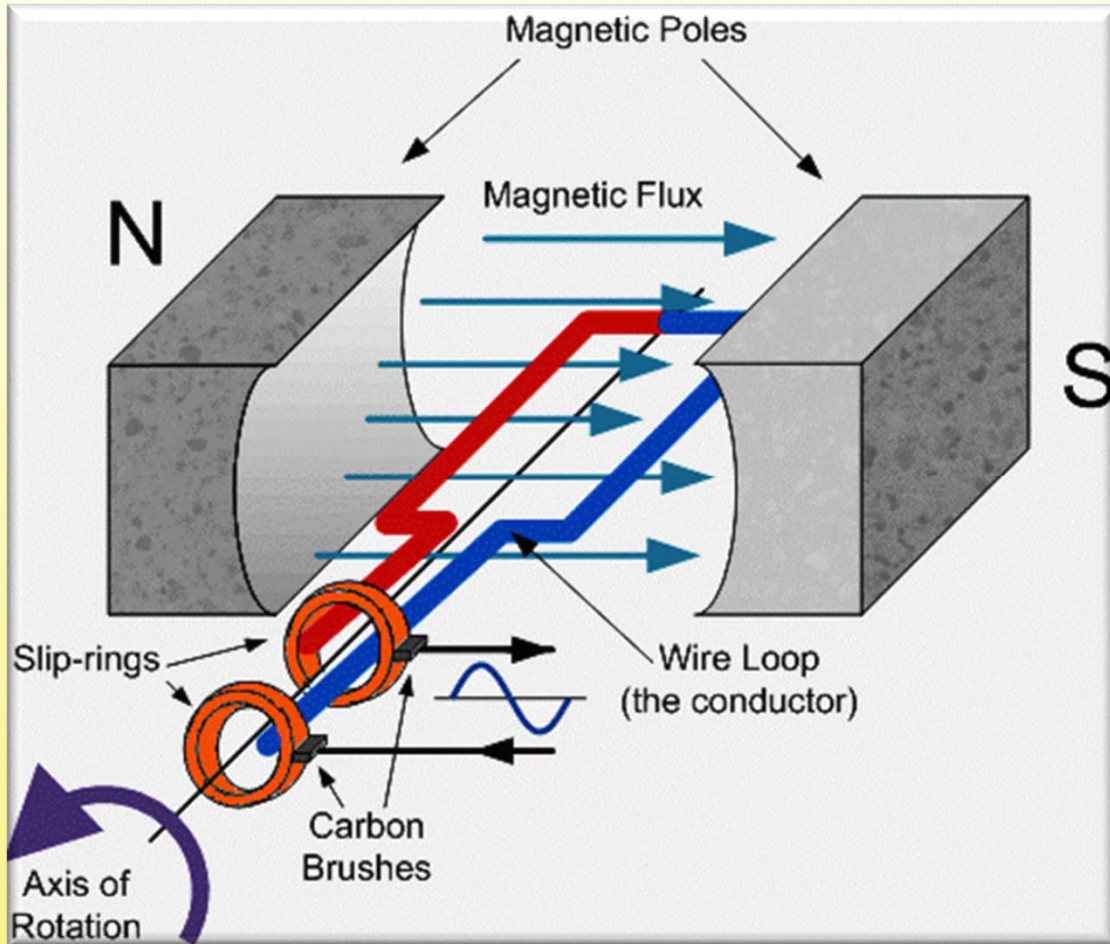


Deplasarea magnetului permanent în interiorul bobinei determină inducerea unei tensiuni în bobină. Acest fapt este demonstrat de aparatul de măsură care sesizează prezența curentului electric.

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

NUMAI mișcarea magnetului determină inducerea unei tensiuni în bobină.

Bobina în 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.

Atunci când există o mișcare relativă
între un câmp magnetic și o bobină,
va apărea o tensiune indusă.

Este vorba despre
fenomenul inducției electromagnetice .





BOBINA

+

CÂMP MAGNETIC

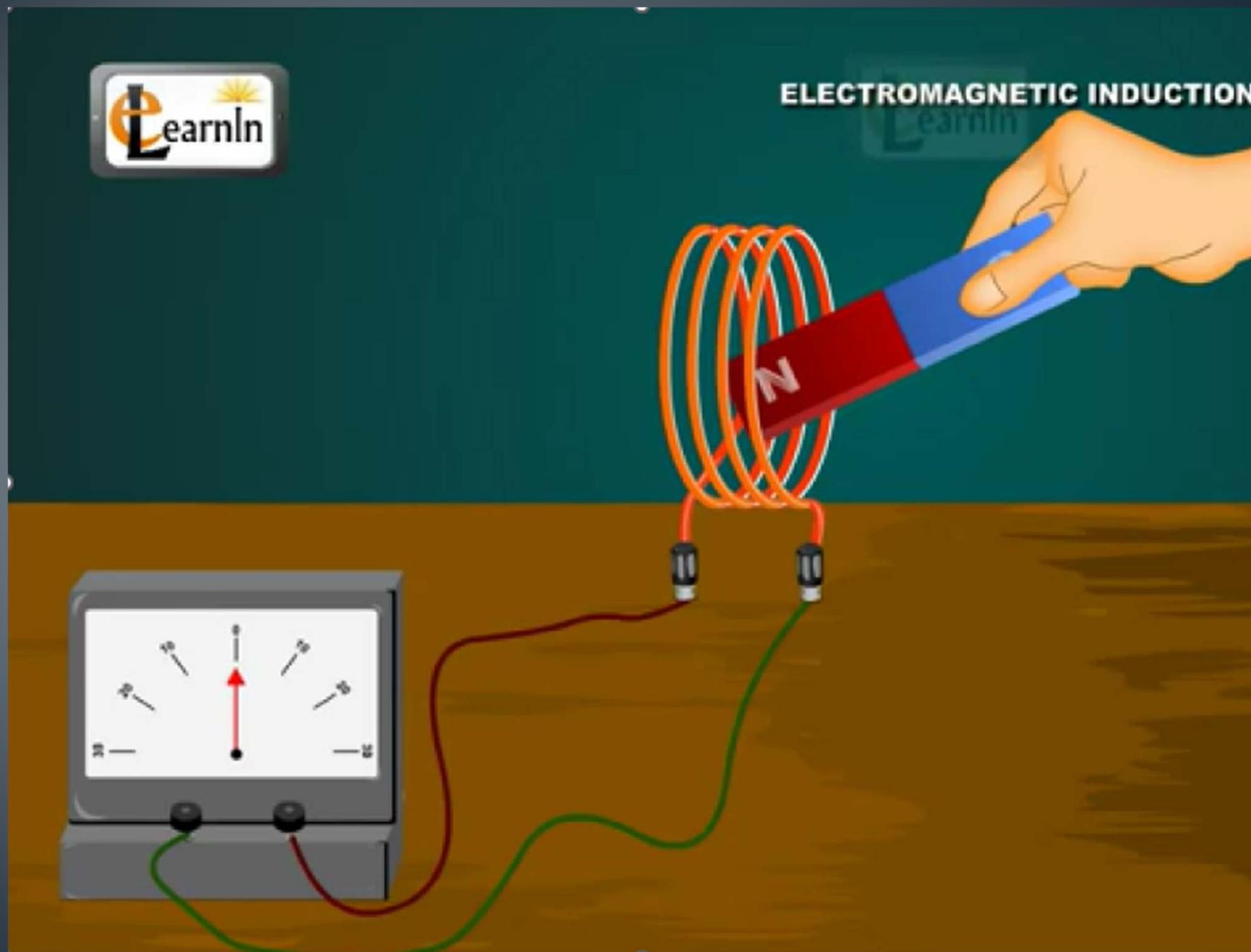
+

MIȘCARE RELATIVĂ (VARIAȚIE)

=

TENSIUNE INDUSA

Film demonstrativ – lege inducției electromagnetice



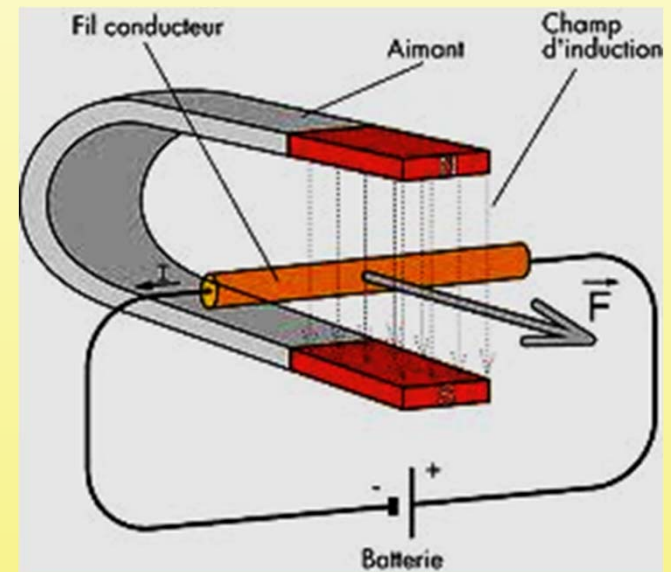
Forța Laplace

Este forța ce acționează asupra unui conductor parcurs de curent și care se află într-un câmp magnetic.

Expresia acestei forțe este dată de :

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

Forța este maximă atunci când direcția curentului și direcția liniilor de câmp formează un unghi de 90°.



Sensul forței poate fi determinat, de exemplu, cu regula „mâinii stângi”: liniile de câmp pătrund perpendicular în palma stângă; degetul arătător indică sensul curentului prin conductor; degetul mare (la 90° față de arătător) indică sensul forței.

Producerea cuplului

CUPLUL sau **momentul forței** este o mărime fizică vectorială ce exprimă cantitativ capacitatea forței de a roti un rigid în jurul unei drepte ce trece printr-un punct și este perpendiculară pe planul format de dreapta suport a forței și punctul respectiv ([Wikipedia](#)).

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} = r \cdot F \cdot \sin(\alpha)$$

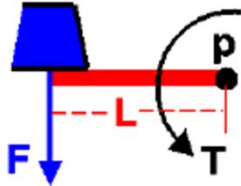


Torque (Moment)

Glenn
Research
Center

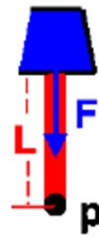
The Torque (T) about a point (p) is equal to the Force (F) times the distance (L) measured from the point perpendicular to the force. $T = F \times L_{\perp}$

Example 1:



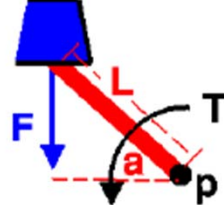
$$T = F \times L$$

Example 2:

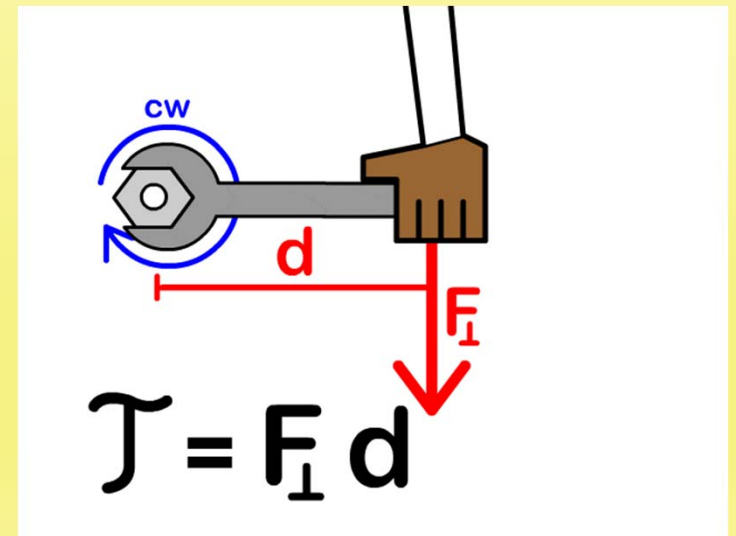


$$T = 0$$

Example 3:



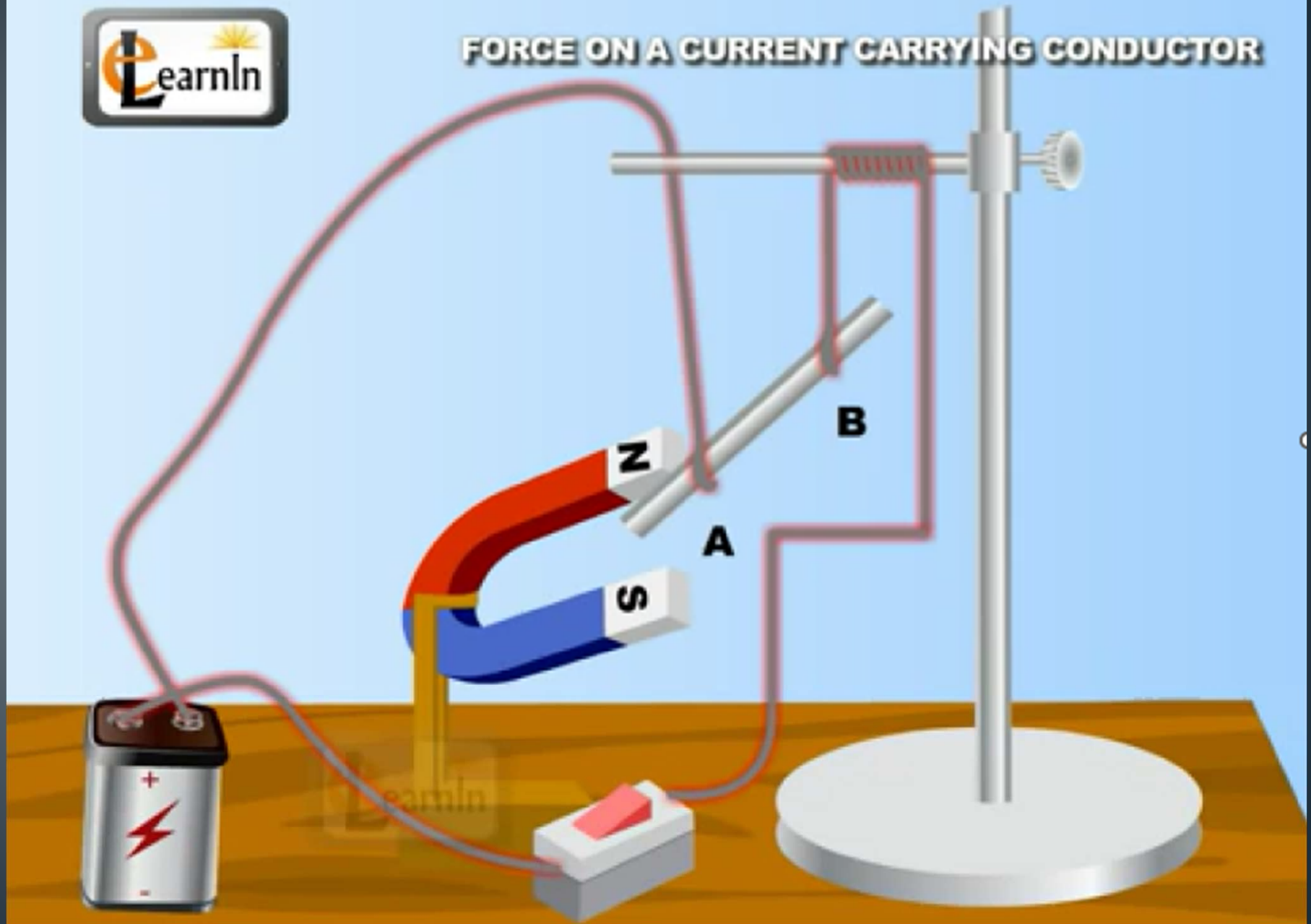
$$T = F \times L \times \cos \alpha$$



Film demonstrativ – producerea forței Laplace



FORCE ON A CURRENT CARRYING CONDUCTOR

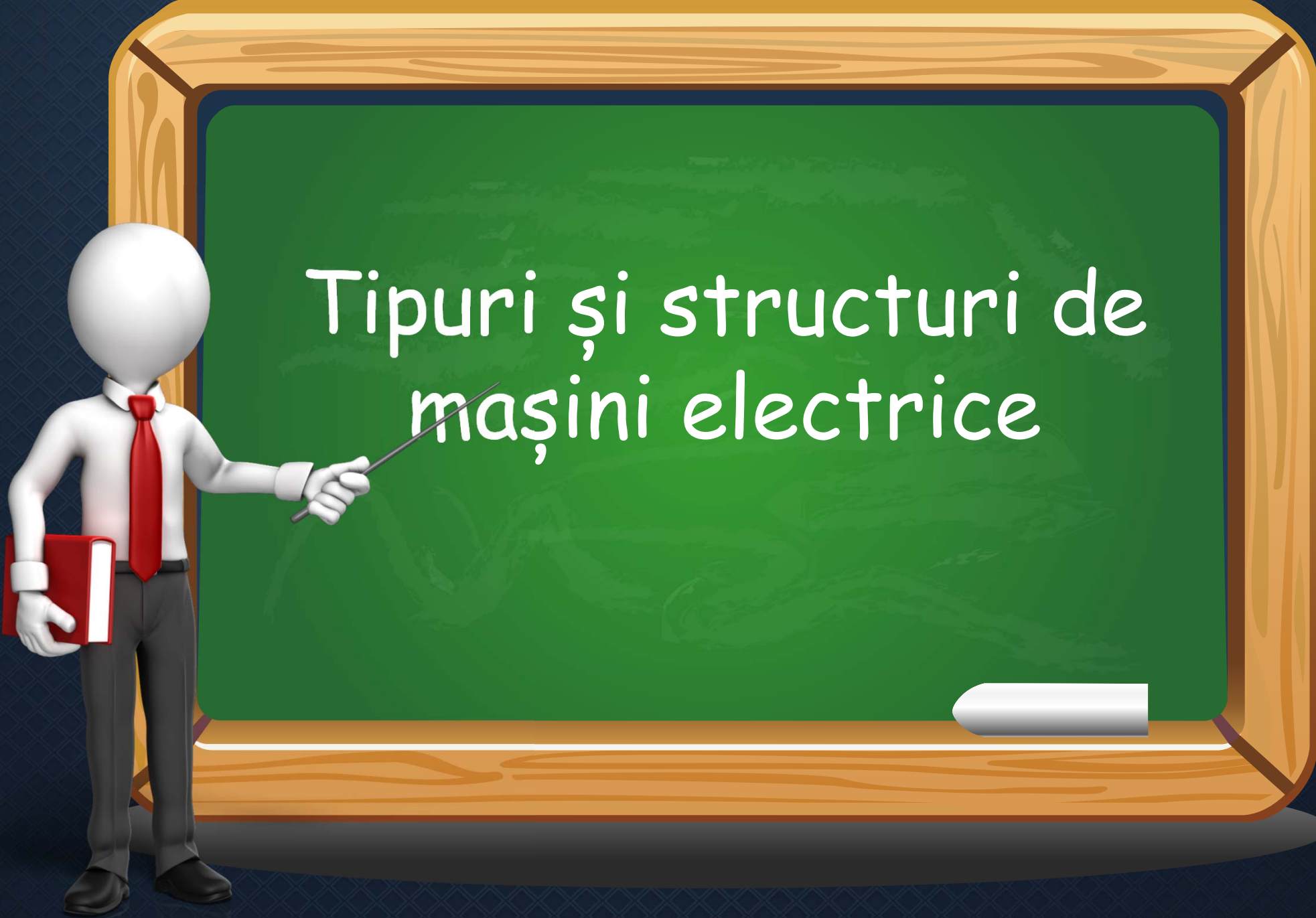




**Legea inducției
electromagnetice**



Forța Laplace



Tipuri și structuri de
mașini electrice

DEFINIȚIE

Mașina electrică este un sistem electromecanic ce transformă energia electrică primită pe la borne, în energie mecanică (funcționare ca motor) sau energia mecanică primită pe la ax, în energie electrică (funcționare ca generator).

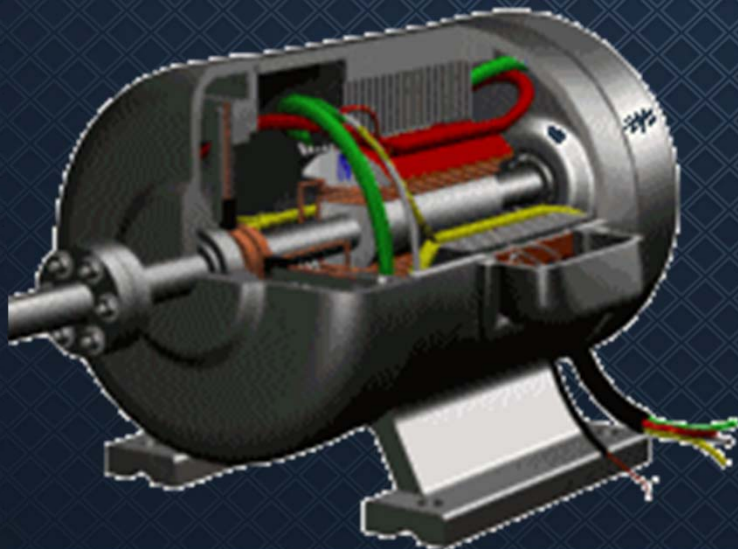
CLASIFICARE

- după tipul de mișcare -

1

MAȘINI ELECTRICE
ROTATIVE

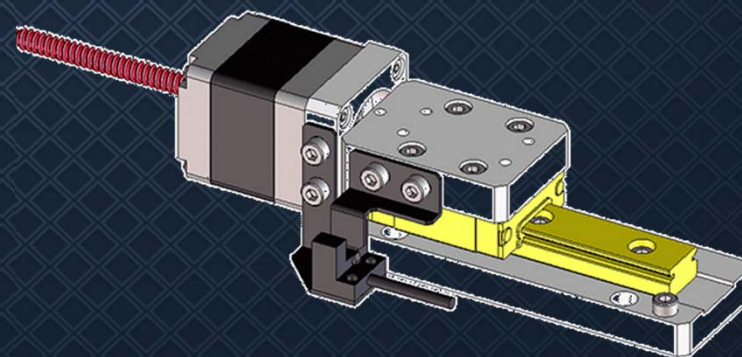
(partea mobilă execută o
mișcare circulară)



2

MAȘINI ELECTRICE
LINIARE

(partea mobilă execută o
mișcare de translație,
paralelă cu partea fixă)



CLASIFICARE

- după modul de închidere a liniilor de câmp la mașinile electrice rotative -

1

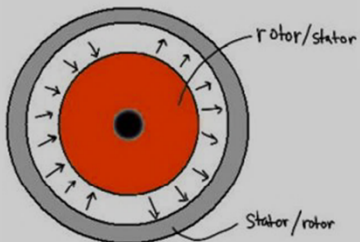
MAȘINI ELECTRICE
ROTATIVE CU
FLUX RADIAL

2

MAȘINI ELECTRICE
ROTATIVE CU
FLUX AXIAL

Radial Flux

flux is produced radially along the sideways of the rotor

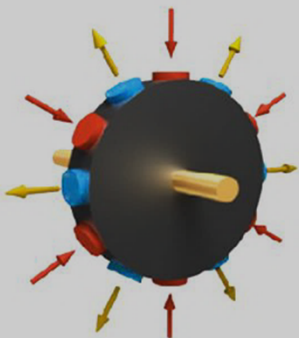


FLUX RADIAL

- liniile de câmp se închid pe trasee radiale

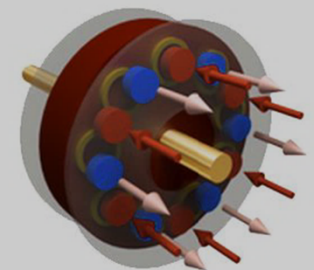
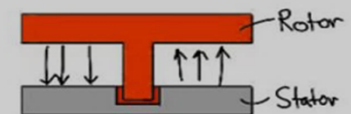
FLUX AXIAL

- liniile de câmp se închid paralel cu axul rotorului

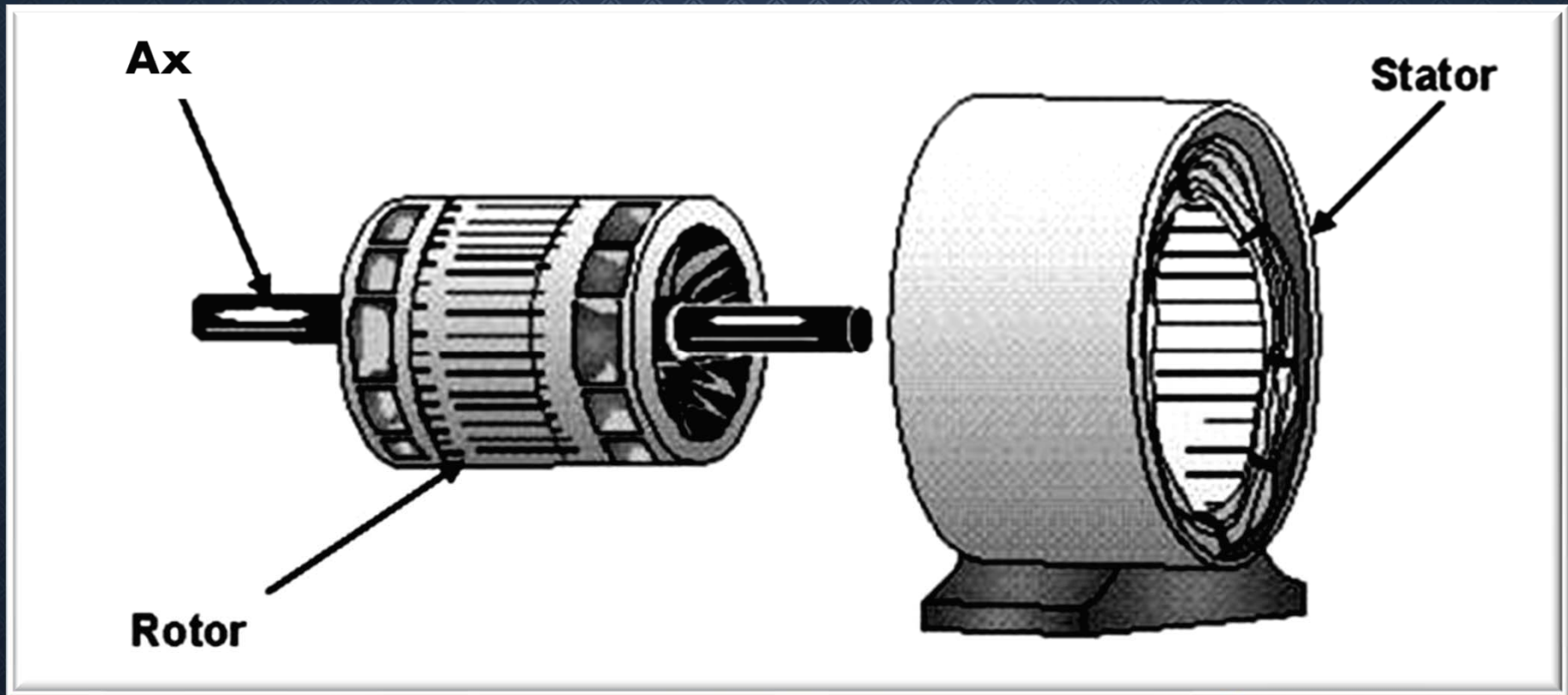


Axial Flux

flux is produced axially along the axis of the rotor



Structura unei mașini electrice rotative în construcție radială



Din punct de vedere constructiv, toate mașinile electrice rotative au două elemente principale:

STATORUL – reprezintă partea fixă a unei mașini electrice rotative.

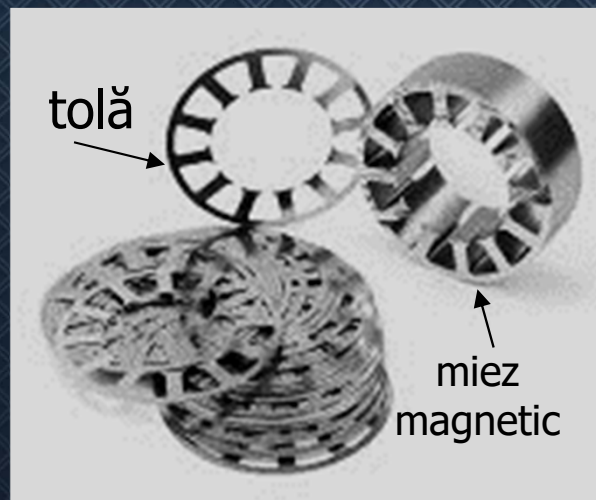
ROTORUL - reprezintă partea mobilă (rotativă) a unei mașini electrice rotative.

De regulă, rotorul este plasat în interiorul statorului.



Atât statorul cât și rotorul sunt construite din material feromagnetic ceea ce permite, pe de o parte, concentrarea câmpului magnetic în anumite regiuni, iar pe de altă parte, obținerea unei energii magnetice cu un consum mai mic de curent.

Atunci când câmpurile magnetice sunt alternative, miezul feromagnetic este realizat din tole, iar când câmpurile magnetice sunt constante, miezurile magnetice sunt realizate din material feromagnetic masiv.



De regulă, pe stator și rotor sunt prevăzute înfășurări parcurse de curent electric. Înfășurările sunt realizate din material conductor: cel mai adesea cupru dar și aluminiu.

Miezurile feromagnetice și cuprul (aluminiul) constituie materialele „active” ale unei mașini electrice.

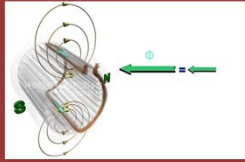


The background features a dark, starry space with a prominent, glowing, wave-like structure that resembles a magnetic field or a complex data visualization. The structure is composed of numerous small, bright particles that form a dense, undulating pattern. The overall aesthetic is futuristic and scientific.

CÂMPURI MAGNETICE ÎN MAȘINILE DE CURENT ALTERNATIV

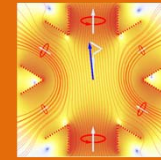
Cuprins:

1



Câmpul creat de o înfășurare monofazată distribuită

Câmpul creat de o înfășurare trifazată distribuită

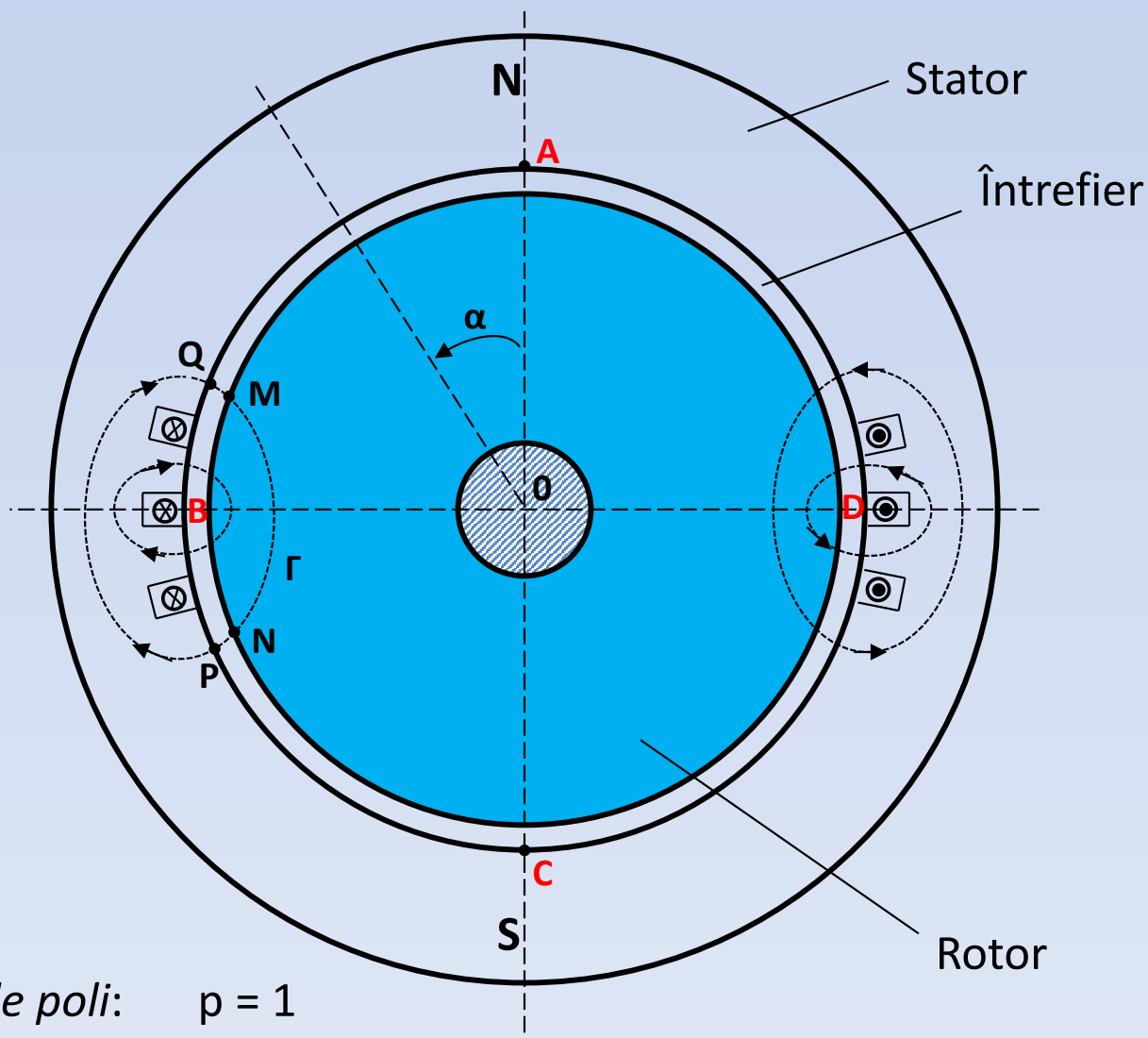
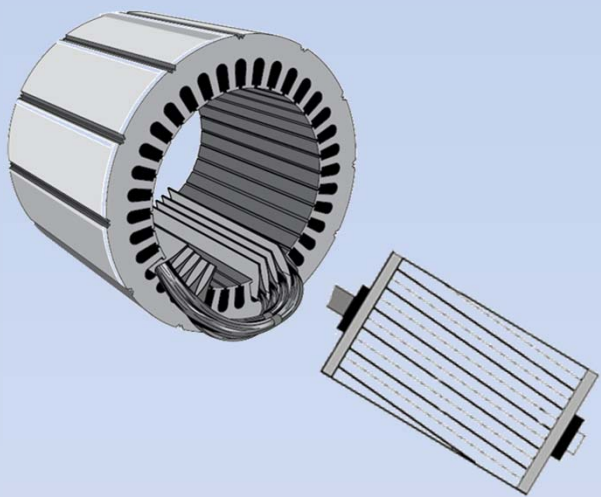


2

3

Teorema lui Leblanc

CÂMPUL CREAT DE O ÎNFĂȘURARE MONOFAZATĂ DISTRIBUITĂ



Numărul de *perechi de poli*: $p = 1$

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 intră 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 intră în stator). Rezultă astfel o structură feromagnetică (în cazul acesta o mașină electrică) cu 2 poli sau o pereche de poli ($p = 1$).

Modul de variație a mărimilor câmpului magnetic în întrefier este exprimat de următoarele expresii matematice :

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

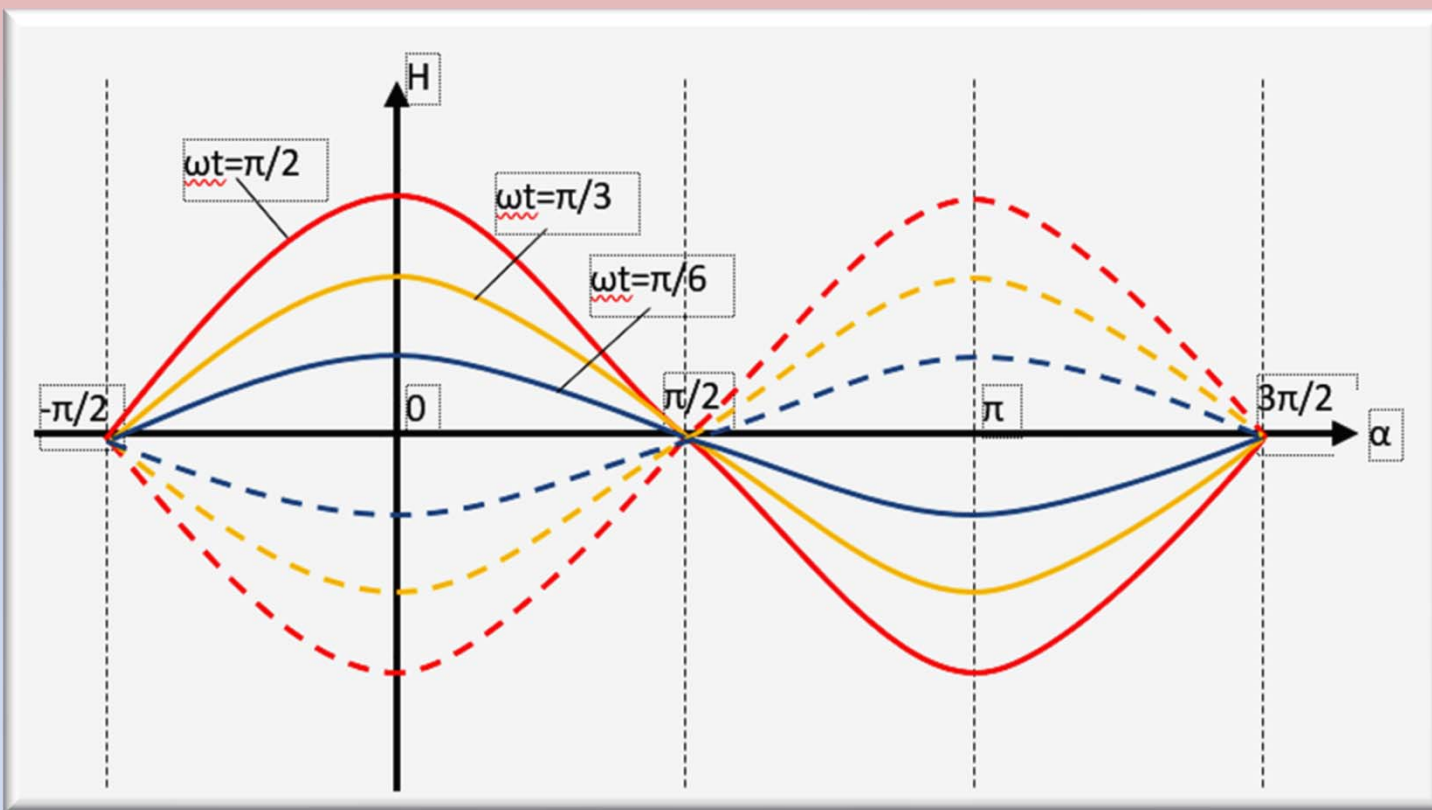
respectiv:

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

unde: H-intensitatea câmpului magnetic; B-inducția câmpului magnetic; p-numărul de perechi de poli ai structurii magnetice; α -coordonata unghiulară; $\omega=2\pi f$ – pulsația curentului ce parcurge înfășurările



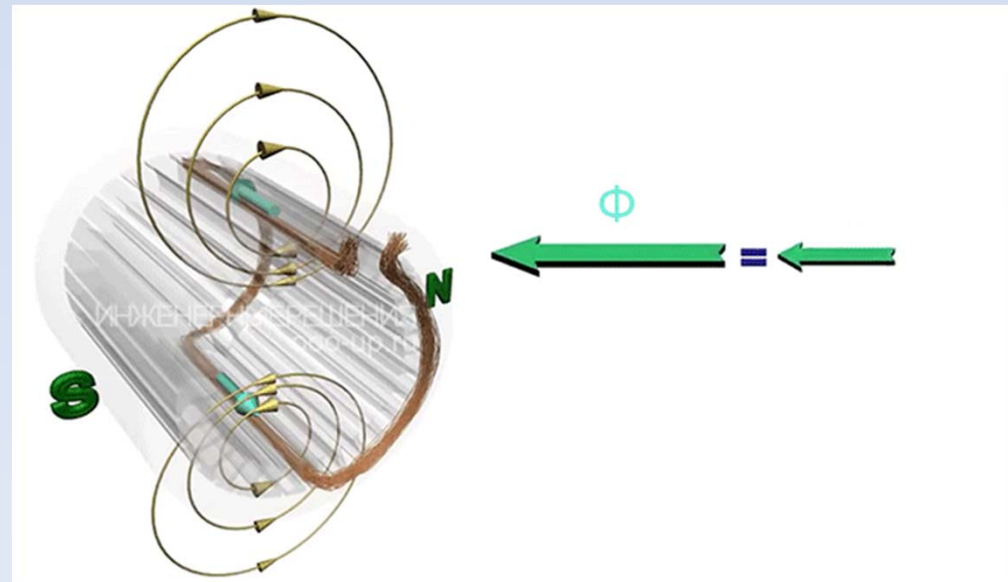
Această relație reprezintă expresia unui câmp PULSATORIU (sau alternativ) care este FIX în spațiu și VARIABIL în timp



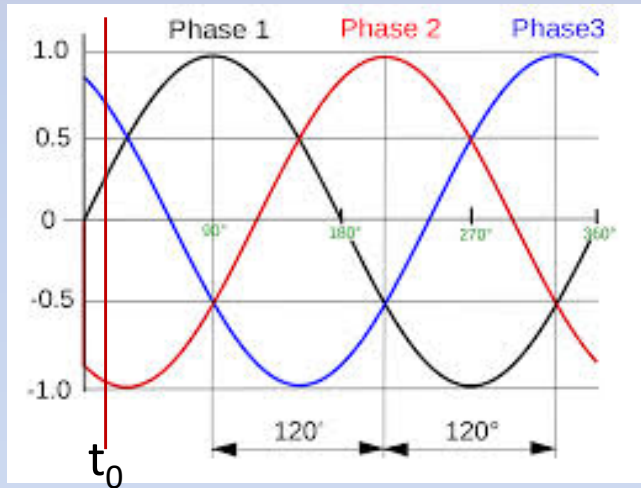
Curbele câmpului creat de o înfășurare monofazata la diverse momente de timp

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

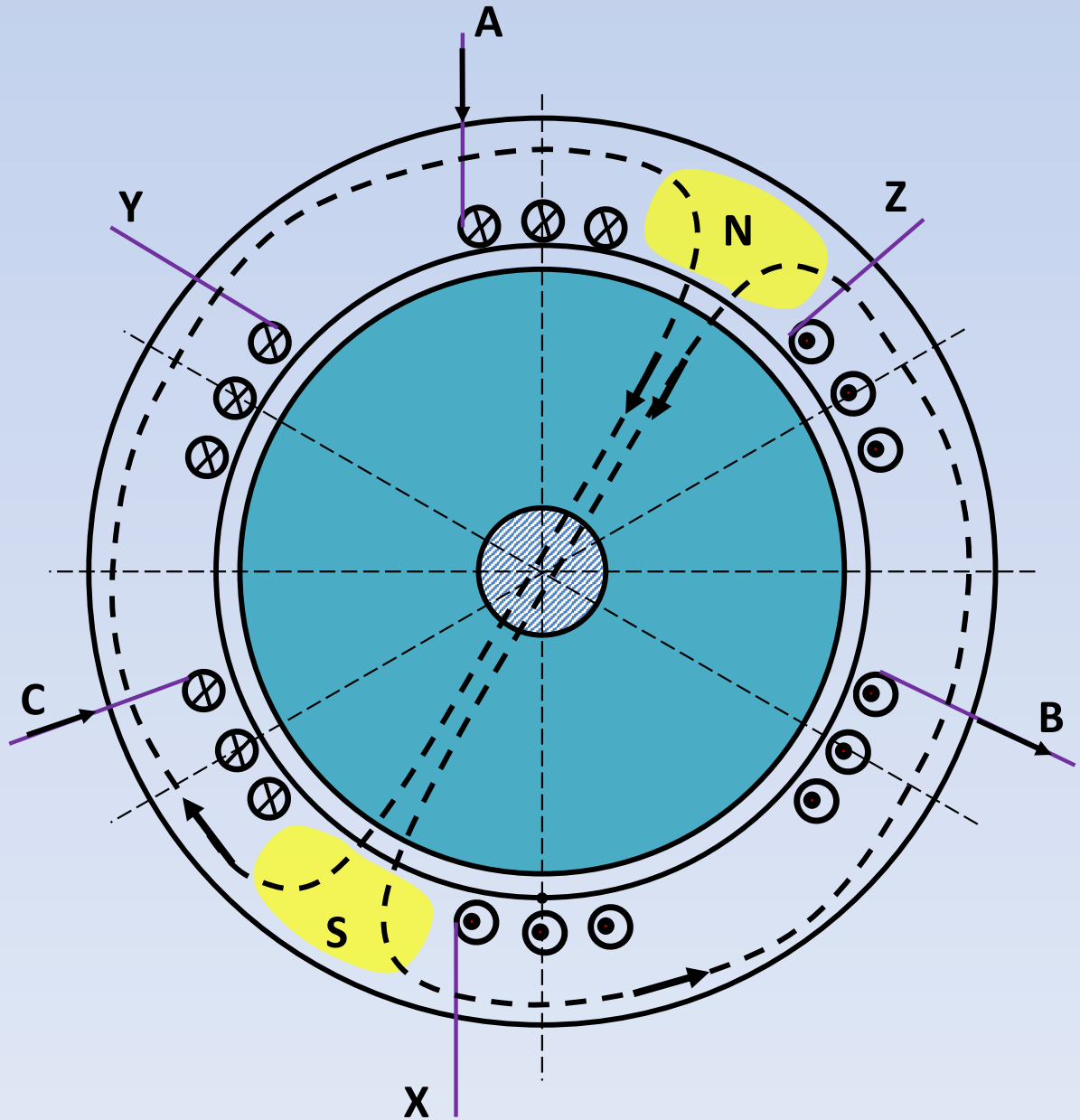
$$H = H_{max} \cos \alpha \cdot \sin \omega t$$



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° (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:

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

$$\hat{\text{Intruc\^at:}} \quad \sin x \cdot \cos y = \frac{1}{2} [\sin(x + y) + \sin(x - y)]$$

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

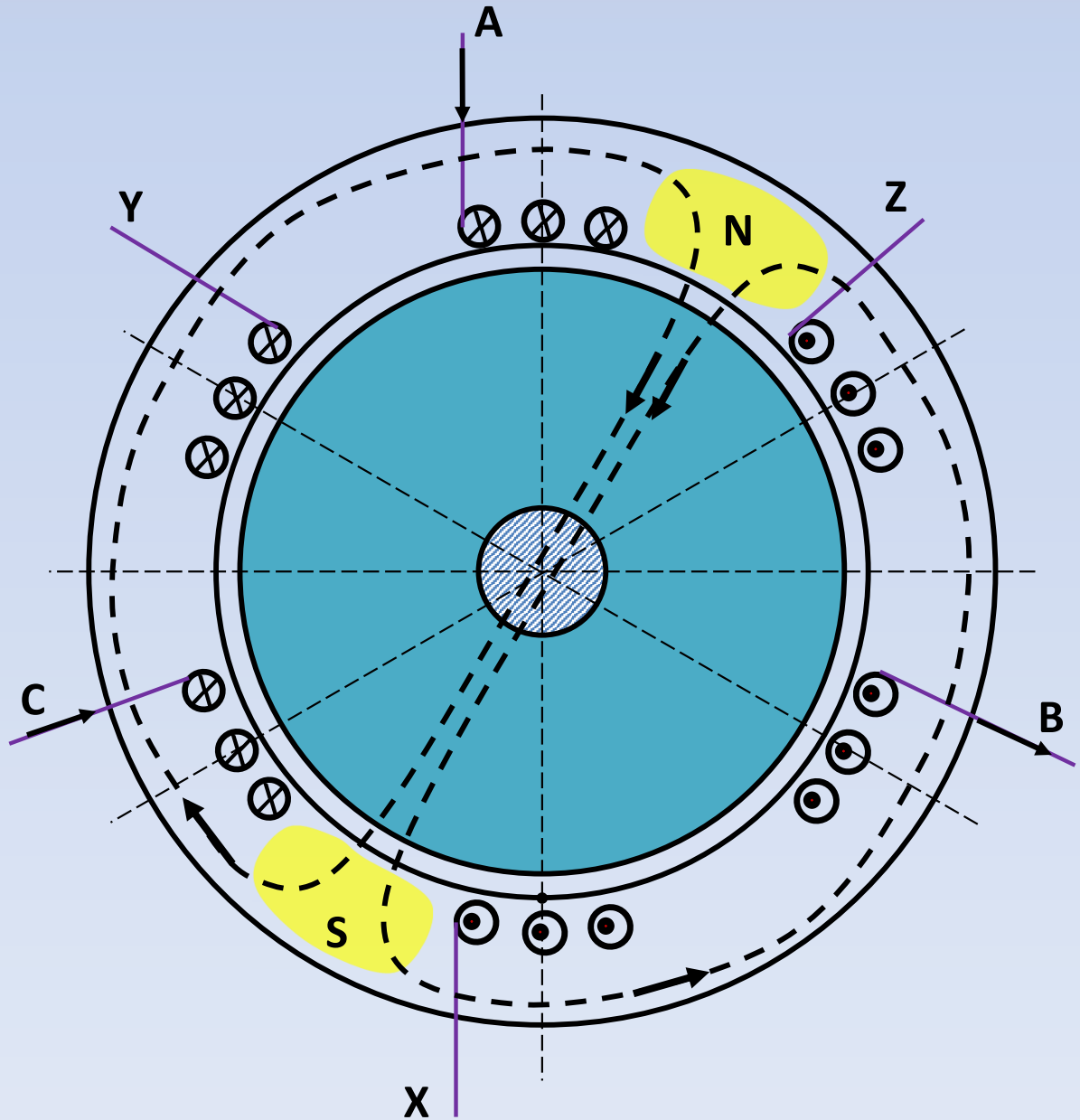
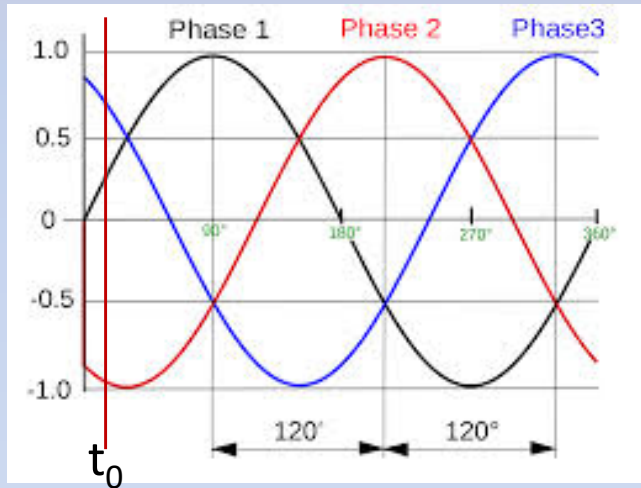
$$H_{rez} = \frac{3}{2} H_{max} \cdot \sin(\omega t - p\alpha);$$

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

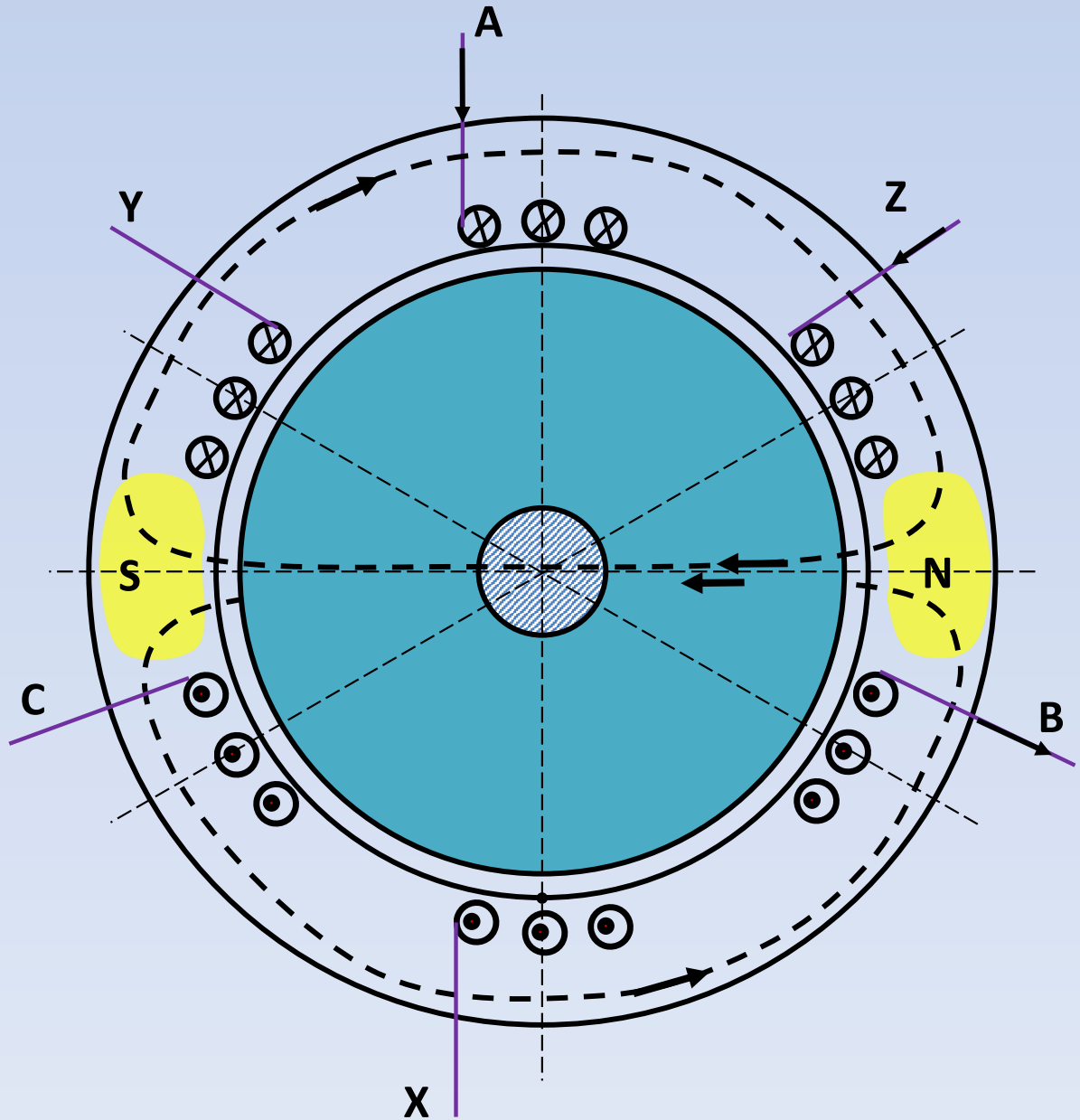
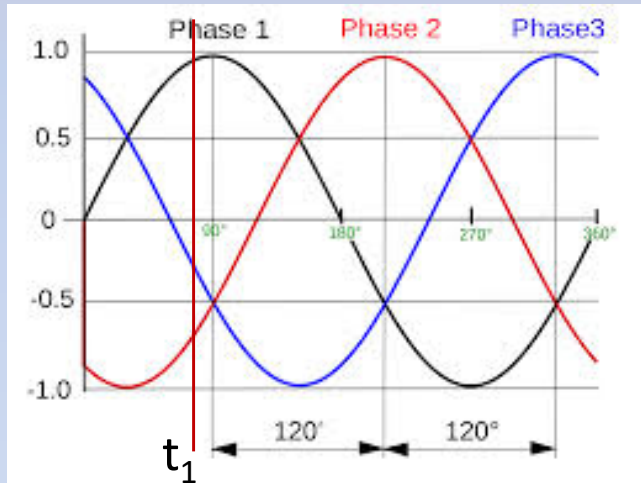


**Această relație reprezintă expresia unui câmp ÎNVÂRTITOR
care este VARIABIL în spațiu și VARIABIL în timp**

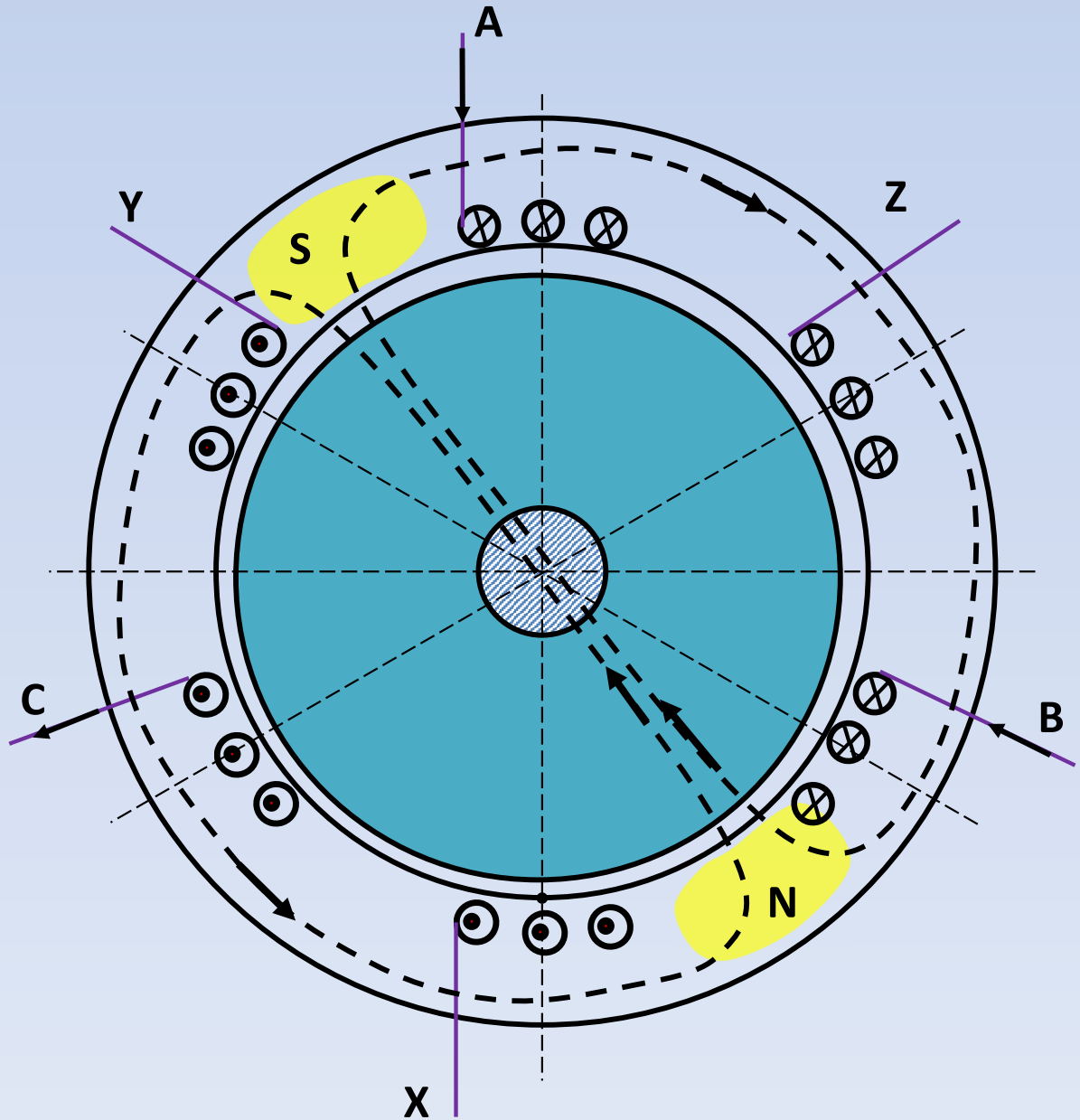
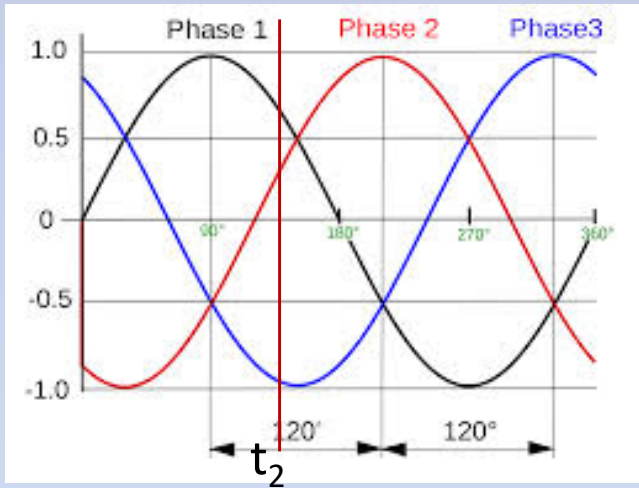
a) Poziția câmpului la momentul t_0



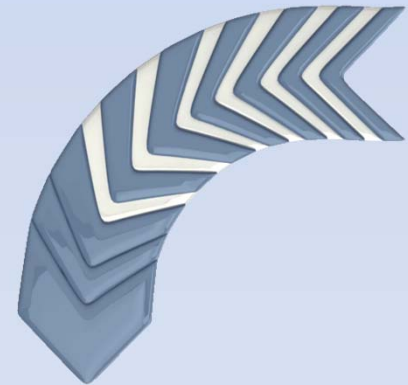
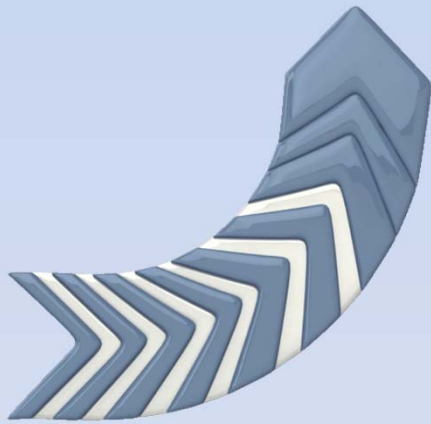
b) Poziția câmpului la momentul t_1



c) Poziția câmpului la momentul t_2

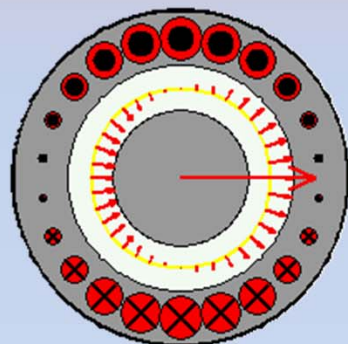


Sistemul de curenți trifazat (caracterizat de defazajul temporal între curenți de 120°) ce străbate înfășurarea trifazată (având fazele decalate spațial la 120° electrice) determină formarea unui câmp magnetic ai cărui poli ocupă diferite poziții spațiale.



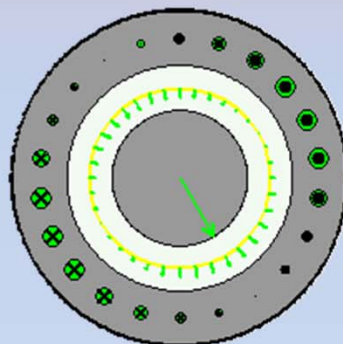
Poziția polilor magnetici sugerează o rotire a acestora. Sensul de rotire este dat de succesiunea fazelor (sensul curenților prin cele trei înfășurări de fază).

Câmpul creat de faza A-X



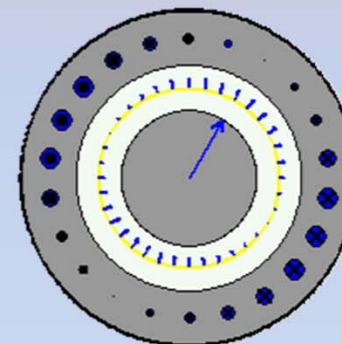
Phase A

Câmpul creat de faza B-Y

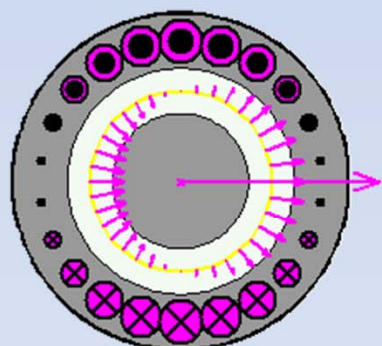


Phase B

Câmpul creat de faza C-Z



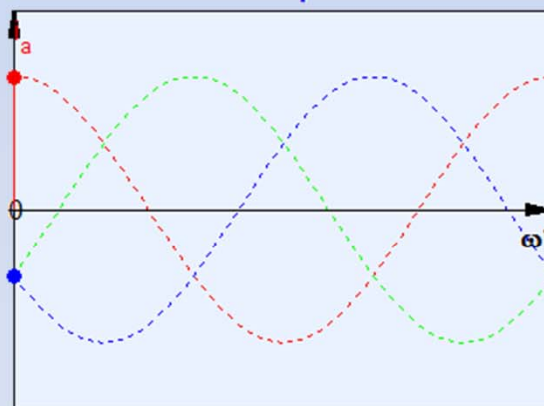
Phase C



Resultant

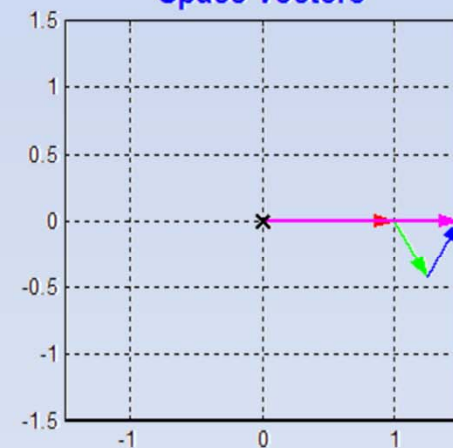
Câmpul rezultat

Balanced three-phase currents



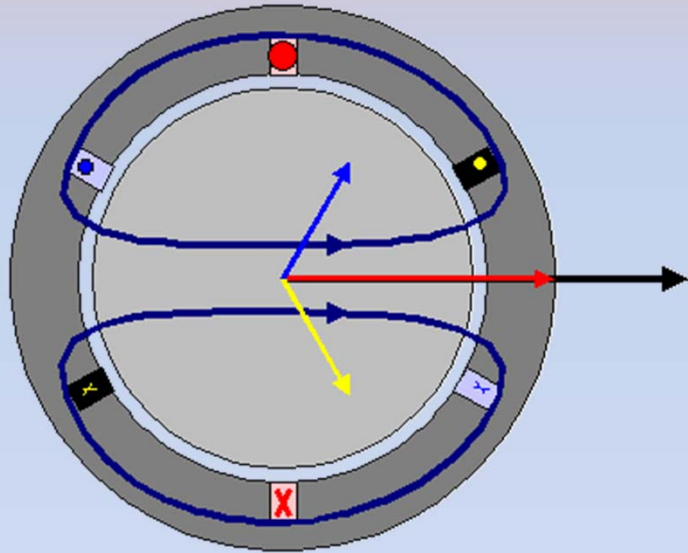
Variația curenților sistemului trifazat

Space vectors



Variația vectorilor spațiali de câmp

0°



Viteza câmpului învârtitor este dată de:

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

unde: ω -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 poartă numele de VITEZA DE SINCRONISM.

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

În 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 (adică 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:

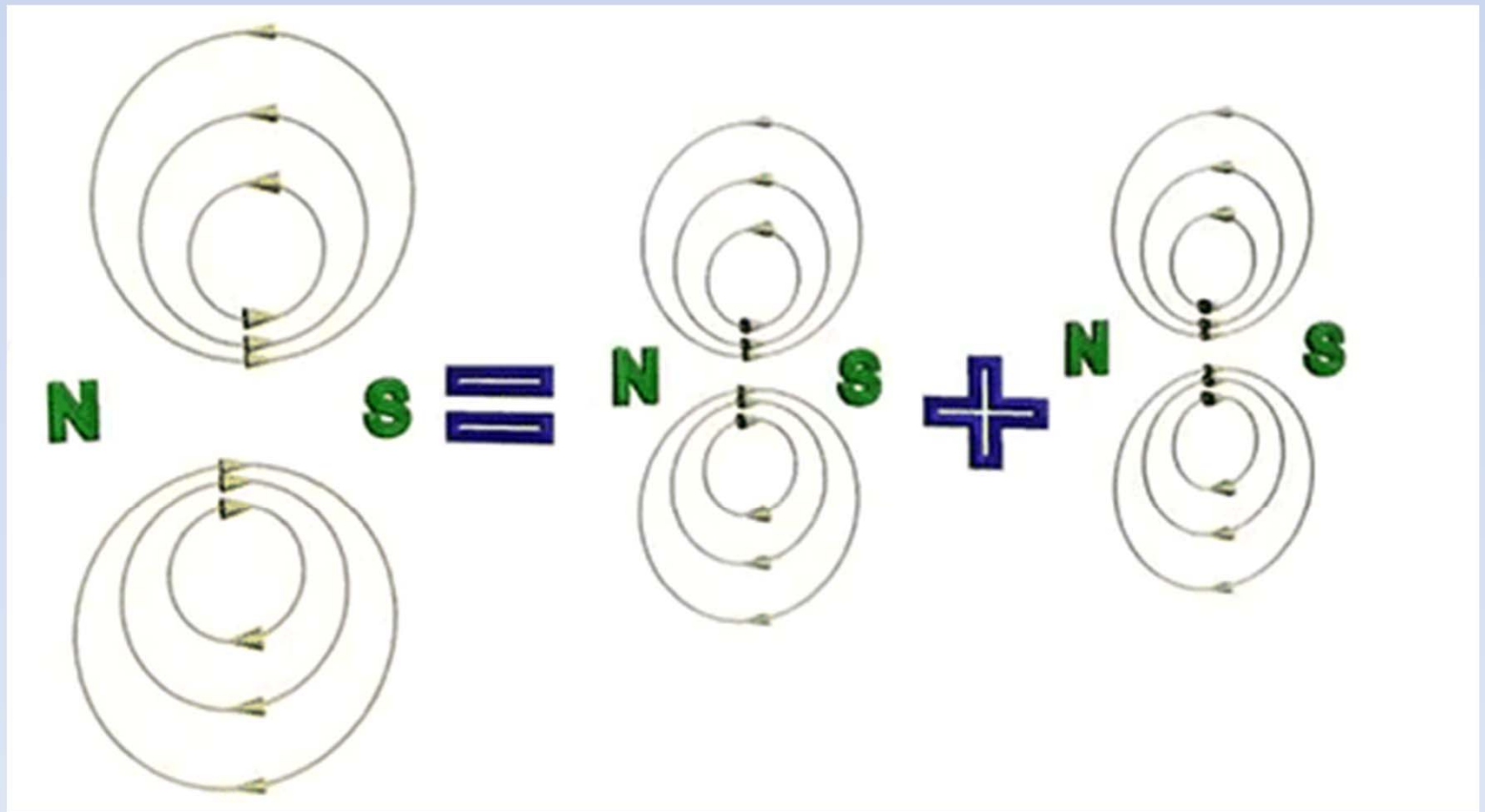
$$H = \frac{1}{2} H_{max} \cdot \sin(\omega t - p\alpha) + \frac{1}{2} H_{max} \cdot \sin(\omega t + p\alpha)$$

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 monofază este echivalent cu două câmpuri învârtitoare identice care se rotesc în sensuri contrare și au amplitudinea pe jumătate.





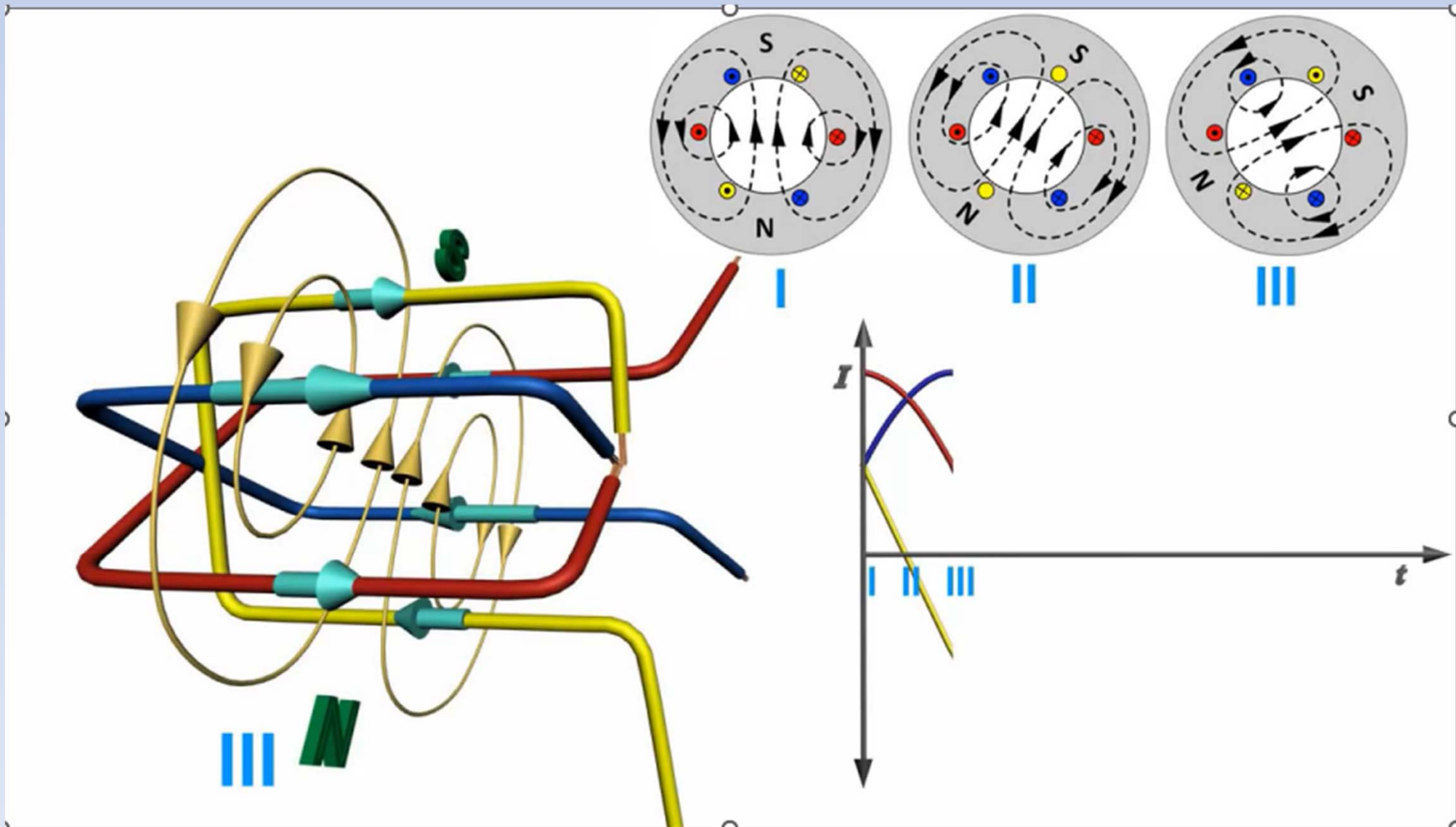
Câmp pulsatoriu (alternativ) – este creat de o înfășurare monofazată

Câmp învârtitor – este creat de o înfășurare polifazată

Viteza de sincronism – viteza câmpului magnetic învârtitor

Film demonstrativ

- producerea câmpului magnetic învârtitor -





MASINA ASINCRONĂ

Construcție și
principiu de
funcționare

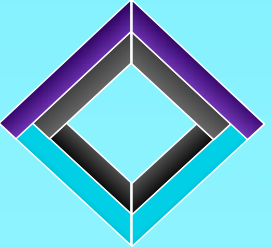
CUPRINS



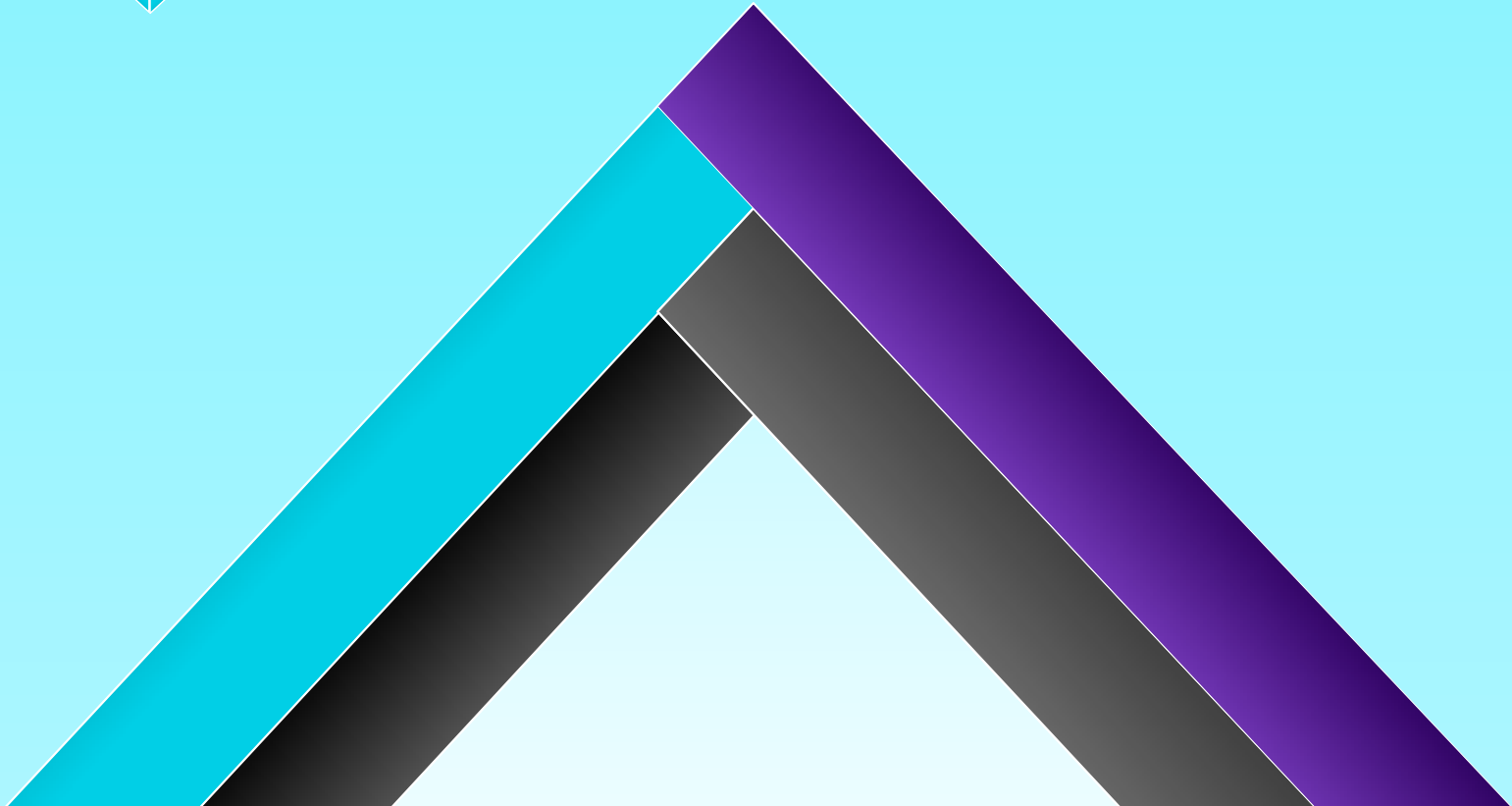
1. Înfășurările mașinilor de curent alternativ



2. Elemente componente și tipuri constructive de mașini asincrone



3. Principiul de funcționare a mașinii asincrone



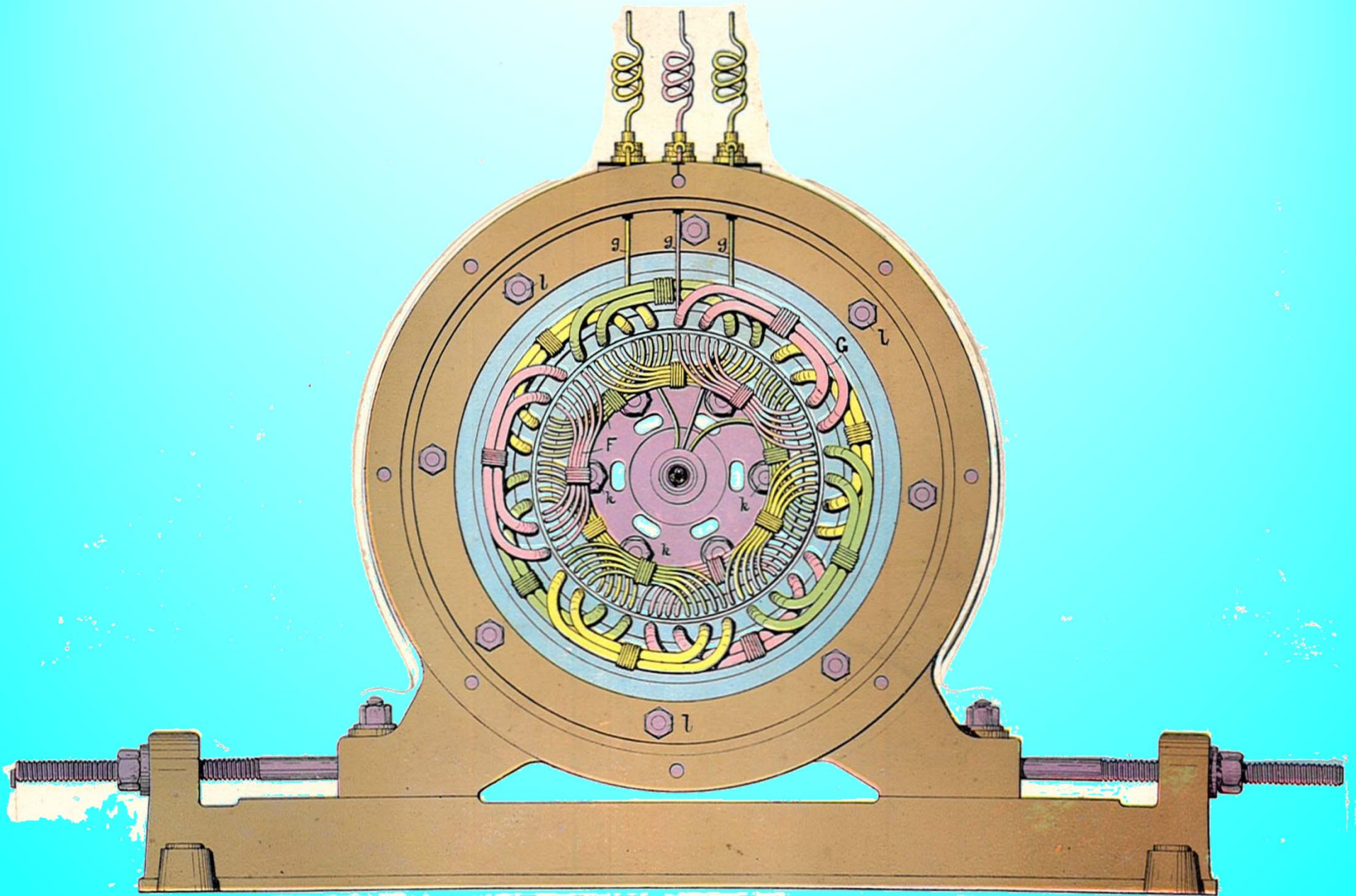
Înfășurări de curent alternativ



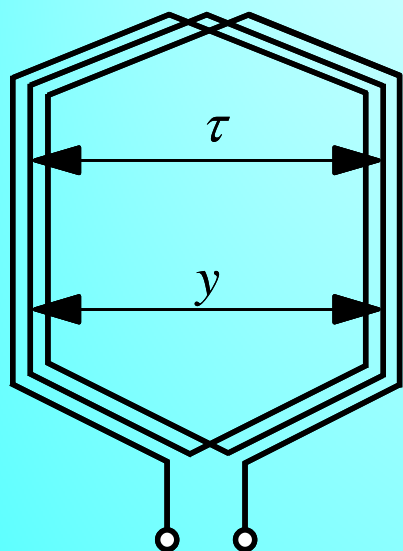
- **Înfășurări de tip repartizat**

- **Înfășurări în scurtcircuit (colivie de veveriță)**

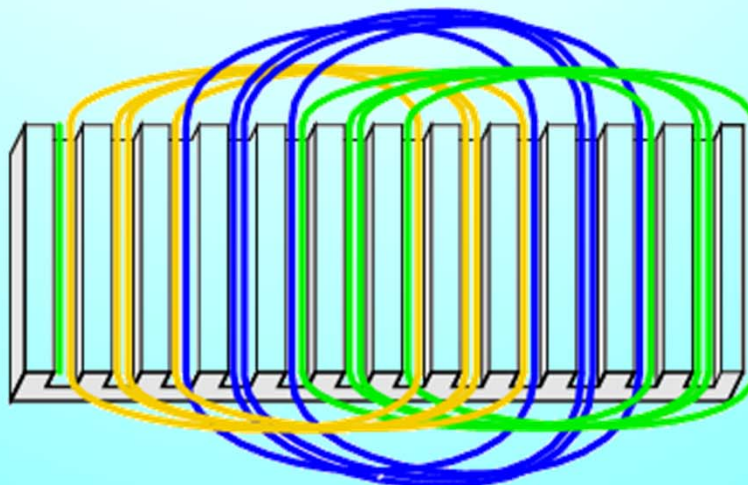
- **Înfășurări de tip concentrat**



Mașină asincronă – secțiune transversală

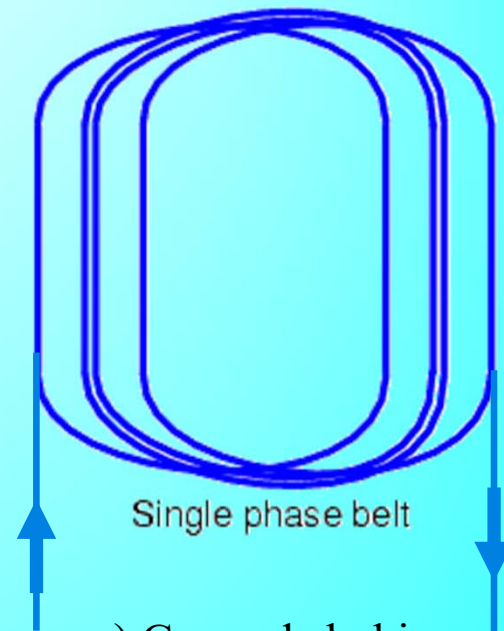


a) $w_s=3$ (bucată)



3- ϕ distributed winding

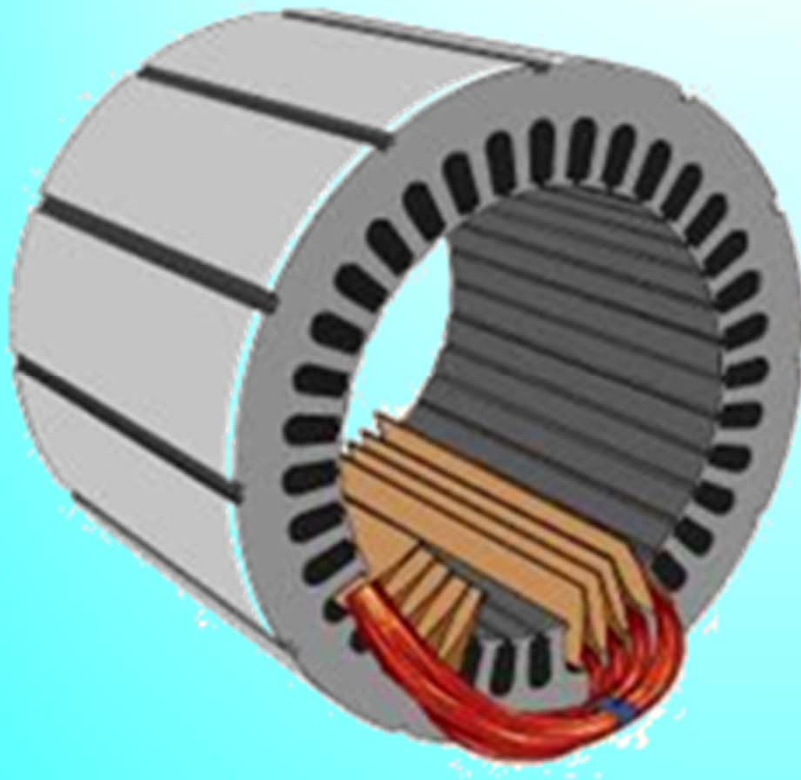
b) Înfășurare distribuita trifazata



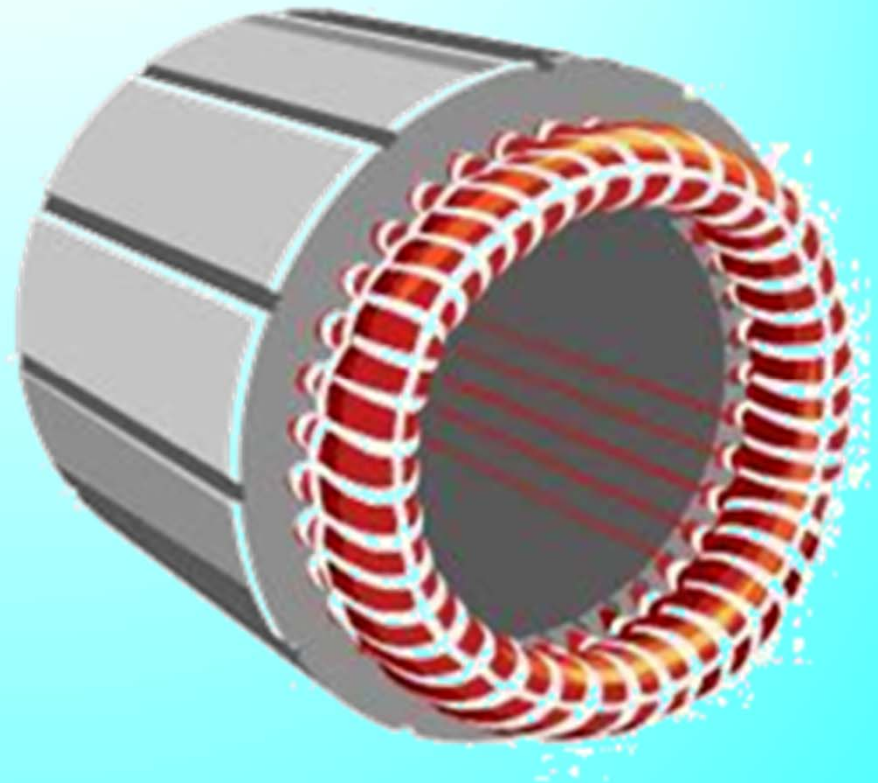
Single phase belt

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 spiră sau din mai multe spire (în cazul bobinei din fig. a sunt 3 spire).



a) Bobinare in curs de realizare



b) Bobinaj finalizat

Rolul înfășurării statorice este de a crea câmpul magnetic inductor, respectiv de a crea un anumit număr de poli magnetici. Se fixează astfel turația de sincronism și respectiv turația rotorului.





Bobinarea unui stator de mașină de CA cu bobine preformate

3 HP 3 PHASE MOTOR WINDING



RPM 1440

SLOT 24

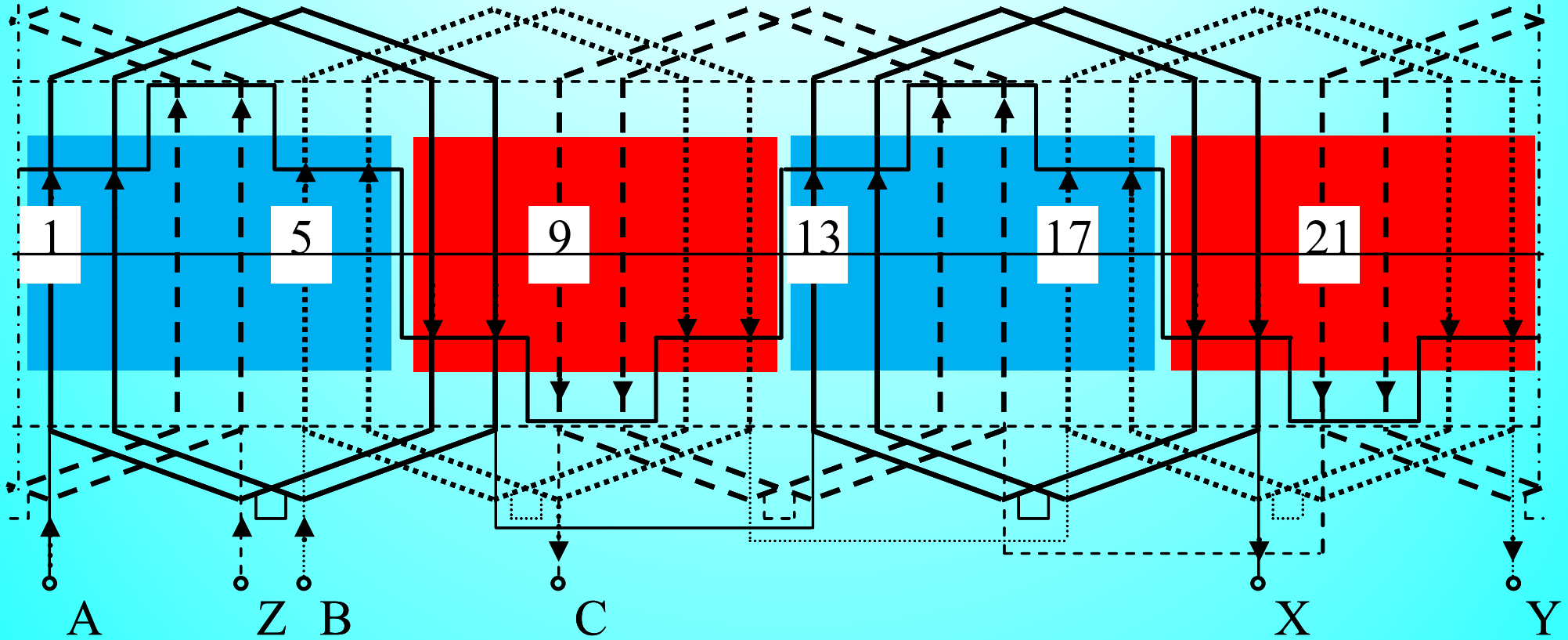
CONNECTION DELTA

FULL VIDEO WITH

DIAGRAM

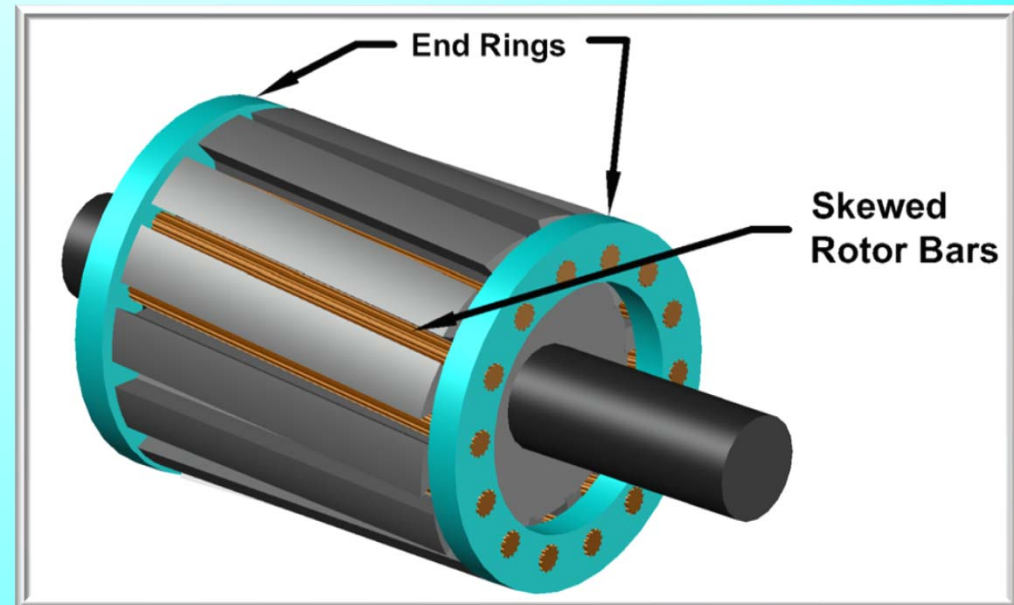
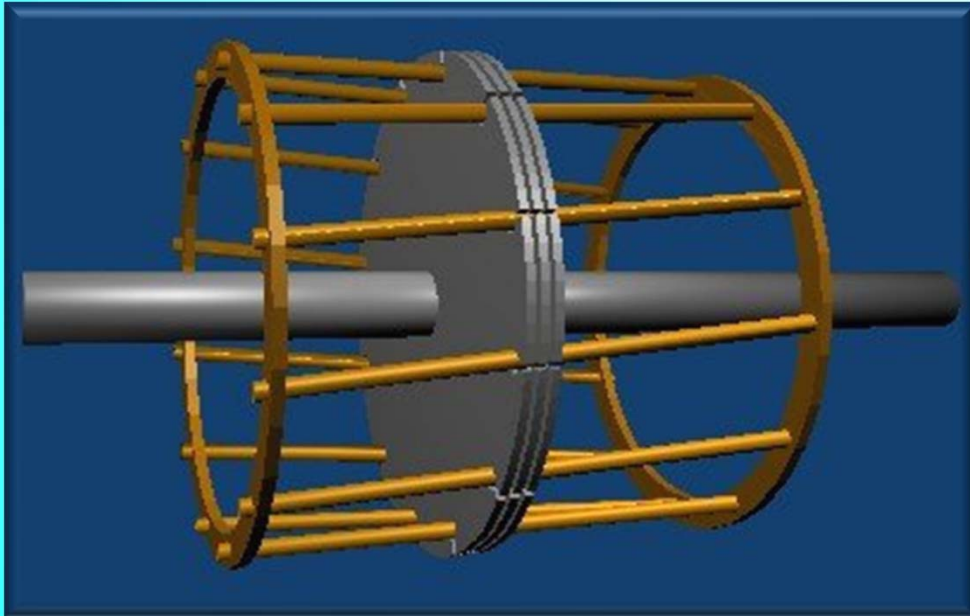
Înfășurare statorică trifazată a unei mașini asincrone trifazate

Înfășurare trifazată având $Z=24$, $2p=4$



Reprezentare desfășurată a unei înfășurări de c.a. ce este plasată în 24 de creștături și formează 4 poli. Turația câmpului magnetic învârtitor creat de această înfășurare este de 1500 rot/min.

Înfășurare rotorică în scurt-circuit



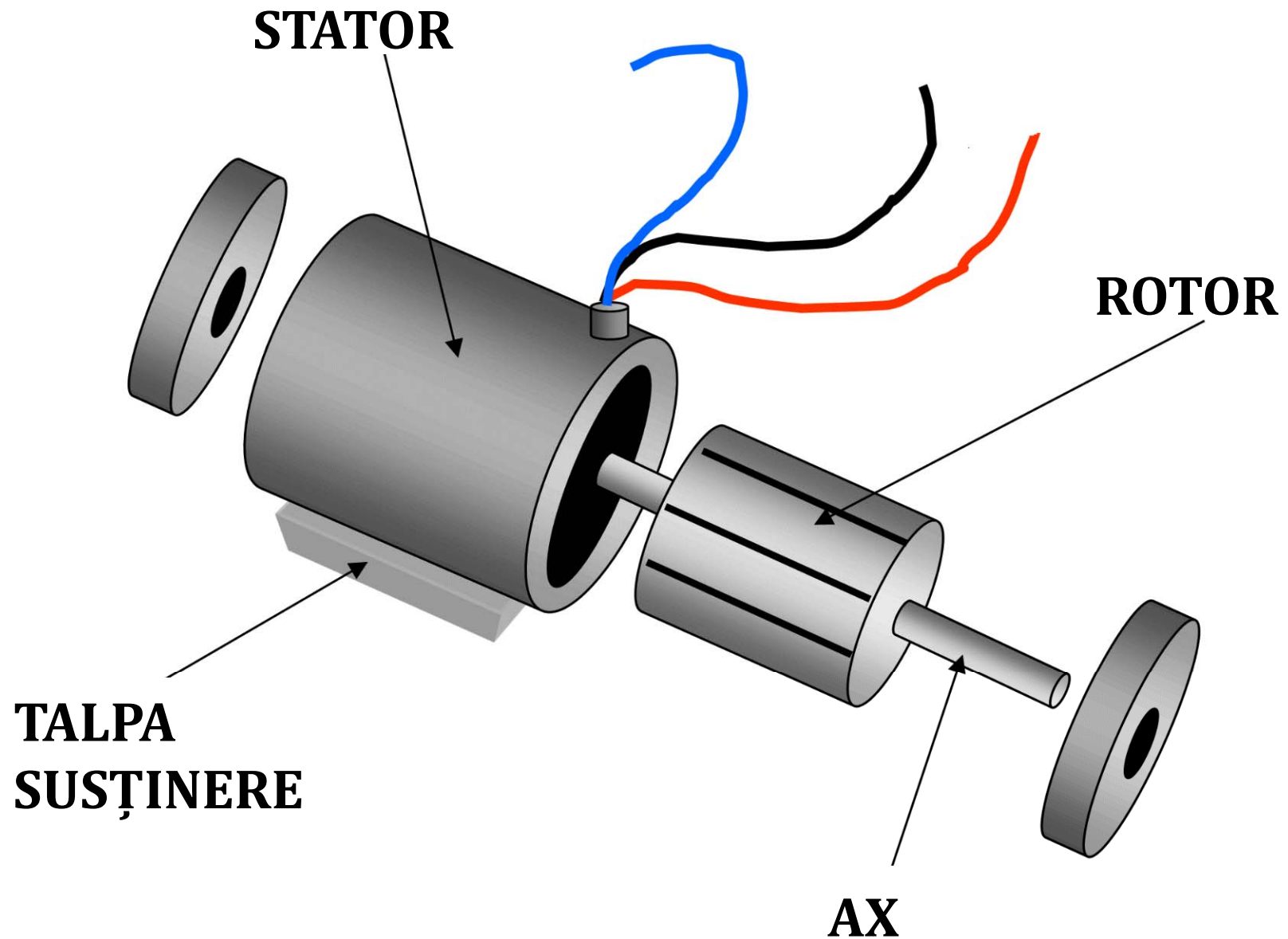
Înfășurarea în scurt-circuit este realizată din bare (cupru sau aluminiu) scurtcircuitate la capete de două inele.

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

Elemente constructive și 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”



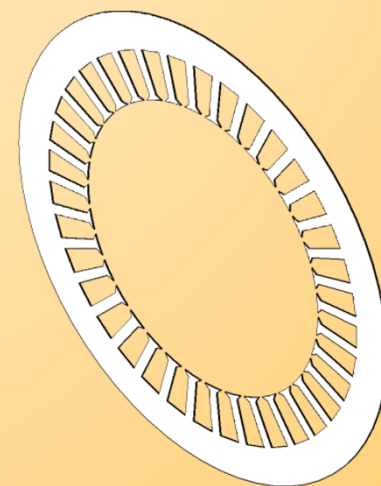
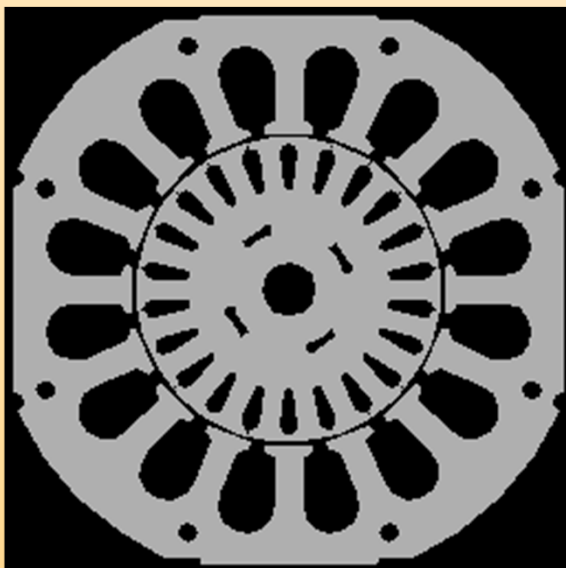
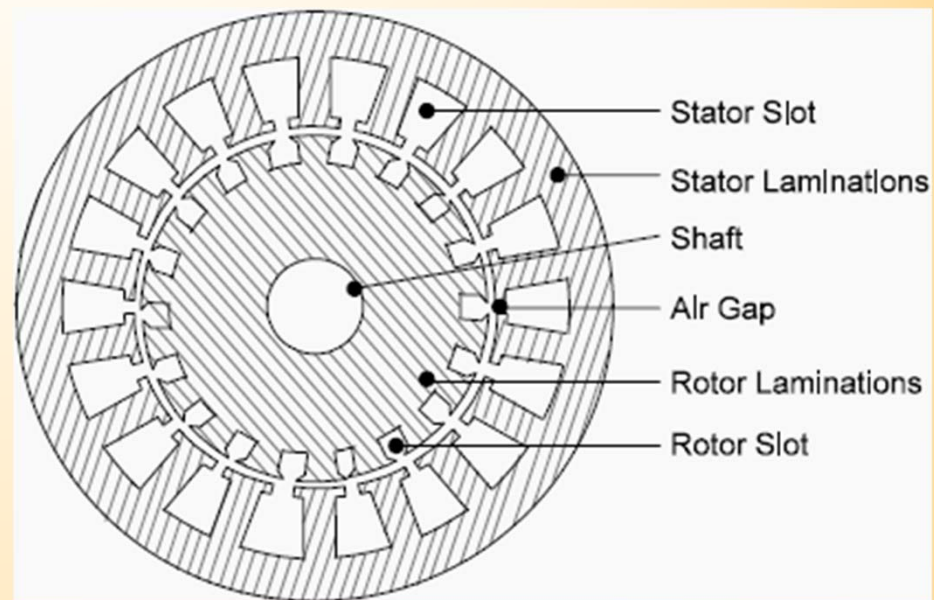
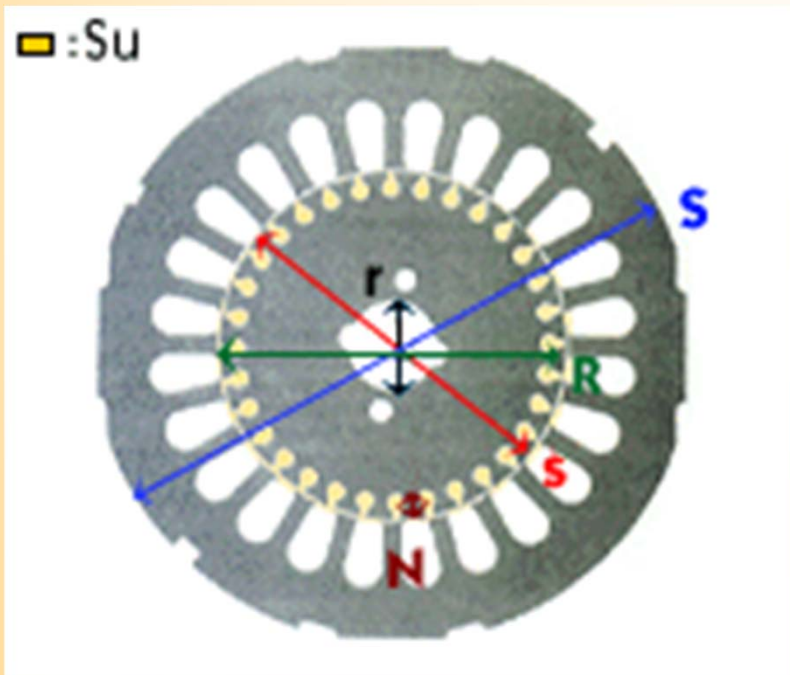
Elementele constructive principale ale mașinii asincrone

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.

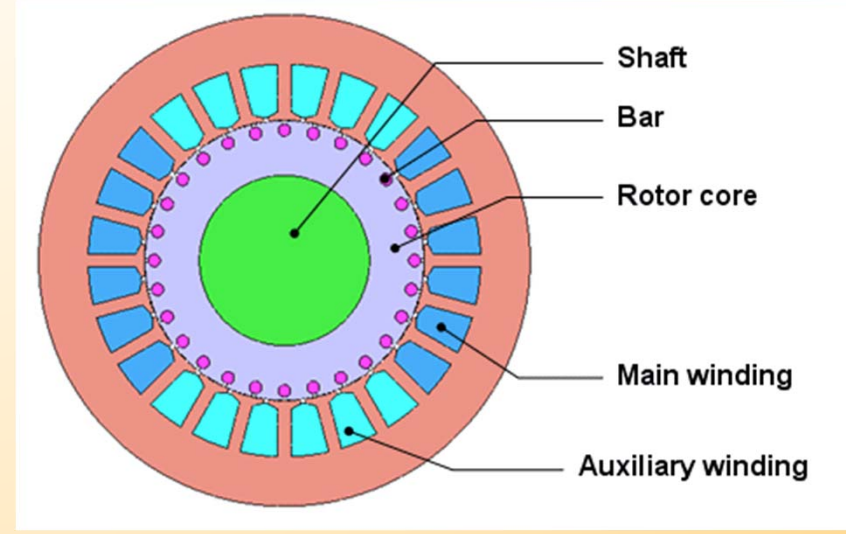
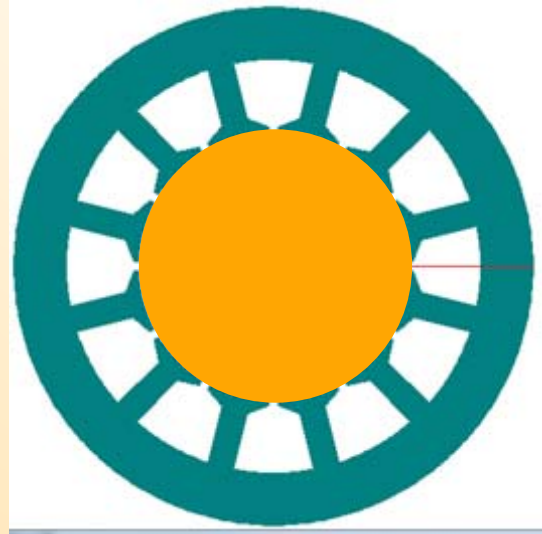


Ansamblu – crestătură statorică + crestătură rotorică

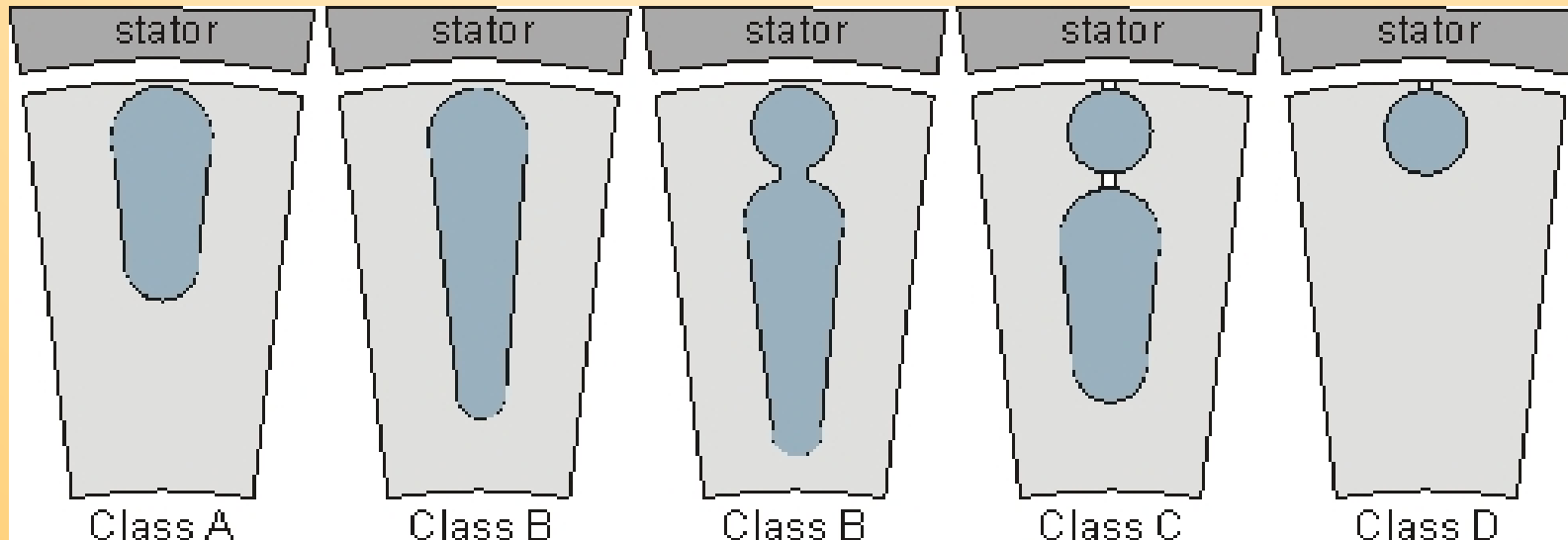
Atât circuitul magnetic statoric cât și cel rotoric sunt realizate din tole . Acestea sunt fâșii din tablă feromagnetică de diverse grosimi (0,35mm, 0,28mm, etc) aliată cu siliciu.

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.

Crestături statorice – stator slots



Crestături rotorice – rotor slots

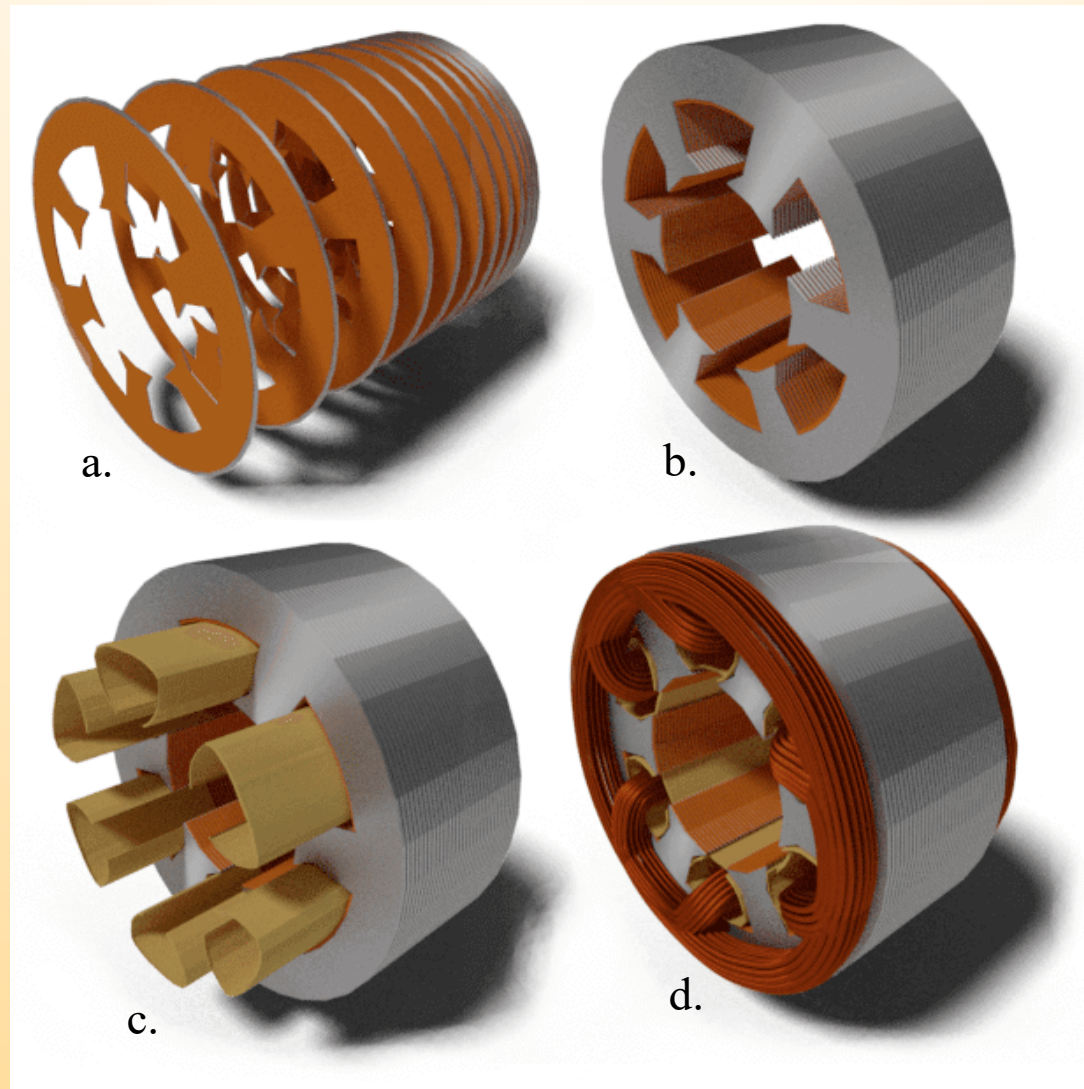


Atât statorul cât și rotorul sunt prevăzute către întrefier cu crestături (respectiv dinți) distribuite pe întreaga periferie. In aceste crestături sunt plasate înfășurările.

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

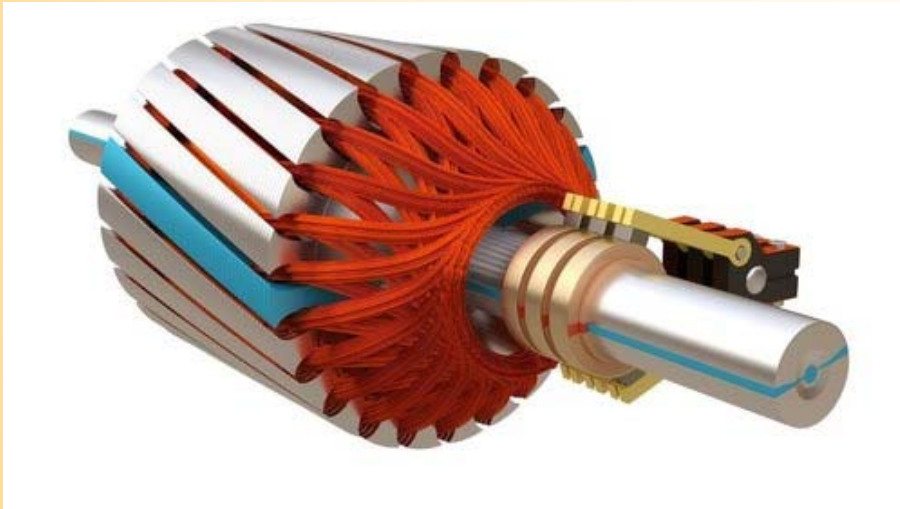


Miezurile magnetice se obțin prin împachetarea axială a tolelor.

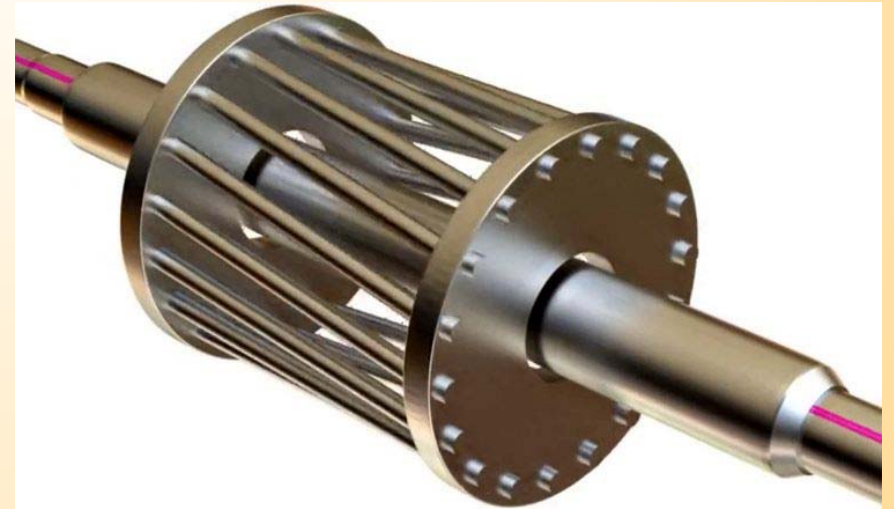


Procesul tehnologic de realizare a statorului include: împachetarea axială și fixarea tolelor (a. și b.), izolarea creștăturilor (c.) și plasarea bobinelor în creșături (d.).

Rotor bobinat



Rotor in sc

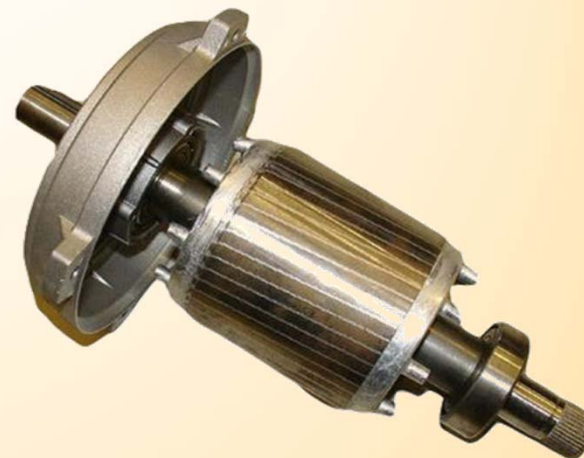
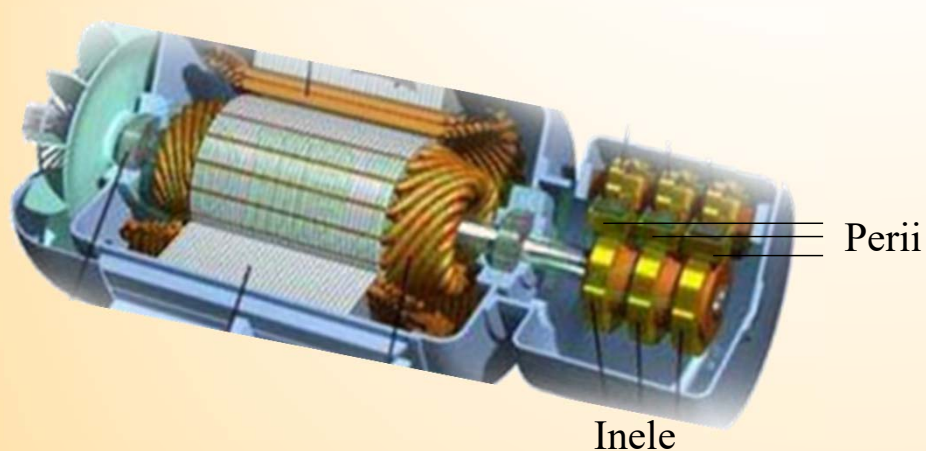


Colivie de veveriță



Circuit magnetic rotoric „expandat”





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

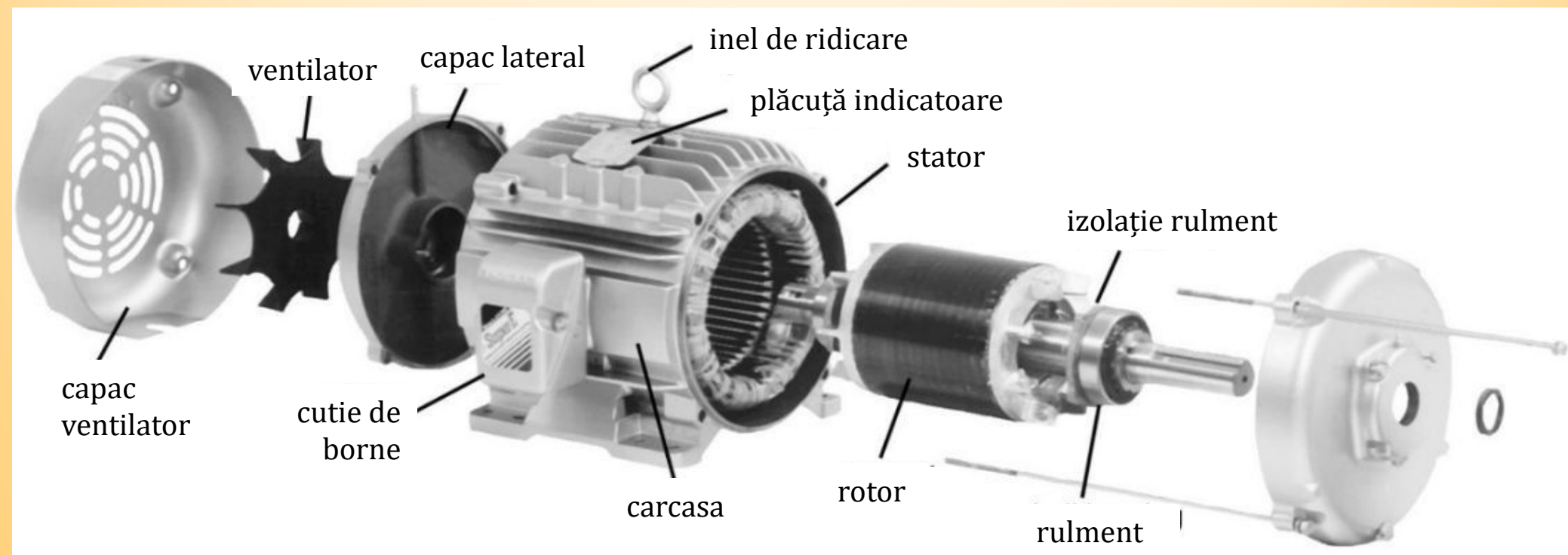
Înfășurarea în sc este realizată din bare de material conductor (cupru sau aluminiu) care sunt scurtcircuitate la cele două capete ale rotorului de către două inele.

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 calcă pe inele, înfășurarea rotorică are legături scoase la o placă de borne.

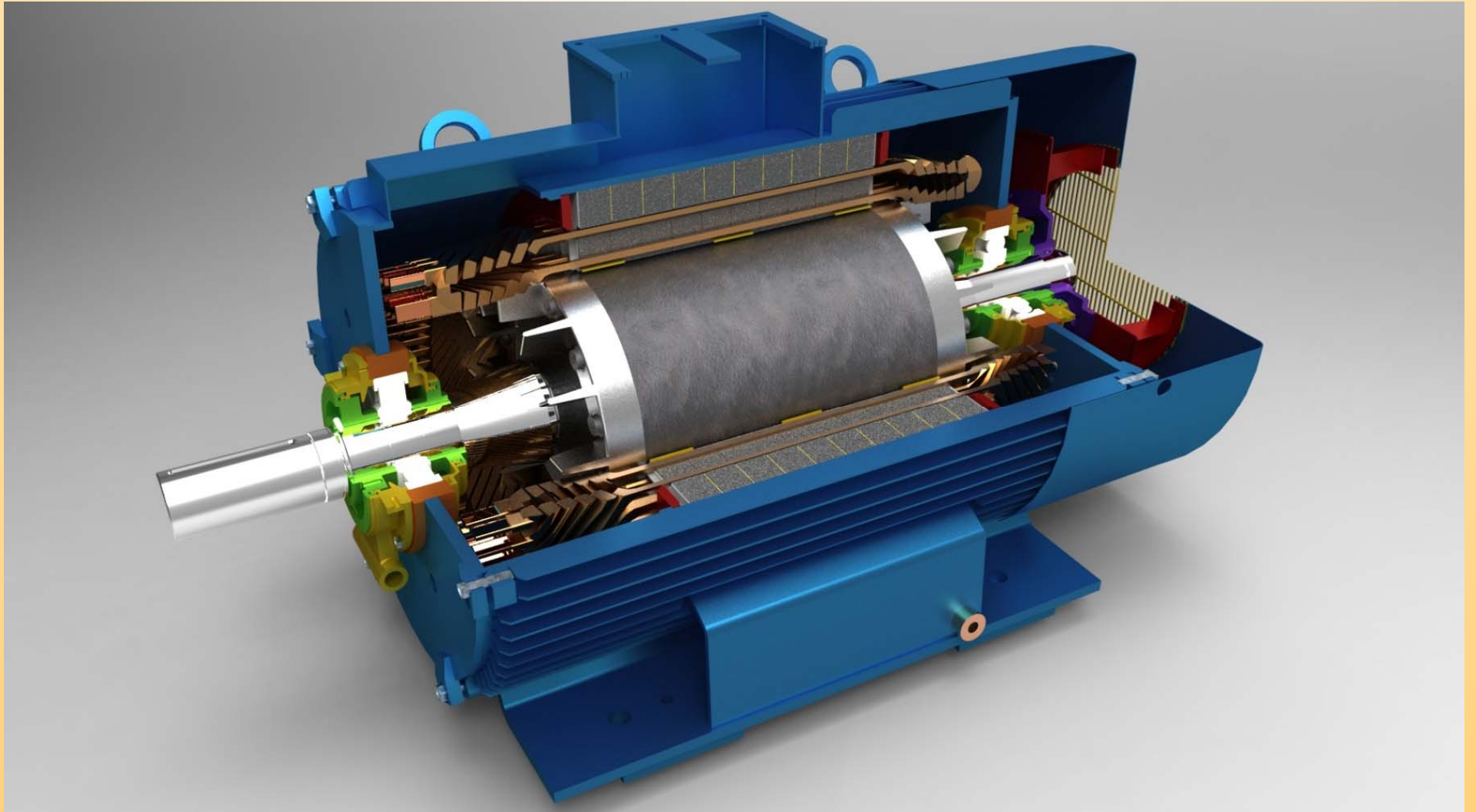
Înfășurarea în sc (colivie de veveriță) este polifazată (numărul de faze este egal cu numărul de bare).

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

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

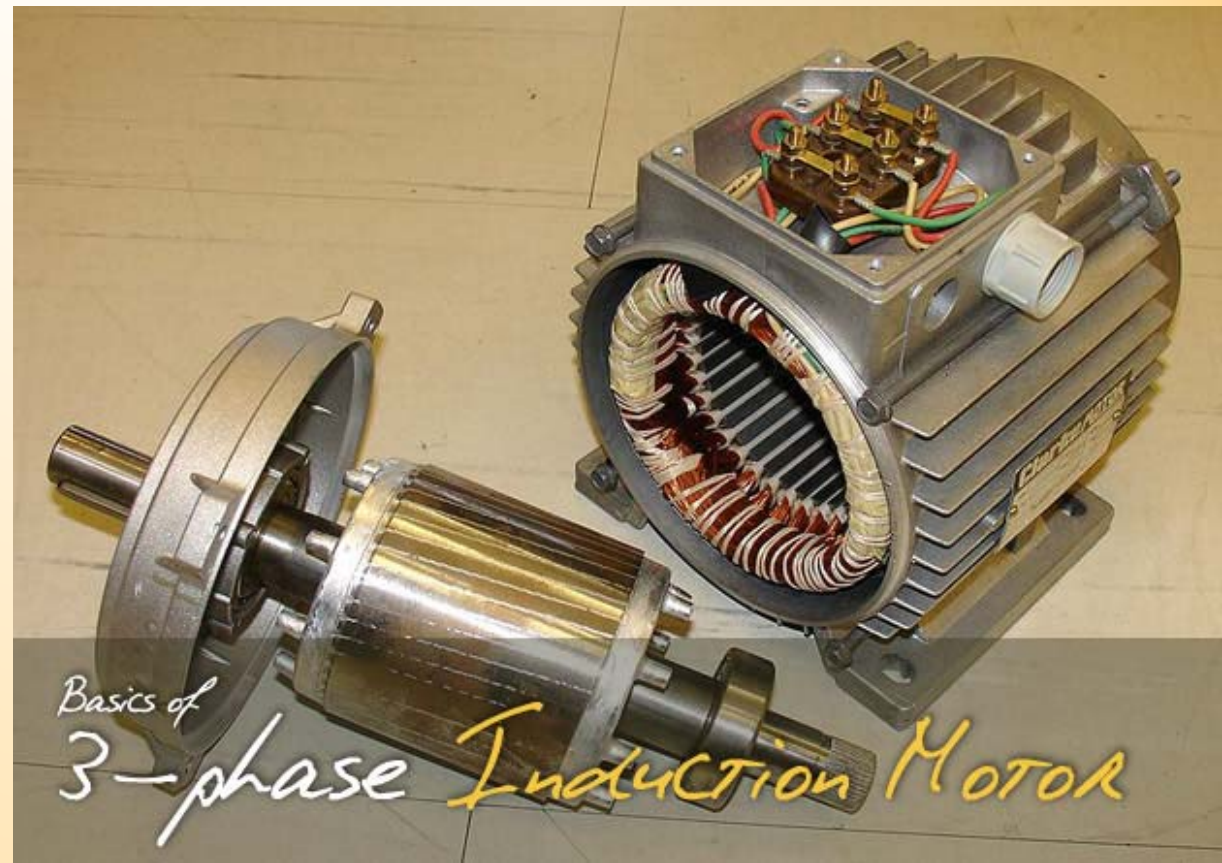


Elementele componente ale unei mașini asincrone

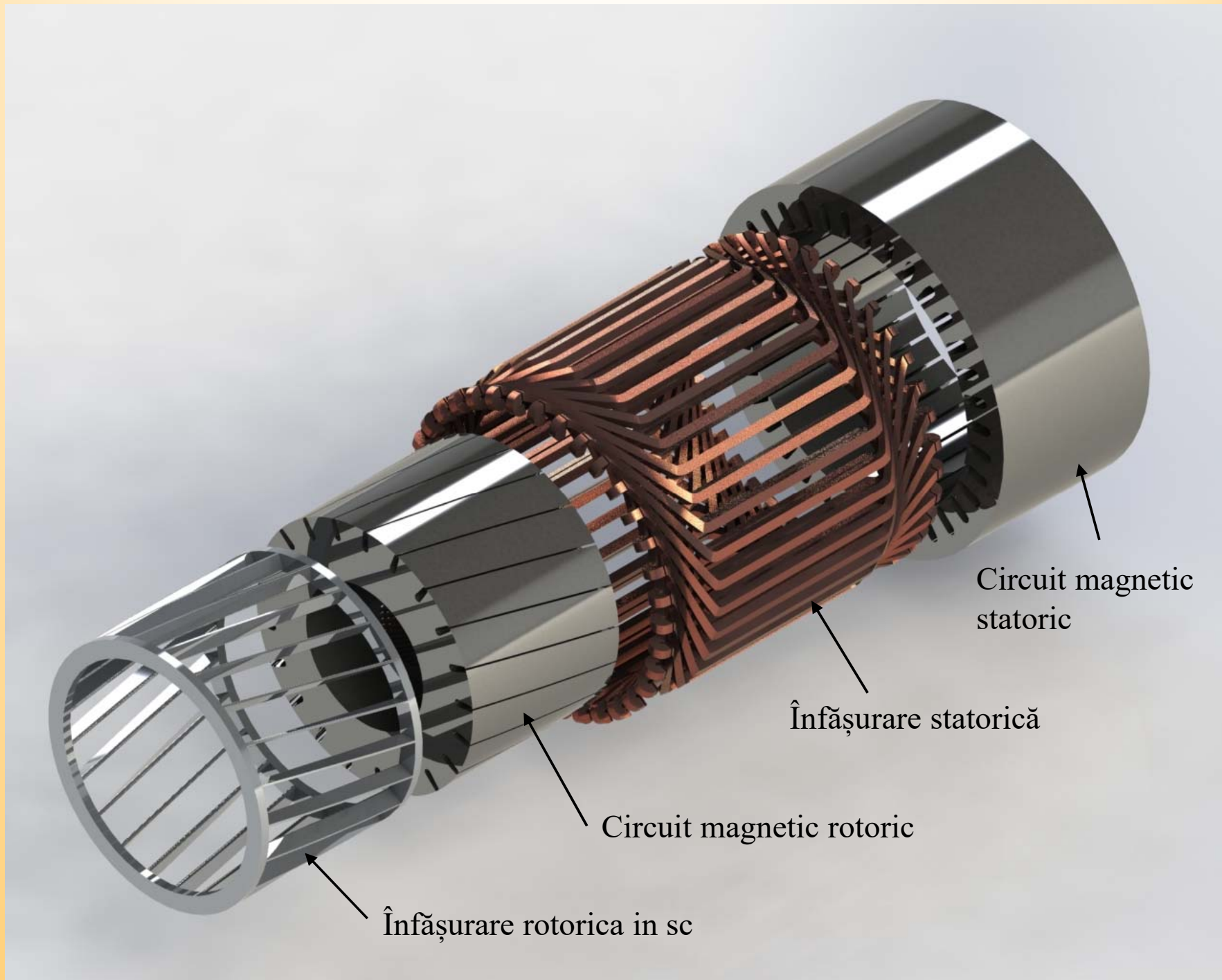


Secțiune printr-o mașină asincronă

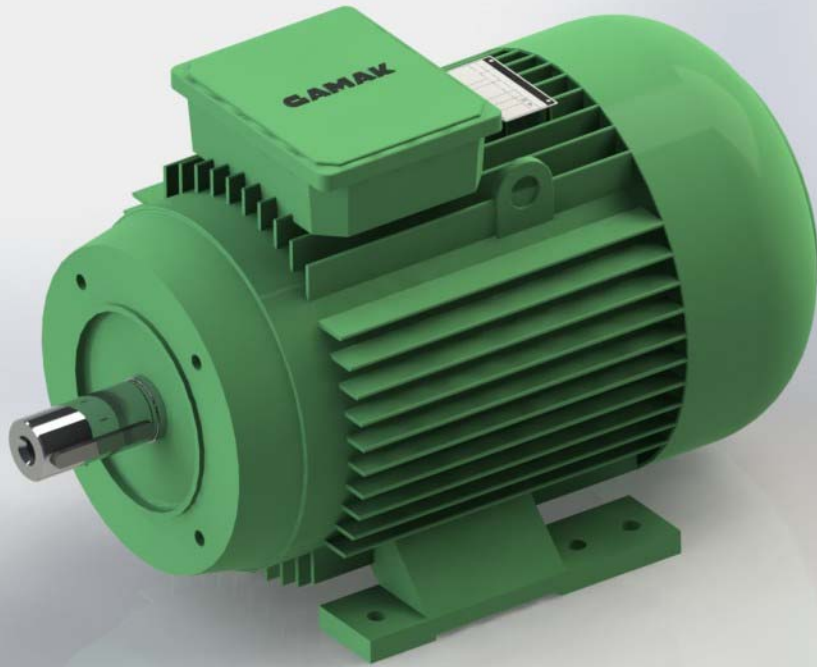
**Rotor in scurtcircuit –
squirrel cage rotor**



Rotor bobinat – wound rotor



Circuit magnetic + înfășurări la mașina asincronă (imagine descompusă)



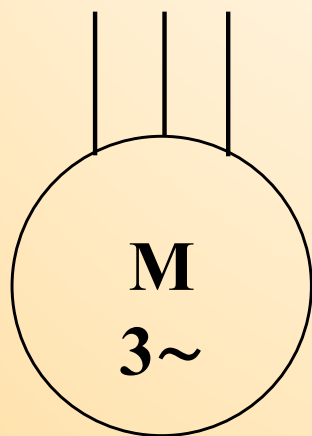
Squirrel cage motor
(rotor in scurtcircuit)

(rotor bobinat)

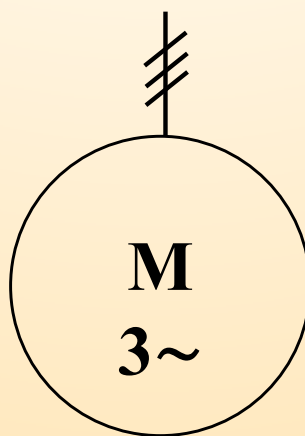
Wound rotor motor



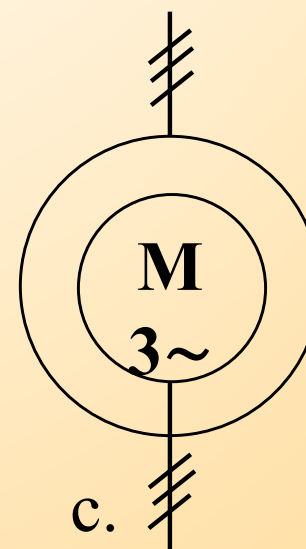
Simbolizarea mașinilor asincrone



a.



b.

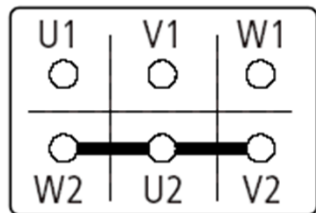


c.

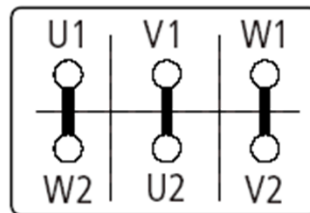
- a. Motor asincron trifazat cu rotor în scurtcircuit
- b. Motor asincron trifazat cu rotor în scurtcircuit – în scheme monofilare
- c. Motor asincron trifazat cu rotor bobinat

Placa de borne, conexiuni

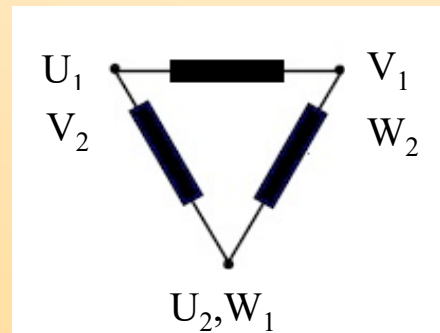
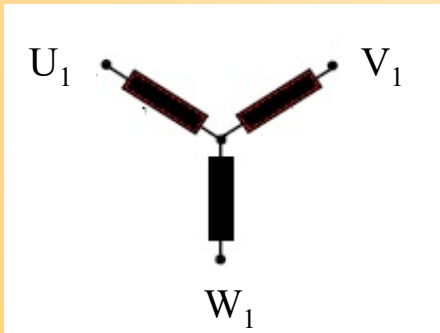
Conexiune stea



Conexiune triunghi

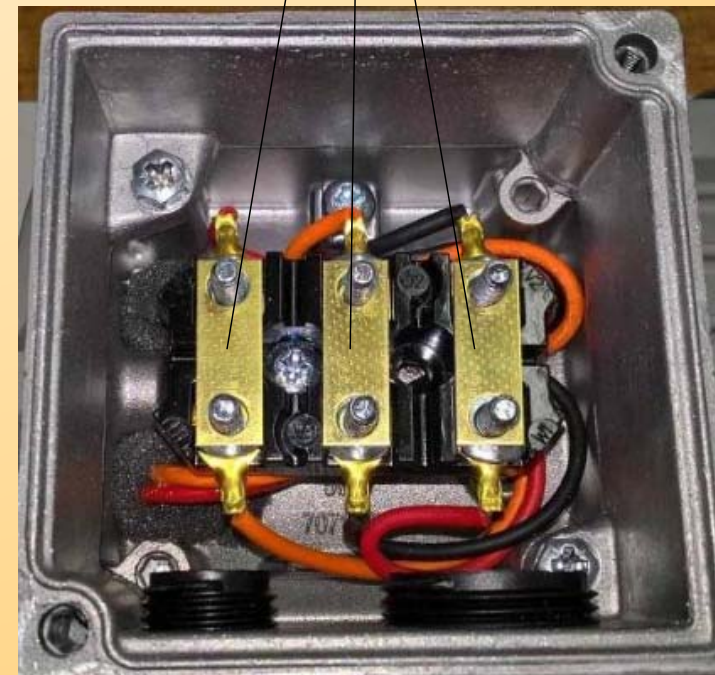


Conexiunea stea sau triunghi a înfășurării statorice se poate realiza, la placa de borne, prin intermediul unor lamele metalice.



La mașina asincronă trifazată, înfășurarea statorică poate fi conectată în stea sau triunghi.

Lamele metalice



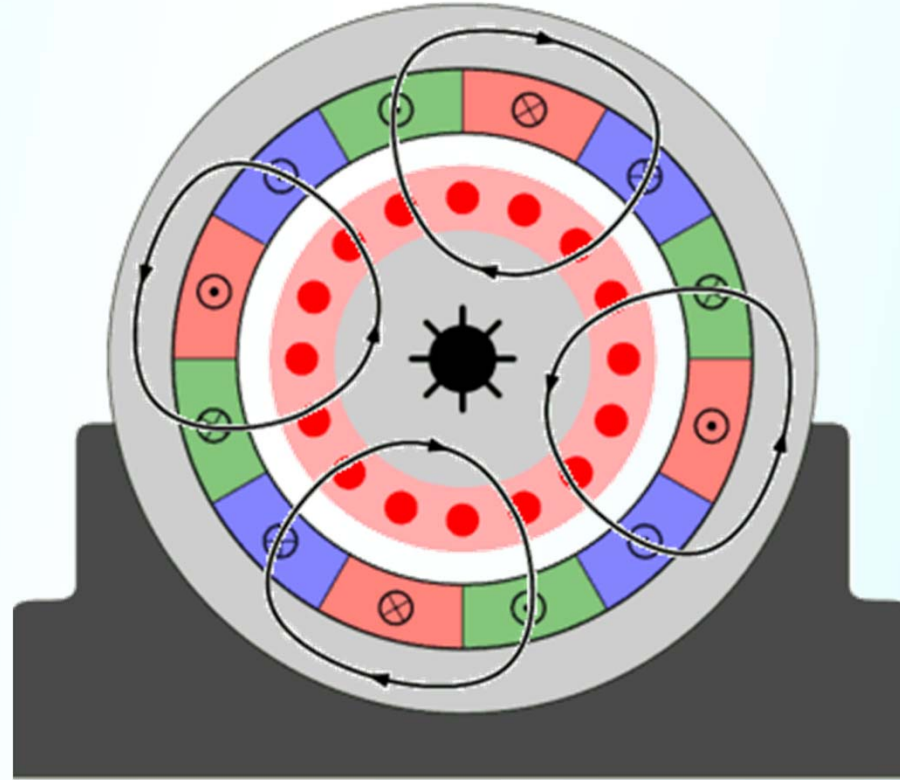
Plăcuța indicatoare

Motor & Co GmbH		
Typ 160 I		
3 ~ Mot.	Nr. 12345-88	
Δ Y 400/690 V	29/17 A	
S1 15 kW	cos φ 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 nominală, factorul de putere, frecvența tensiunii de alimentare, turația.

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

Principiul de funcționare





Se consideră o mașină asincronă 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 consideră 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.

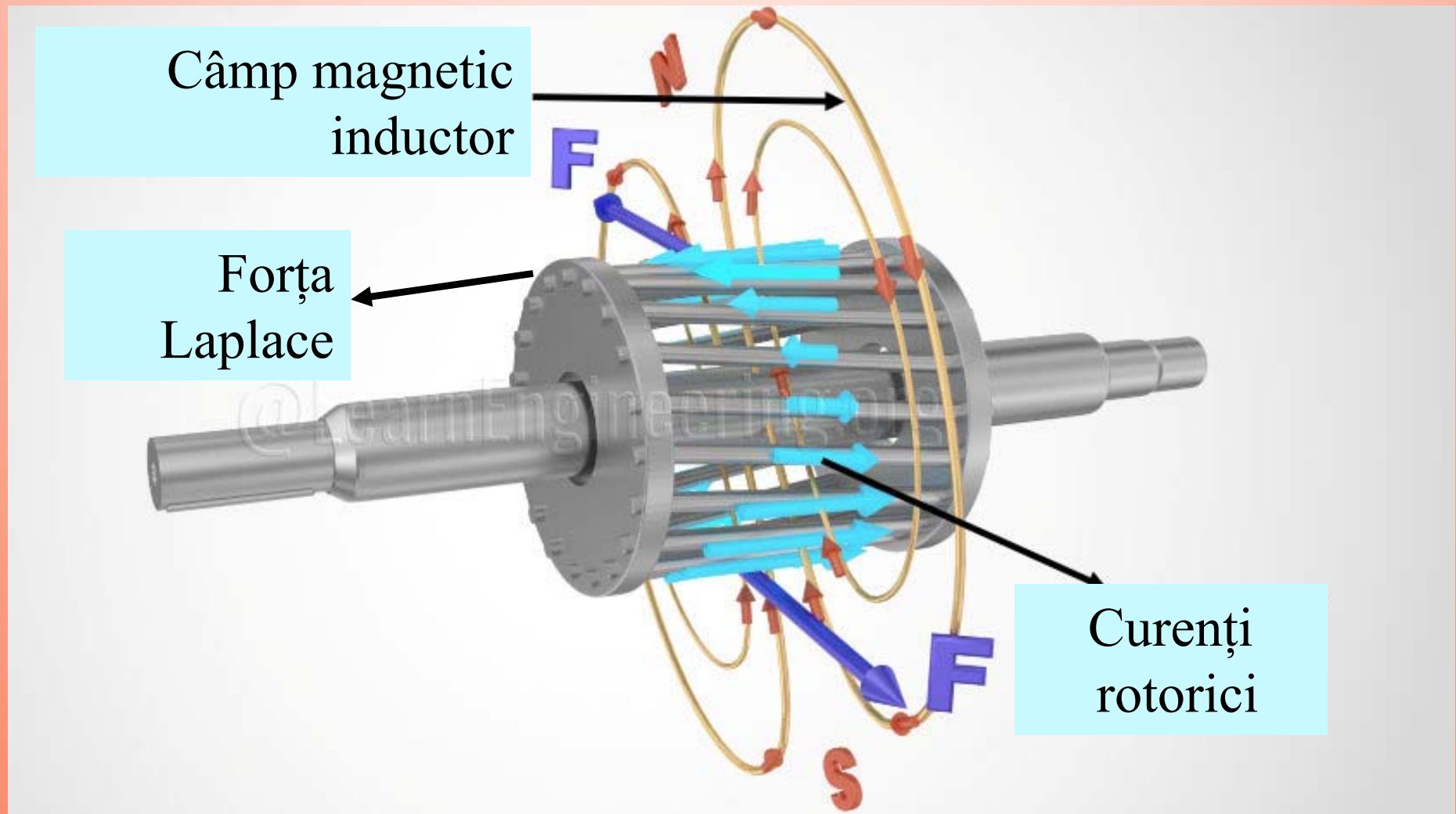
1. Producere câmp magnetic învârtitor având viteza de rotație:

$$\Omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}$$

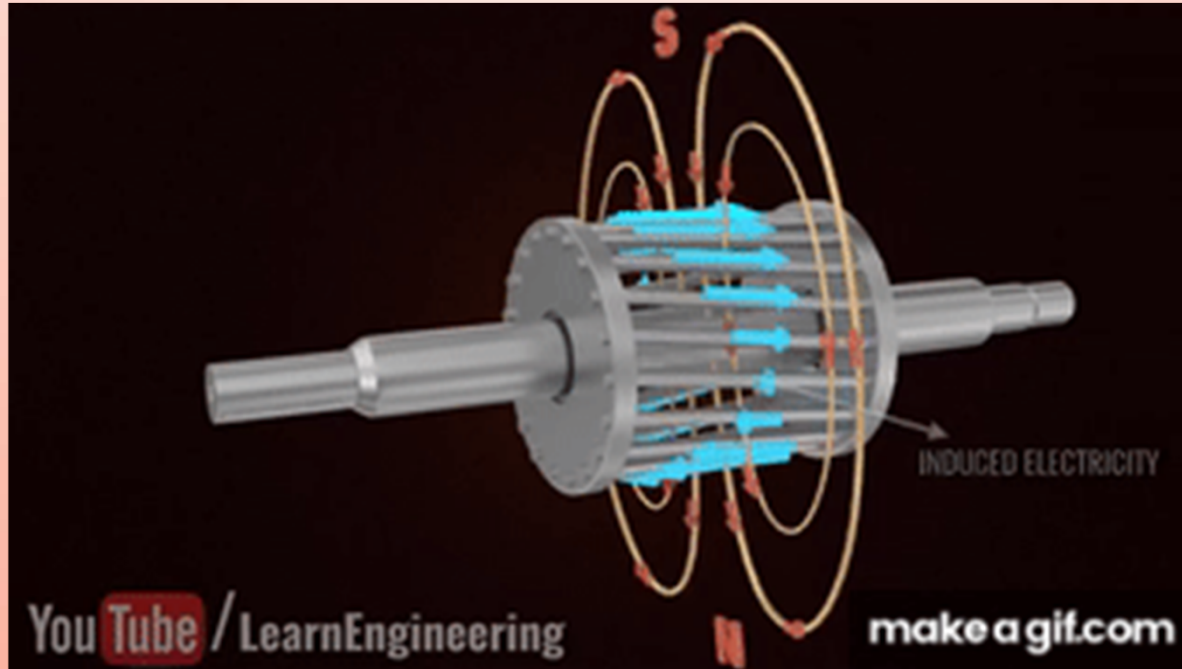


2. Se induce în înfășurarea rotorică o tensiune conform legii inducției electromagnetice

3. Apariția curentului rotoric și a câmpului de reacție



4. Apariția cuplului electromagnetic ce pune în mișcare de rotație rotorul până la viteza Ω



Viteza rotorului, Ω , este întotdeauna diferită de viteza câmpului magnetic învârtitor creat de înfășurarea statorică, Ω_1



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

Expresia alunecării

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

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

Regimuri de funcționare

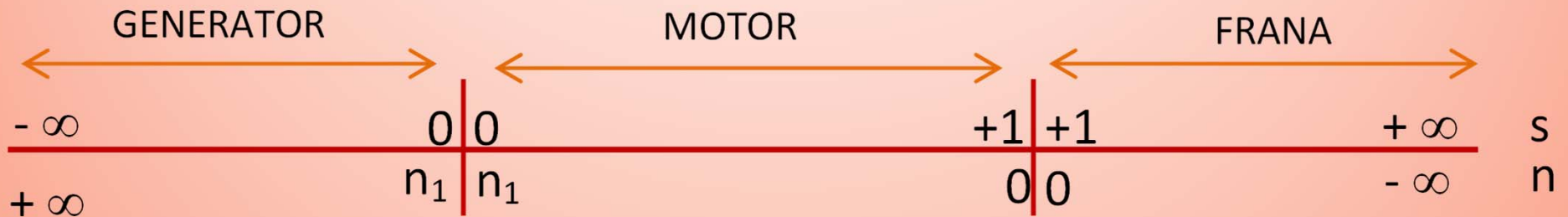
Regimul de motor are loc atunci când mașina electrică absoarbe energie electrică pe la borne și furnizează energie mecanică la ax. În acest regim, mașina asincronă are o turație a rotorului mai mică decât turația de sincronism.



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-zisă este un regim tranzitoriu, limitat.

Regimuri de funcționare



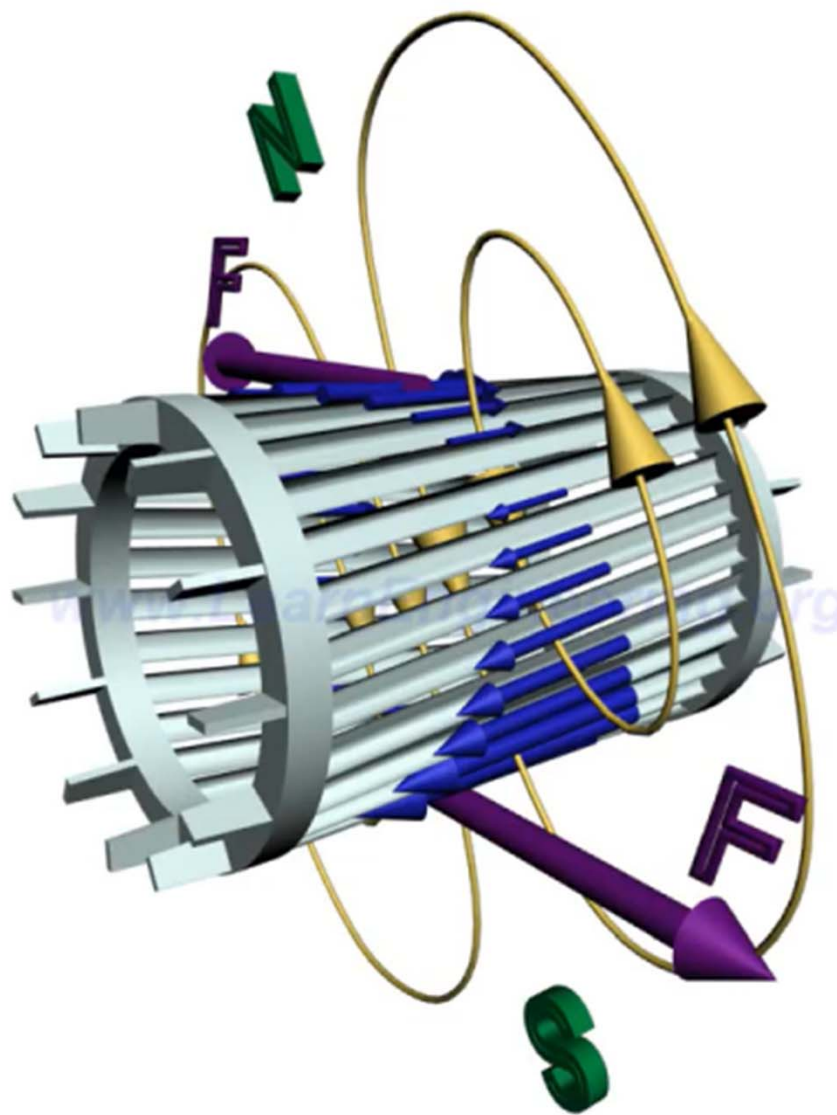
Regim de funcționare	Alunecare s	Turație rotor n
Motor	$s \in (0, 1)$	$n \in (0, n_1)$
Generator	$s < 0$	$n > n_1$
Frână	$s > 1$	$n < 0$

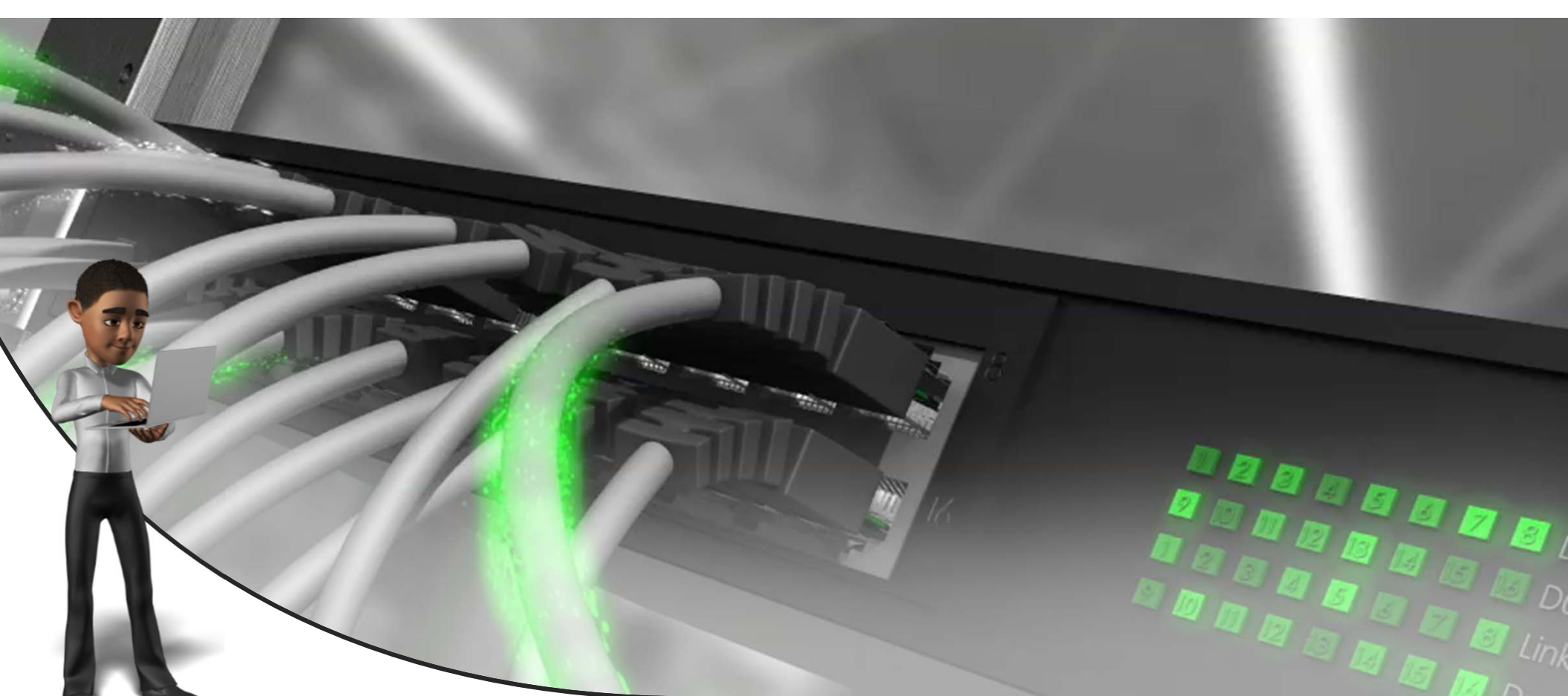


- Înfășurări de tip repartizat
- Rotor în scurt-circuit
- Rotor bobinat
- Alunecare

Film demonstrativ

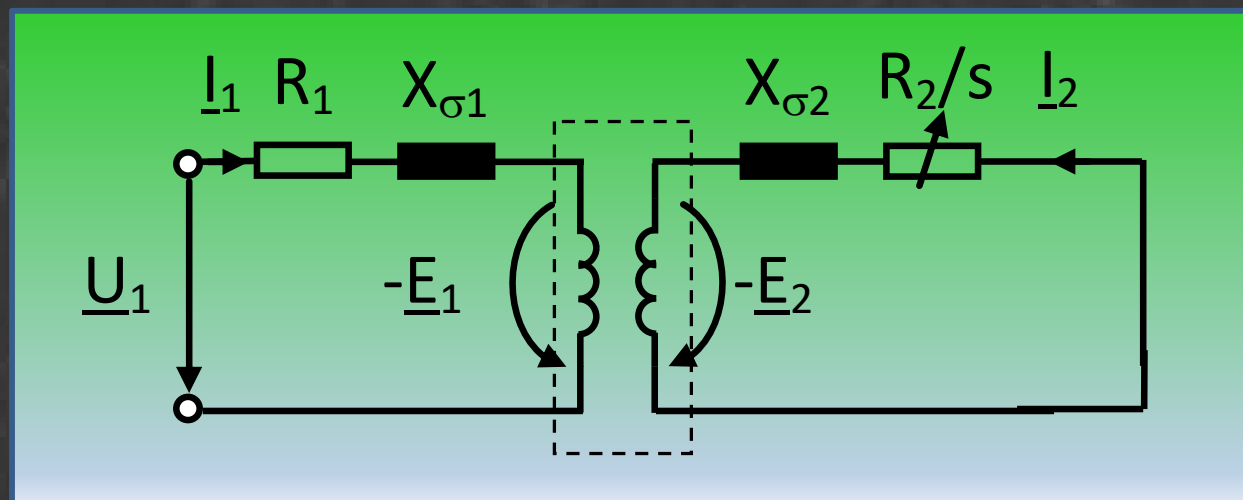
- principiul de funcționare a mașinii asincrone





PARAMETRI SPECIFICI MAȘINII ASINCRONE

Ecuatiile de funcționare și schema electrică echivalentă ale mașinii asincrone *ideale*



Schema electrică echivalentă a unei mașini asincrone *ideale* pune în evidență existența celor două circuite electrice reprezentate de înfășurarea statorică respectiv înfășurarea rotorică. Intre aceste două circuite există un cuplaj mutual.

Mărimile reprezentate pe schema echivalentă sunt:

R_1, R_2 – rezistența înfășurărilor de fază statorice și rotorice;

$X_{\sigma 1}, X_{\sigma 2}$ – reactanțele de dispersie ale statorului și rotorului;

I_1, I_2 – curenții prin înfășurărilor de fază statorice și rotorice;

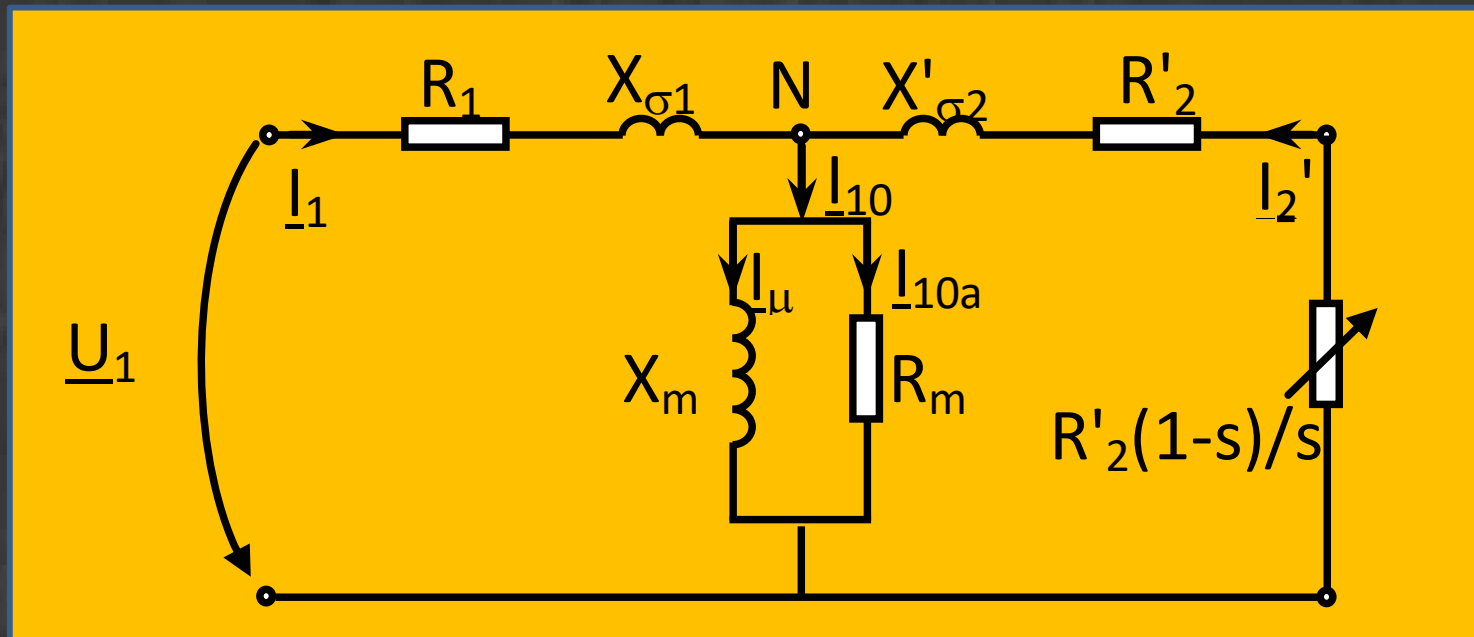
s – alunecarea;

E_1, E_2 – tensiunile induse în înfășurărilor de fază statorice și rotorice de către câmpul învârtitor rezultat;

U_1 – tensiunea de alimentare de fază.

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

Schema electrică echivalentă a mașinii reale elimină cuplajul mutual între circuitul statoric și cel rotoric. În plus, apar elemente de circuit ce modelează pierderile în fierul mașinii și fenomenul de magnetizare a acesteia.



Curentul I_{10} reprezintă curentul de mers în gol (atunci când cuplul rezistent la arbore este zero). El are două componente: I_{10a} - componenta activă a curentului de magnetizare ce corespunde pierderilor în fier; I_{μ} - componenta reactivă a curentului de magnetizare.

R_m – este rezistența de magnetizare și reprezintă componenta de circuit care „modelează” existența pierderilor în fier;

X_m – este reactanța de magnetizare a circuitului magnetic al mașinii.

Trebuie remarcat faptul că rezistența înfășurării rotorice variază odată cu alunecarea (deci cu viteza rotorului). Această rezistență poate fi descompusă în două componente: una constantă (R'_2) și una variabilă cu alunecarea, $R'_2(1-s)/s$.

Corespunzător schemei electrice echivalente, ecuațiile mașinii asincrone sunt:

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

ecuația circuitului statoric

ecuația circuitului rotoric

ecuația de interdependența a curenților

Bilanțul puterilor și randamentul mașinii asincrone

Echilibrul puterilor, la funcționarea în regim de motor, a mașinii asincrone este dat de următoarea expresie:

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

unde:

P_2 – puterea utilă, disponibilă la axul mașinii. Este puterea indicată pe plăcuța indicatoare a mașinii corespunzător sarcinii nominale;

P_1 – puterea activă absorbită de la rețea. $P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1$

- Pierderi în înfășurarea statorică și respectiv fierul statorului:

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

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

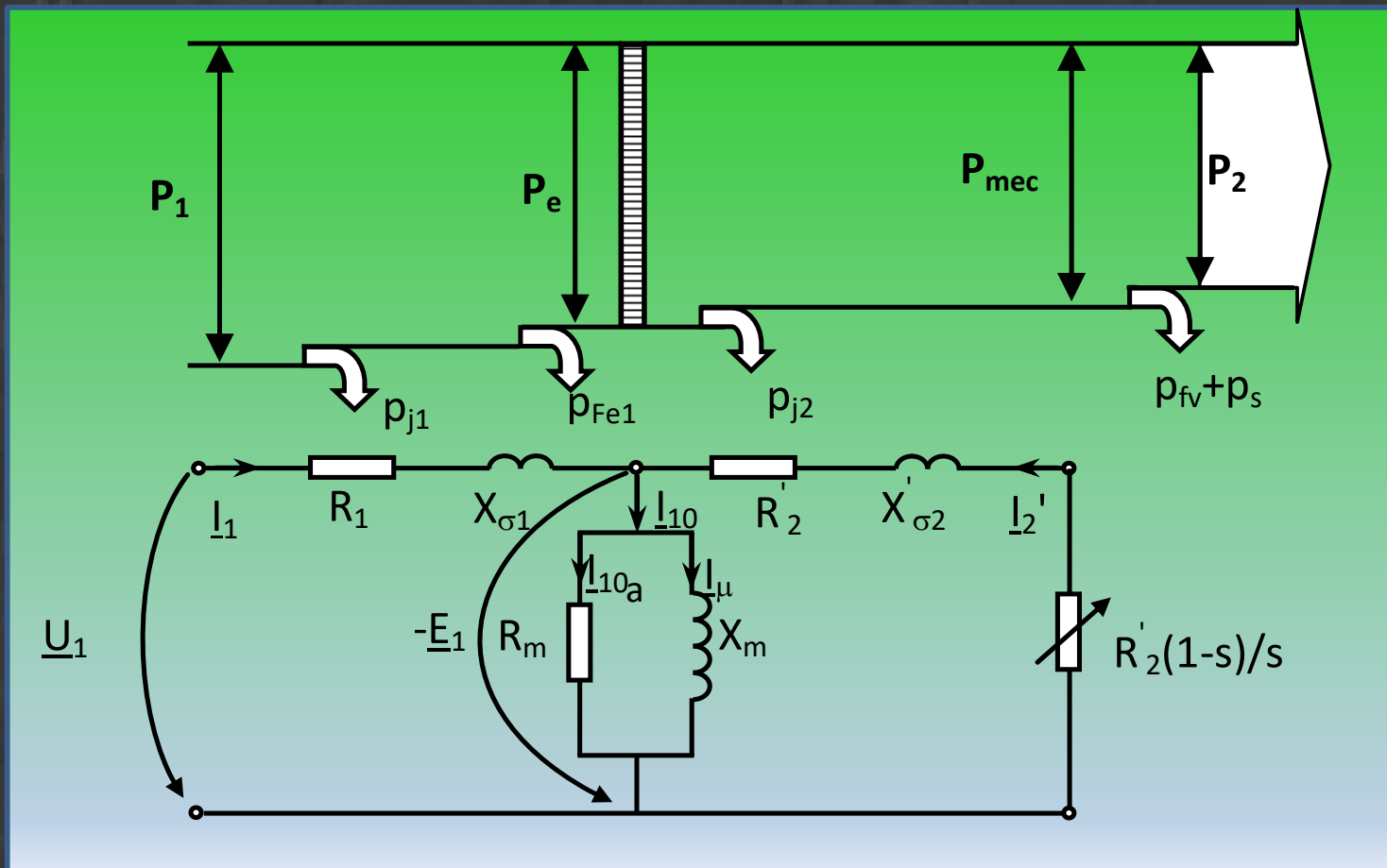
- Pierderi în înfășurarea rotorului

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

De regulă, pierderile în fierul rotoric se neglijează întrucât ponderea lor este foarte mică.

- p_{fv} = pierderi prin frecare și ventilație;
- p_s = pierderi suplimentare

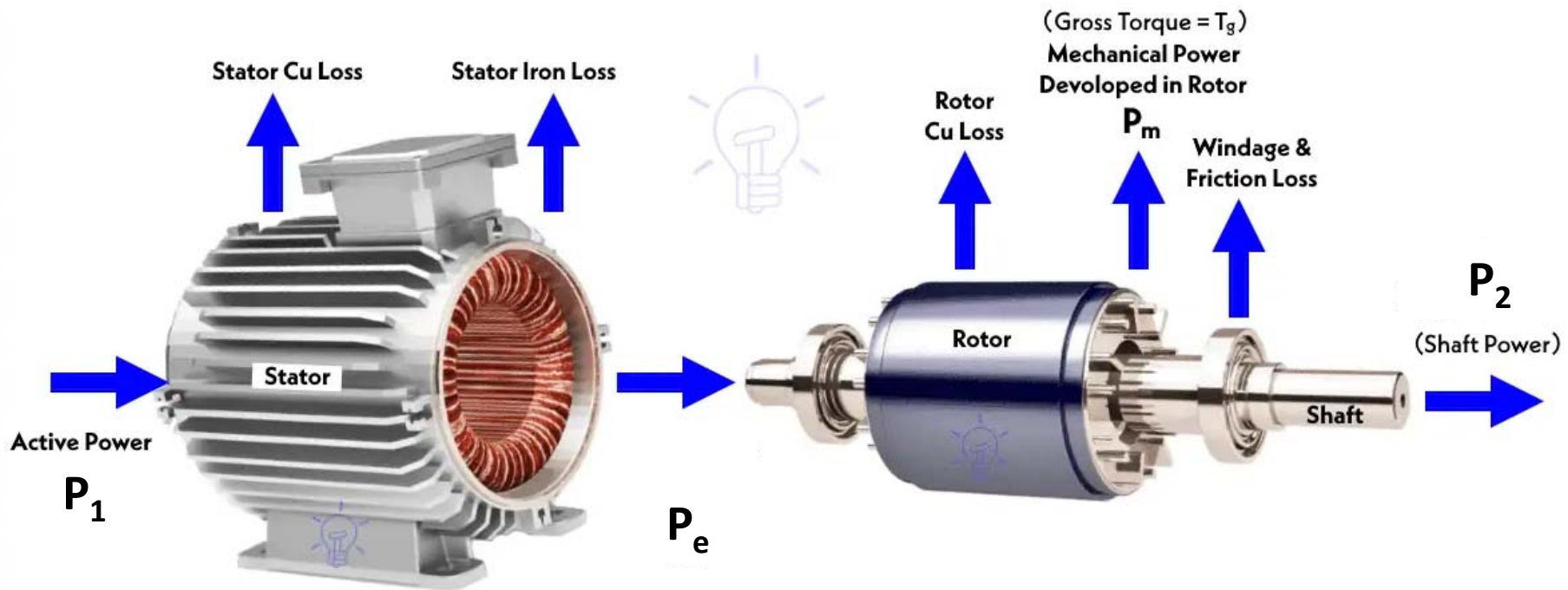
Diagrama bilanțului de puteri asociată cu schema electrică echivalentă este:



Obs: P_e reprezintă puterea electromagnetică adică putere ce se transferă pe cale electromagnetică de la stator către rotor.

Localizarea pierderilor și diagrama puterilor la motorul asincron

Losses in Induction Motor



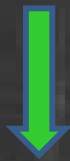
Expresia randamentului este:

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

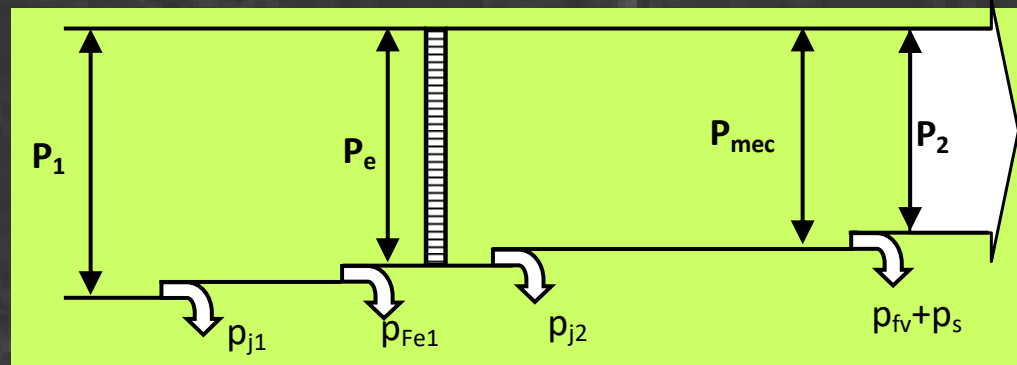
Obs: Randamentul unei mașini electrice are întotdeauna o valoare subunitară. Cu cât această valoare este mai apropiată de 1, cu atât funcționarea este mai eficientă.

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:

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

Expresia *cuplului electromagnetic* produs în mașina asincrona este:

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

Valoarea maximă a cuplului are expresia:

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

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

Valoarea maximă a cuplului se obține pentru o valoare a alunecării având expresia:

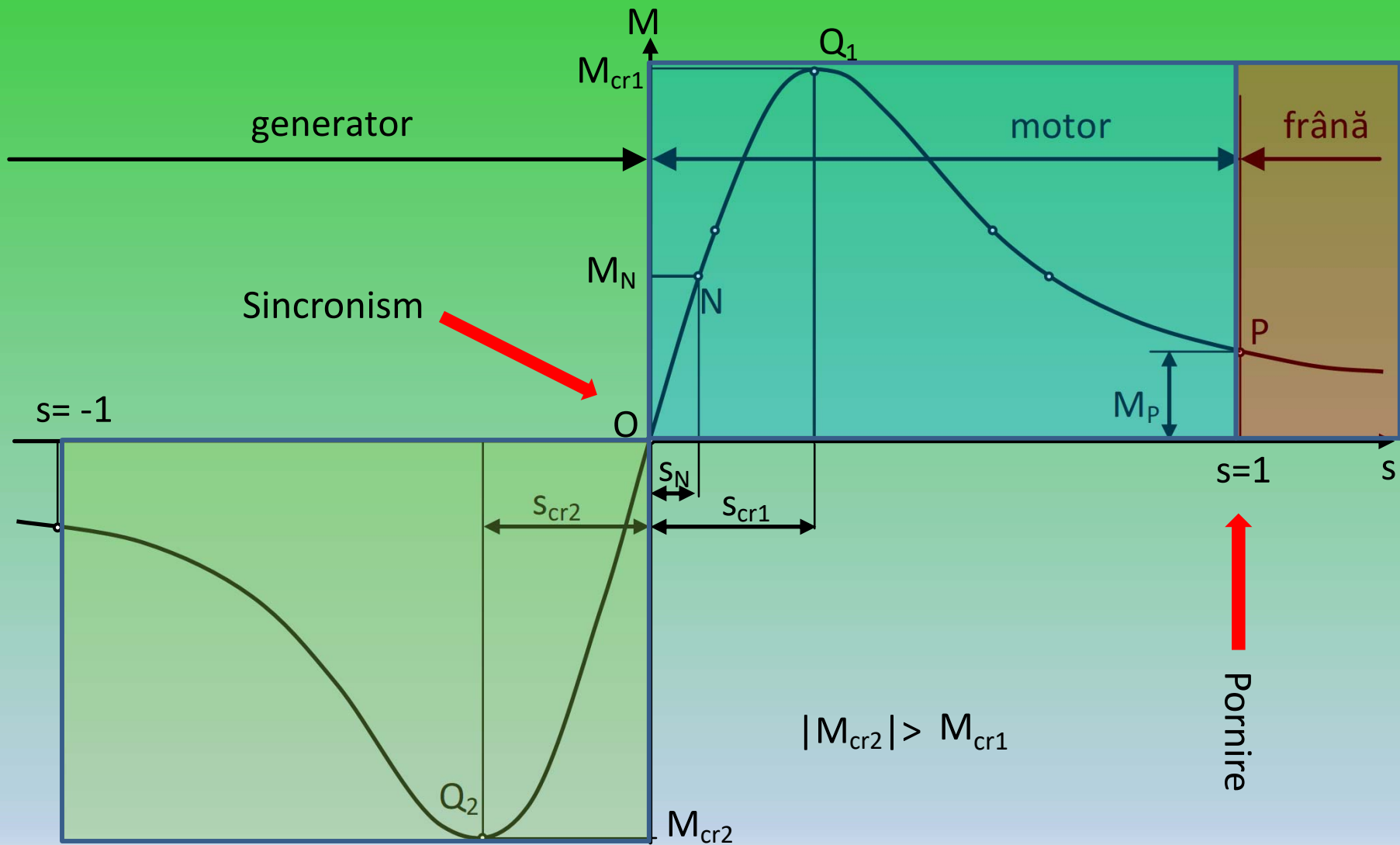
$$s_{cr} = \pm \frac{c_1 \cdot R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2}}$$

numită *alunecare critică*.

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

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

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 pe perioada pornirii și opririi). 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.

Cuvinte cheie

Putere absorbită (P_1) vs
putere cedată (P_2)

Cuplu electromagnetic

Pierderi în înfășurări

Cuplu de pornire

Pierderi în fier

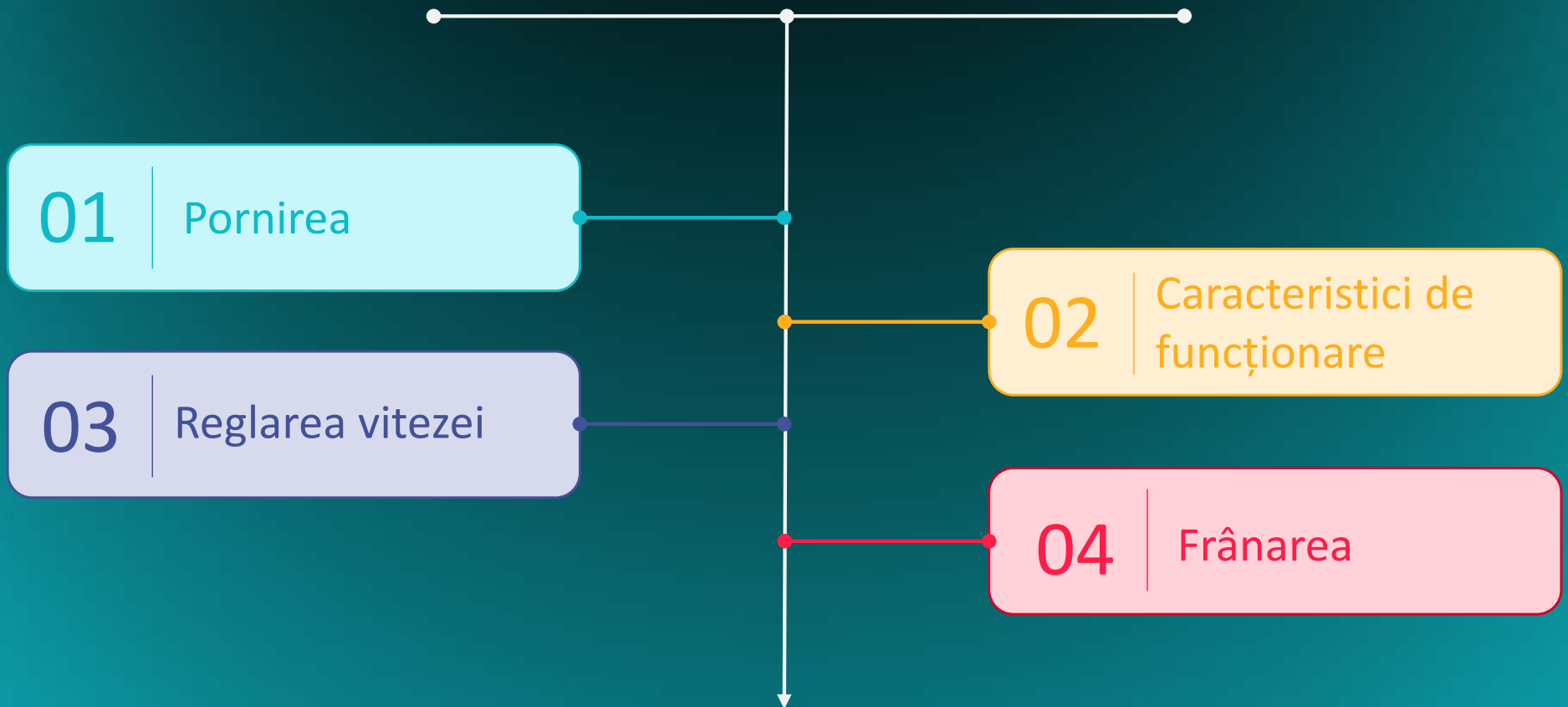
Cuplu maxim (critic)



FUNȚIONAREA MOTORULUI ASINCRON

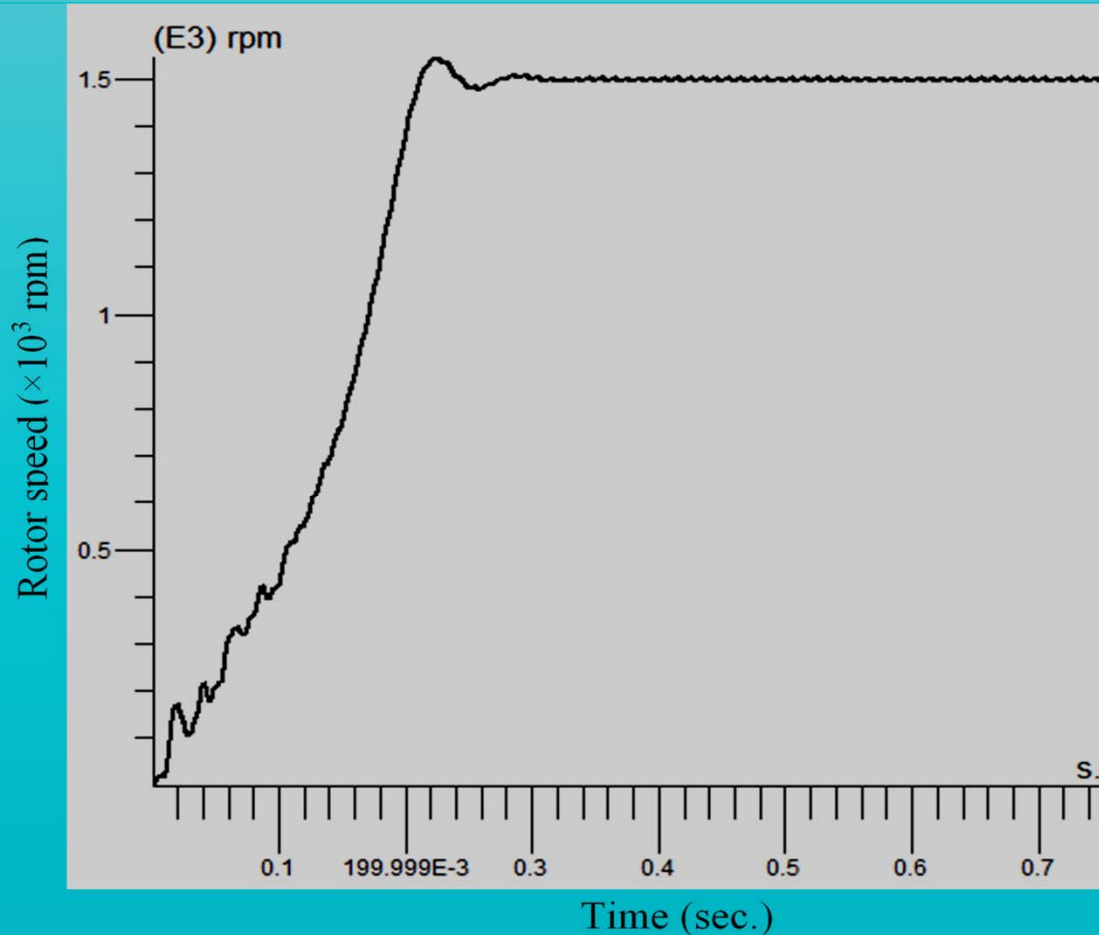


Tematici de analiză la motorul asincron

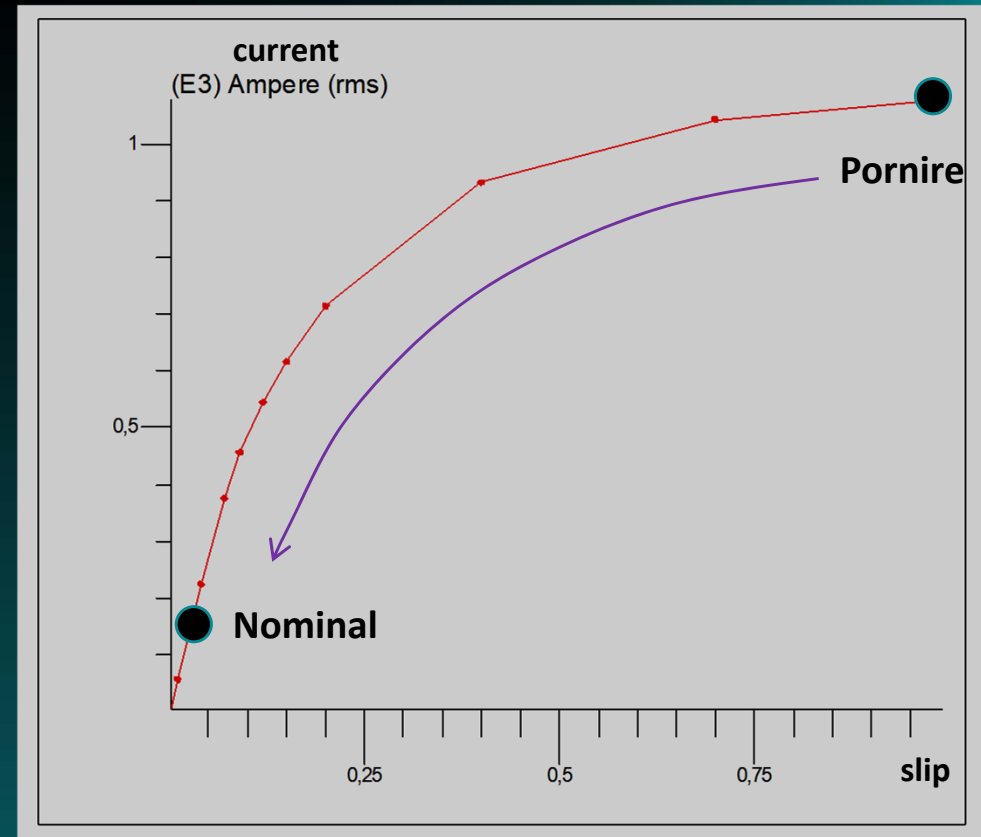
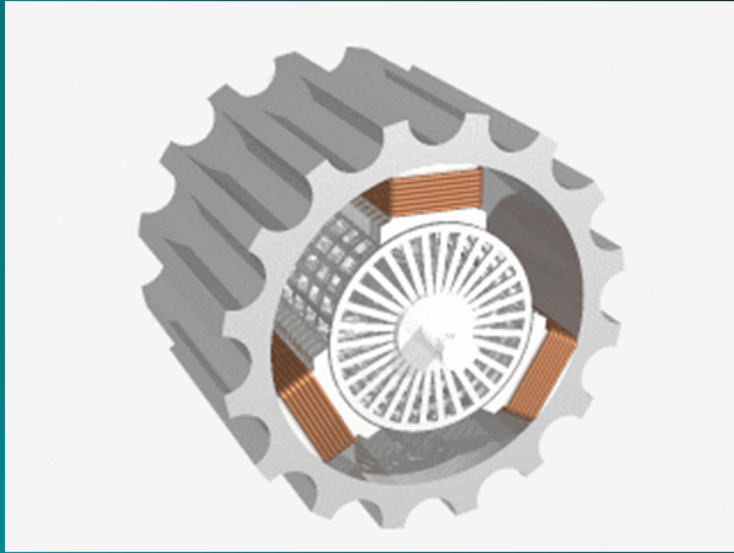




Pornirea este un regim tranzitoriu al funcționării in regim de motor pe parcursul căruia mașina accelerează de la zero până la stabilizarea vitezei la o valoare constantă, determinată de sarcină.



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.

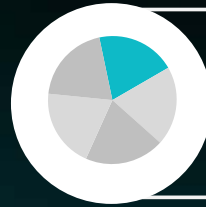
La pornirea motorului asincron apare întotdeauna prin înfășurări un curent mai mare decât valoarea nominală. Acest curent, în mod uzual, se încadrează în limitele $(4-7)I_N$. Deși, pe moment, acest curent nu produce defectarea mașinii întrucât regimul de pornire este scurt, în timp are loc o depreciere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

TIPURI DE PORNIRE



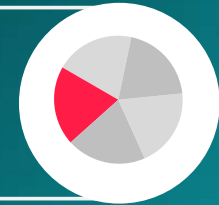
I.
Cuplarea directă la rețea

II.
Pornirea stea-triunghi



III.
Pornirea cu autotransformator

IV.
Pornirea cu soft-starter

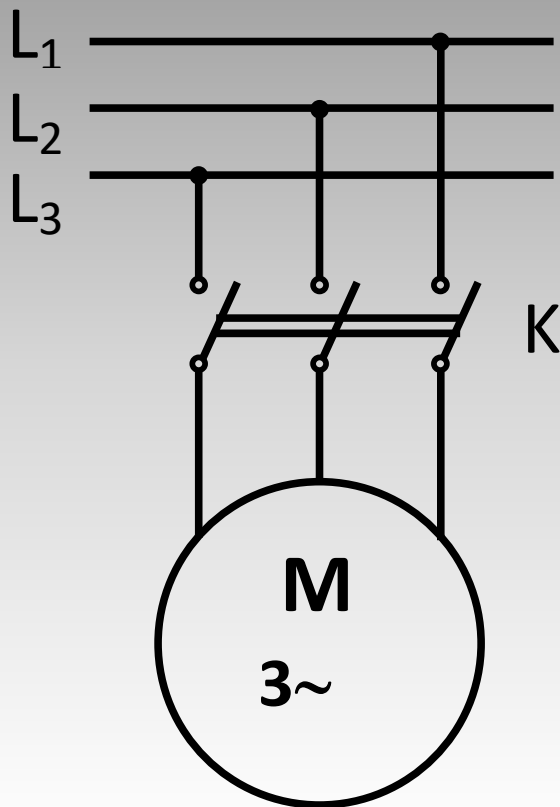


V.
Pornirea cu convertor de frecvență

VI.
Pornirea cu rezistențe înseriate în
circuitul rotoric



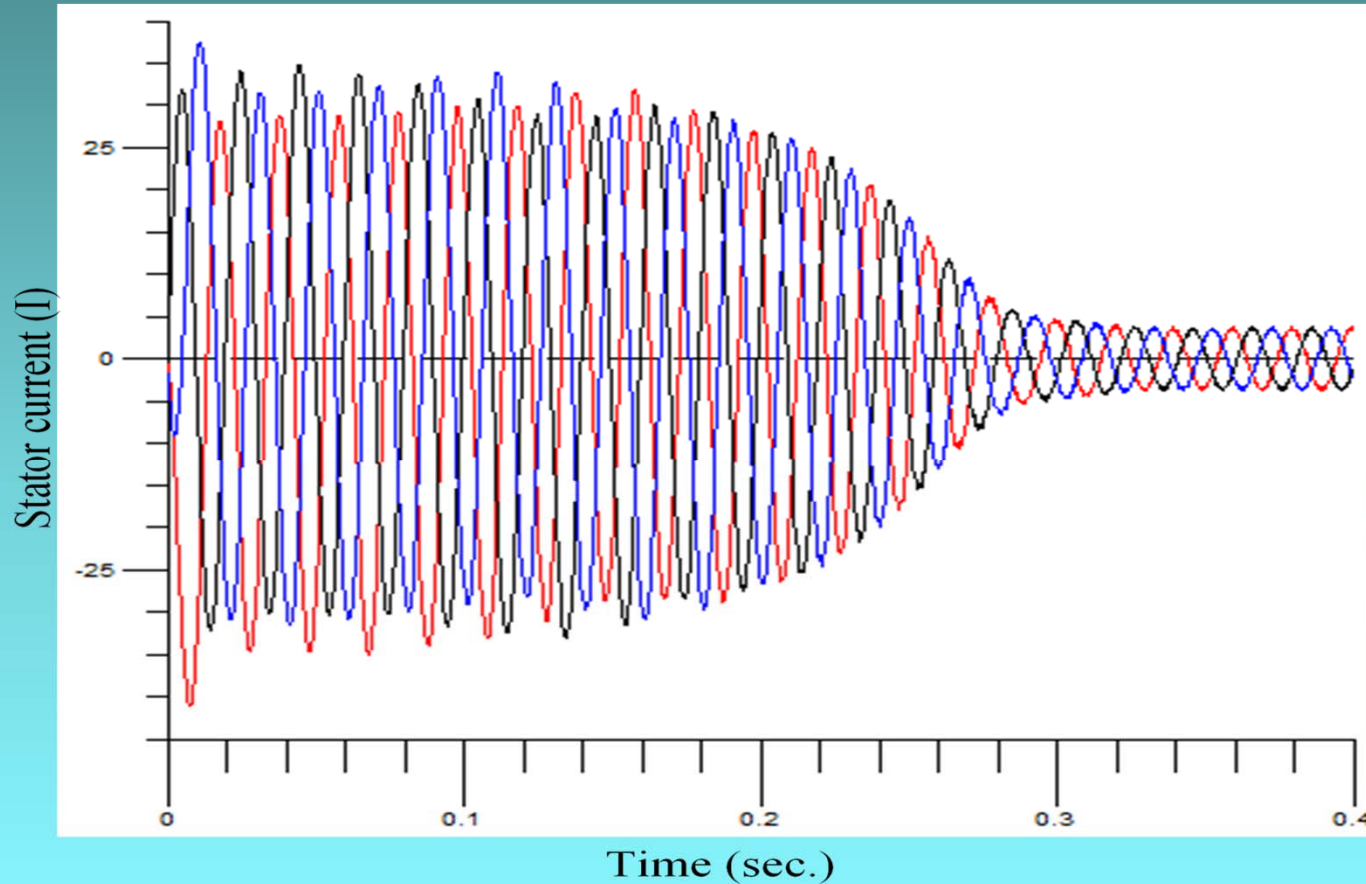
I. Cuplarea directa



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.

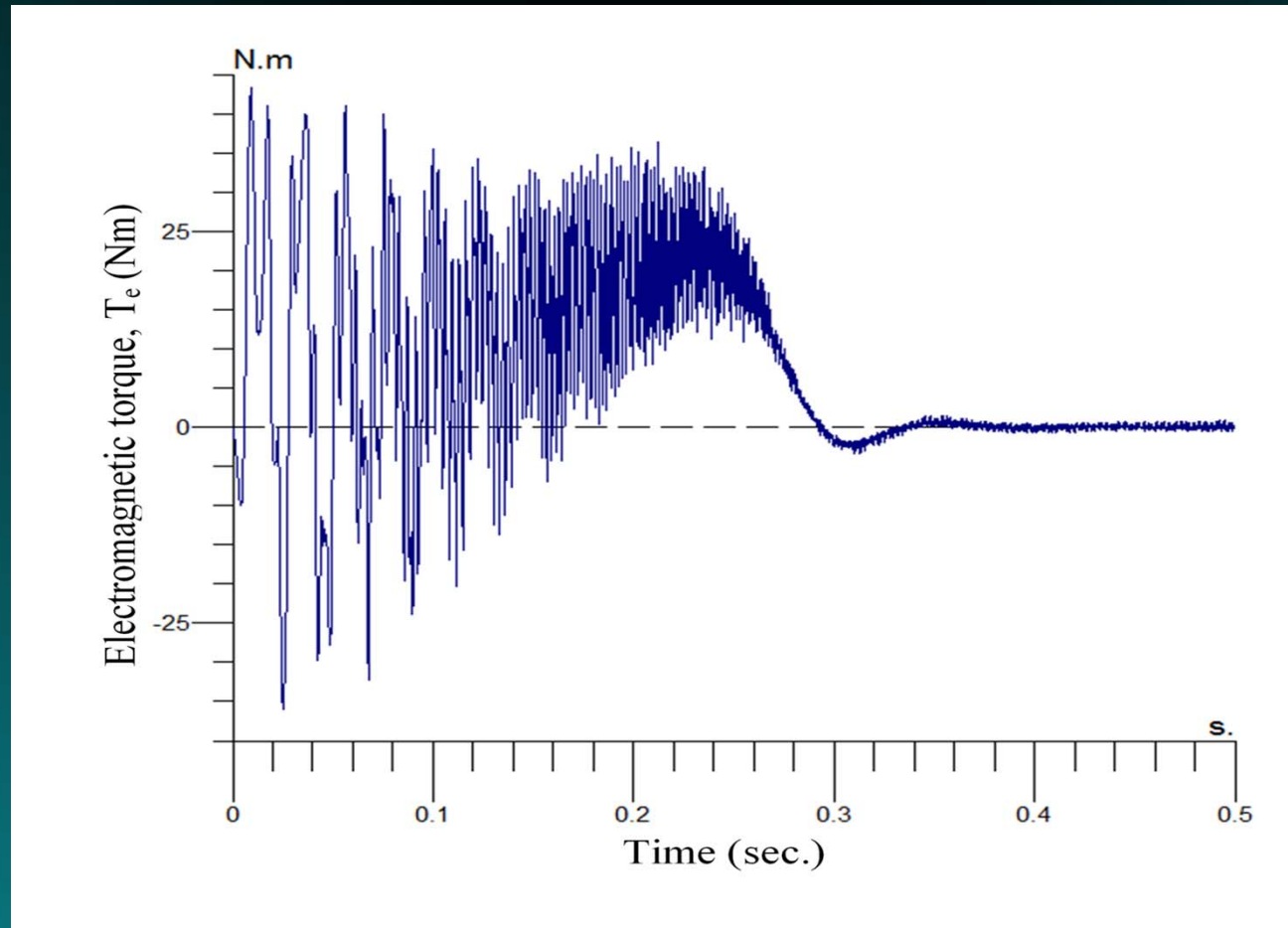
Variația curenților prin înfășurarea trifazată statorică, la conectarea unei mașini asincrone la rețea.



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



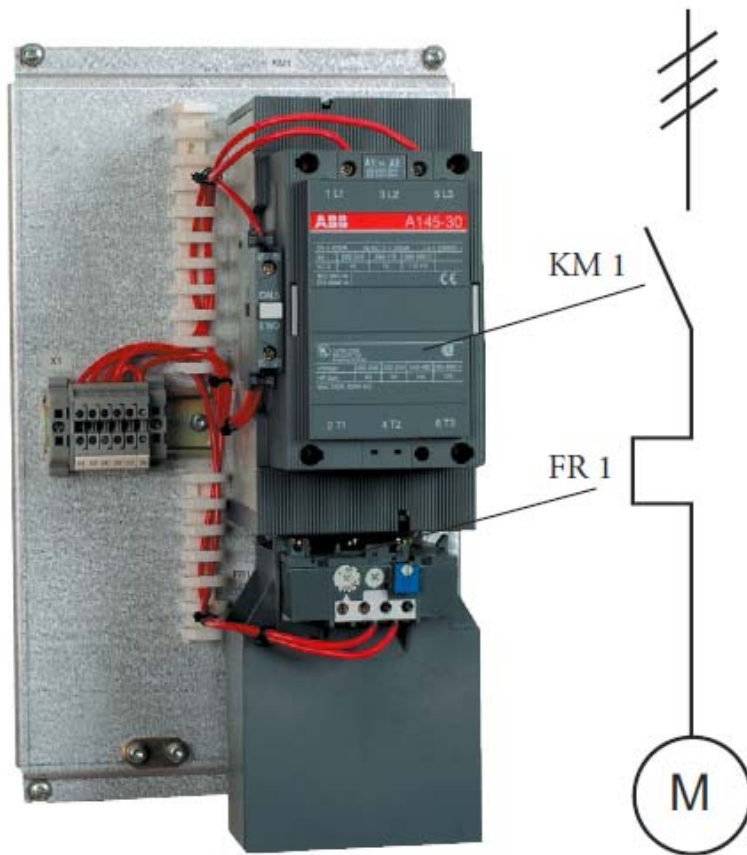
$$M_e = J \frac{d\Omega}{dt} + M_r$$

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

Ω – viteza unghiulară a rotorului.

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

Contactor utilizat la cuplarea directă a motorului asincron la rețea



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:

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

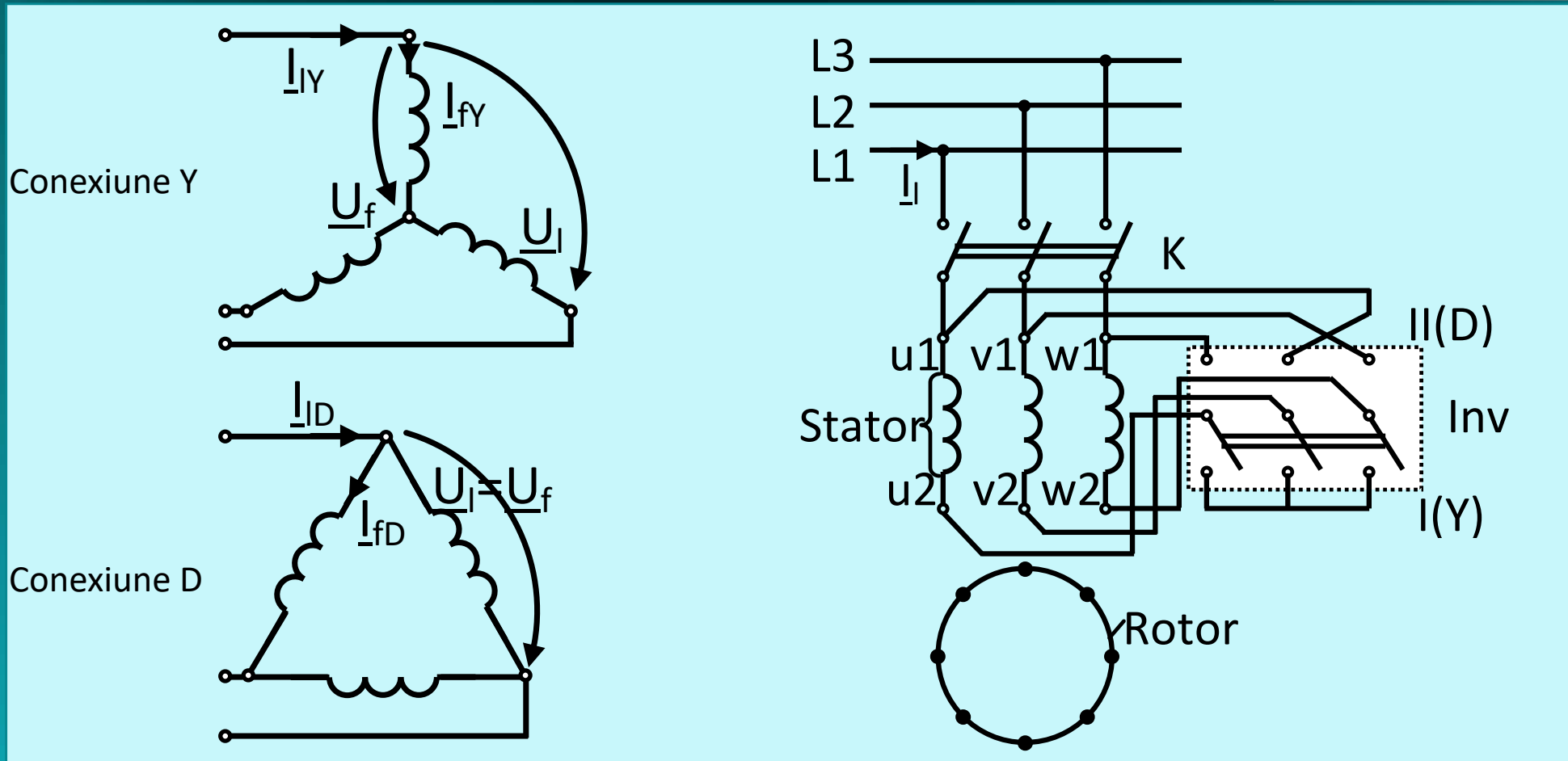
II. Pornirea stea-triunghi

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

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).

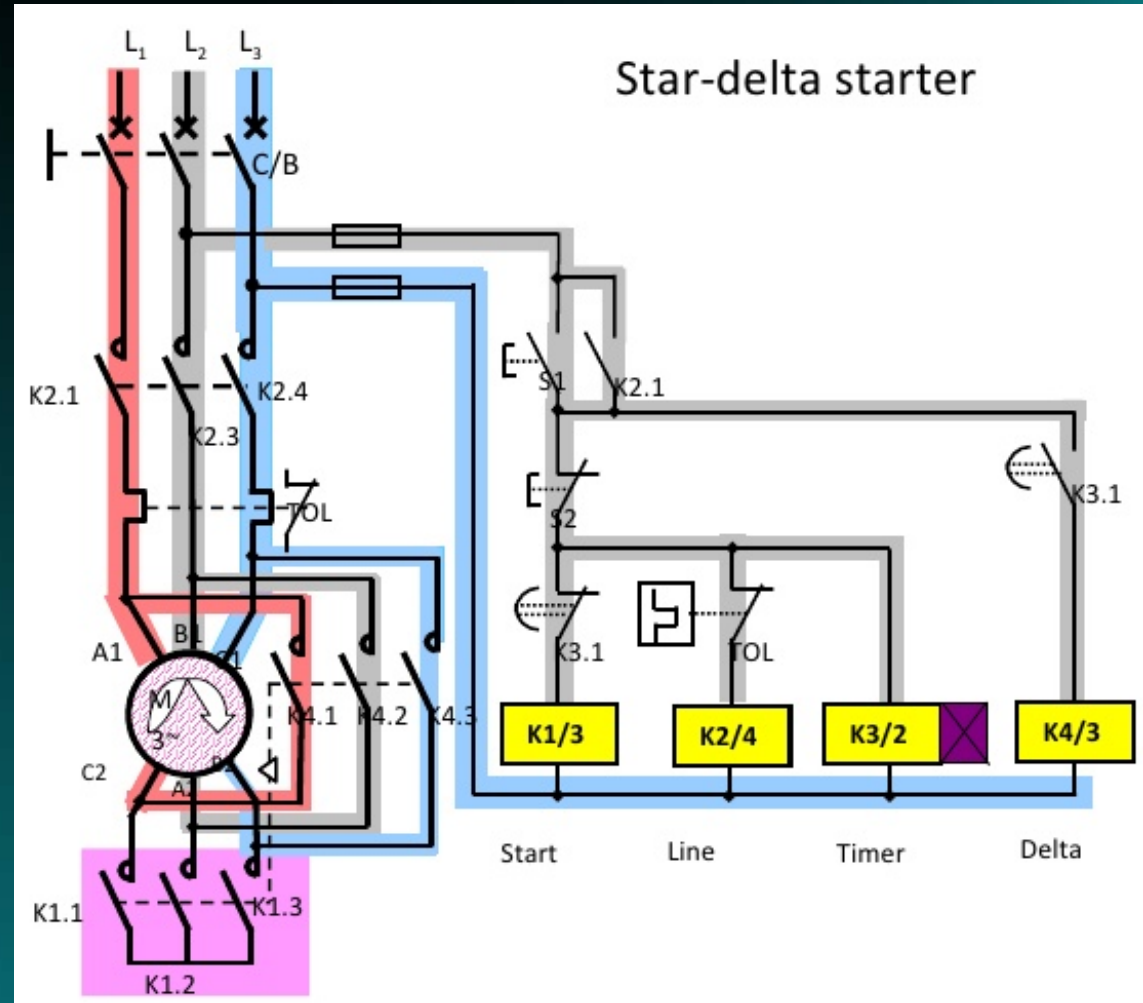
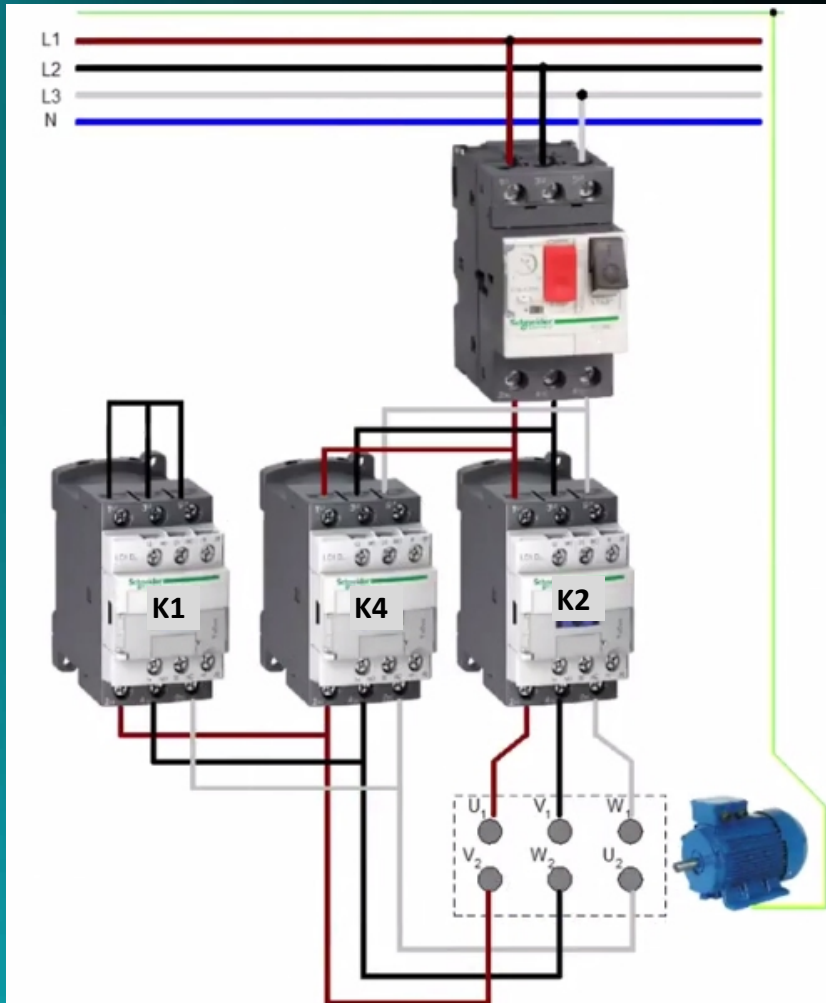
Comutator stea-triunghi



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

Schema de principiu a comutatorului stea-triunghi

Sistem de pornire Y/Δ automatizat



- Când se apasă butonul de pornire S1, se alimentează bobinele contactoarelor K1 și K2 ce duce la închiderea contactelor acestora. 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).

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

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

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

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

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**.



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 funcționarii în triunghi

Indicația de pe plăcuța indicatoare trebuie să arate astfel:

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

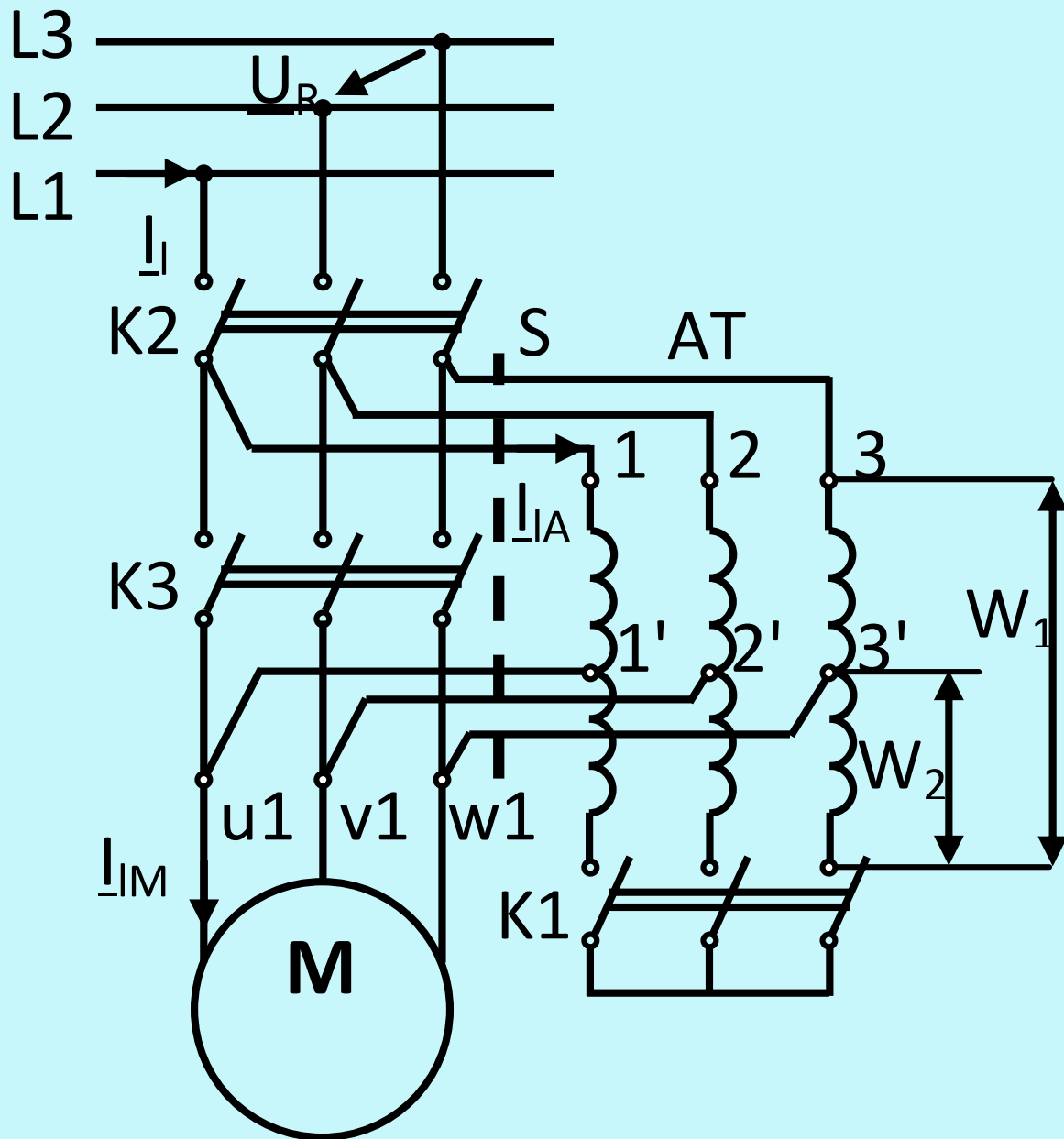


Dacă pe plăcuța indicatoare a mașinii apare:

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

înseamnă că mașina este destinată să funcționeze în conexiunea stea și trecerea ei în 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*

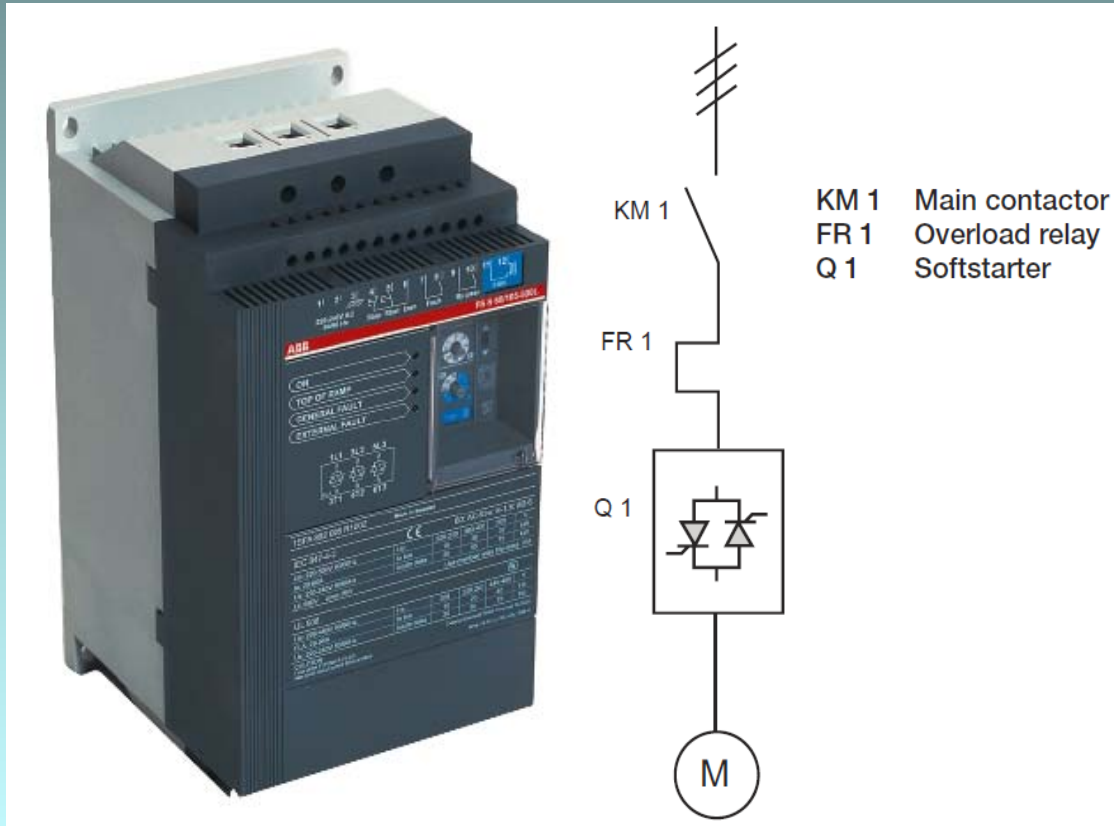
$$\text{Daca } \frac{w_1}{w_2} = 2 \quad \text{atunci } U_{1m} = \frac{1}{2} U_{1r} \quad \text{dar } M = 0,25 \cdot M_{pN}$$

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

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

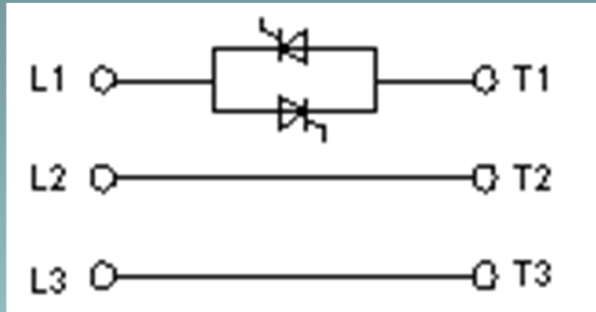
4. Deoarece costul ATR este mare, metoda se folosește pentru alimentarea succesivă a mai multor motoare.

IV. Pornirea cu soft-starter

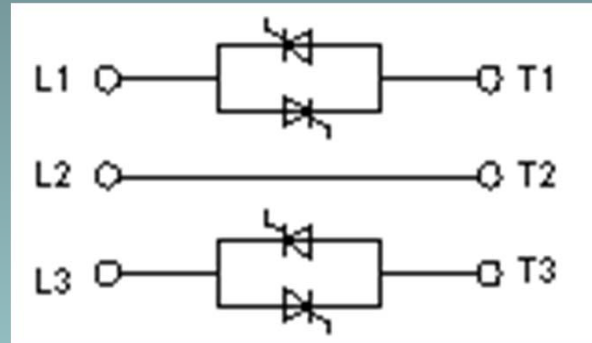


Soft-starterul este un dispozitiv ce permite reglarea temporară, pe cale electronică, a tensiunii de alimentare. De regulă, este prevăzut cu tiristoare legate în antiparalel pe una, două sau toate trei fazele. Valoarea tensiunii este reglată prin modificarea unghiului de conducție al tiristoarelor.

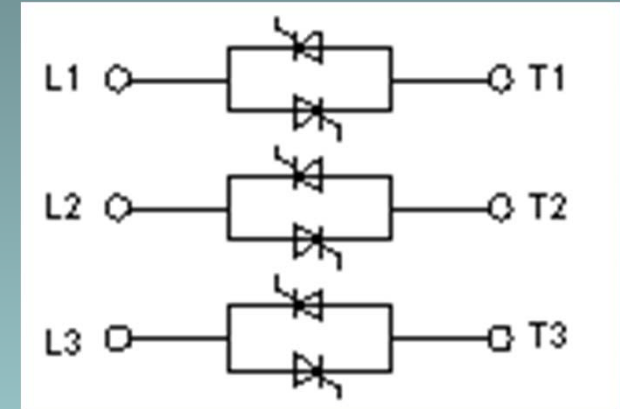
Tipuri de soft-startere



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

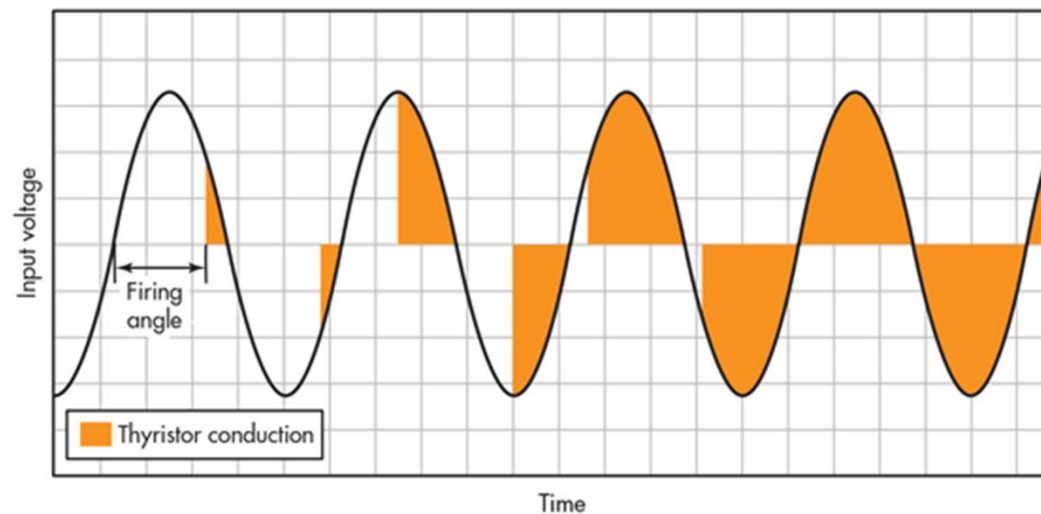


Soft-starter cu reglajul tensiunii pe doua faze ale sistemului de alimentare



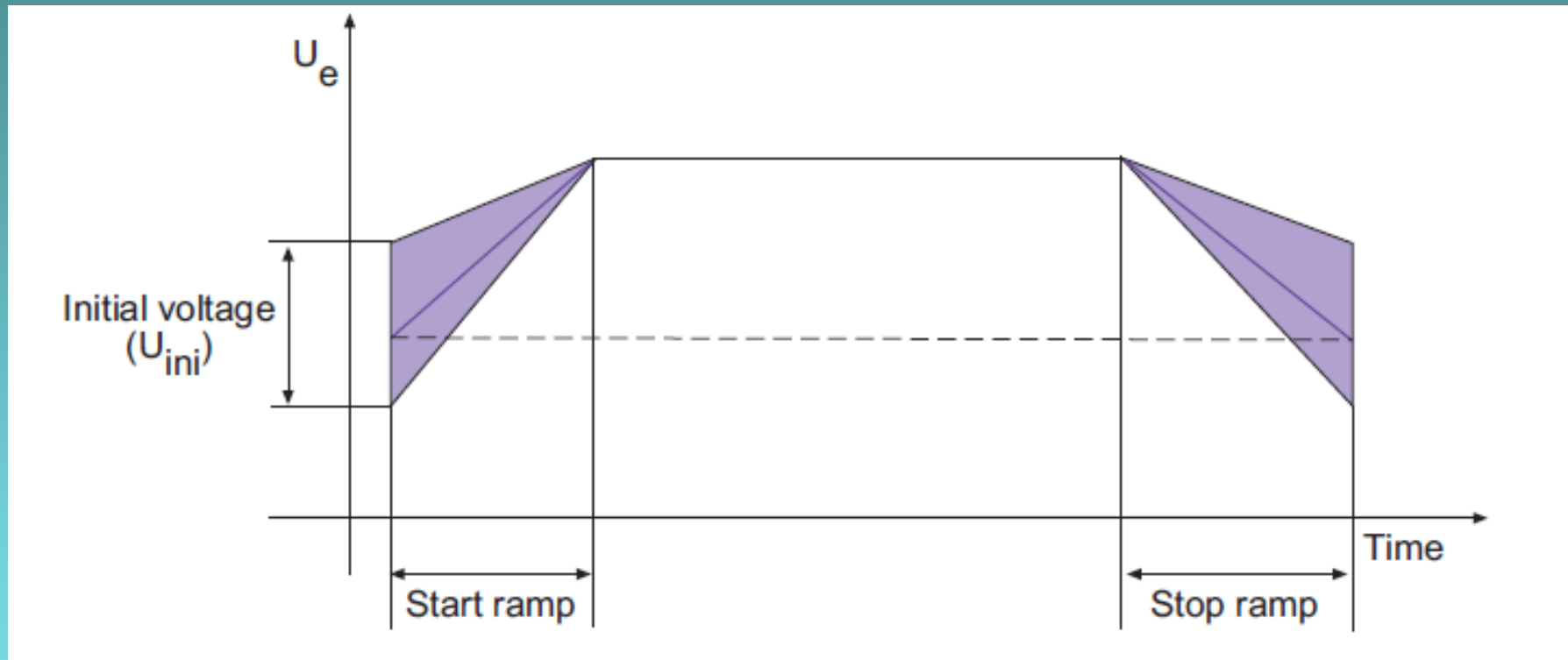
Soft-starter cu reglajul tensiunii pe toate fazele sistemului de alimentare

Secvență de comanda a tiristoarelor soft-starterului



Prin modificarea unghiului de comanda a tiristoarelor se obține modificarea tensiunii de alimentare a motorului

Diagrama de pornire cu soft-starter



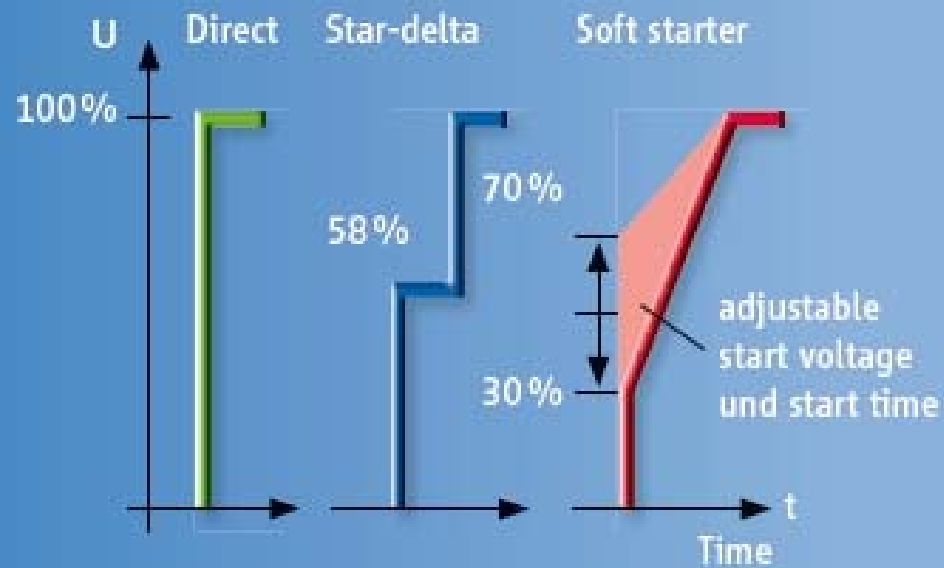
Soft-starterul permite pornire cu tensiune redusă a cărei valoare poate fi ajustată de utilizator în funcție de specificul pornirii. În plus, se poate regla și timpul de pornire.

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.

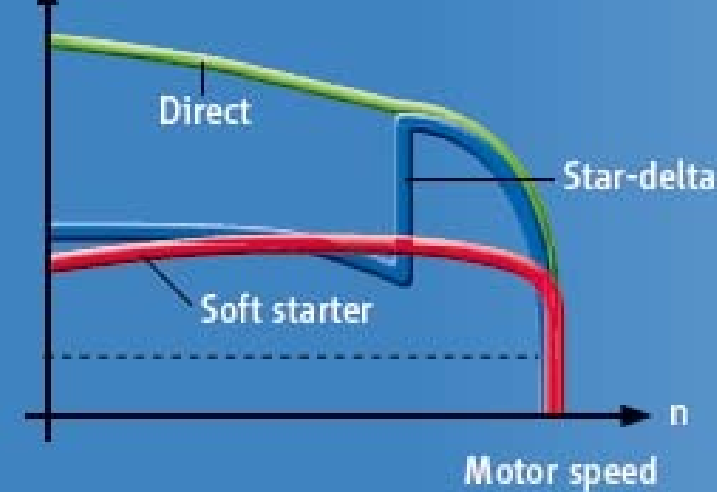
Diagrams of starting

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).

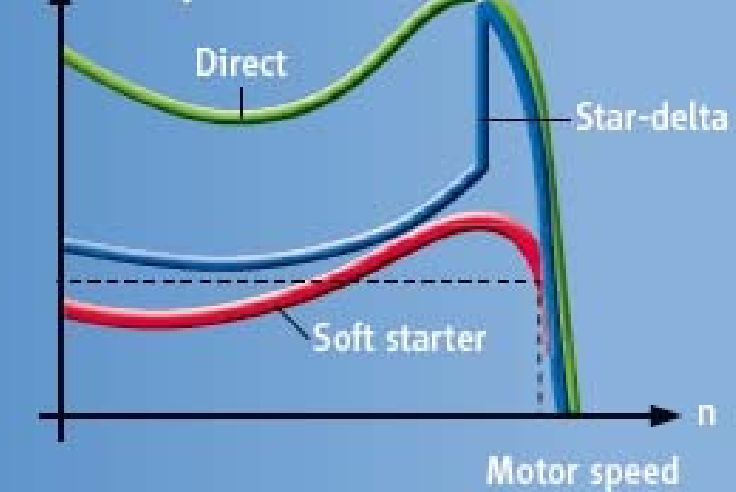
Motor voltage



Motor current



Torque



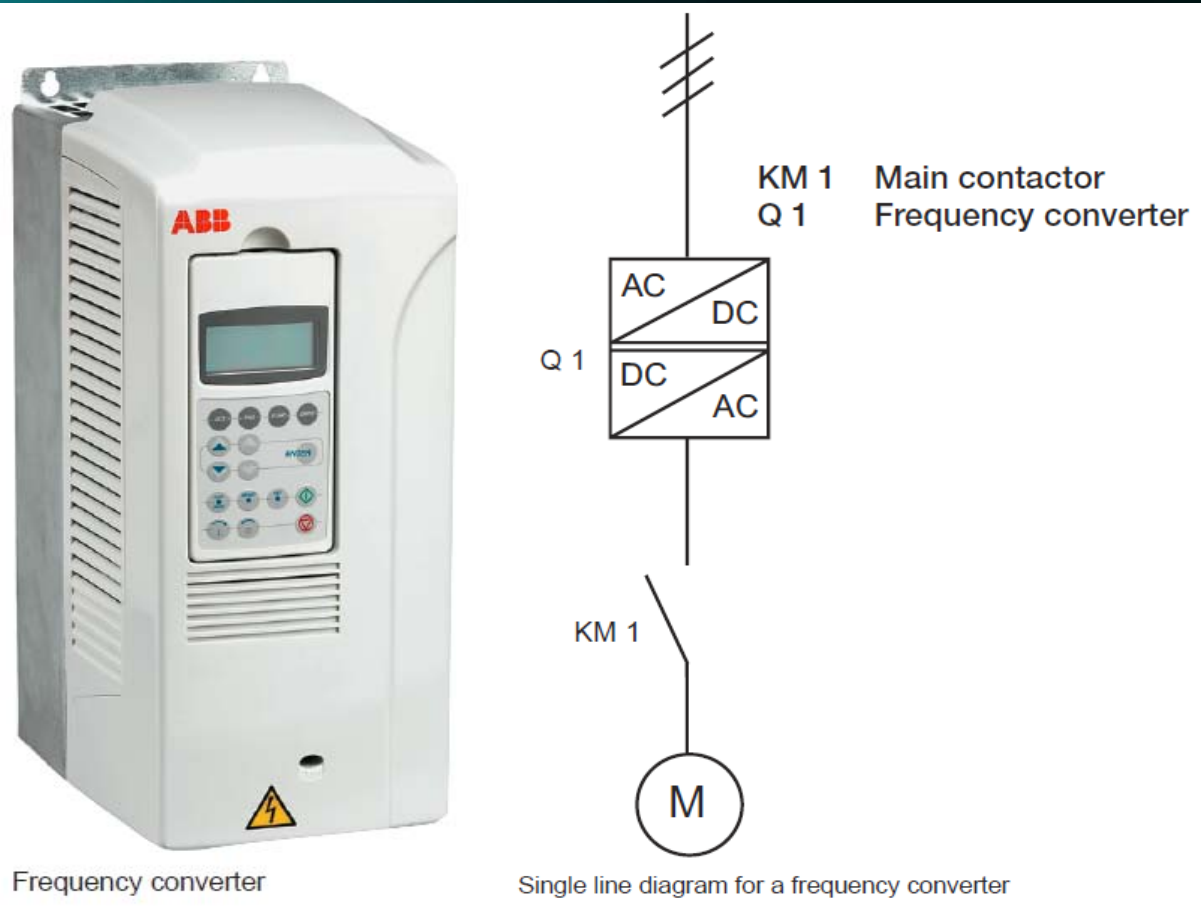


1. Pornire se face cu tensiune redusă *ajustabilă*.
2. Se poate face controlul rampei de pornire. Oprirea poate fi de asemenea controlată.
3. Se poate folosi un singur starter pentru pornirea mai multor motoare.
4. Atenție la reducerea cuplului de pornire.

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 și frecvență* reduse.

Este o metodă ce se folosește doar atunci când este necesar și reglaj de viteză.




Beneficiază de funcția *soft-stop*.

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

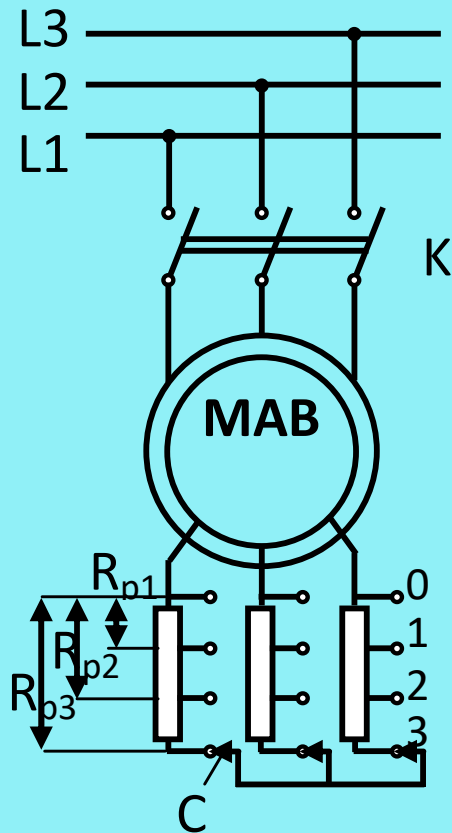
$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2}} \quad M_p = \frac{3U_1^2 \cdot R'_2}{\Omega_1 \left[\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \right]}$$



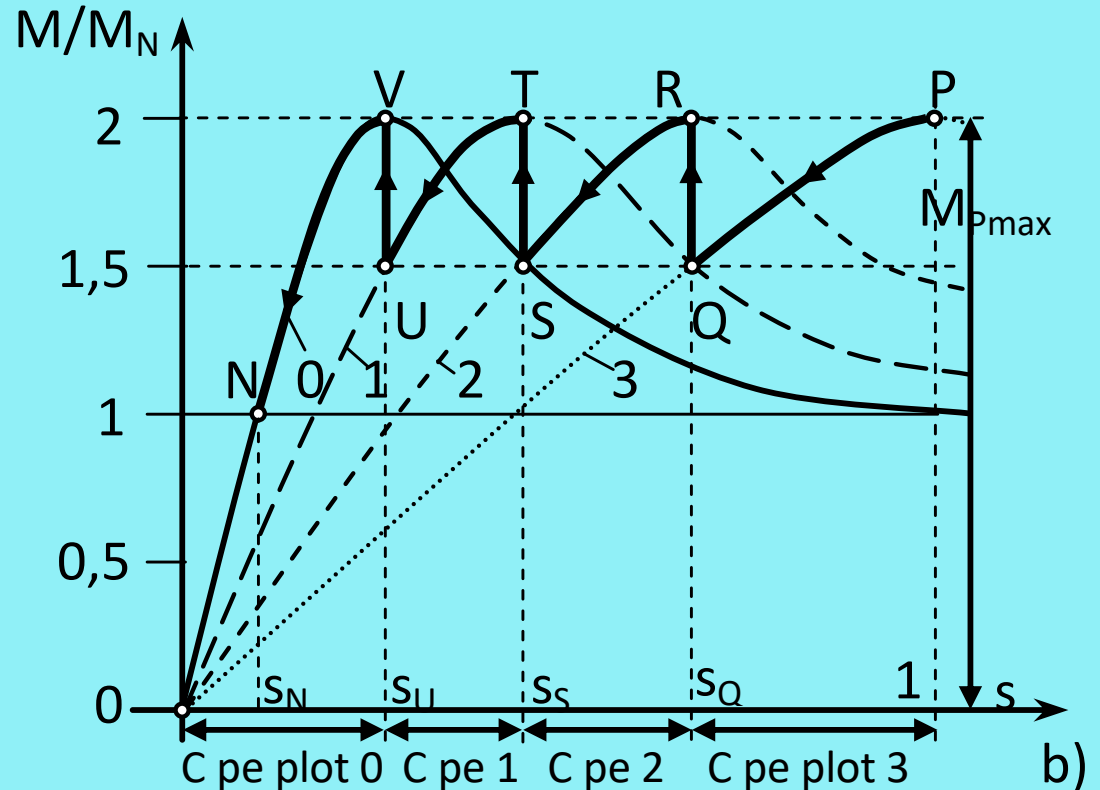
Din expresia curentului rotoric se poate observa că o creștere a rezistenței circuitului, R'_2 , determină scăderea valorii acestuia.



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



a)



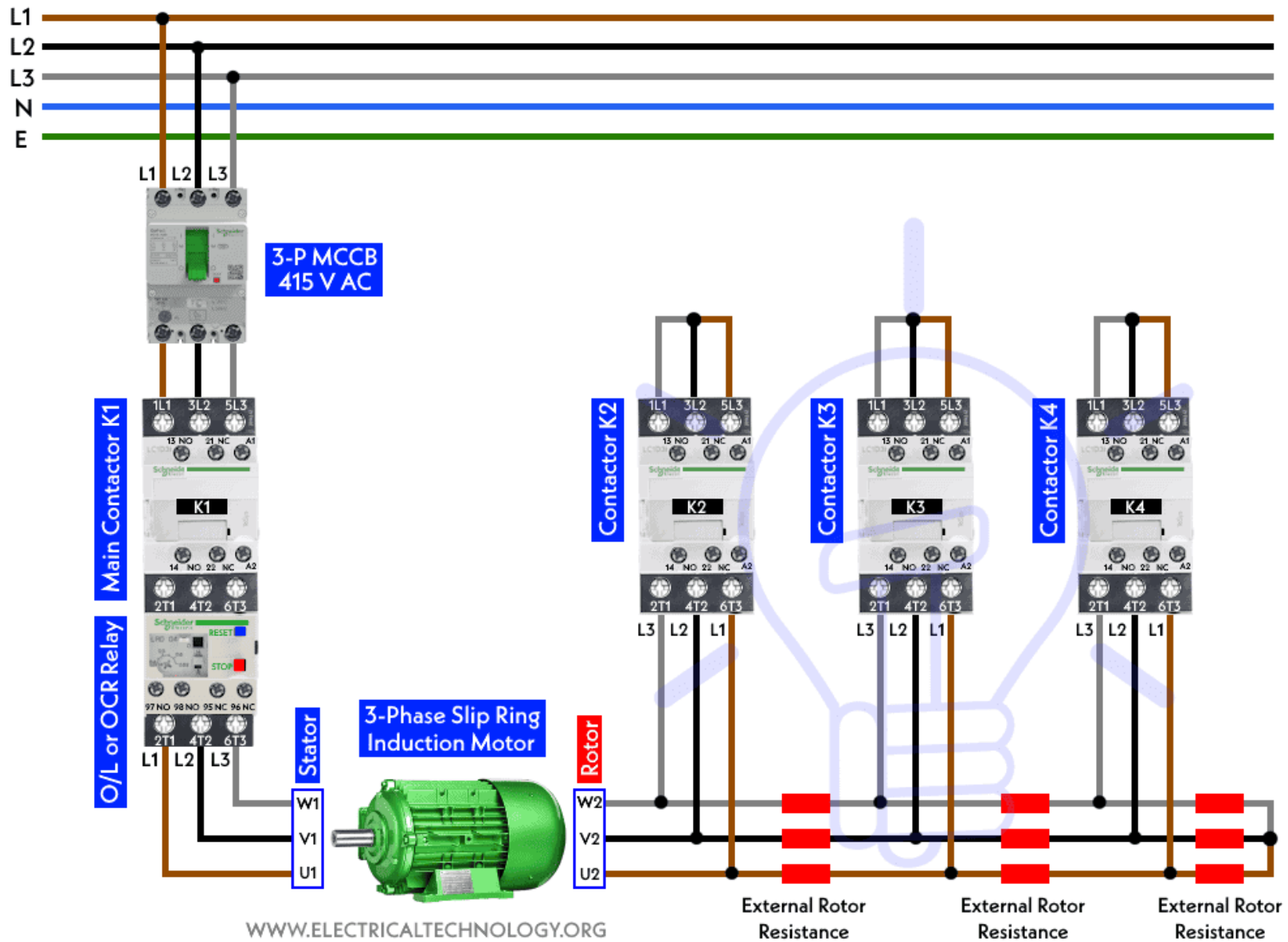
b)

Procedura de pornire implică inserierea 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.

Schematic of Self Start 3-Φ Induction Motor Slip-Ring Wound Rotor Starter



Pornire automata cu rele de temporizare si trei trepte de rezistenta



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

Caracteristici de funcționare

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

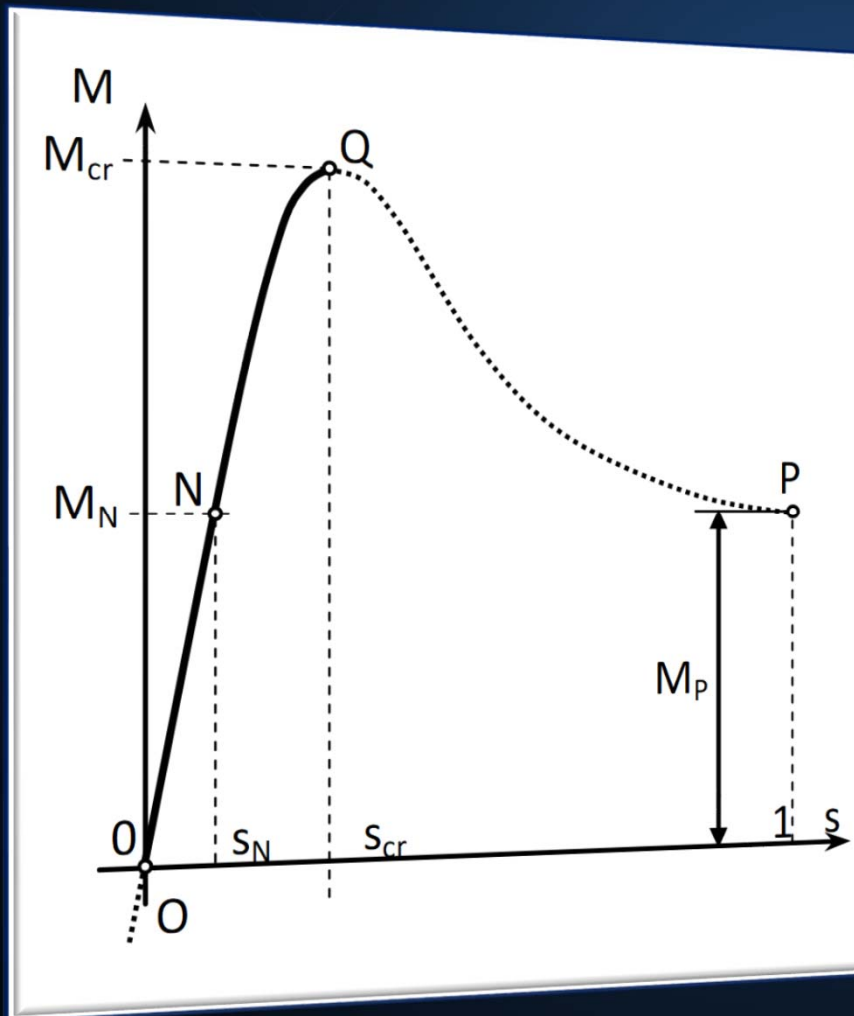
Dacă funcționarea are loc la mărimi nominale (tensiunea și frecvența indicate pe plăcuța indicatoare), atunci caracteristicile obținute se numesc „naturale”.

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



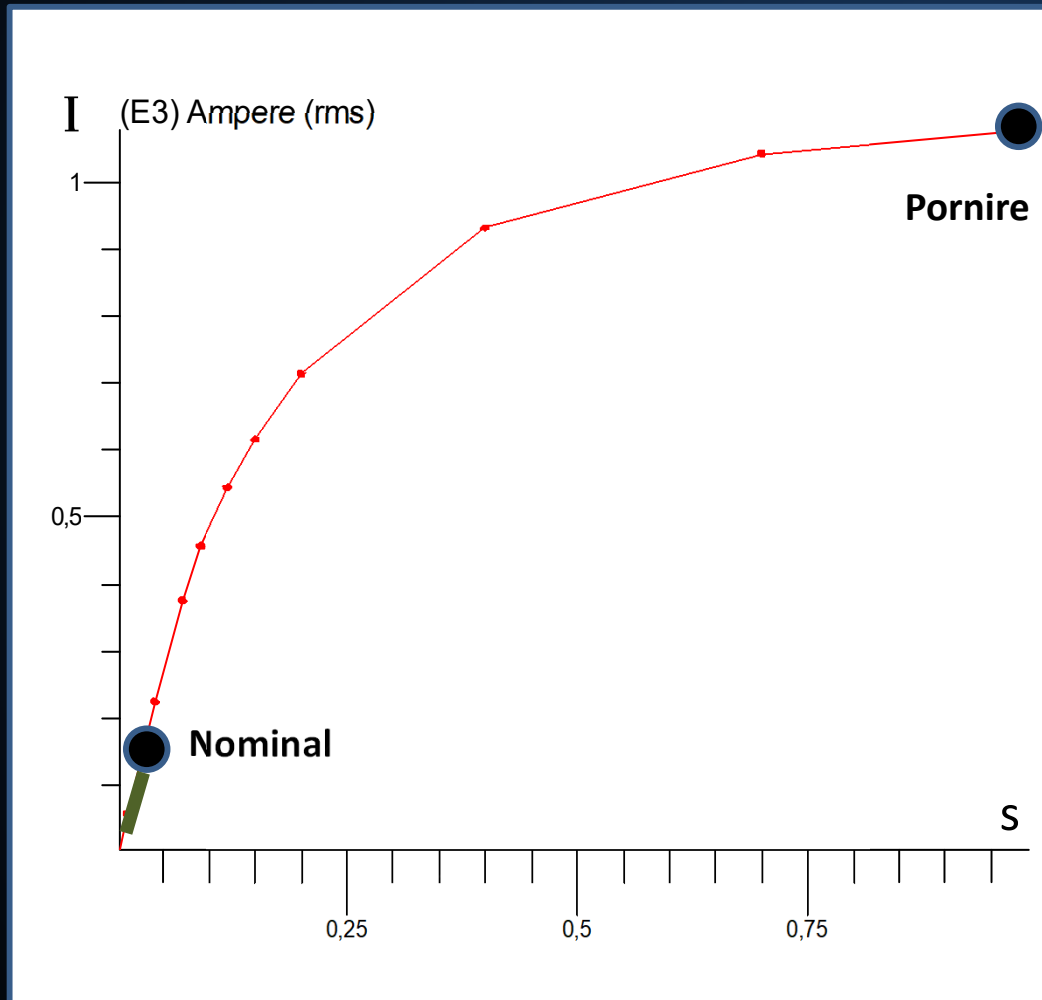
Această caracteristică este specifică mașinii asincrone.

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



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

Funcționarea în sarcină are loc pe zona verde, adică între nominal și gol.

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 verde a caracteristicii. Aceasta reprezintă, în fapt, zona de funcționare uzuală a motorului asincron. În zona roșie, funcționarea este limitată în timp.

Mărimi variabile cu puterea utilă, P_2

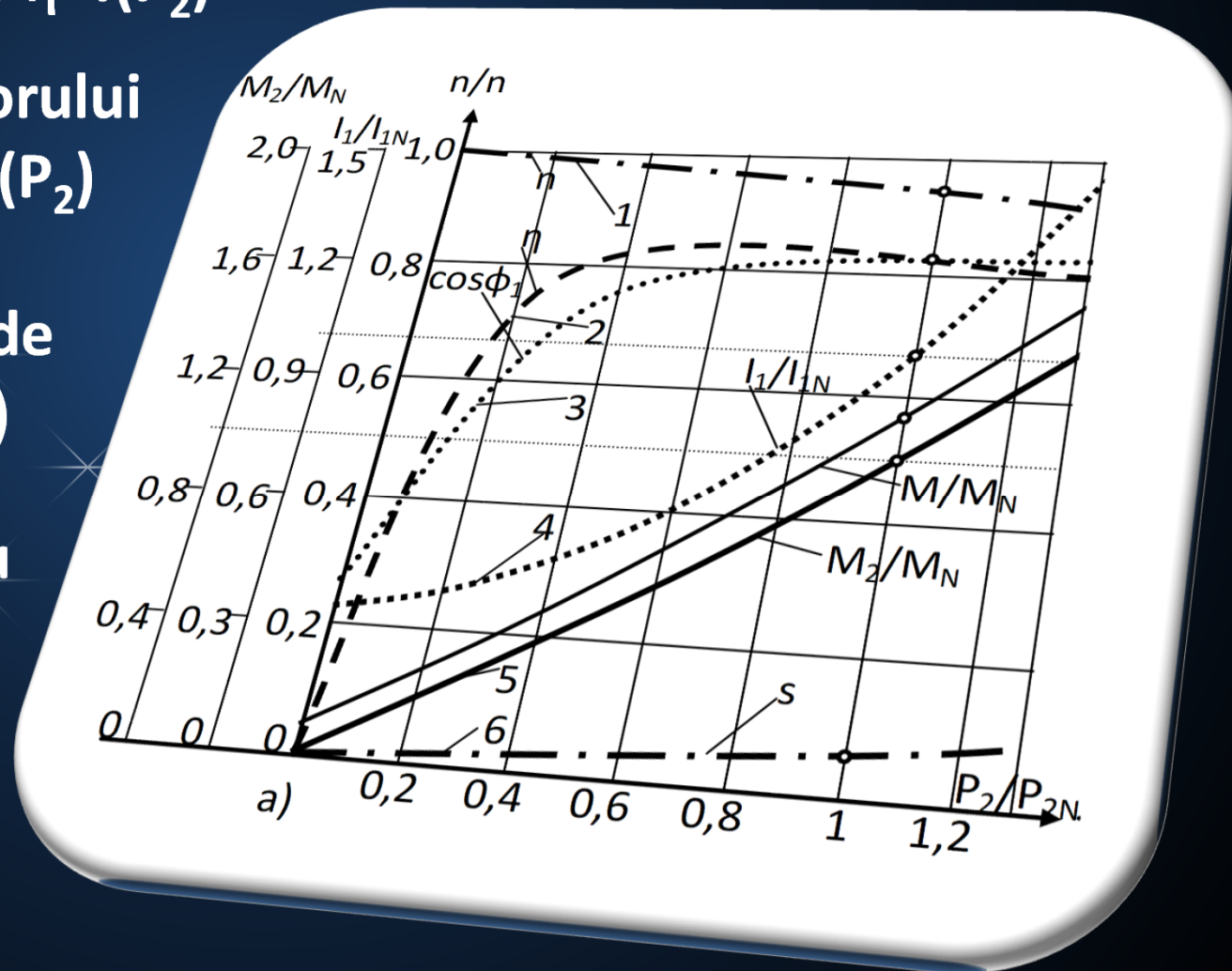
4. Caracteristica de randament(2), $\eta=f(P_2)$

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

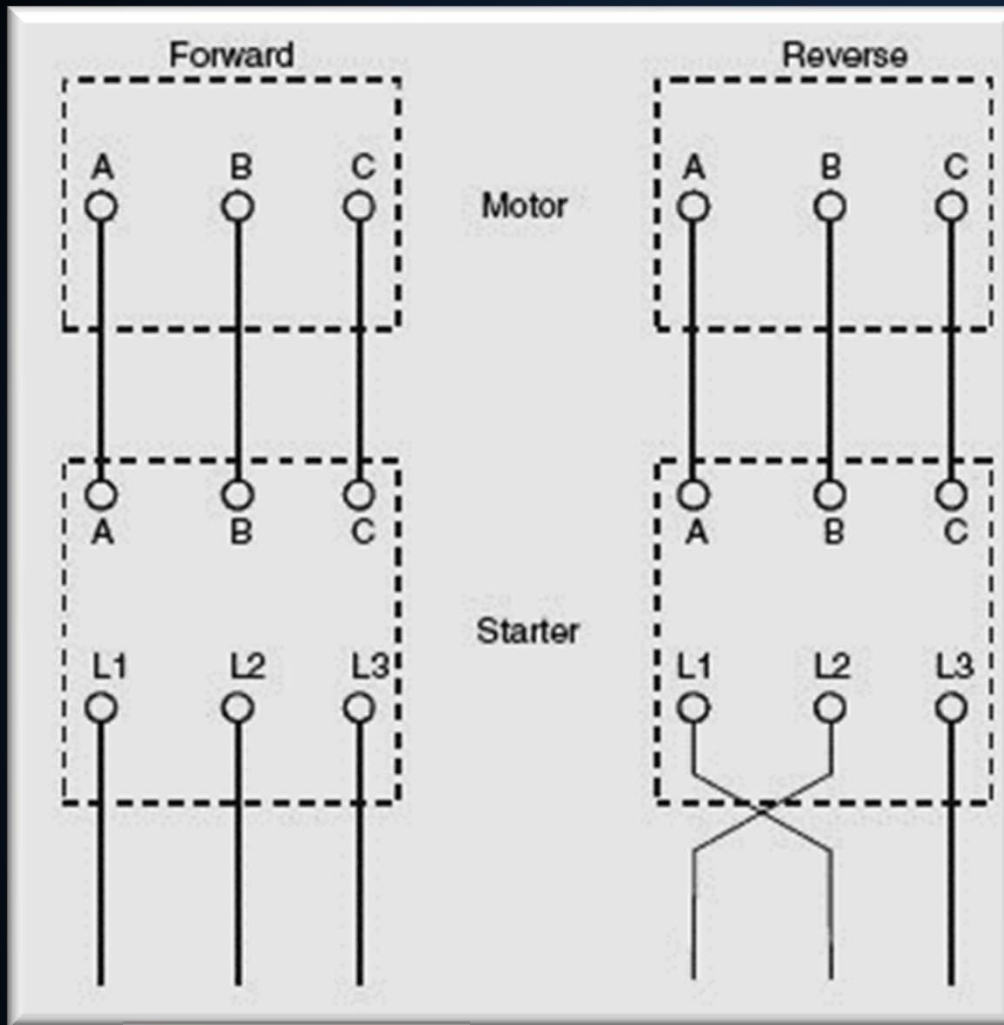
8. Caracteristica de alunecare (6)



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

Evident, atât curentul (prin înfășurarea statorică sau rotorică) cât și 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.

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

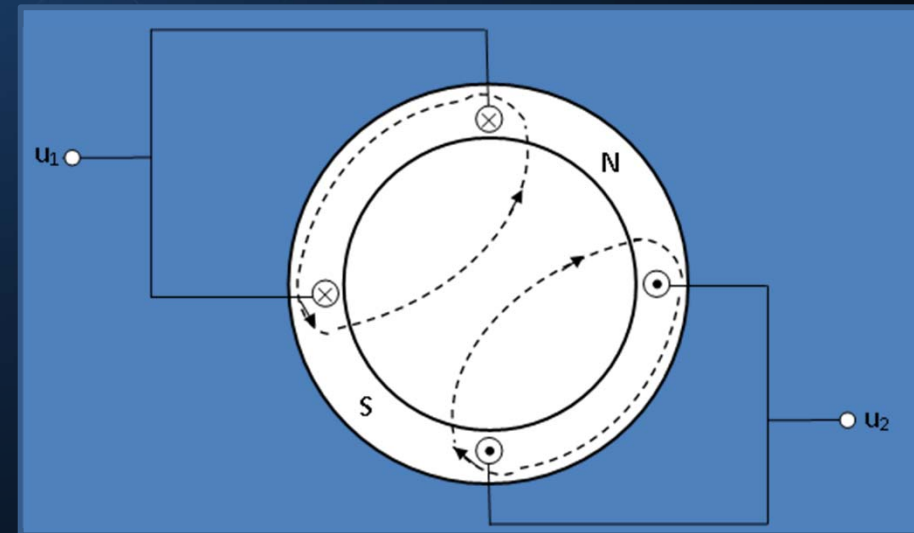
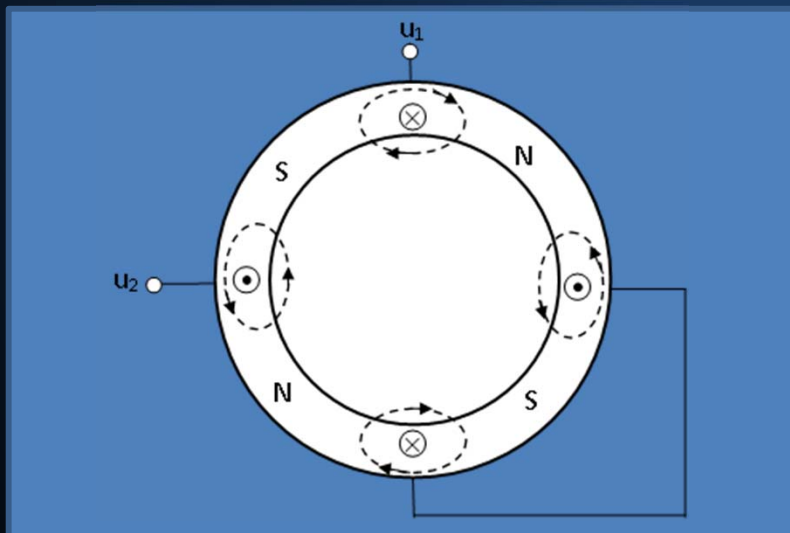
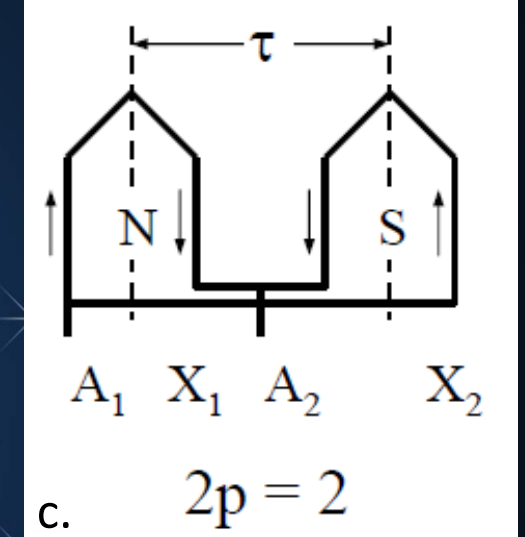
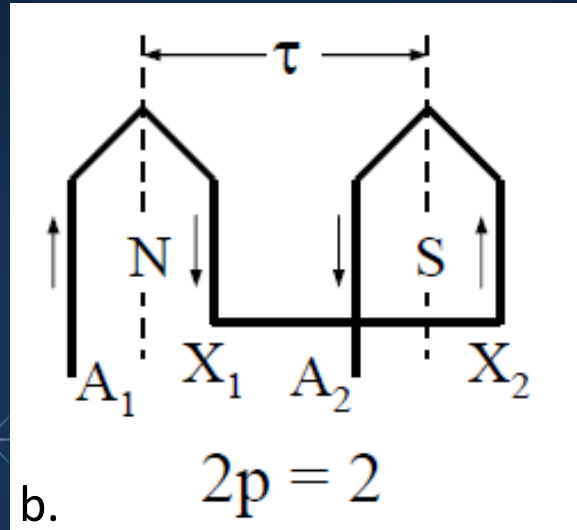
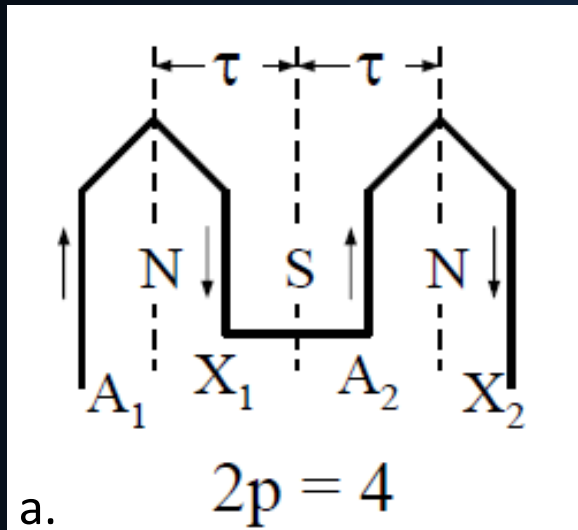


Modificarea numărului de poli ai mașinii



Modificarea alunecării

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.

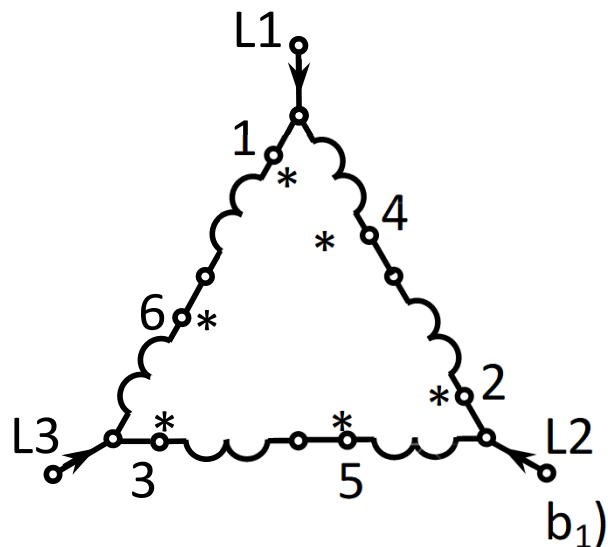
Pentru a putea schimba numărul de poli este necesar ca fiecare înfășurare de fază să conțină un număr par de bobine sau grupe de bobine și să fie posibil accesul la punctul median al acestor înfășurări.



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.

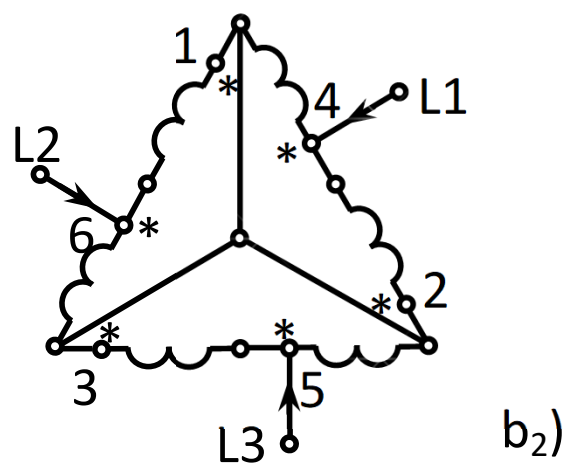
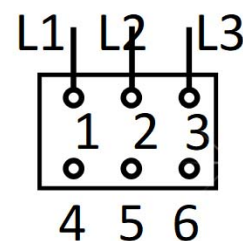
În plus, se poate schimba tipul de conexiune din Y în D sau invers .

Reglarea vitezei prin schimbarea numărului de poli – conexiunea triunghi-dublă stea (Dahlander)



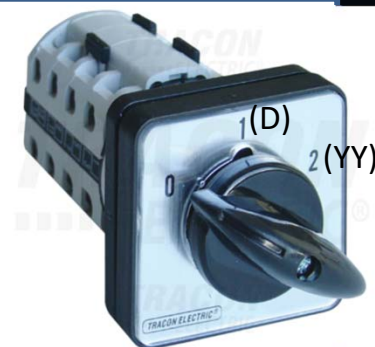
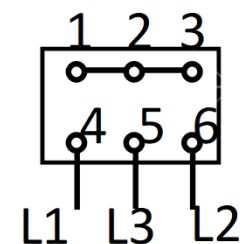
D
(triunghi)
2p
Viteza mica

Conexiuni



YY
(dublă-stea)
p
Viteza mare

Conexiuni



la cuplu constant

Reglarea vitezei prin schimbarea numărului de poli

1. Se aplică NUMAI la motoarele cu rotor în scurtcircuit

2. Constă în schimbarea sensului curentului prin jumătate din fiecare fază

3. Reglarea turației se face ÎN TREPTE

4. Mașinile au DOUĂ sau PATRU turații de funcționare

5. Raportul turațiilor este de regulă $1/2$ dar există soluții și pentru $2/3$ sau $3/4$



Reglarea vitezei prin modificarea frecvenței tensiunii de alimentare

Modificarea frecvenței aduce schimbări MAJORE în valorile parametrilor mașinii asincrone

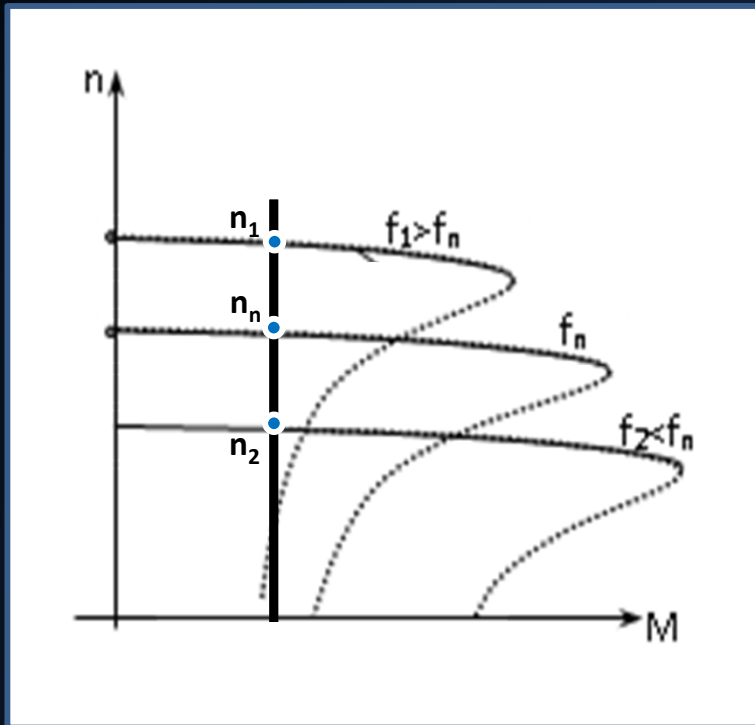
$$\left. \begin{aligned} \underline{E}_1 &= -j\omega_1 \cdot k_{w1} \cdot w_1 \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \\ \underline{U}_1 &= R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \end{aligned} \right\} \longrightarrow \Psi \approx \frac{U_1}{\omega_1} \rightarrow \frac{U_1}{f_1}$$

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

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



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

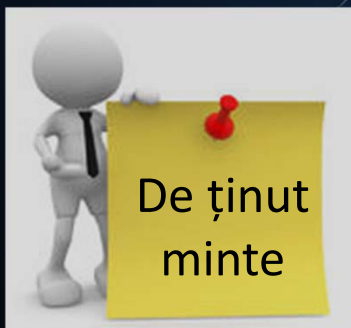


I. La scăderea frecvenței:

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

II. La creșterea frecvenței:

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



Ca metodă de reglare a vitezei, modificarea frecvenței tensiunii de alimentare permite un reglaj larg de viteză (vezi punctele de funcționare n_1 , n_n și n_2) atât *sub* valoarea nominală cât și *peste* valoarea nominală.

Reglarea vitezei prin modificarea tensiunii de alimentare

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

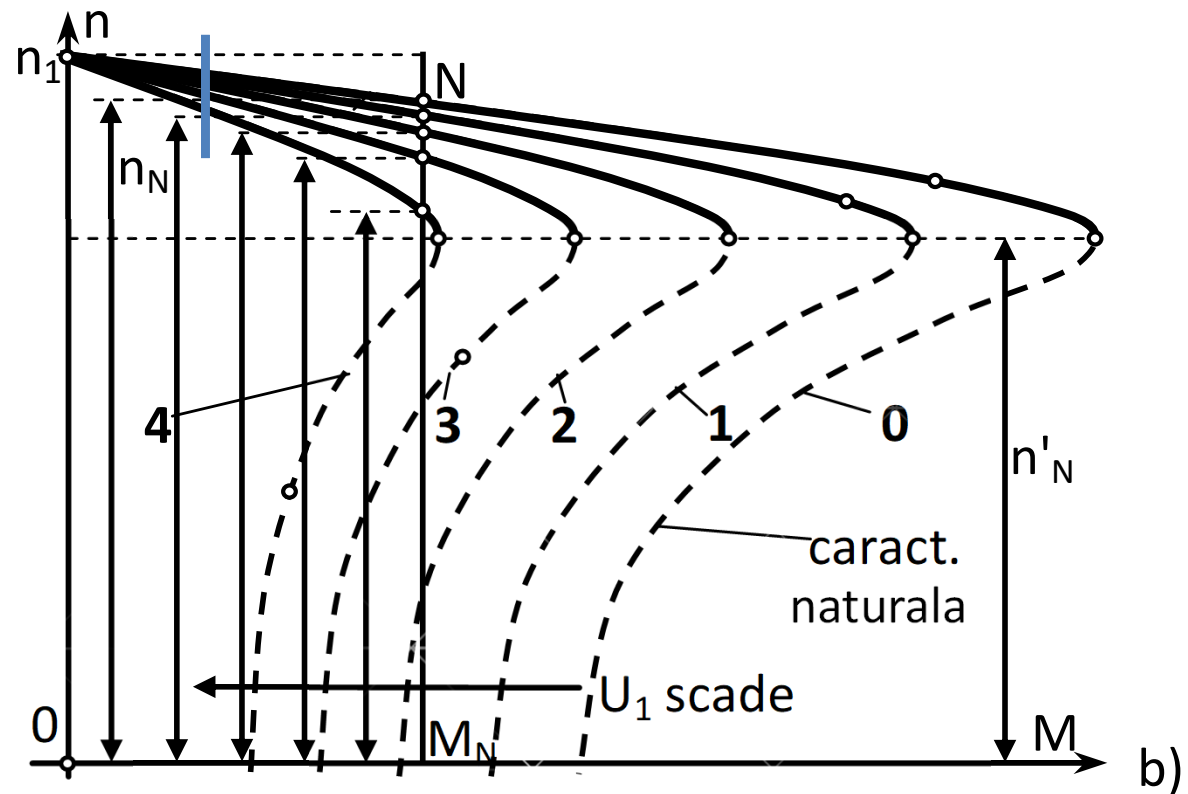
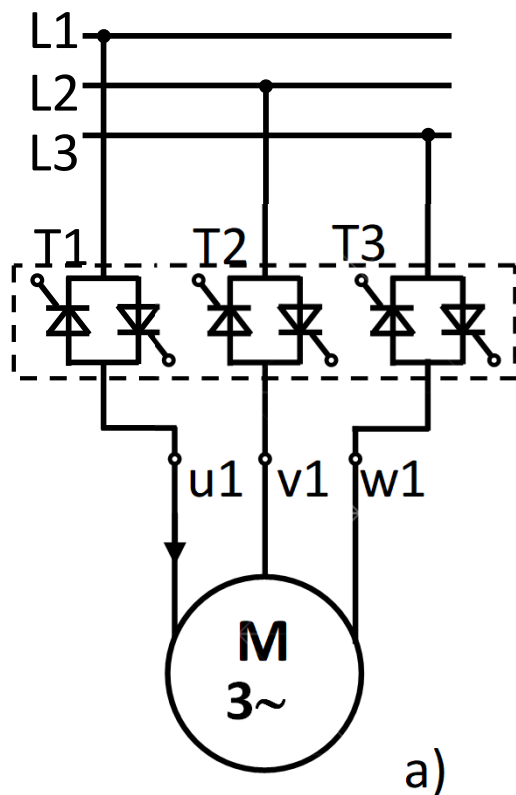
$$M_e = \frac{3U_1^2 \cdot p}{2\pi f_1} \cdot \frac{\frac{R'_2}{s}}{\left[\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \right]} \quad \text{Se modifică}$$

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

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

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

Reglarea vitezei prin modificarea tensiunii de alimentare



- a) Schemă de alimentare cu tensiune variabilă (variație electronică a tensiunii);
b) caracteristici mecanice pentru diverse tensiuni de alimentare.

Modificarea tensiunii de alimentare se poate face numai descrescător față de valoarea nominală.

Se obțin caracteristici artificiale (1-4) la care se modifică atât valoarea cuplului maxim cât și a cuplului de pornire.

Este necesar un aparat scump (de regulă variator de tensiune alternativă cu semiconductoare) care, prin performanțele obținute, nu își justifică utilizarea.

Reglarea vitezei prin modificarea tensiunii de alimentare

1. Metoda ineficientă - Reglaj de turație în limite mici și numai pentru valori sub viteza nominală

2. Scade capacitatea de suprasarcină a motorului

3. La sarcini mici reglajul de viteză este aproape insesizabil

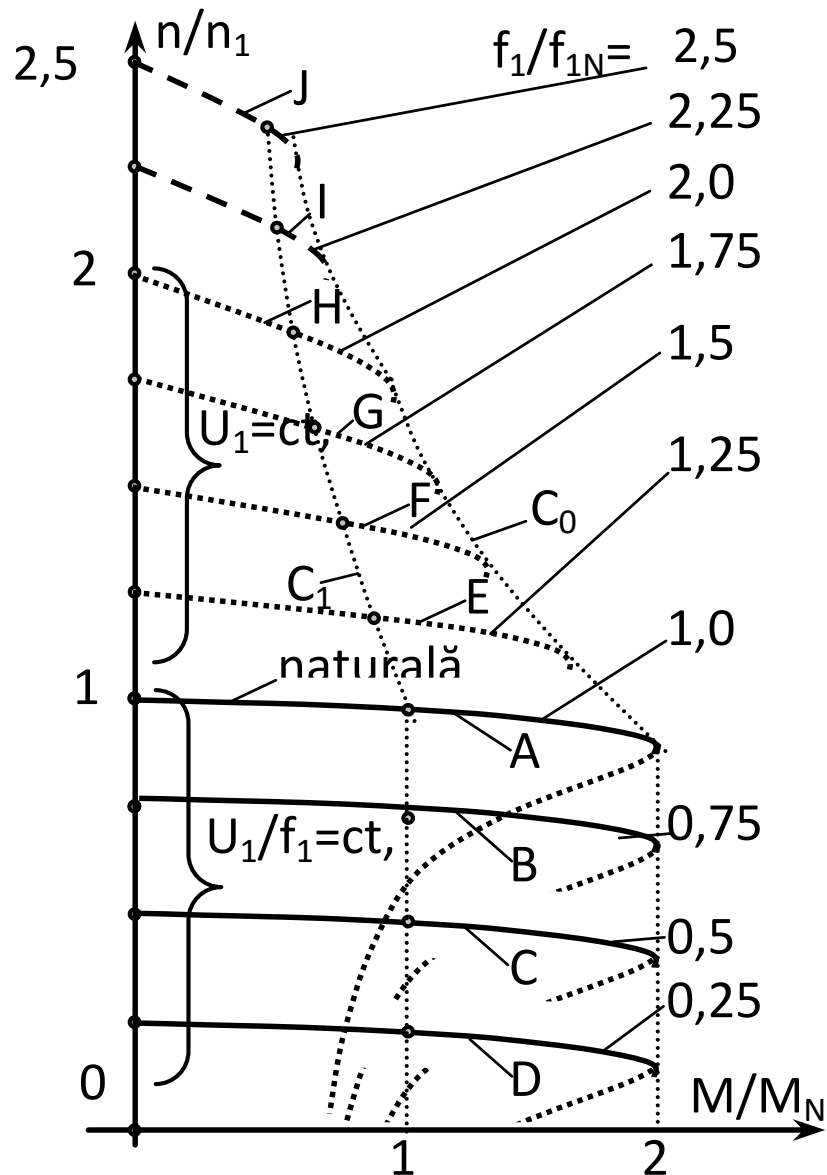


Reglarea vitezei prin modificarea frecvenței și tensiunii de alimentare



Este necesară folosirea unui convertor de frecvență care modifică simultan valoarea tensiunii de alimentare a motorului și frecvența acestei tensiuni. Raportul celor două mărimi rămâne constant.

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



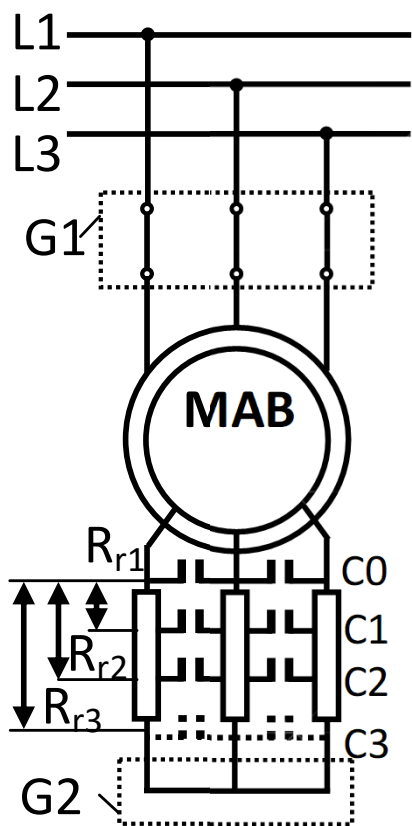
Este metoda cea mai eficientă și cea mai folosită pentru reglarea vitezei motoarelor de c.a.

Reglarea vitezei prin variația rezistenței circuitului rotoric

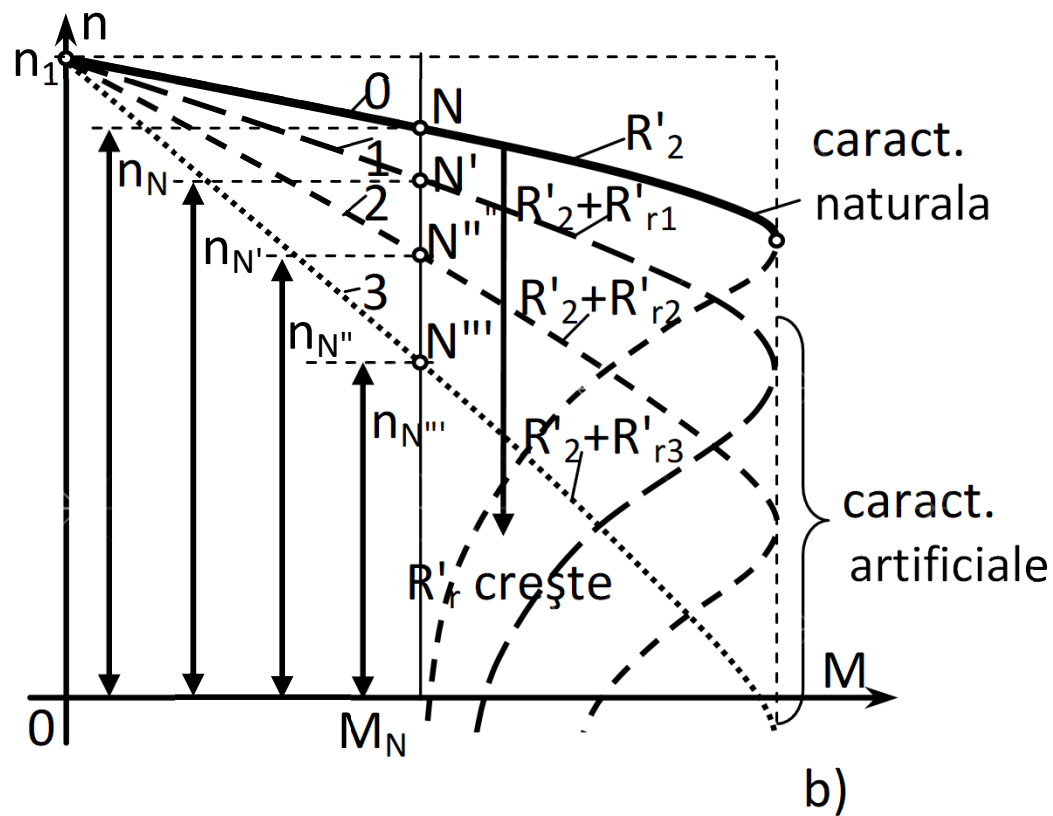
1. Se aplică NUMAI la motoarele cu rotor bobinat
2. Rezistența introdusă în circuitul rotoric este voluminoasă pentru că trebuie dimensionată pentru funcționare de durată



Reglarea vitezei prin variația rezistenței circuitului rotoric



a)



b)

- a) Schemă electrică cu introducerea unei rezistențe cu ploturi în circuitul rotoric;
 b) caracteristici mecanice pentru diverse valori ale rezistenței rotorice.

Reglarea vitezei prin variația rezistenței circuitului rotoric

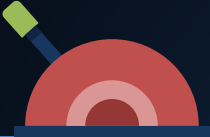
Pentru modificarea vitezei se aduce reostatul R_r pe una dintre pozițiile C1, C2 sau C3 cărora le corespunde o anumită valoare de rezistență. Punctul de funcționare trece de pe caracteristica naturală (notată cu 0) pe una dintre caracteristicile artificiale, ducând la scăderea vitezei (punctele de funcționare de pe caracteristicile 1, 2 sau 3).

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 ($M_{\max} = \text{ct.}$) însă alunecarea critică se modifică
4. Este o metodă cu pierderi importante pe rezistența rotorică ce duce la scăderea pronunțată a randamentului



Cuvinte cheie



Caracteristica
mecanica
 $n = f(M)$



Caracteristica
cuplu-alunecare
 $M = f(s)$



Reglarea vitezei
 p_e
caracteristici
artificiale



Schimbarea
numărului de
poli



Modificarea U/f



Rezistență in
circuitul rotoric



MOTORUL MONOFAZAT

CUPRINS



Motorul asincron monofazat – particularități

1

Motorul monofazat cu faza auxiliara

2

Motorul monofazat cu condensator de pornire

3

Motorul monofazat cu faza auxiliara permanenta

4

Motorul monofazat cu doua condensatoare

5

Motorul monofazat cu spira in scurt-circuit

6

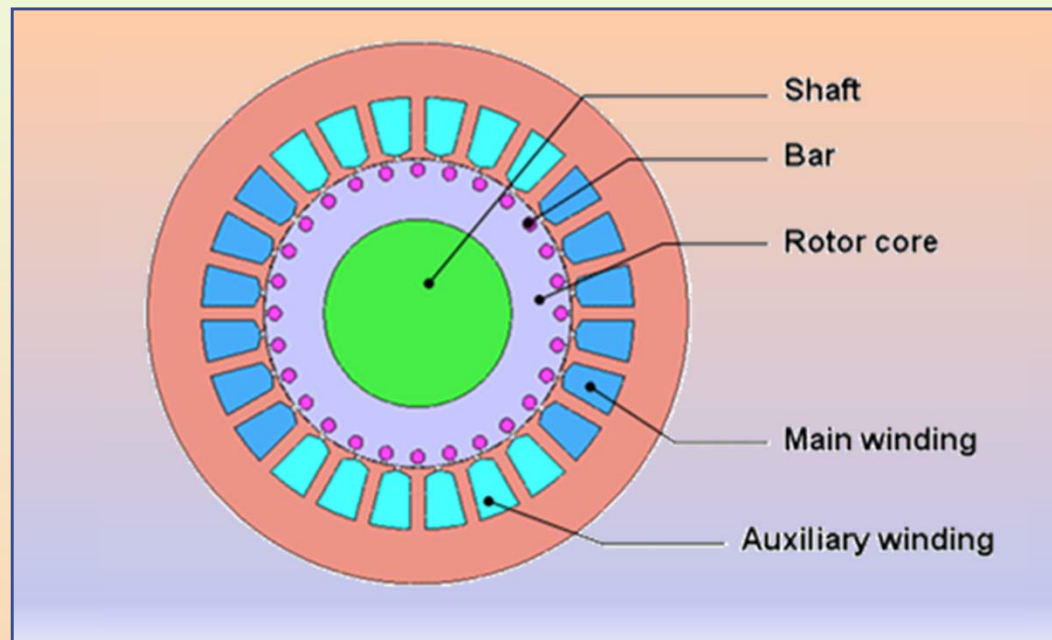
Inversarea sensului de rotație la motorul monofazat

7

1
2
3
4
5
6
7

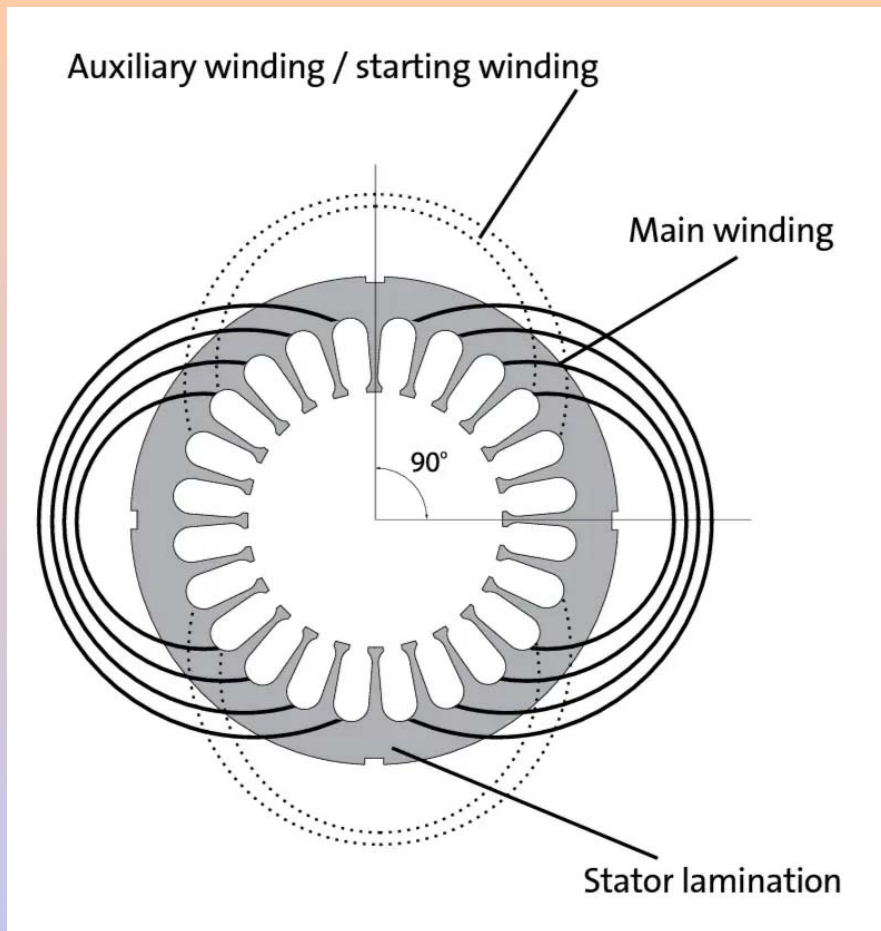


Motorul asincron monofazat este motorul de inducție a cărui alimentare se face de la o sursă de tensiune monofazată.

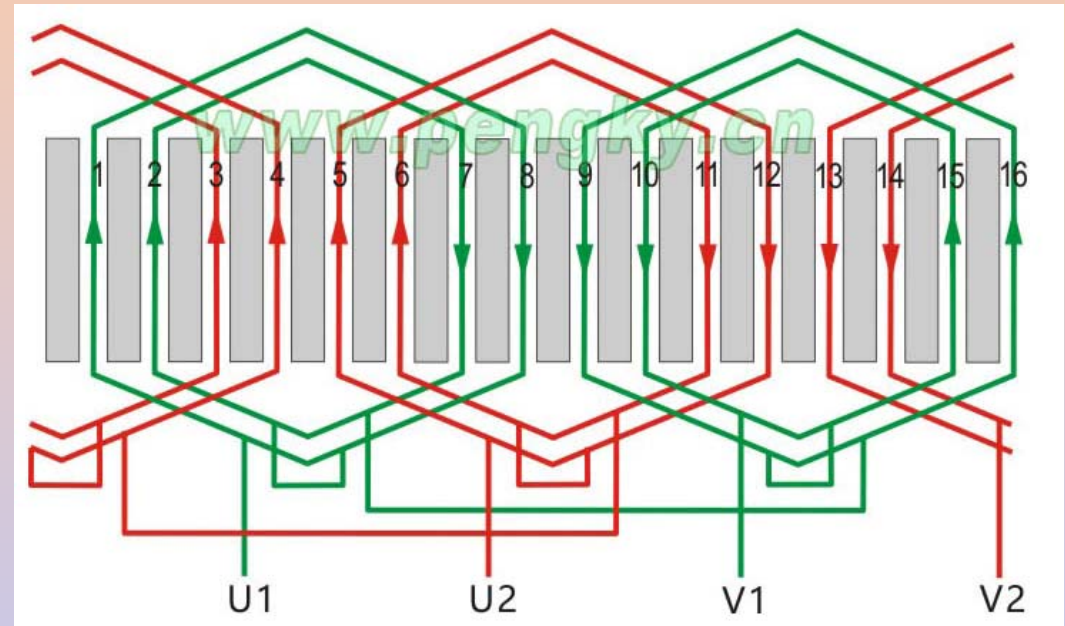


Din punct de vedere constructiv, motorul monofazat are aceleași elemente ca și motorul trifazat: stator cu creștături uniform distribuite, rotor cu înfășurare în scurt-circuit (variantea cu rotor bobinat nu există la motorul monofazat).

Singurul element diferit este înfășurarea statorică.



a.



b.

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

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



Defazajul spațial dintre cele două înfășurări este de 90° electrice.

Obs. Există variante constructive la care cele două înfășurări sunt identice și ocupă același număr de creștături (fig. b).

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

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

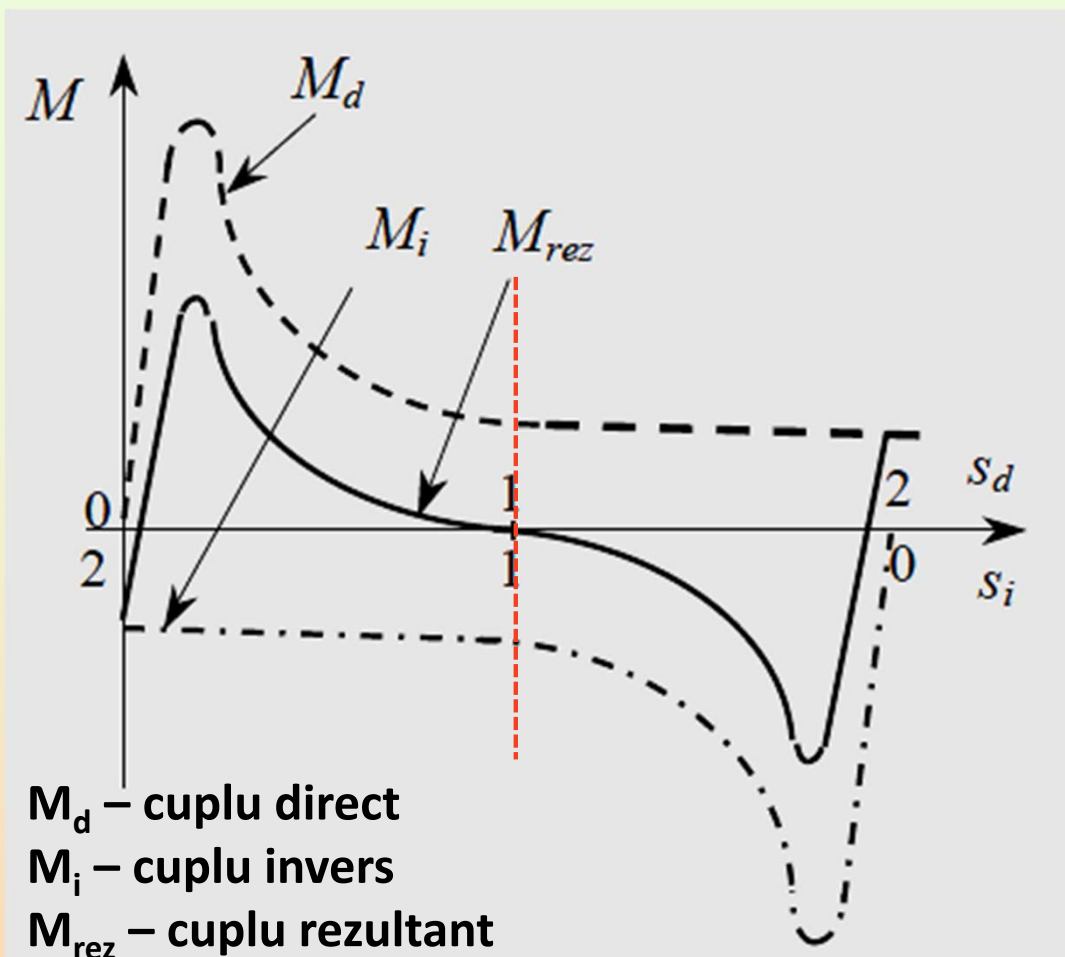
Dacă se aplică teorema lui Leblanc:

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

câmp învârtitor direct

câmp învârtitor invers

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



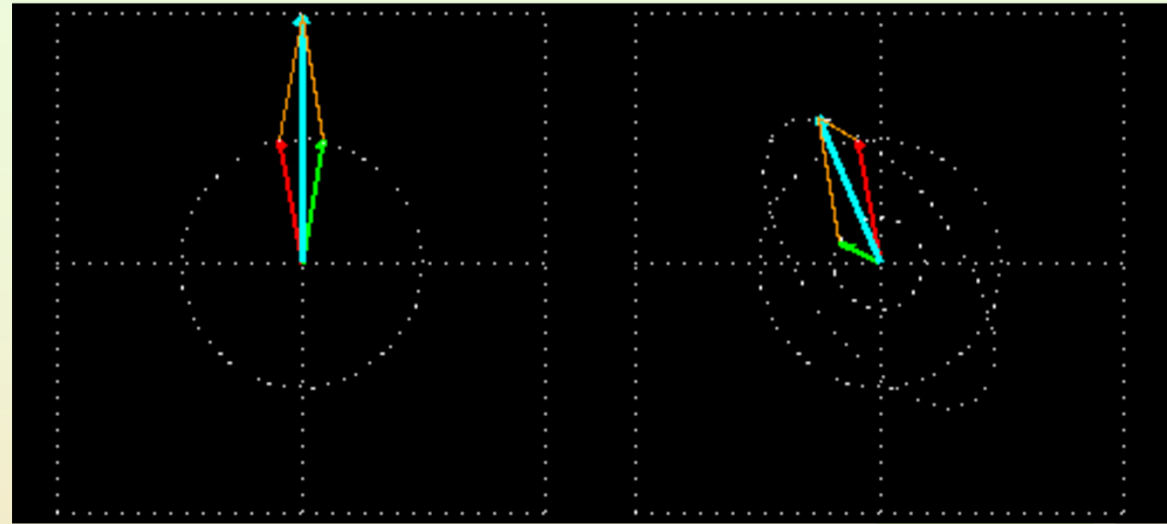
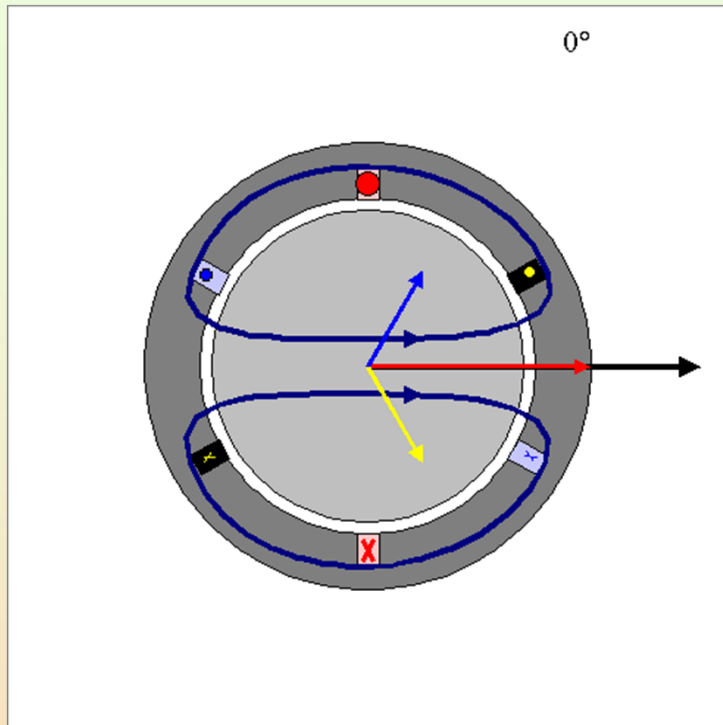
Cele două cupluri (reprezentate de curbele punctate) se compun dând naștere cuplului rezultat, M_{rez} .

Cuplul rezultat este nul pentru $s=1$



Motorul monofazat (cu o singură fază) NU are cuplu de pornire.

Câmp magnetic învârtitor circular



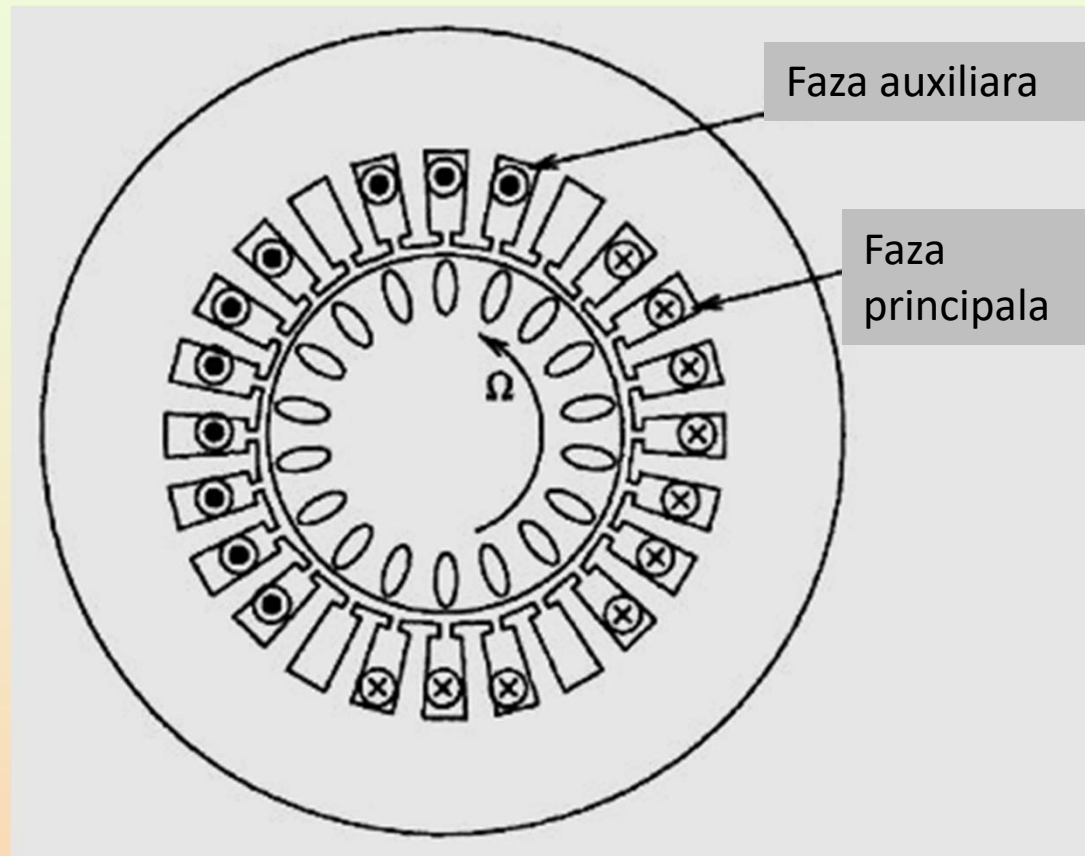
Câmp magnetic alternativ

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° electrice și sunt parcurse de curenți defazați, de asemenea, la 120° .

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 fază auxiliară



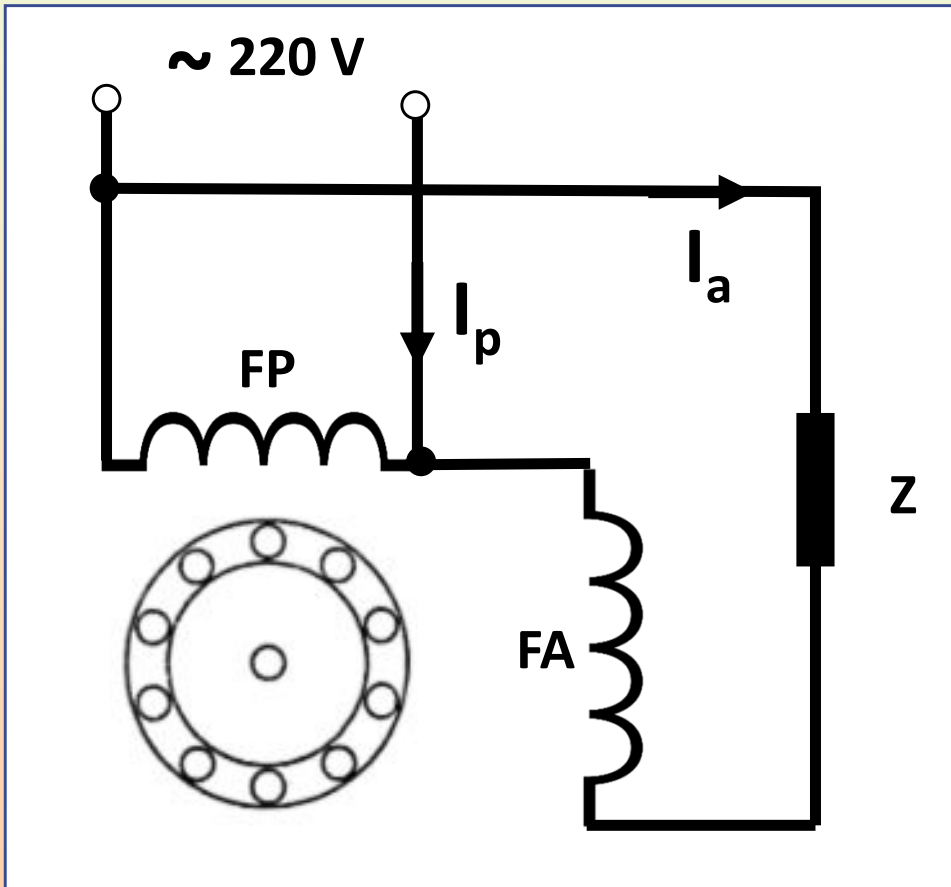
Se adaugă o fază auxiliară pentru a transforma mașina monofazată într-una bifazată (polifazată) capabilă să producă un câmp învârtitor și deci un cuplu de pornire.



Cele două 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° electrice)

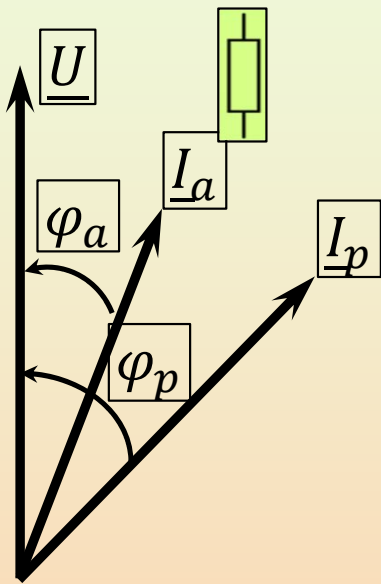


Pentru obținerea defazării curentului prin faza auxiliară față de cel din faza principală, se introduce în circuitul fazei auxiliare o impedanță Z.

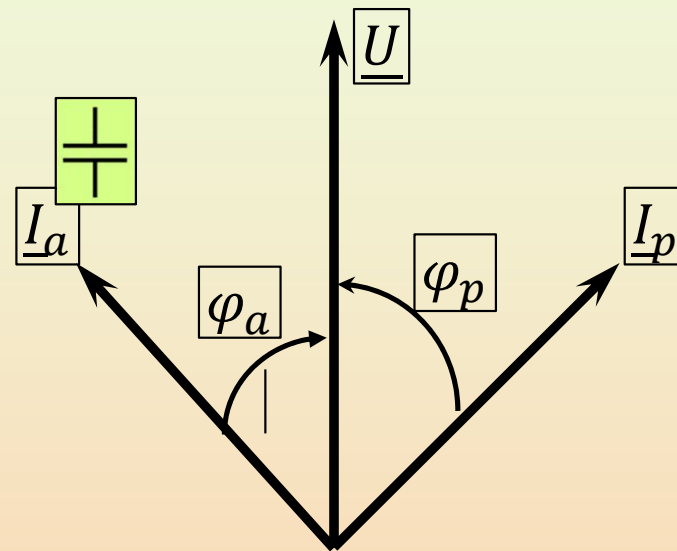
Această impedanță defazoare poate fi constituită din:

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

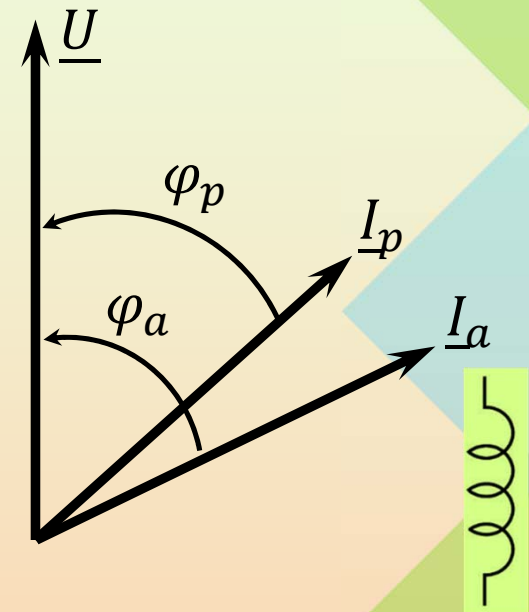
Diagrame fazoriale



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 în circuitul fazei auxiliare face ca defazajul dintre tensiunea de alimentare, U și curentul I_a să fie mai mic decât defazajul dintre U și curentul prin faza principală, I_p . În acest fel apare un defazaj între curenții prin cele două faze. Deși este, ca valoare, departe de unghiul ideal de 90° , rezultă totuși un câmp eliptic și deci un cuplu de pornire.

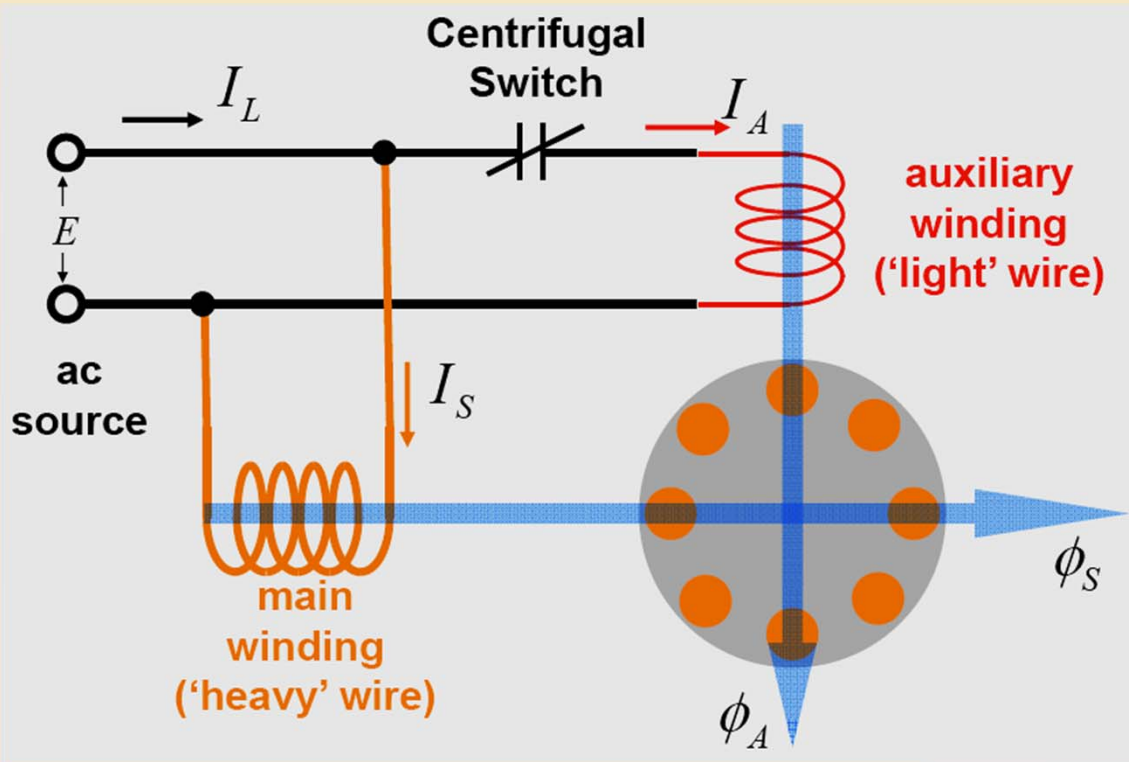
b) Condensatorul introdus ca element defazor în circuitul fazei auxiliare determină un defazaj negativ între tensiunea de alimentare, U și curentul I_a (curentul este în avans față de tensiune). Drept urmare, defazajul dintre I_a și I_p poate atinge chiar 90° . Este situația cea mai favorabilă.

c) Prezența bobinei ca element defazor în circuitul fazei auxiliare determină un defazaj mai mare a curentului I_a față de tensiunea de alimentare, U . Din nou rezultă un mic defazaj între curenții I_a și 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° .

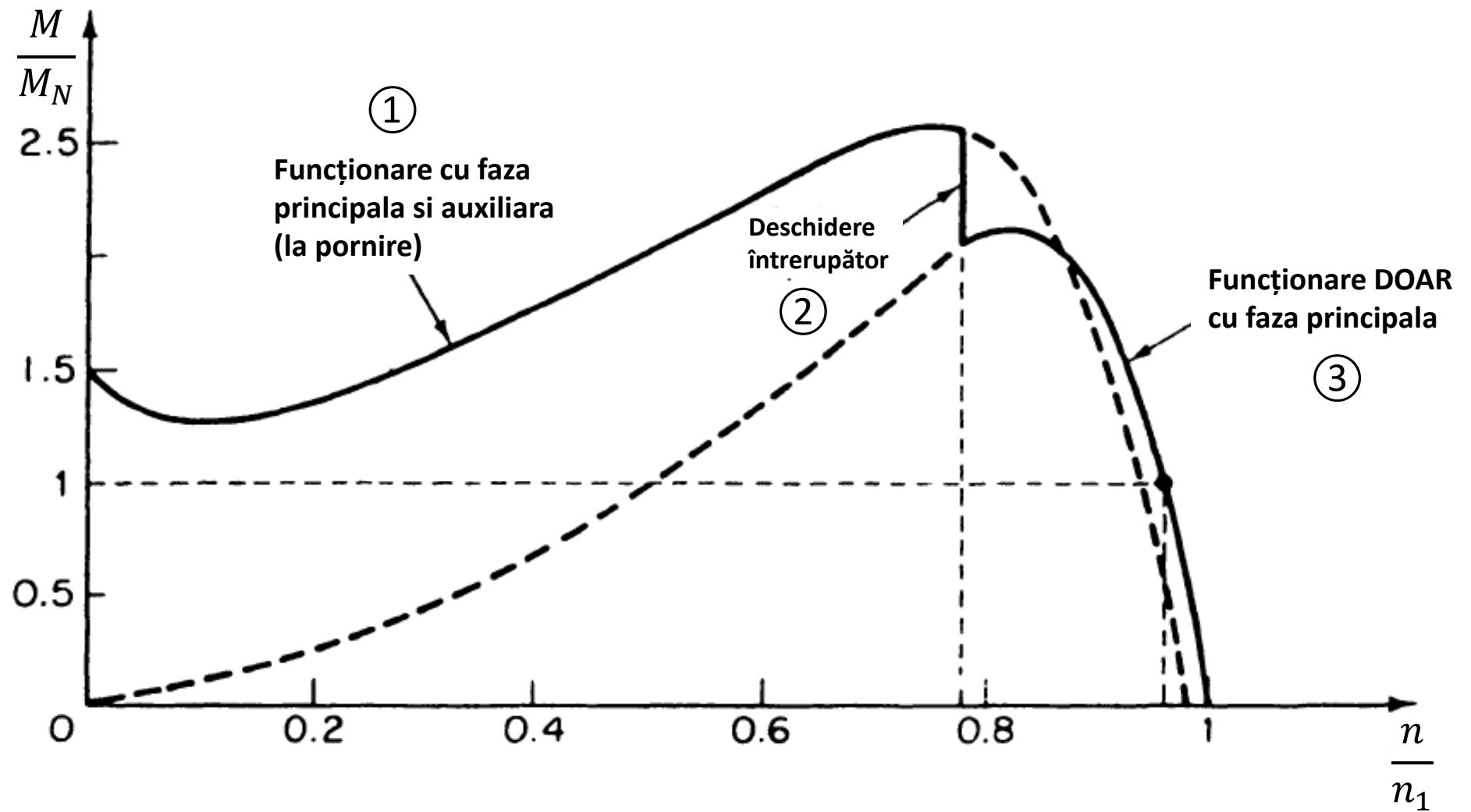
➤ Faza auxiliară este folosită NUMAI la pornire după care este scoasă din circuit de către întrerupătorul centrifugal

➤ Cuplu mediu de pornire

➤ Curent mare de pornire în înfășurarea auxiliară

➤ Configurația este favorabilă pentru motoare de până la 250 W

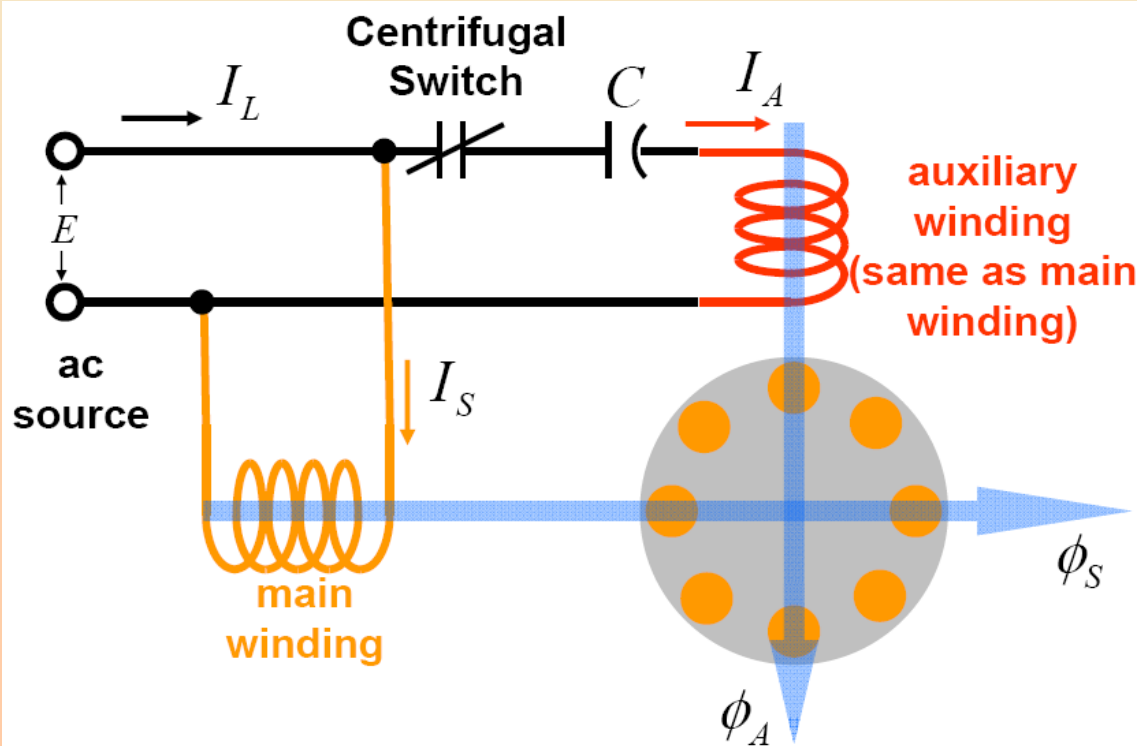
Caracteristica $M=f(s)$ pentru motorul cu fază auxiliară



II. Motor cu condensator de pornire

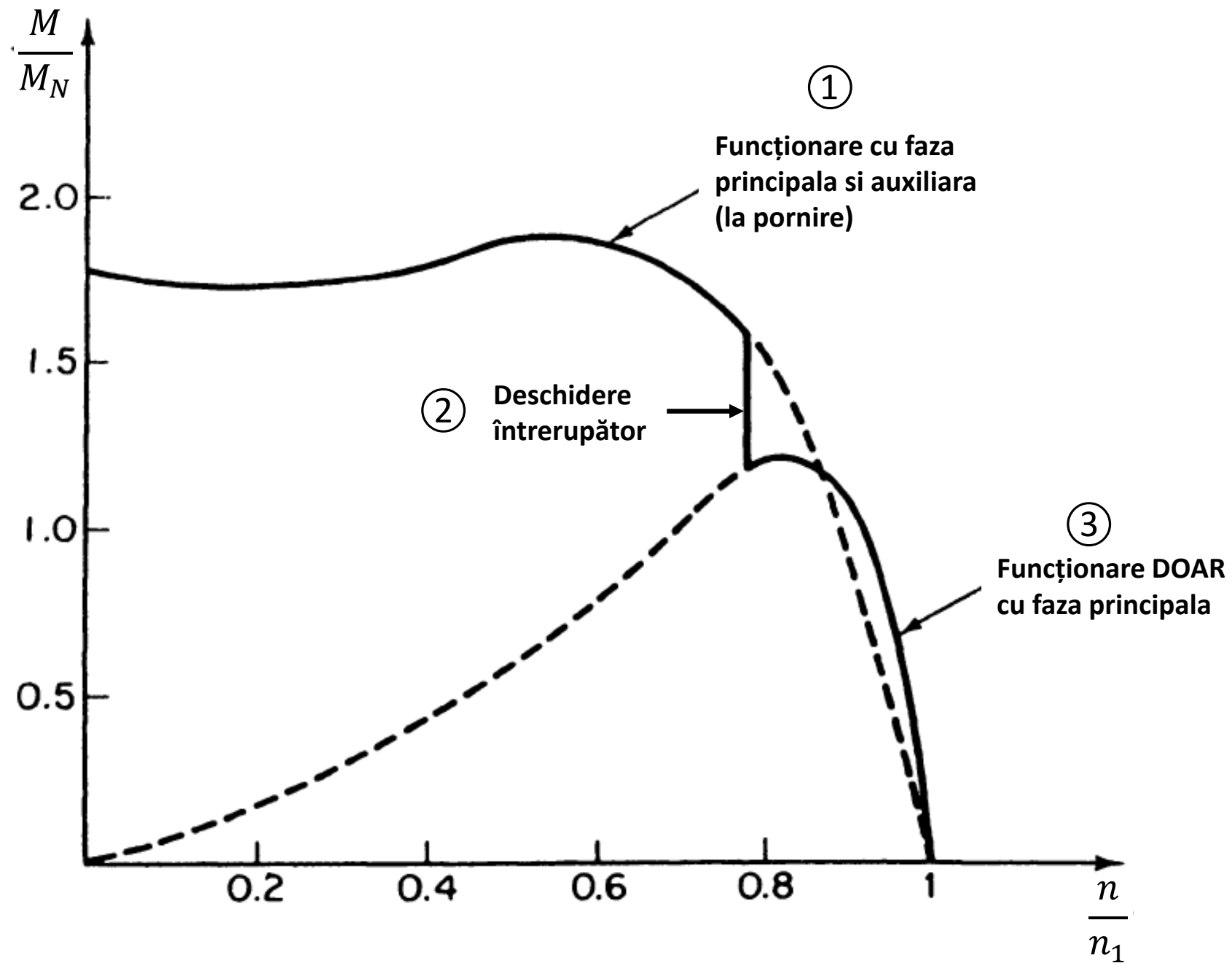
Capacitor-start motor

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 două 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 în instalații de aer condiționat



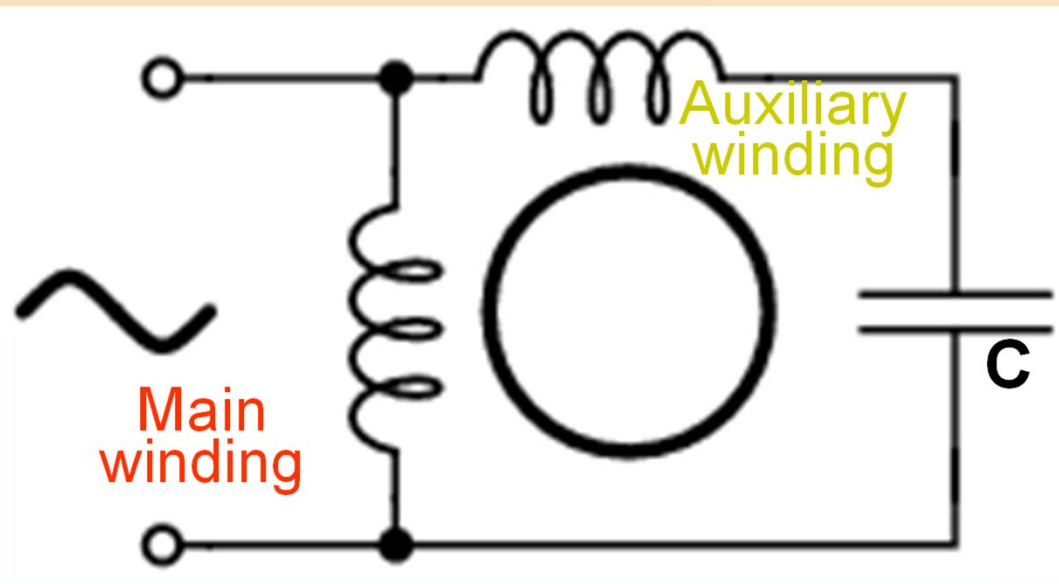


Caracteristica $M=f(s)$ pentru motorul cu condensator de pornire

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

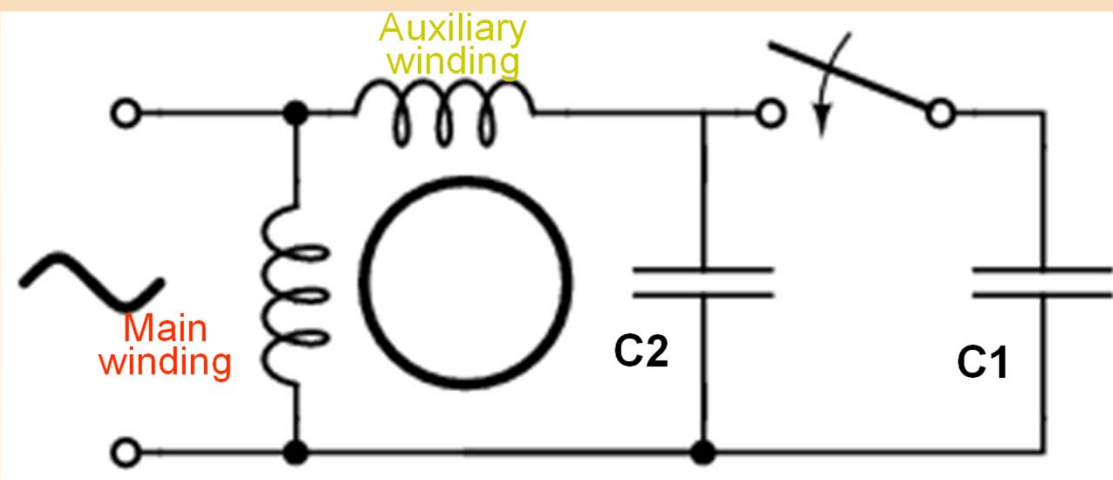


- Cele două înfășurări sunt identice
- Valoarea condensatorului este între cea favorabilă pornirii și cea favorabilă funcționării
- Curentul de pornire este mai mare
- Timpul de pornire este mai mare
- Apar pulsații de cuplu la turație nominală
- Configurația este favorabilă pentru motoare de până la 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 în circuit

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

➤ $C1 > C2$

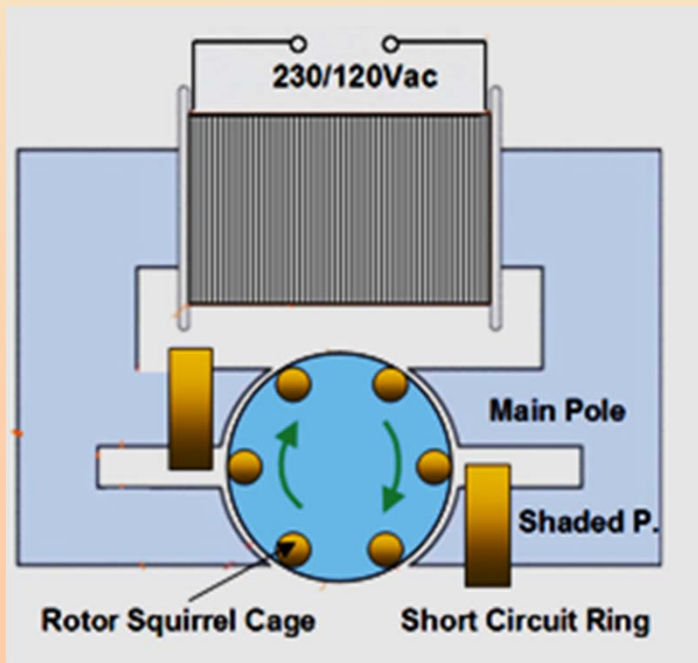
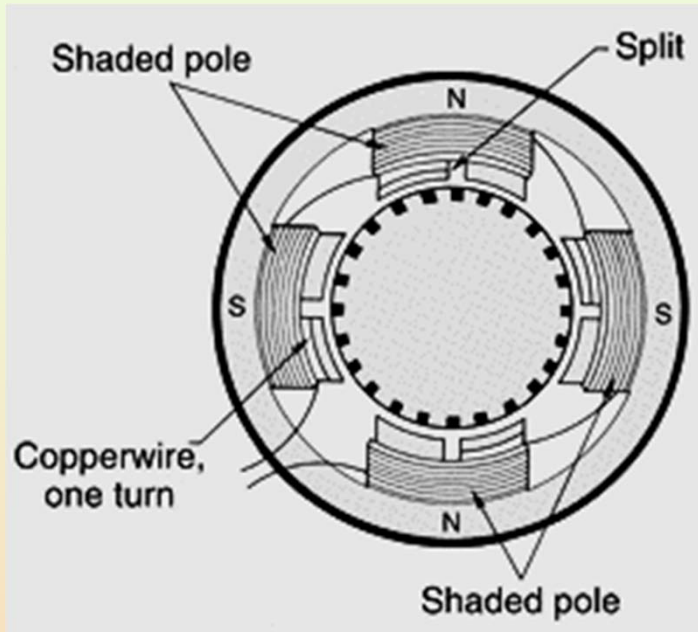
➤ Este configurația cea mai performantă pentru motoare monofazate

➤ Configurația este favorabilă pentru motoare de ordinul kW



V. Motor cu spira în scurtcircuit

Shaded-pole motor



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

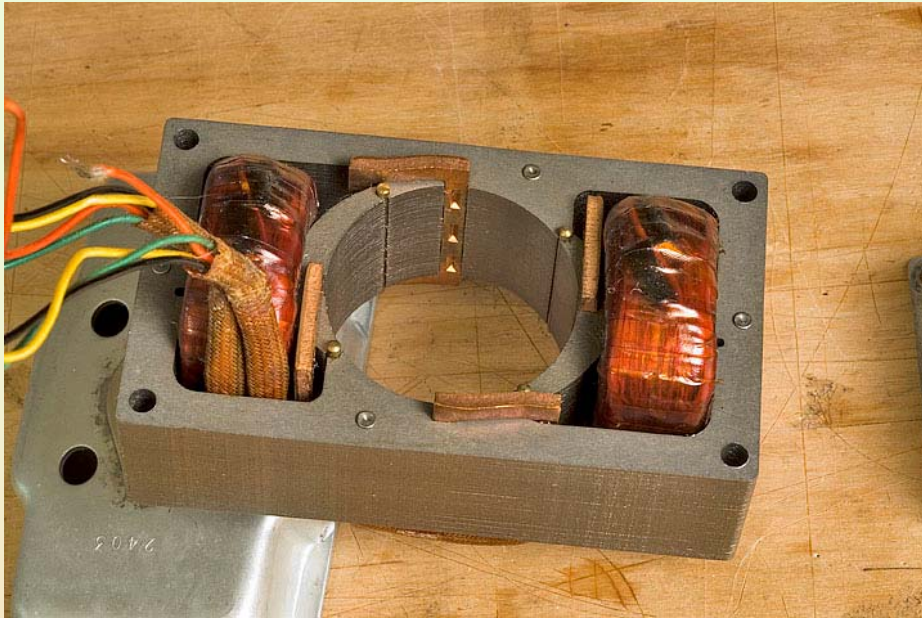
➤ Fiecare pol statoric are o spiră în scurtcircuit ce îmbrățișează cca 1/3 din pol

➤ Motorul are un singur sens de rotație impus de poziția spirei în scurtcircuit (rotorul se rotește dinspre partea neecranată spre partea ecranată de spira în sc.)

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

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 cu spira în sc cu doua bobine inductoare



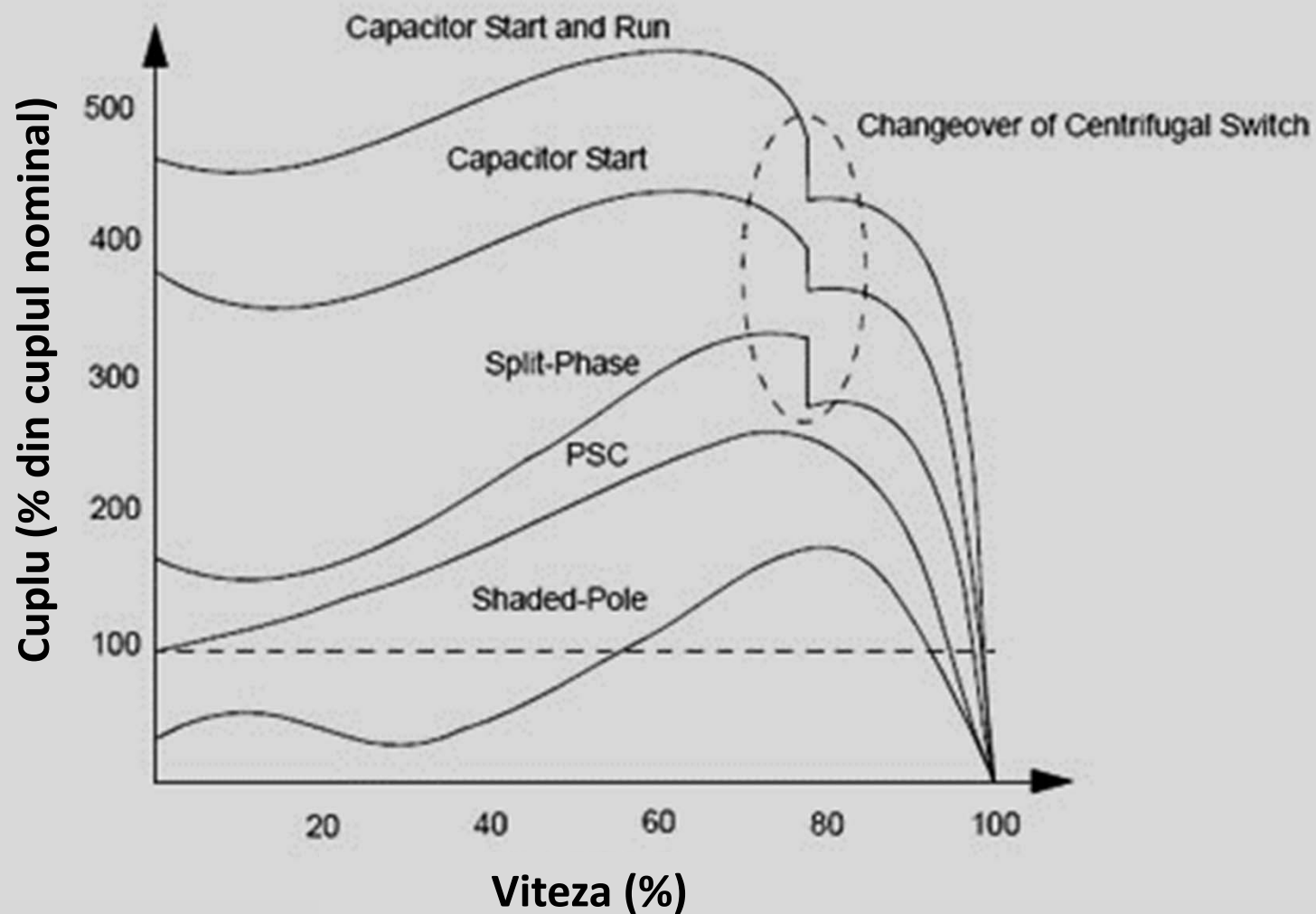
Motor cu spira în sc cu o singura bobina inductoare



Motor cu spira în sc cu P=1kW

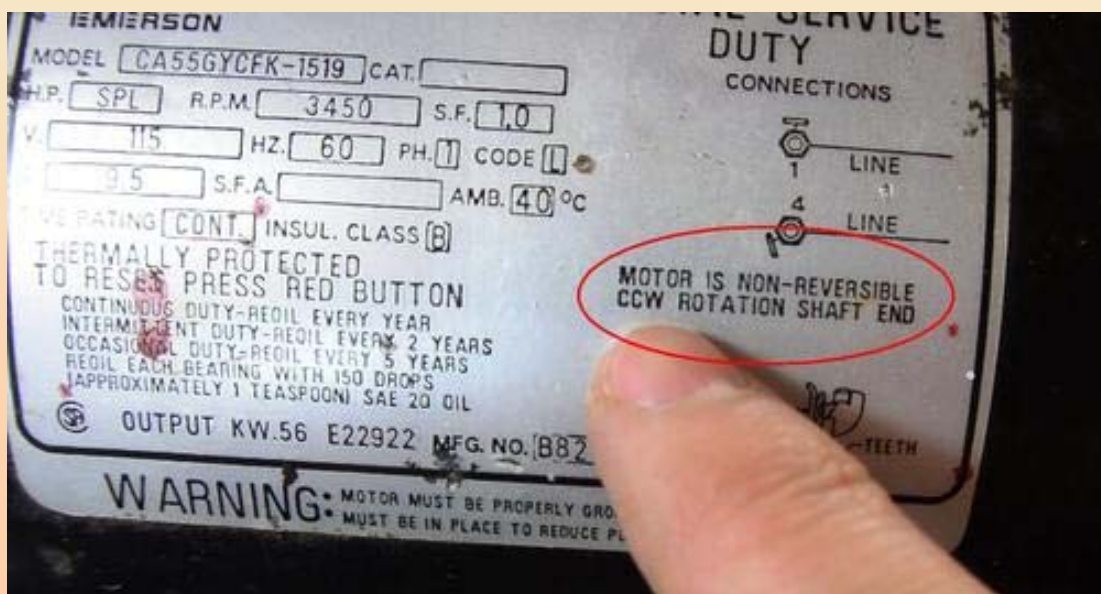
MOTOR TYPE	SPLIT-PHASE	CAPACITOR-START	PERMANENTLY SPLIT CAPACITOR	CAPACITOR START-CAPACITOR RUN	SHADED POLE
DESCRIPTION	Start winding connected in parallel with main winding, connection controlled by centrifugal switch or relay.	Identical to the split-phase design except includes the addition of a capacitor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

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

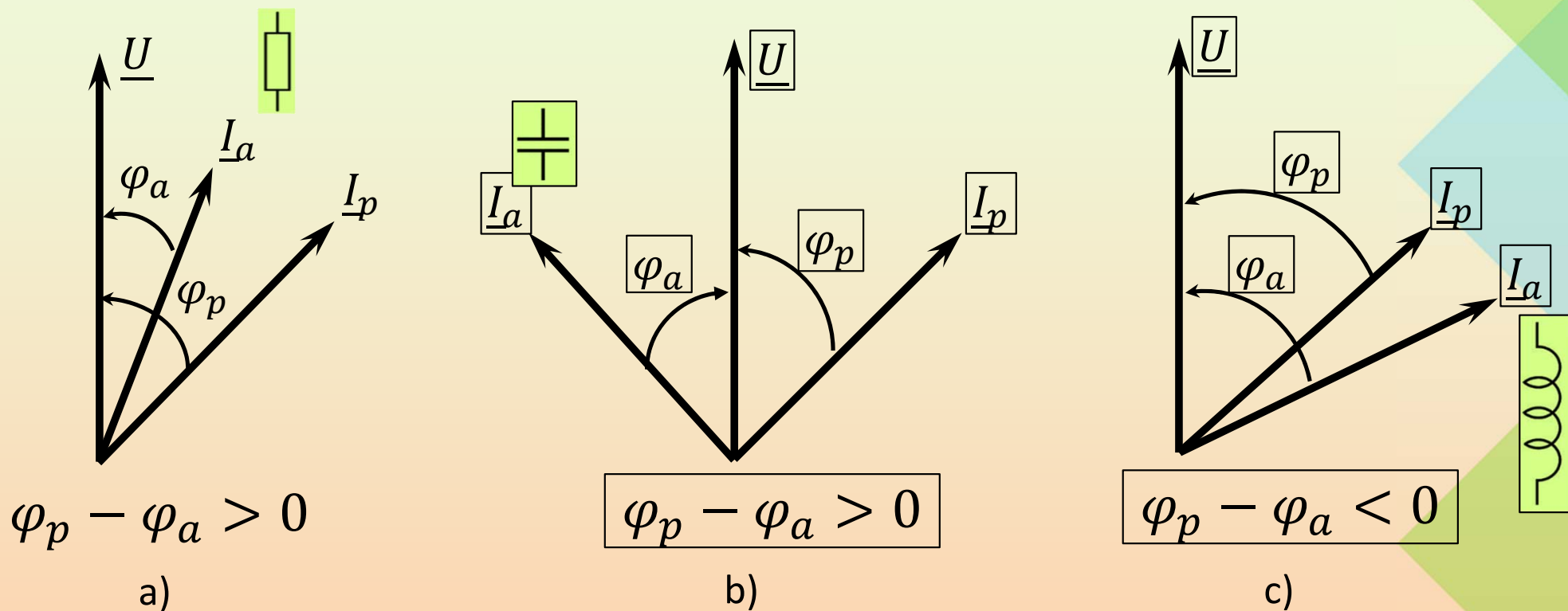


Inversarea sensului de rotație la motorul asincron monofazat

1. Schimbarea sensului curentului prin una dintre cele două 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).

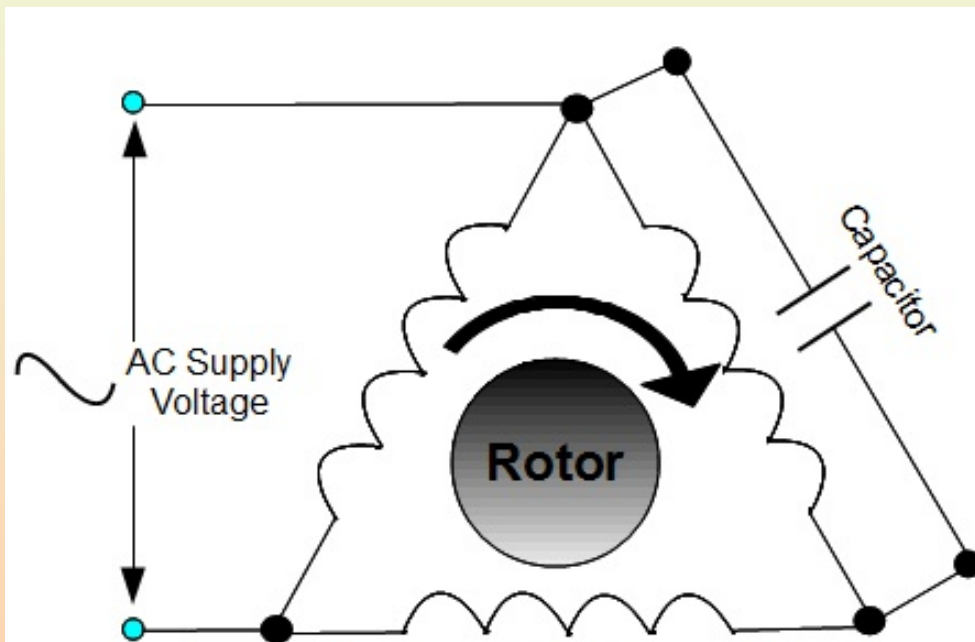


2. Prin schimbarea defazorului (un condensator sau o rezistență folosite ca element defazor se înlocuiesc cu o bobină).

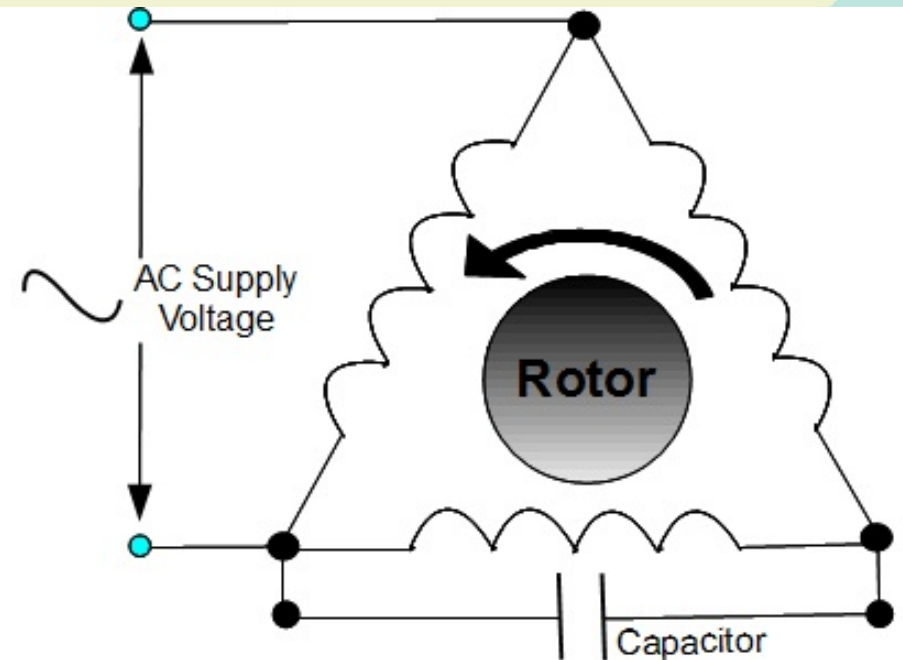


Se remarcă din diagramele fazoriale că defazajul produs de prezența rezistenței sau a condensatorului este pozitiv iar în cazul bobinei, acesta este negativ. Drept consecință, introducerea unui condensator sau a unei rezistențe ca element defazor determină un anumit sens de rotație, iar introducerea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

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

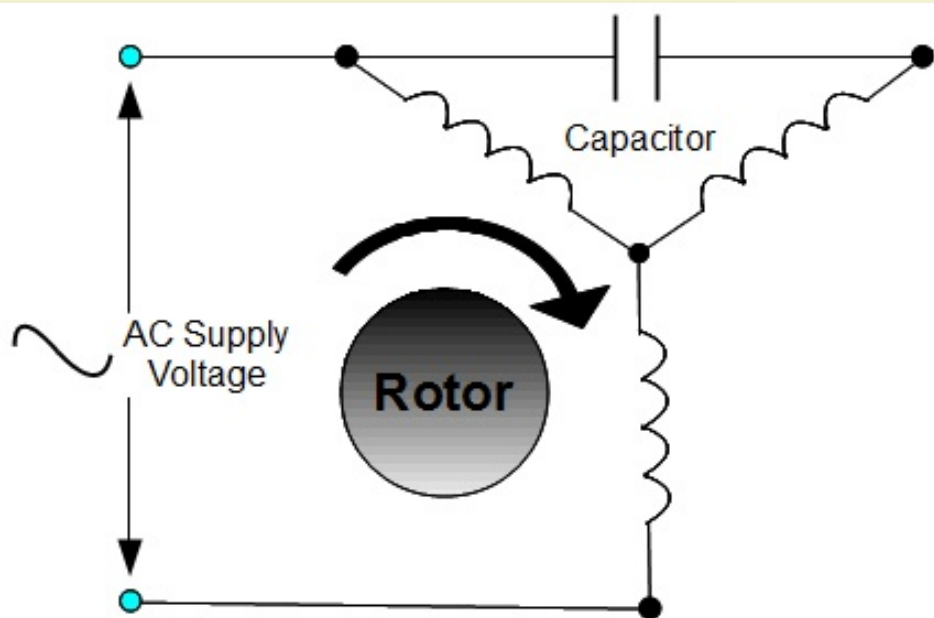


Forward Rotation of Delta Connected 3 phase AC Motor Supplied with Single Phase Voltage

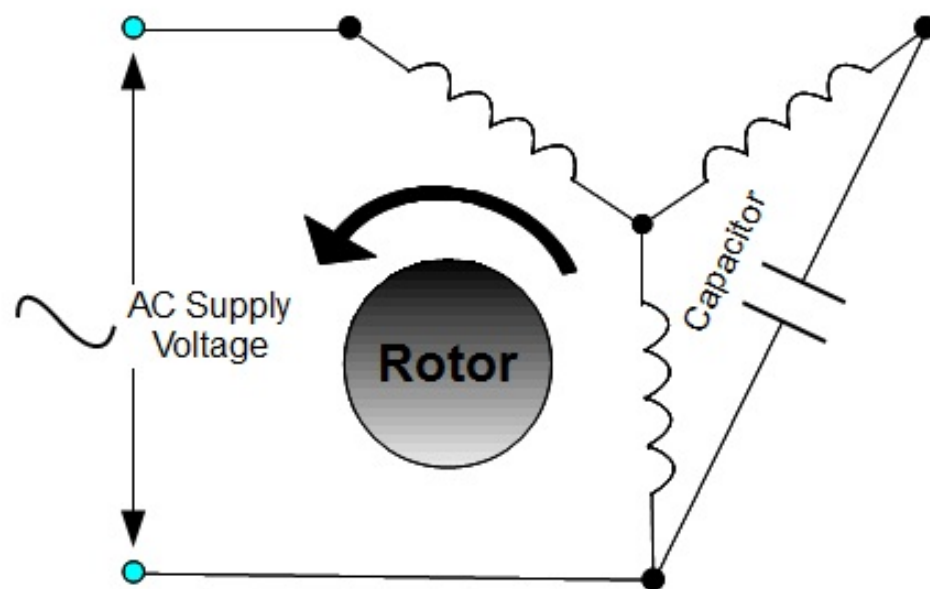


Reverse Rotation of Delta Connected 3 phase AC Motor Supplied with Single Phase Voltage

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



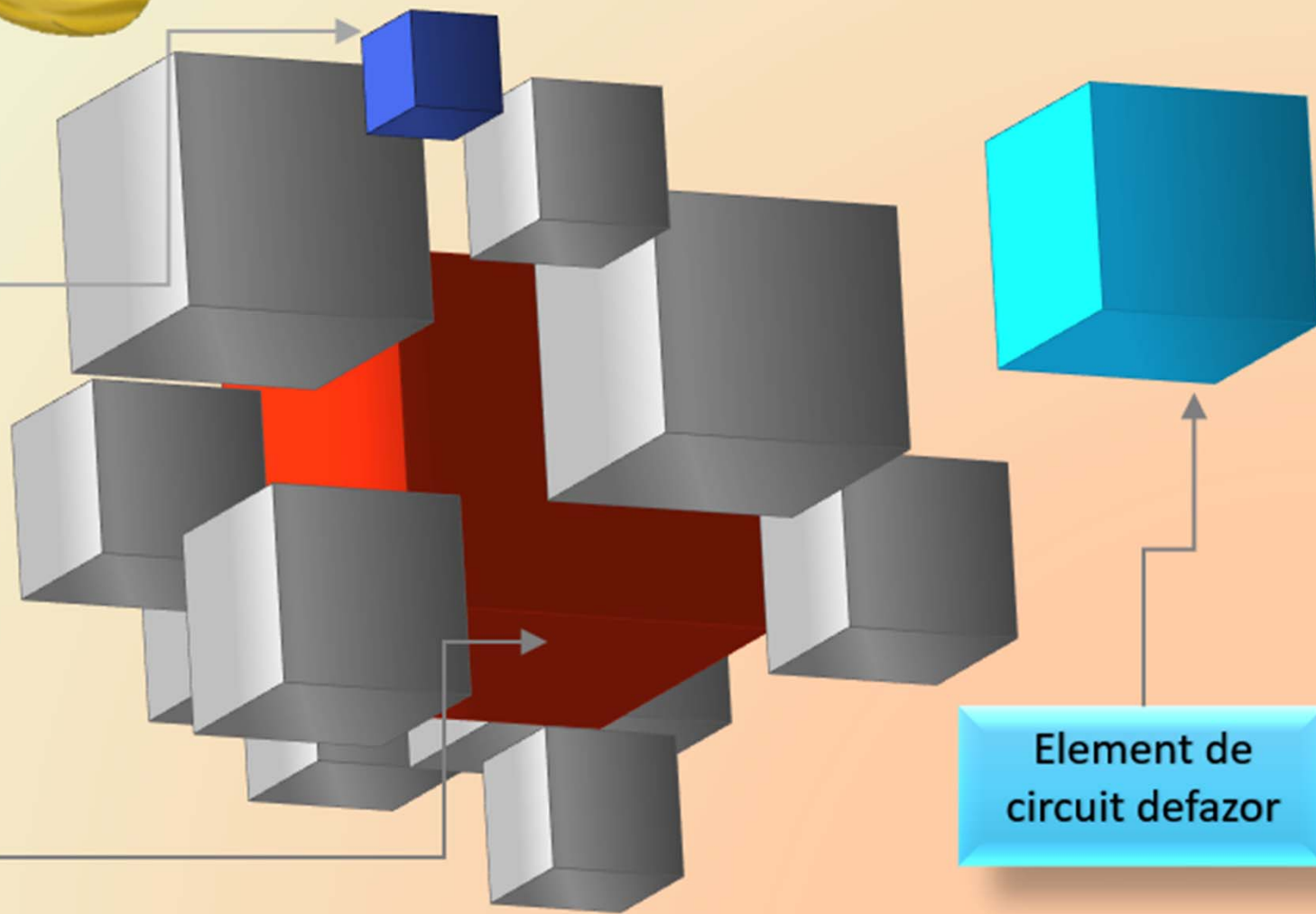
CUVINTE CHEIE

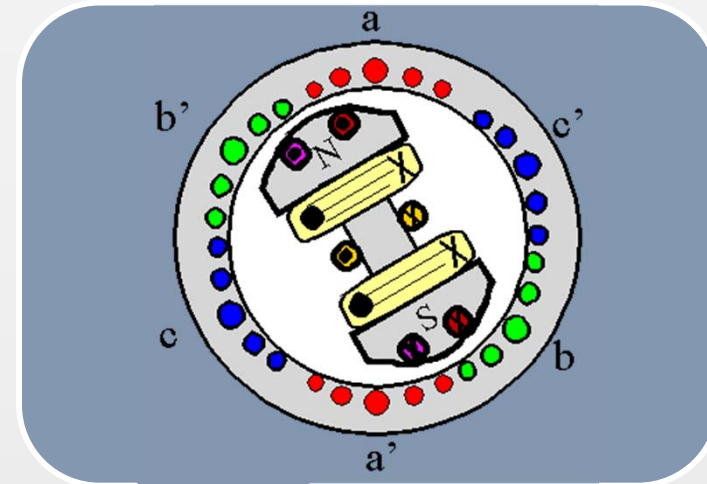
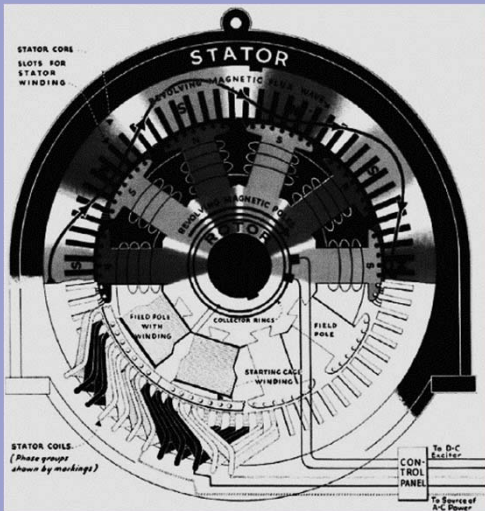


Alimentare
monofazată

Două înfășurări
de fază

Element de
circuit defazor



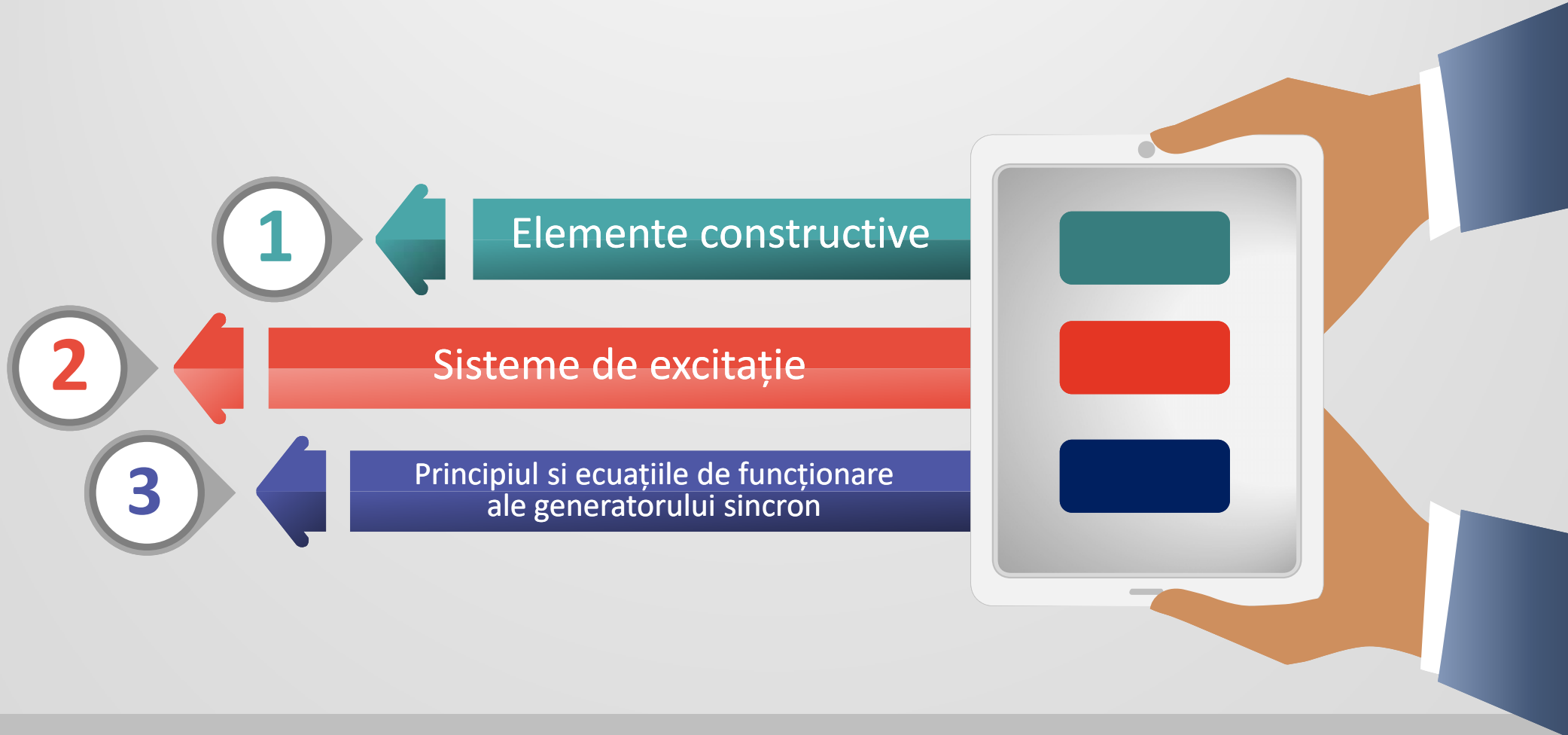


Maşina

sincronă

SUBMIT

CUPRINS





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

ELEMENTE CONSTRUCTIVE

STATOR

Partea fixa a mașinii

1

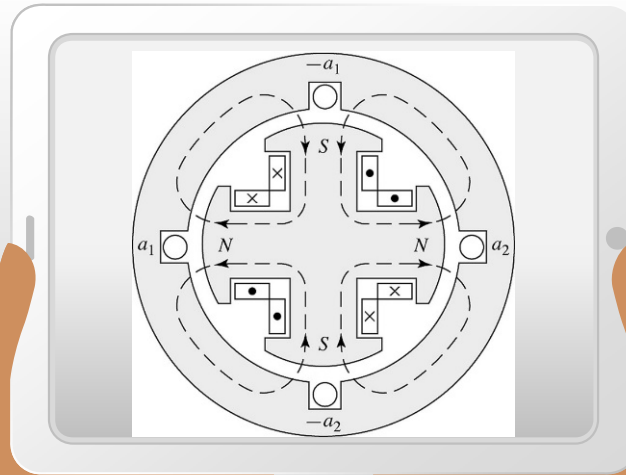
ROTOR

Partea mobila a mașinii

2

*Sistem de
excitație*

3

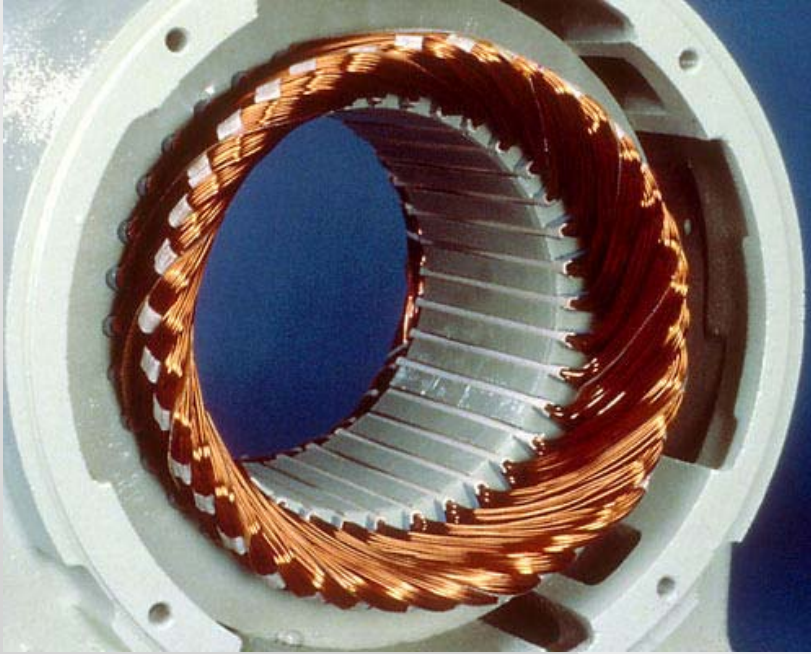


Accesorii

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**



Infășurare

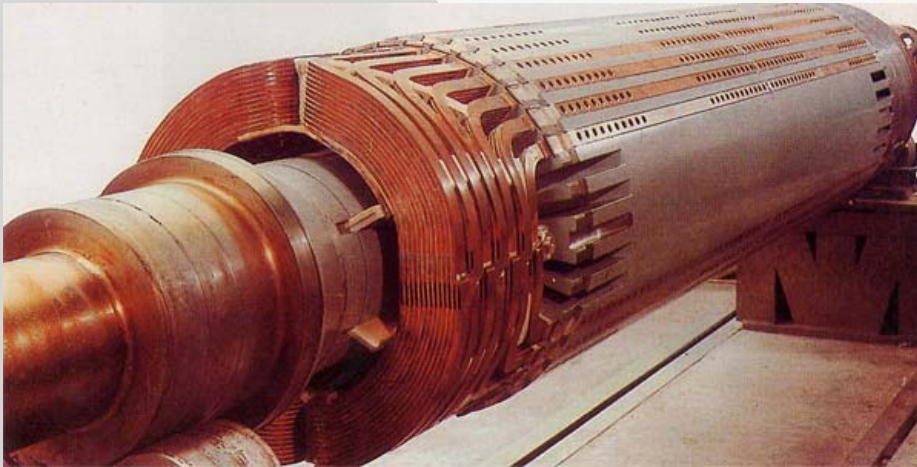
De regulă, statorul este INDUSUL mașinii sincrone.

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 crestături (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.

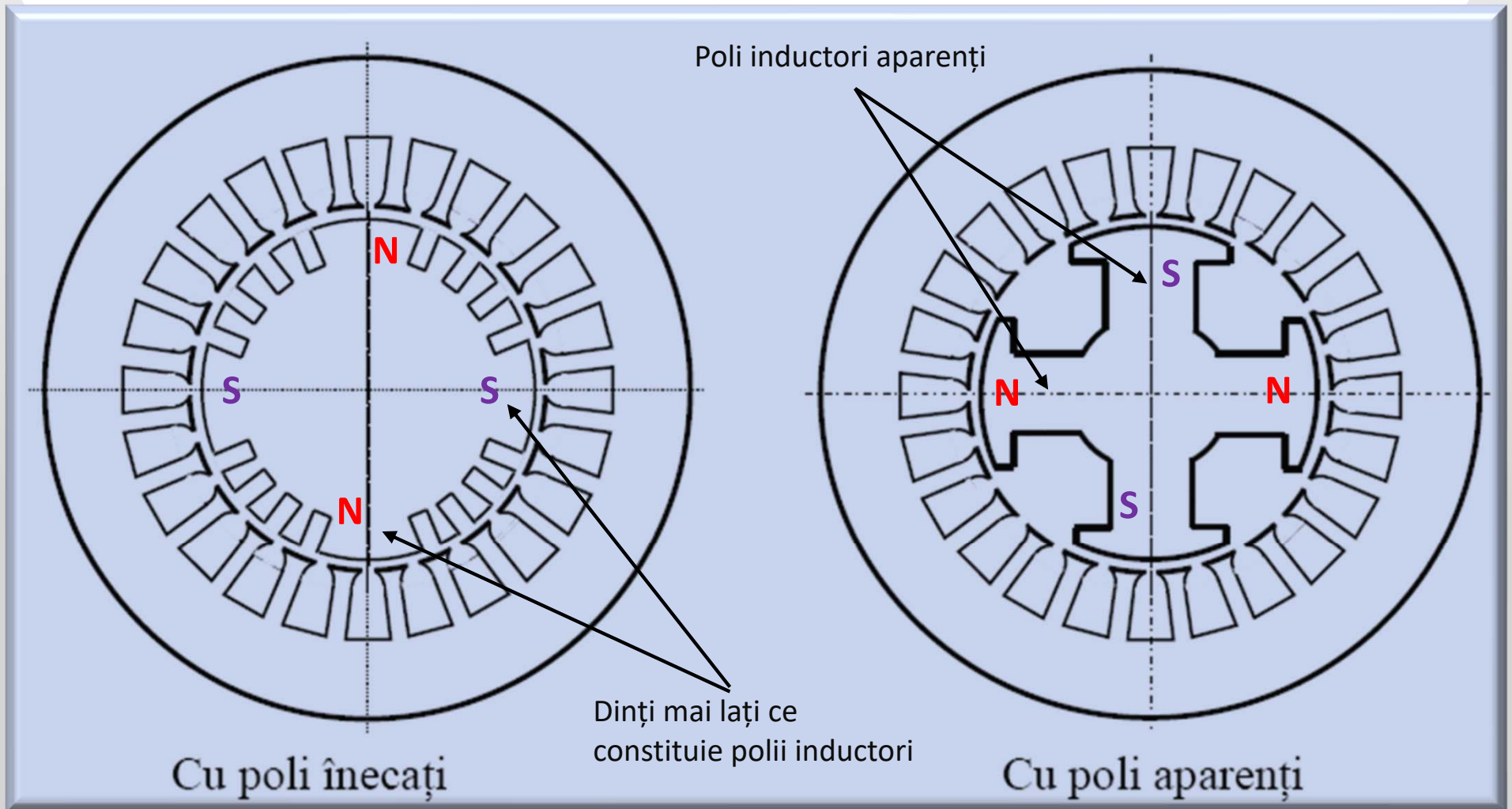


Rotor cu poli înecați



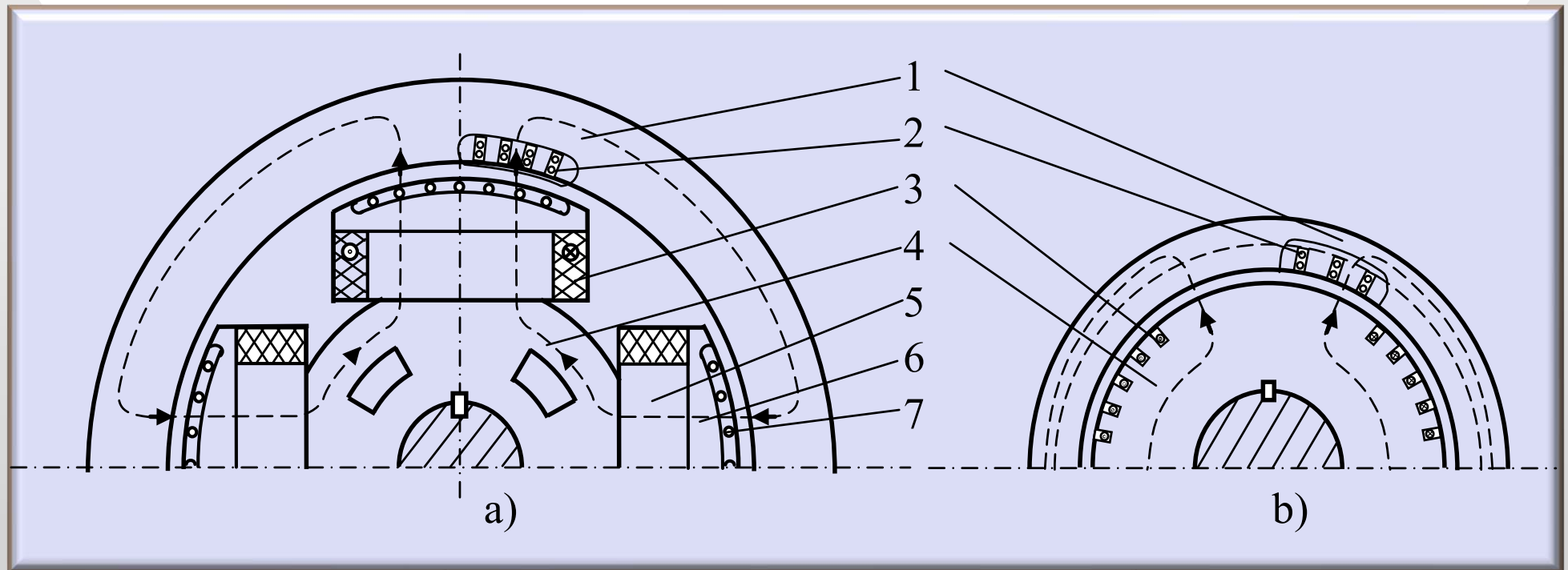
Rotor cu poli aparenti

Tipuri de mașini sincrone



- **Mașina cu poli înecați – are întrefier cvasi-constant**
- **Mașina cu poli aparenti – are întrefier variabil**

Tipuri de mașini sincrone



Elemente constructive de bază ale mașinilor sincrone:

a) cu poli aparenti, b) cu poli înecați.

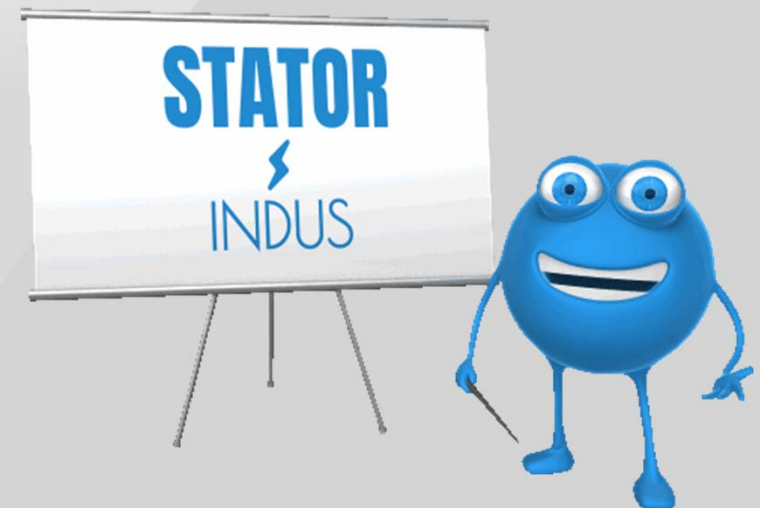
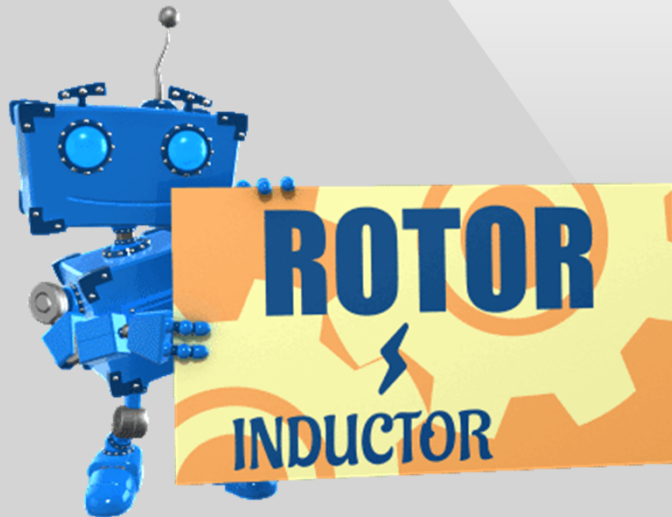
1. Jug statoric, 2. Înfășurare statorică (indusă), 3. Înfășurare rotorică (inductoare), 4. Jug rotoric, 5. Pol rotoric, 6. Piesă polară, 7. Înfășurare de pornire/amortizare

Înfășurarea rotorică

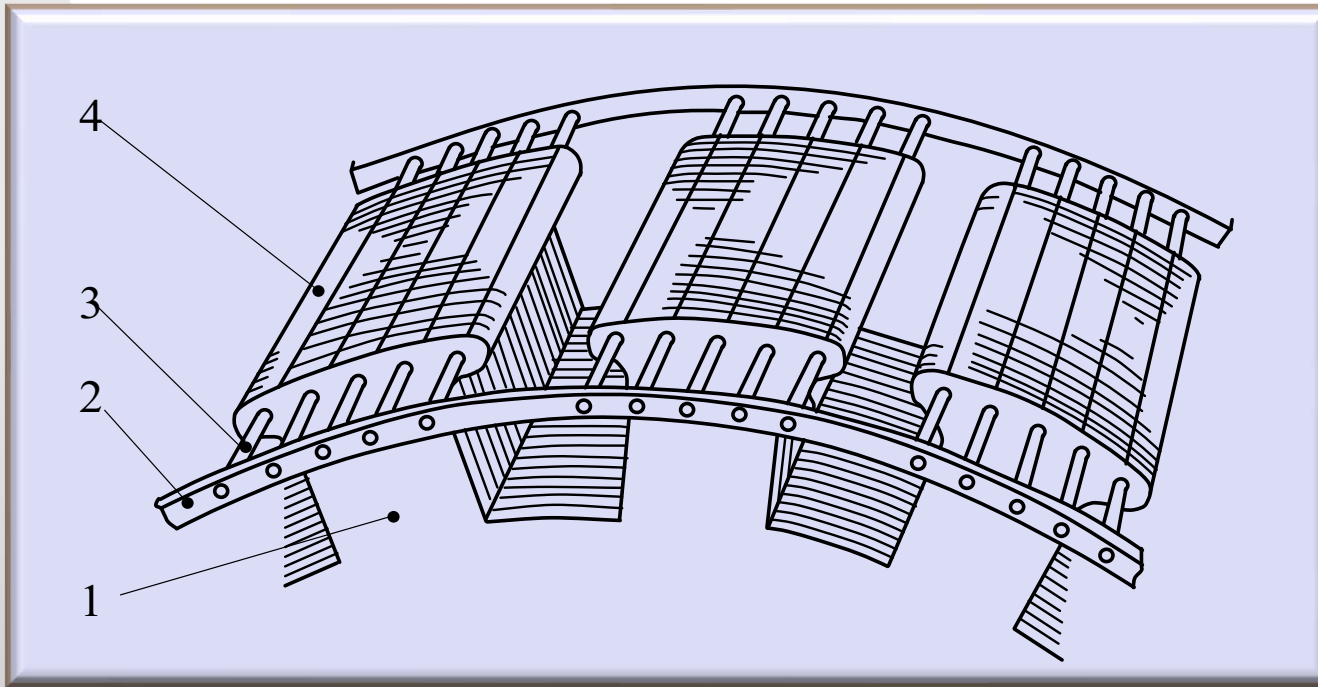
Indiferent de tipul de rotor, înfășurarea rotorică este alimentată în curent continuu. Drept urmare ea creează un câmp magnetic *constant* ca amplitudine și *fix* în spațiu.

Sensul curenților prin înfășurări determină polaritatea alternantă a polilor mașinii.

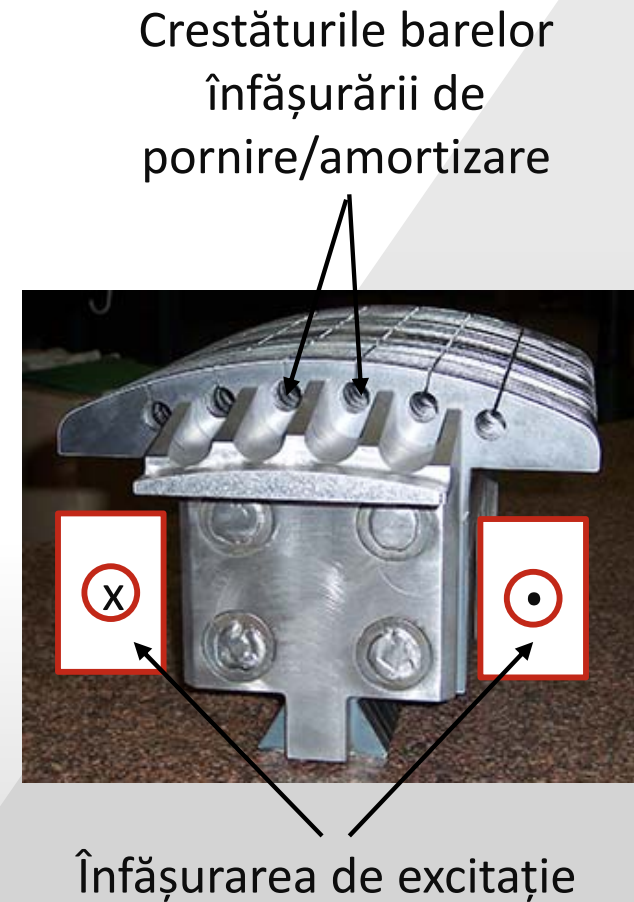
Câmpul creat de înfășurarea rotorică reprezintă câmpul inductor iar rotorul reprezintă inductorul mașinii.



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 practice 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.

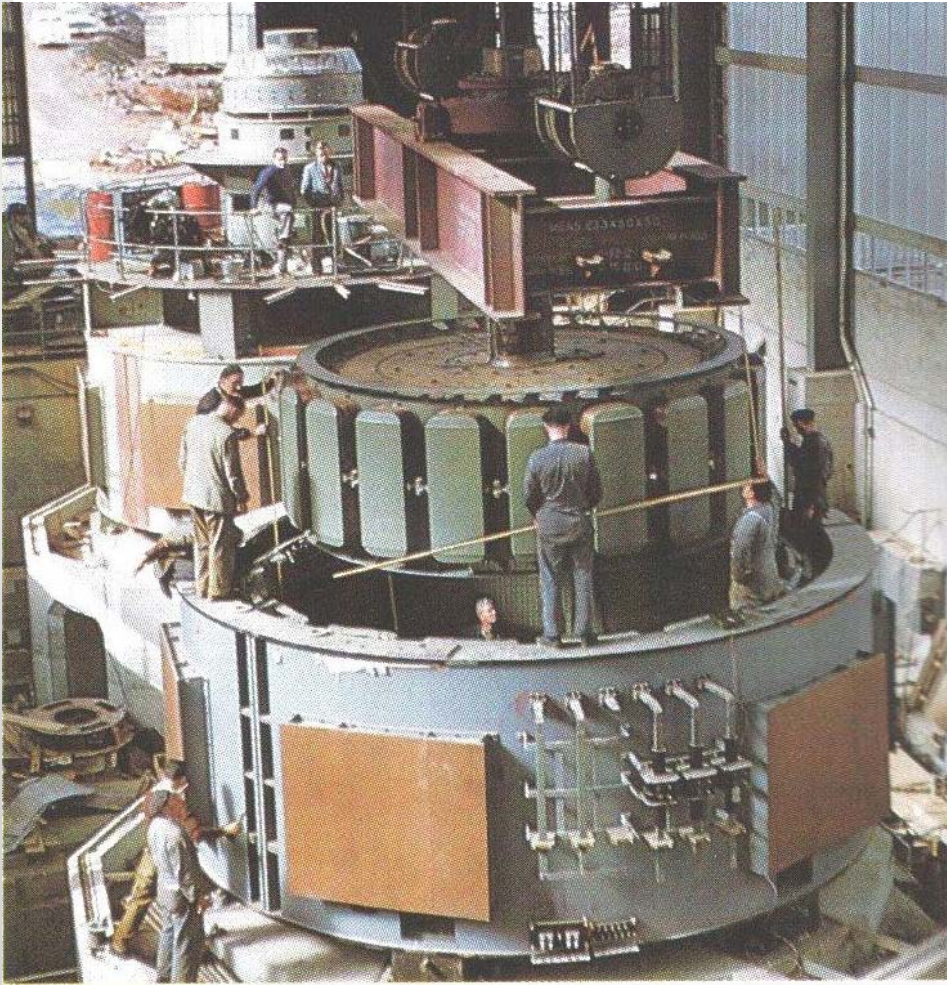


Există mașini sincrone la care înfășurarea de pornire poate lipsi.

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)**

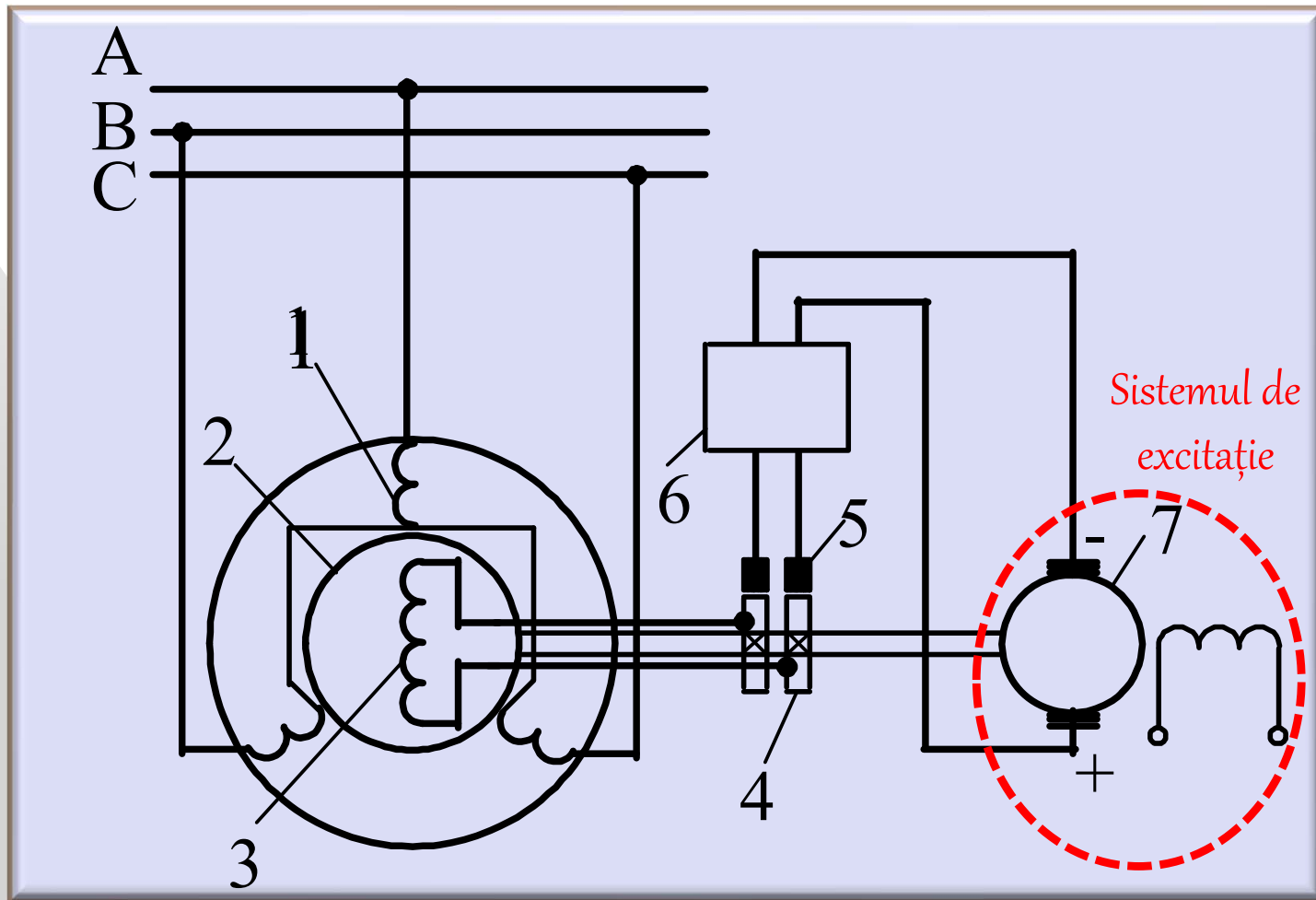


Sisteme de excitație

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

El furnizează tensiunea continuă necesară alimentării înfășurării inductoare, rotorice.

I. 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.

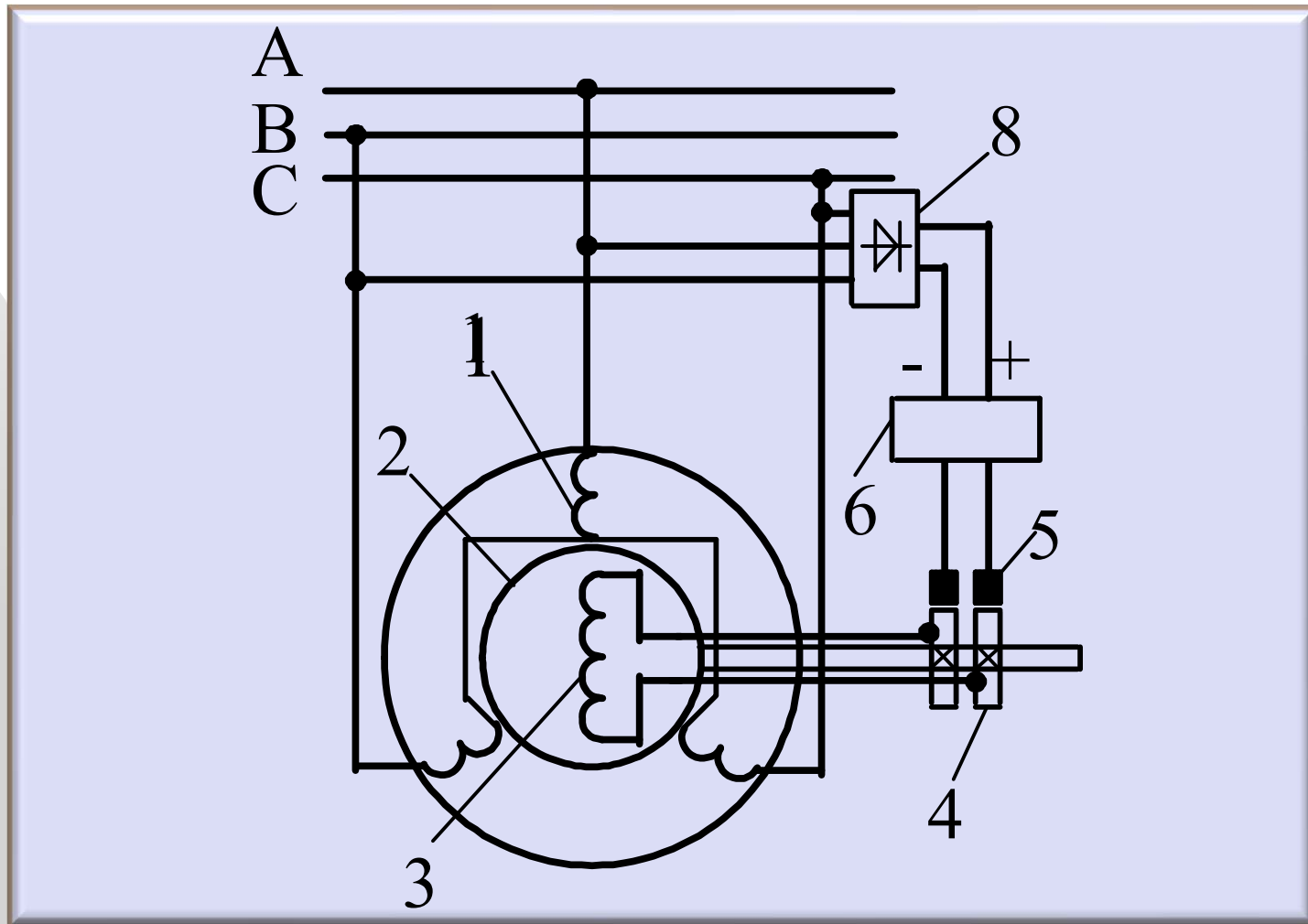
Sisteme de excitație cu excitatrice

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.

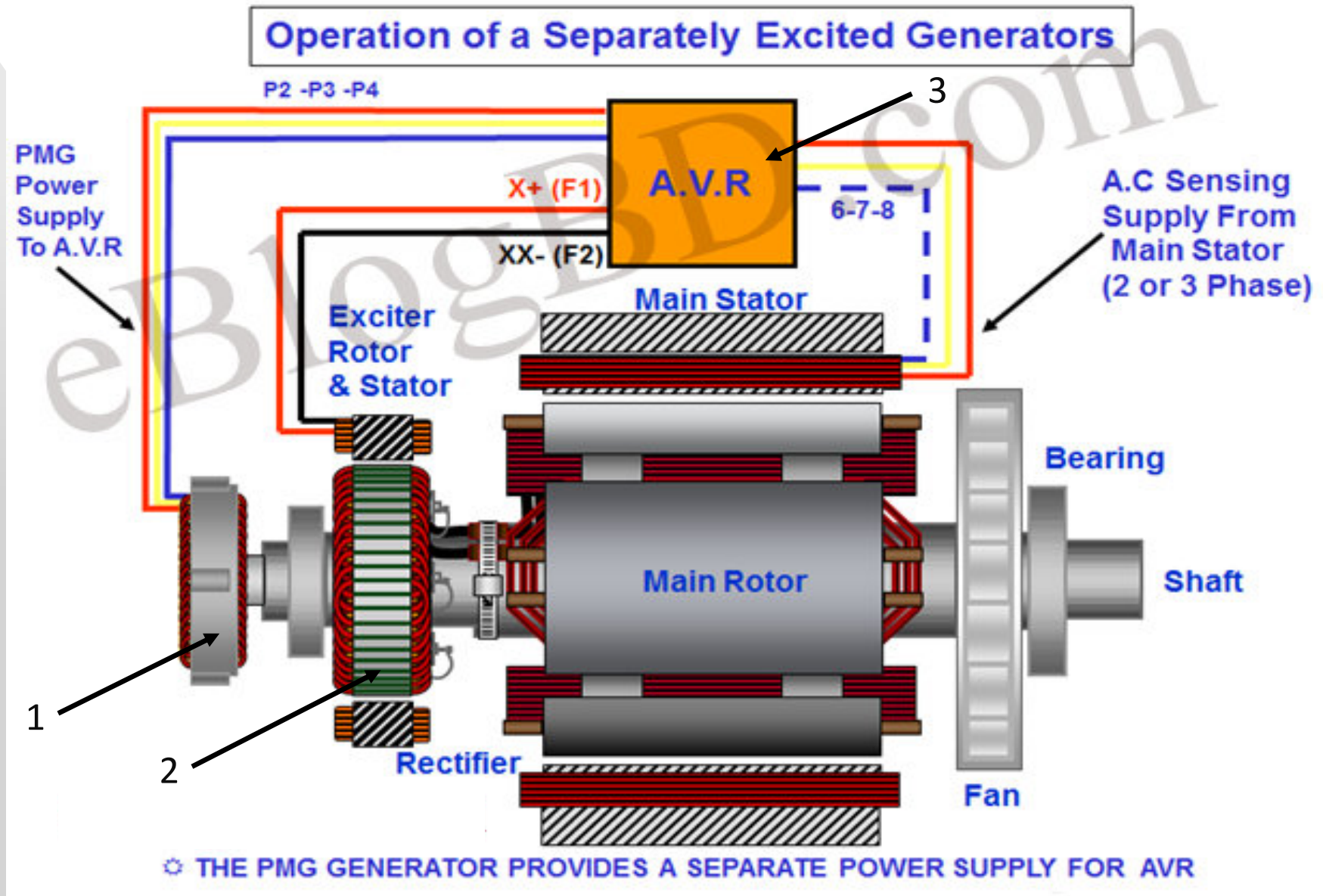
II. Sisteme de excitație cu redresor



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.

III. Sisteme de excitație cu două 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

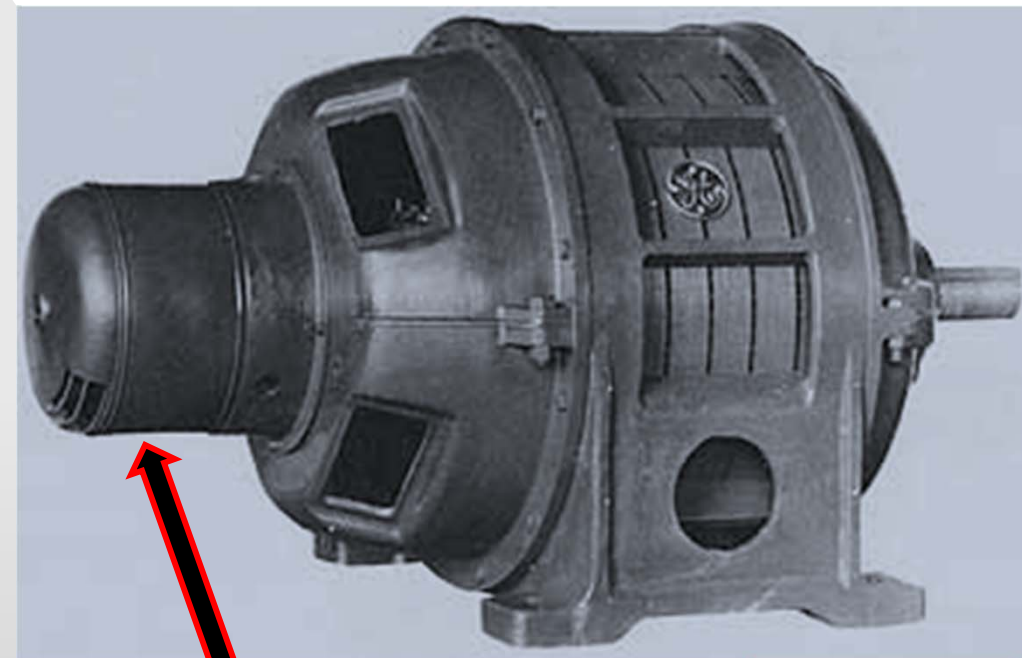
Sistemul de excitație este format din două mașini plasate pe axul mașinii sincrone:

- 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 „diode rotitoare”).

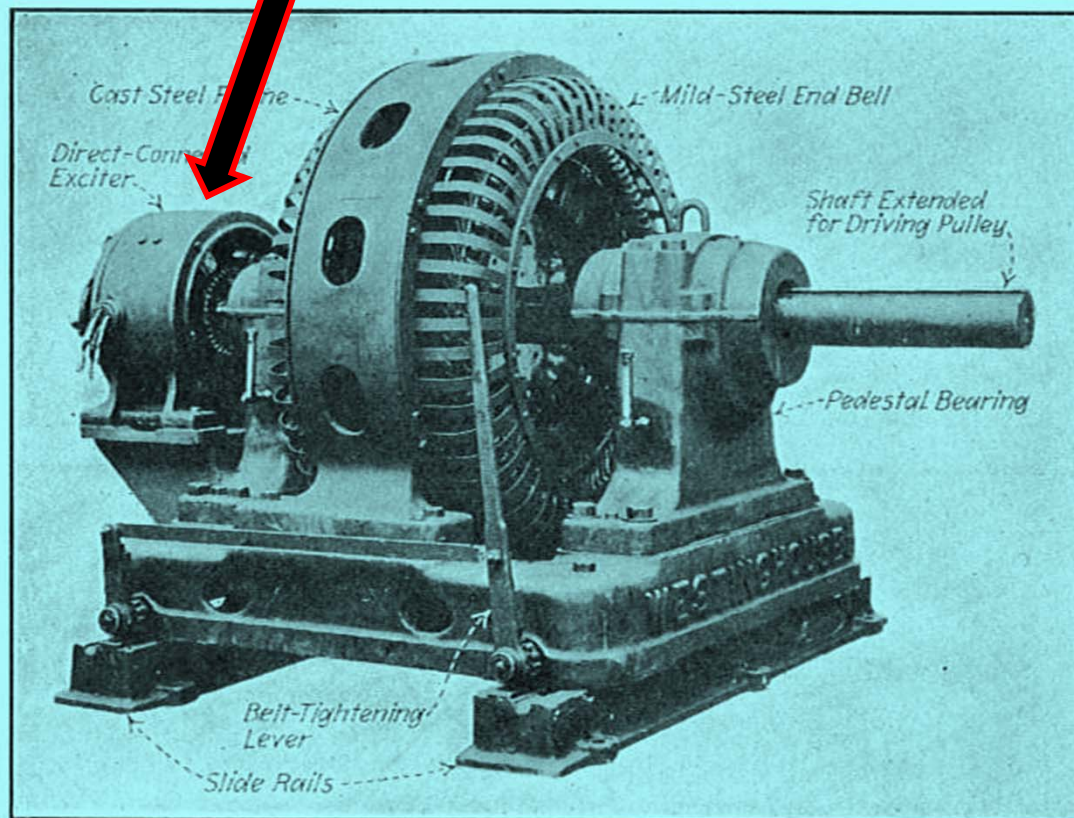


Această soluție elimină existența unei surse externe de c.c.

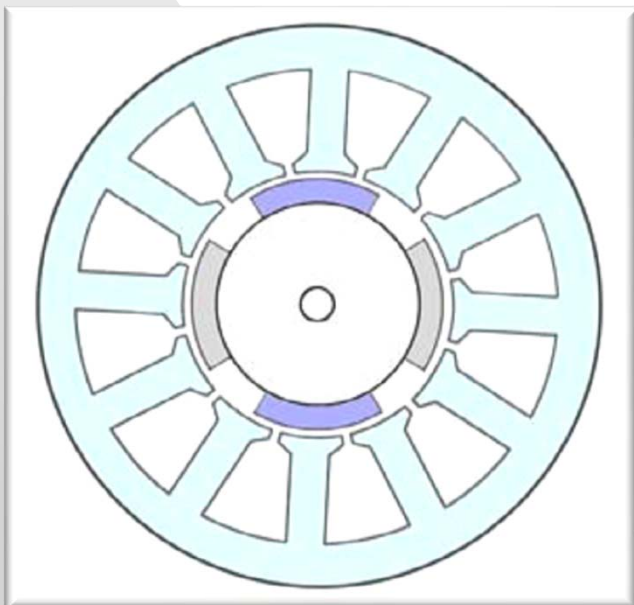


Excitatrice incorporata

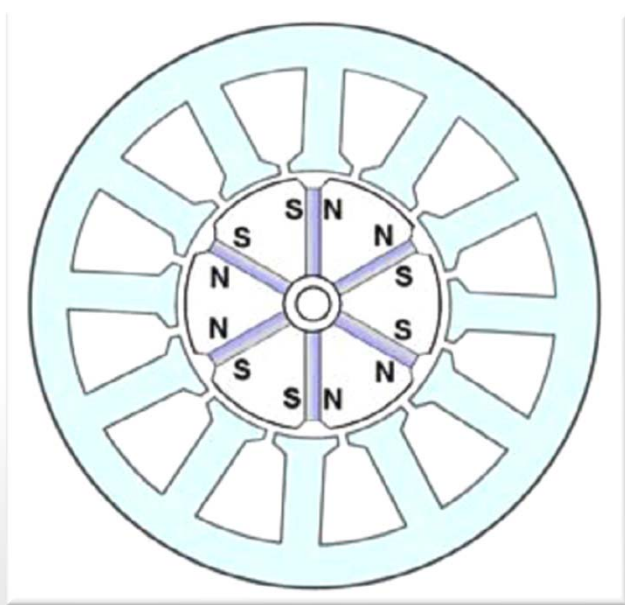
Excitatrice separata



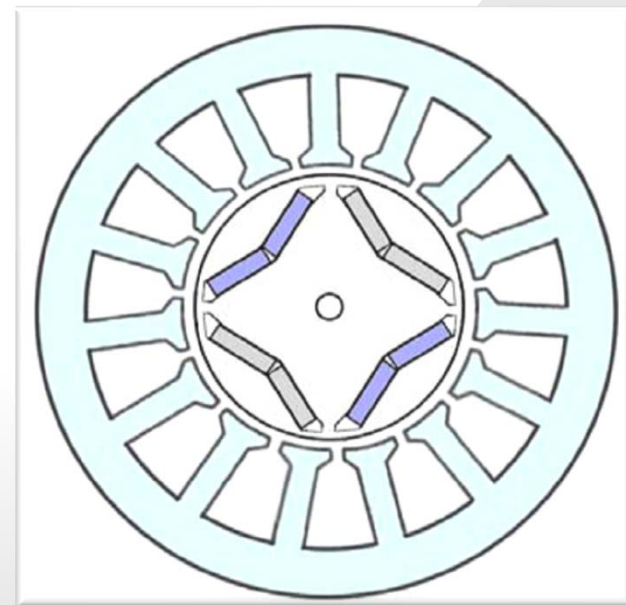
Sisteme de excitație cu magneți permanenți



**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



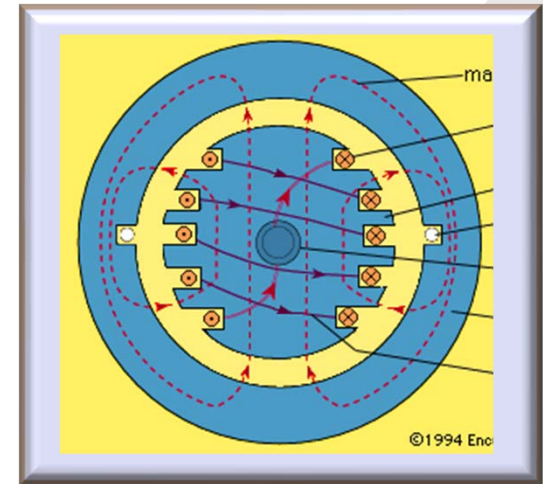
Motor



Compensator

Principiul de funcționare în regim de generator

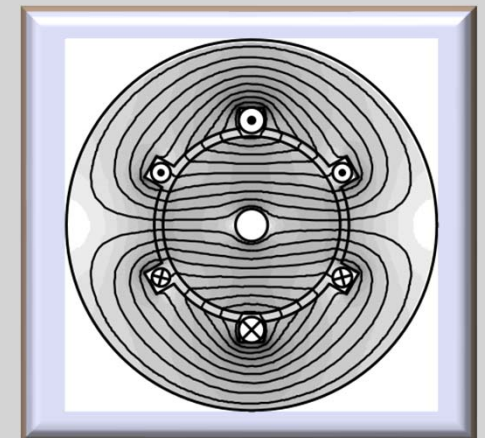
1. Prin alimentarea înfășurării de excitație de pe rotor de la o sursă de tensiune continuă ia naștere un câmp magnetic inductor, fix în spațiu și constant ca amplitudine - Φ_0



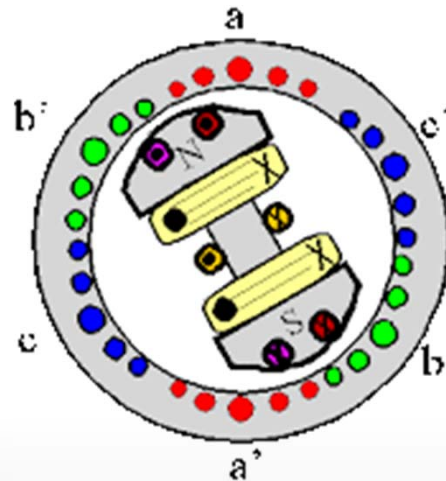
2. Antrenarea rotorului de către agentul sau mașina de antrenare transformă câmpul inductor fix într-unul învârtitor, deci variabil pentru înfășurarea statorică.

3. Conform legii inducției electromagnetice, în înfășurarea statorică se induce tensiune (apare la bornele mașinii un sistem trifazat de tensiuni).

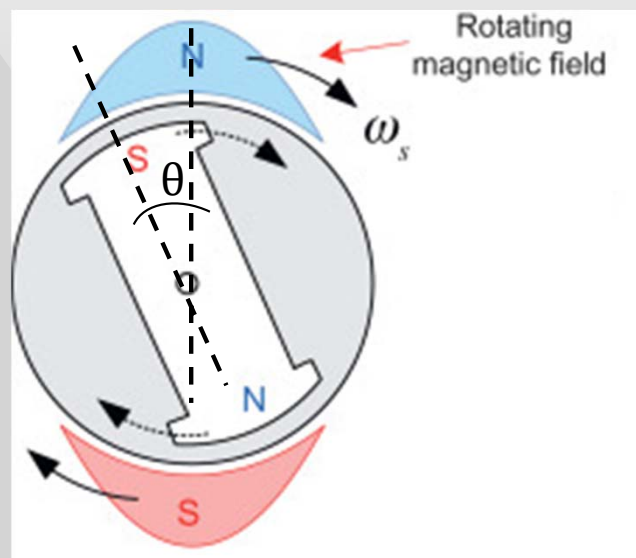
4. Dacă la bornele statorului se conectează o sarcină, prin înfășurarea statorică se stabilește un sistem trifazat de curenți. Acest sistem creează un câmp de reacție, ce este un câmp învârtitor - Φ_a



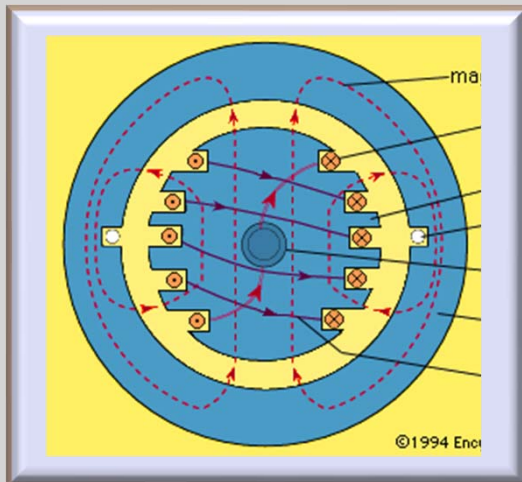
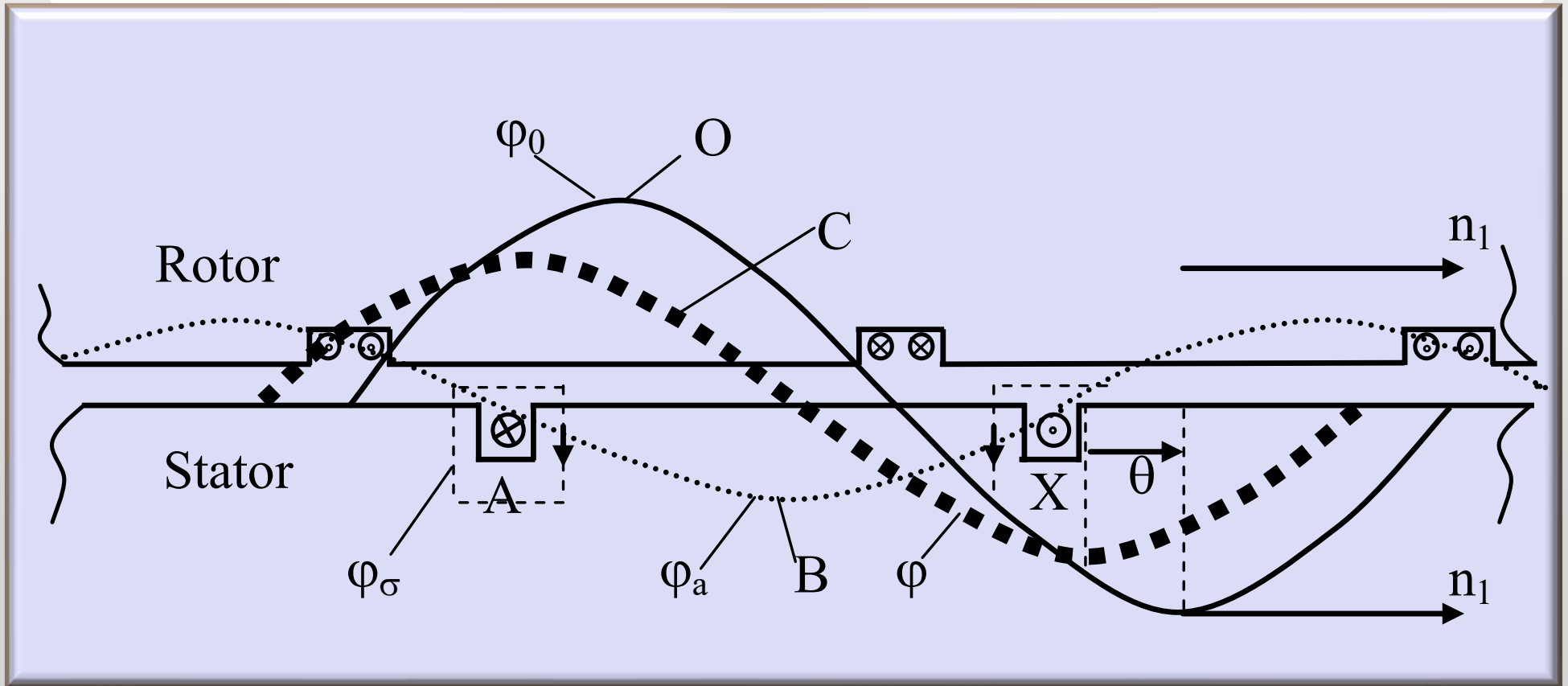
5. Cele două câmpuri, inductor și de reacție, se rotesc în același sens și cu aceeași viteză. Ele se compun dând naștere câmpului rezultat - Φ



6. Decalajul unghiular dintre câmpul inductor și câmpul rezultat reprezintă UNGHIUL INTERN θ al mașinii



Principiul și ecuațiile de funcționare ale generatorului sincron cu poli înecați

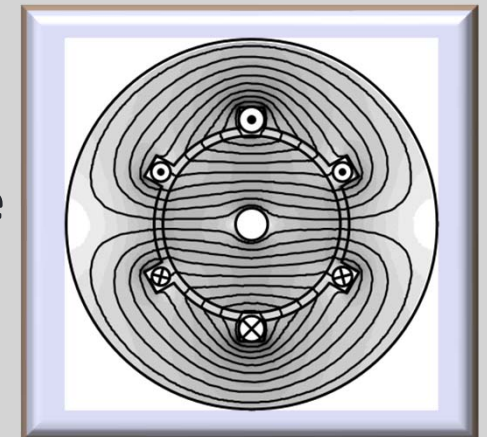


φ_0 - flux inductor

φ_a - flux de reacție

φ - flux rezultat

φ_σ - flux de dispersie



1+2. Câmp magnetic învârtitor în 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 în înfășurarea statorică (defazată în 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 un defazaj al curentului cu unghiul β)

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

- Analog pentru fazele BY și 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

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

- și tensiunea indusă în înfășurarea statorică

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

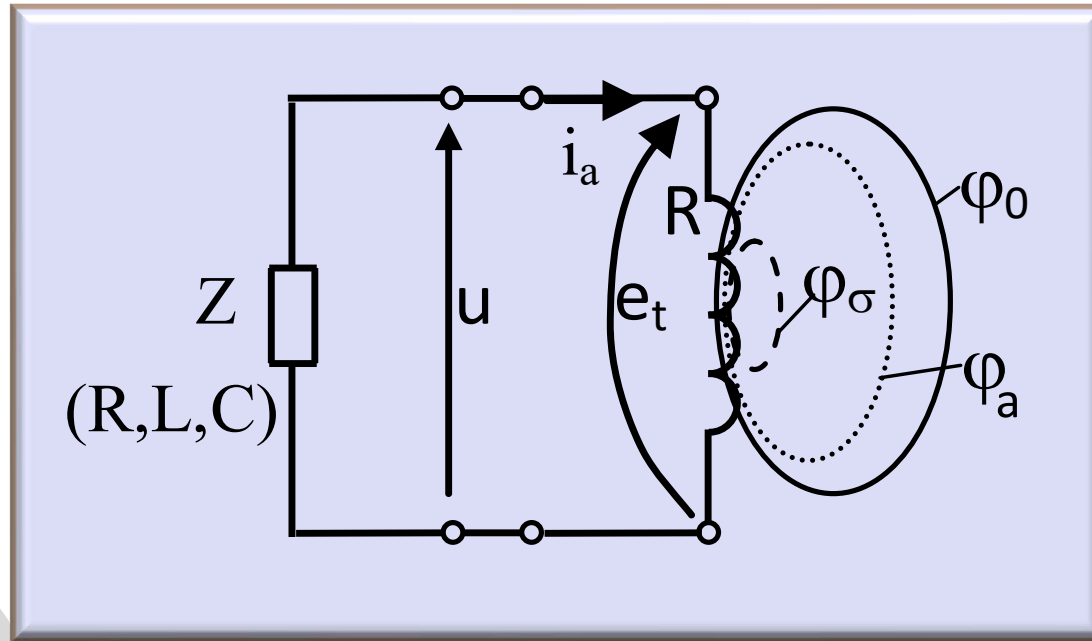
- având valoarea efectivă

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

5. Fluxul rezultat

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

Schema echivalentă



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

unde e_t este tensiunea indusă de φ_0 , φ_a și φ_σ

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

Trecând la scrierea în complex simplificat se obține:

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

dar $j\omega \cdot w_1 \cdot k_{w1} \cdot \frac{\Phi_0}{dt} = -\underline{E}_0$ și rezultă

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

dar $\omega \cdot L_a = X_a$

$$\omega \cdot L_\sigma = X_\sigma \quad \text{- reactanță de dispersie}$$

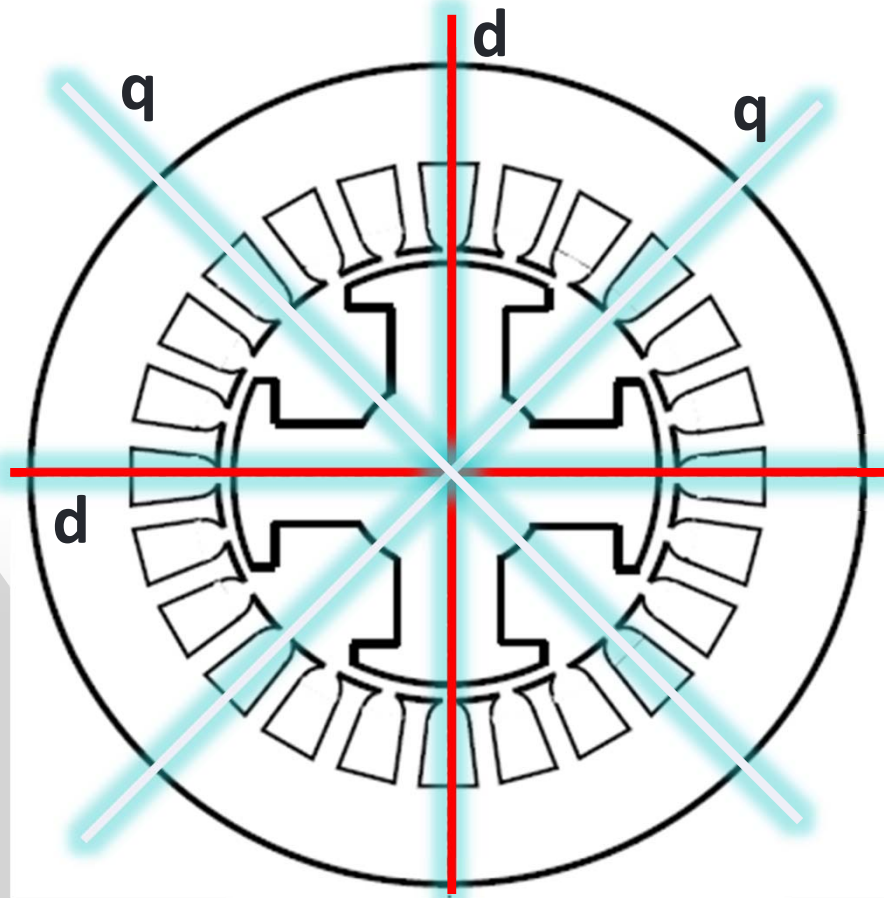
$$\underline{E}_0 = \underline{U} + R \cdot \underline{I}_a + j(X_a + X_\sigma)\underline{I}_a$$

Expresia finală a ecuației de tensiuni pe o fază a generatorului sincron este:

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

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

Principiul și ecuațiile de funcționare ale generatorului sincron cu poli aparenti



La mașina sincronă cu poli aparenti există două tipuri de axe de simetrie distincte:

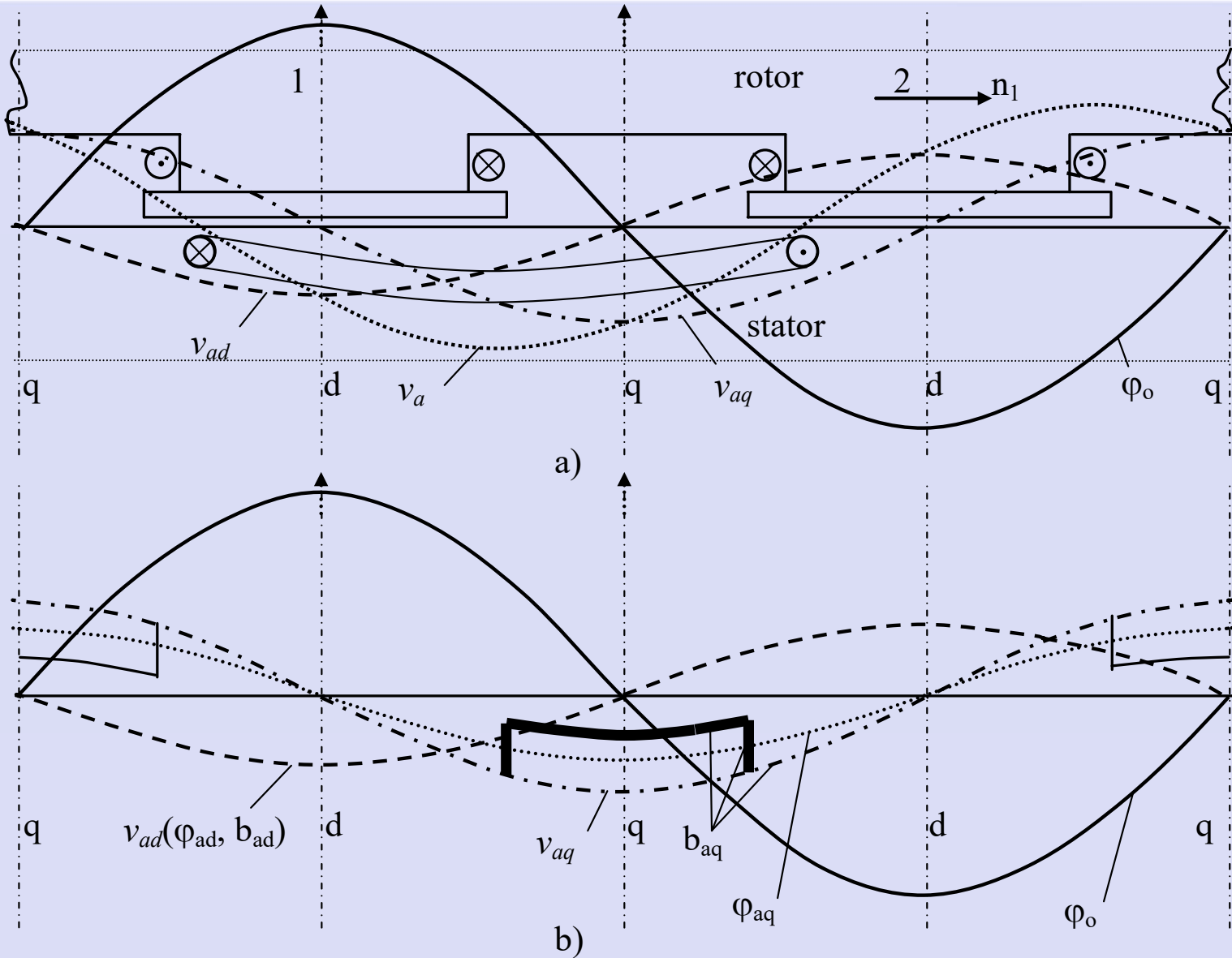
- Axa d – axa longitudinală (axa polilor)
- Axa q – axa transversală (axa interpolară)

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, φ_{ad} și φ_{aq}

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

Generator sincron cu poli aparenti funcționând în sarcină activ-inductivă



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 β :

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

4. Acest curent (în 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 ϕ_{ad} și ϕ_{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: $j\omega \cdot w_1 \cdot k_{w1} \cdot \frac{\underline{\Phi}_0}{dt} = -\underline{E}_0$ 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

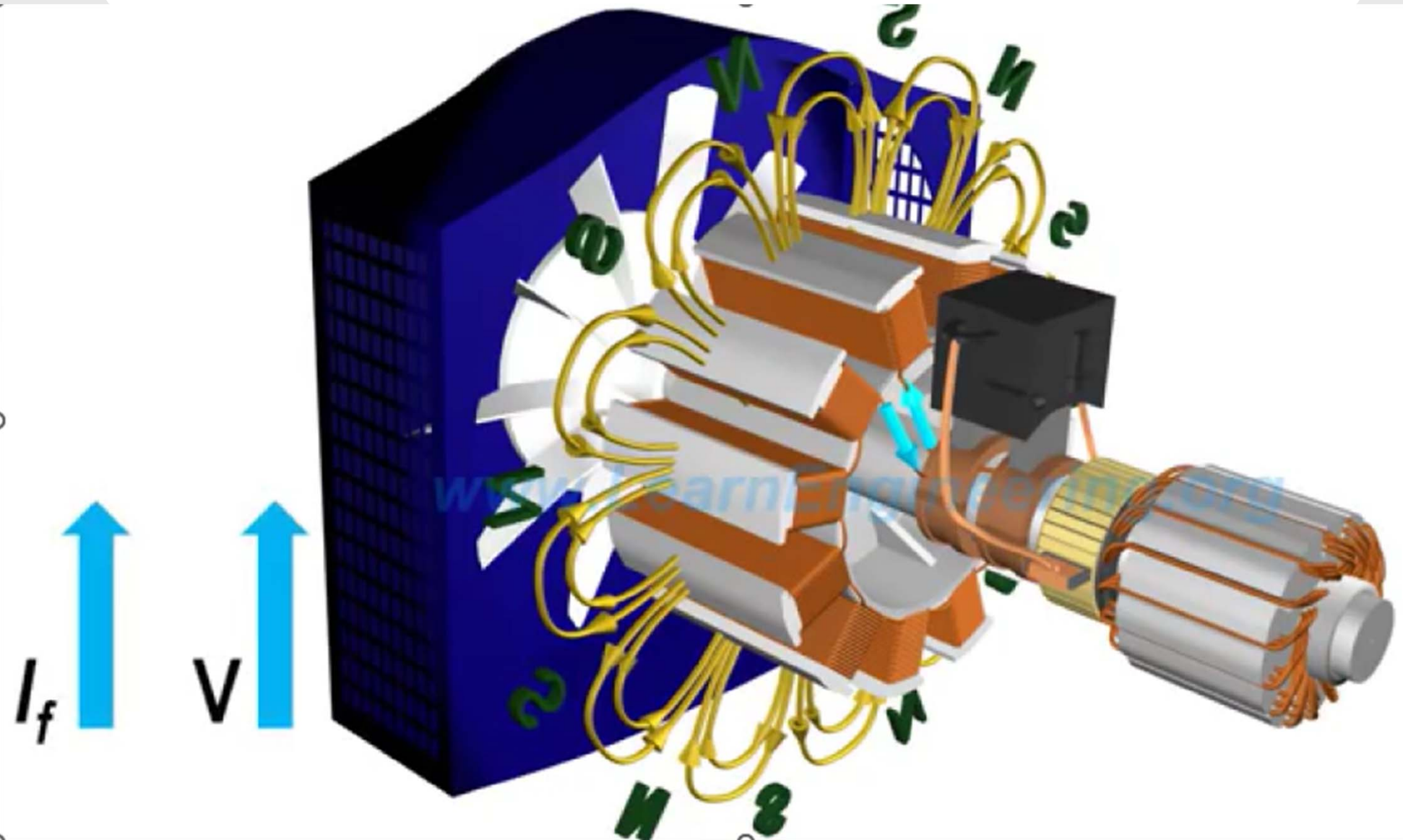
$X_q = X_{aq} + X_\sigma$ reprezintă reactanța sincronă transversală a mașinii



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

Film demonstrativ

- principiul de funcționare a mașinii sincrone -





Puterea și cuplul electromagnetic la mașina sincronă

Generatorul sincron

Cuprins



Expresia puterii și a cuplului electromagnetic

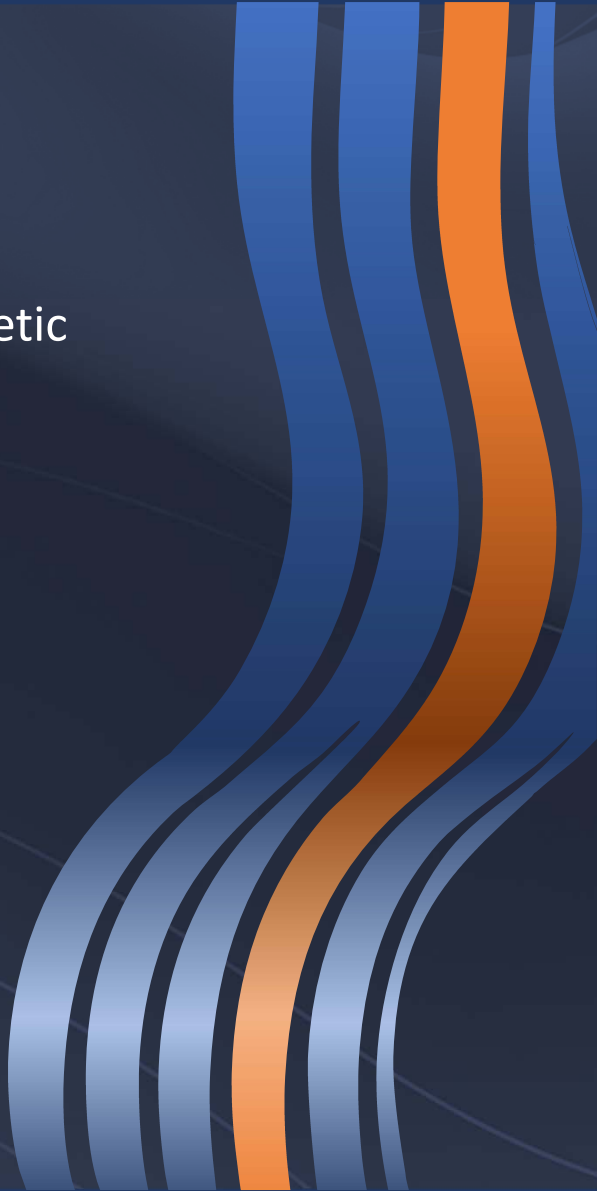
Caracteristica unghiulară

Generatorul sincron autonom



Generatorul sincron conectat la rețea

Cuplarea în paralel a generatoarelor
sincrone



Deducerea expresiilor puterii și cuplului electromagnetic la mașina sincronă cu poli aparenti

Deducerea expresiei puterii electromagnetice dezvoltate de o mașină sincronă pornește de la ecuația de tensiuni simplificată în care se neglijează termenul $R \cdot I_a$:

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

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

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

Folosind diagrama fazorială simplificată pentru exprimarea mărimilor din relația de mai sus, se obține expresia puterii:

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

Cele două componente au următoarea semnificație:

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

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

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

Expresia cuplului electromagnetic se obține din relația simplă:
 $= M_e \cdot \Omega$, respectiv:

P_e

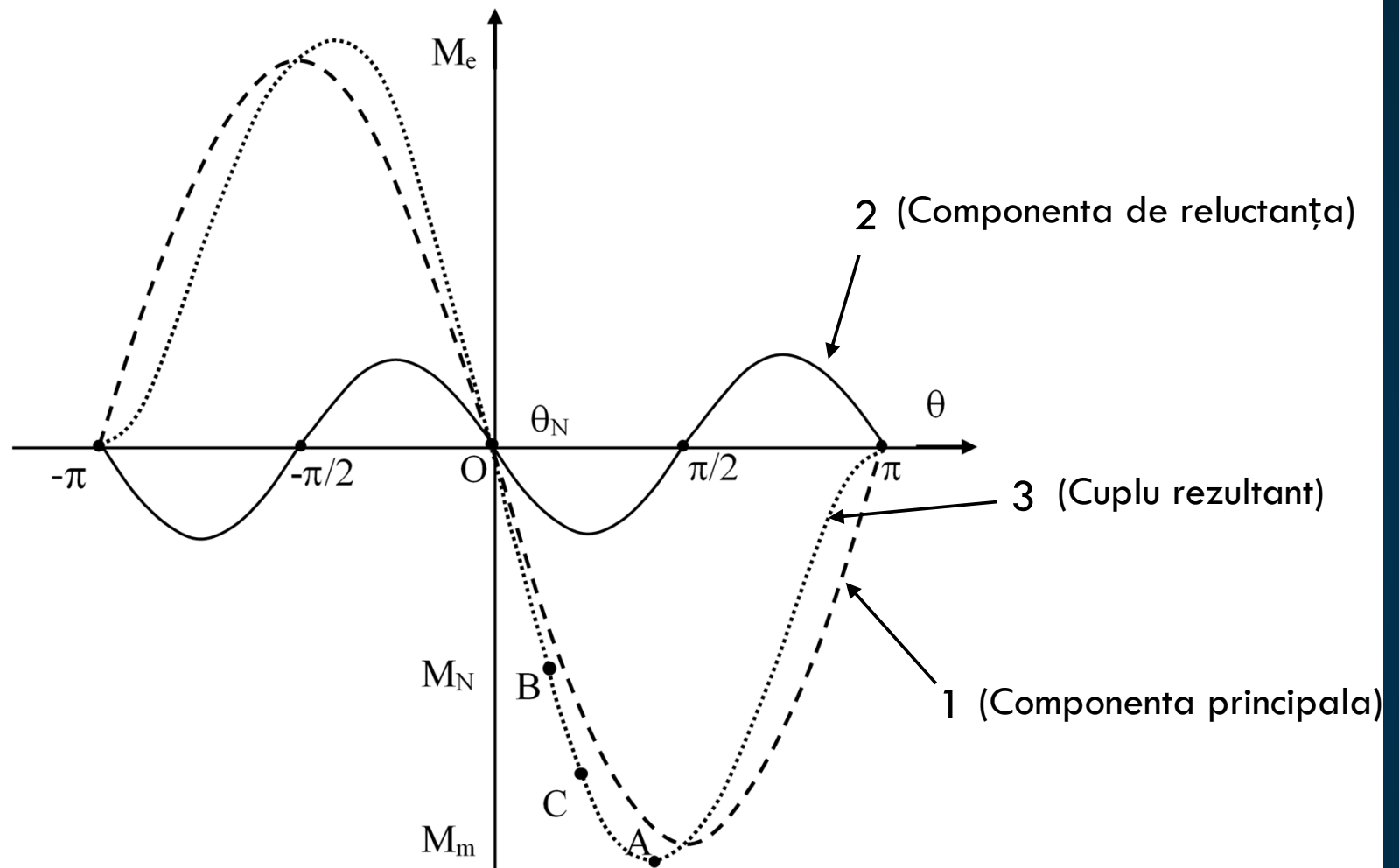
$$M_e = \frac{3}{\Omega} \left[\frac{UE_0}{X_d} \sin \theta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \right]$$



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

$$M_e = \frac{3}{\Omega} \cdot \frac{UE_0}{X_s} \sin \theta$$

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 unghiulară

Este o caracteristică specifică mașinii sincrone și care exprimă dependența *cuplului electromagnetic* dezvoltat de mașina sincronă în funcție de *unghiul intern*.

In regim de generator, cuplul electromagnetic se opune mișcării de antrenare a rotorului (și deci este considerat negativ) iar unghiul intern este pozitiv. Caracteristica unghiulară de funcționare este plasată în cadranul IV.

In regim de motor, cuplul electromagnetic antrenează în mișcare de rotație rotorul (și deci este considerat pozitiv) iar unghiul intern este negativ. Caracteristica unghiulară de funcționare este plasată în cadranul II.

Componenta principală a cuplului electromagnetic variază cu $(\sin \theta)$ - curba 1.

Componenta de reluctanță a cuplului electromagnetic variază cu $(\sin 2\theta)$ - curba 2.

Caracteristica unghiulară

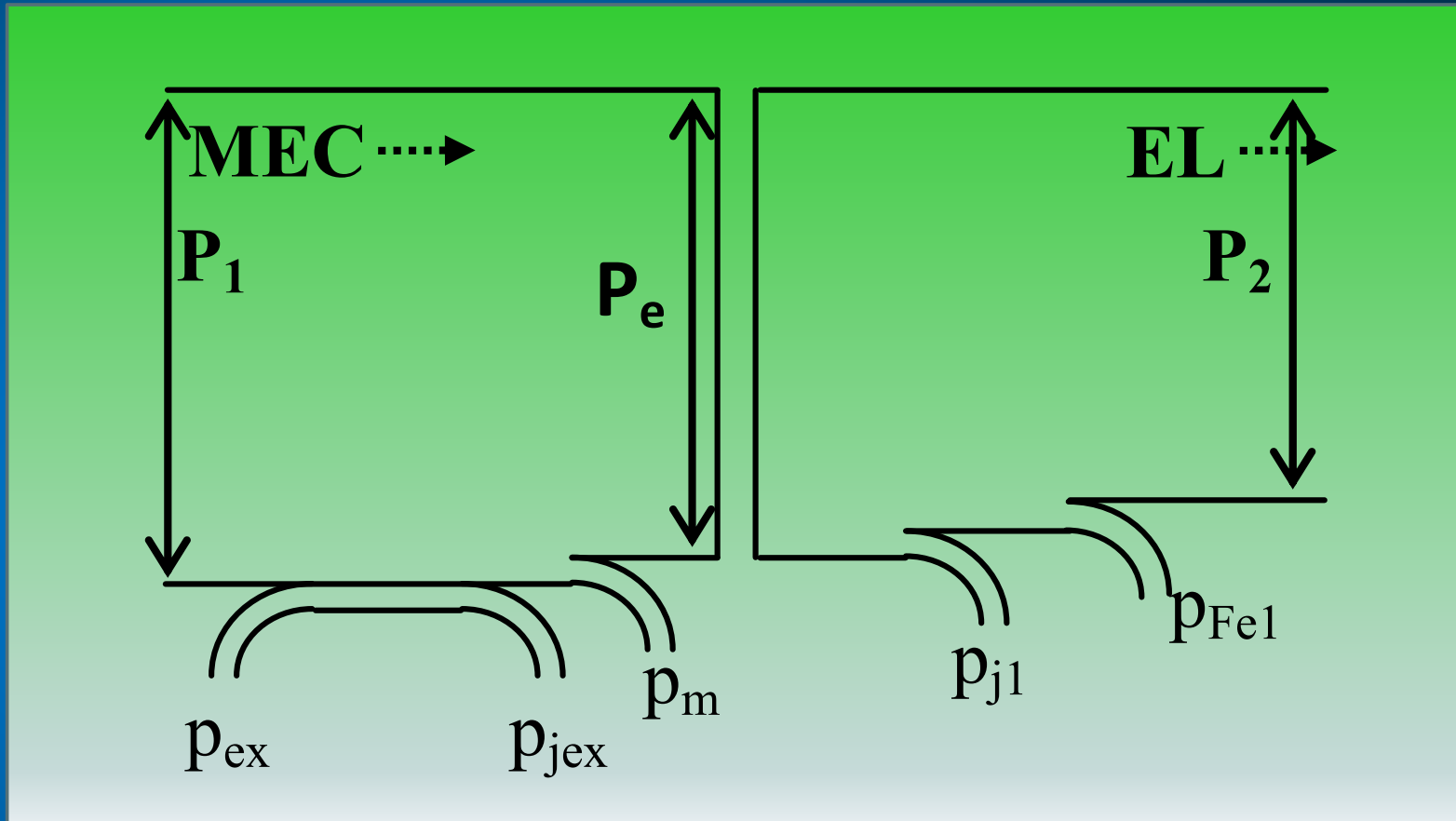
La mașina cu poli înecați ($X_d = X_q = X_s$) există doar componentă principală a cuplului electromagnetic. Caracteristica unghiulară este reprezentată de curba 1.

La mașina cu poli aparenti ($X_d > X_q$), există atât componenta principală a cuplului electromagnetic cât și o componentă de reluctanță. Caracteristica unghiulară se obține prin compunerea curbelor 1 și 2, rezultând curba 3.

În regim de generator, punctul B de pe caracteristica unghiulară a mașinii cu poli înecați reprezintă funcționarea la nominal, de exemplu. Mașina poate funcționa și la suprasarcină (un timp scurt), de exemplu în punctul C. Funcționarea limită la suprasarcină are loc în punctul A. Dacă cuplul rezistent depășește valoarea corespunzătoare punctului A, mașina decroșează (scade turația până la oprire însă, atenție, este un regim de avarie ce poate deteriora mașina electrică).

La mașina cu poli înecați, unghiul intern maxim este de $\pi/2$. La mașina cu poli aparenti, unghiul intern maxim este mai mic de $\pi/2$ (în funcție de amplitudinea componentei de reluctanță).

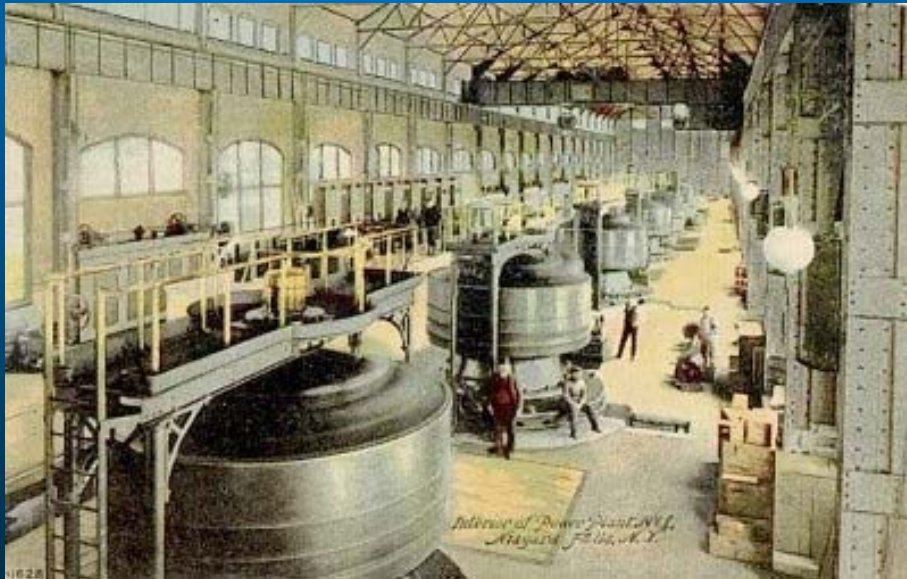
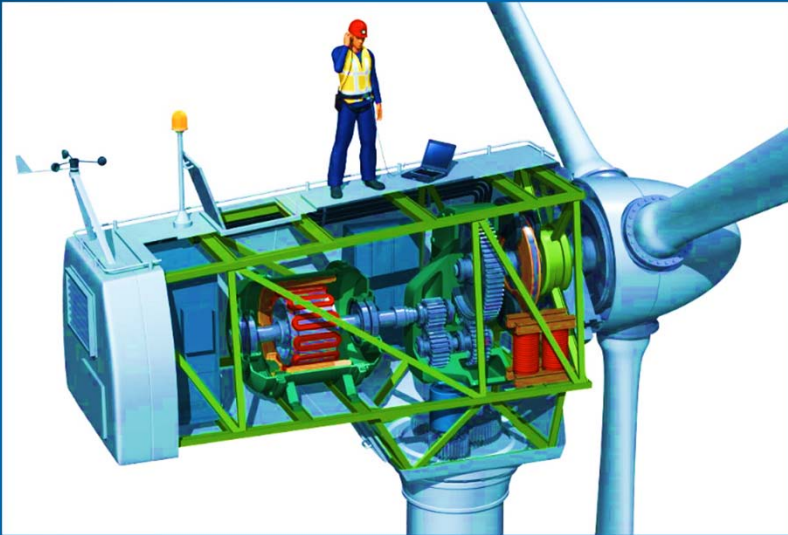
Diagrama echilibrului de puteri pentru regimul de generator



- 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



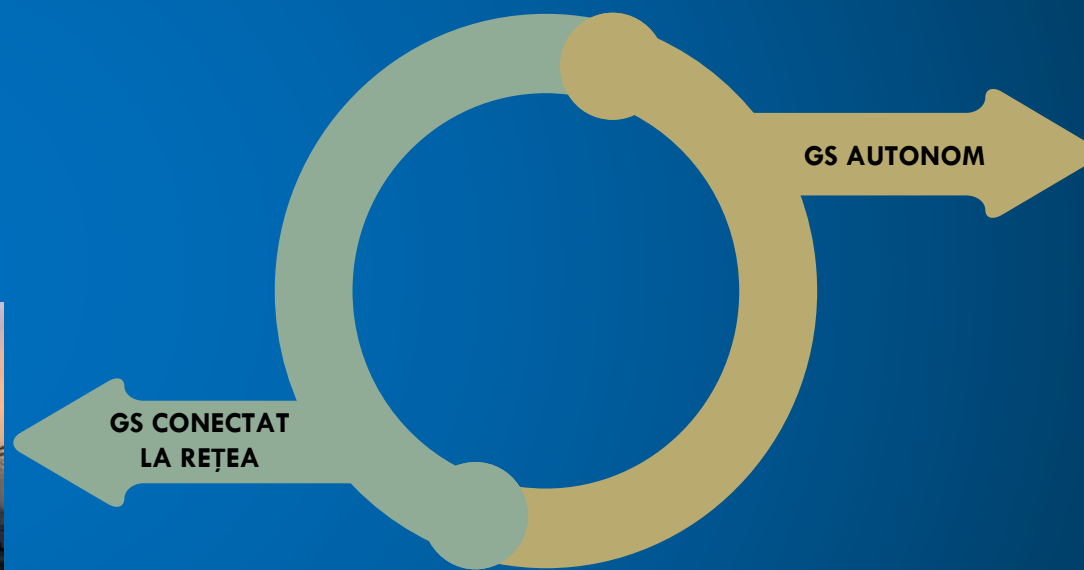
Regimul de generator este caracterizat de:

- Antrenarea mașinii din exterior;
- Primește putere mecanică pe la arbore și cedează putere electrică pe la borne;
- Unghiul intern este pozitiv ($\theta > 0$), respectiv câmpul inductor este în avans față de câmpul rezultat.

TIPURI DE FUNCȚIONARE



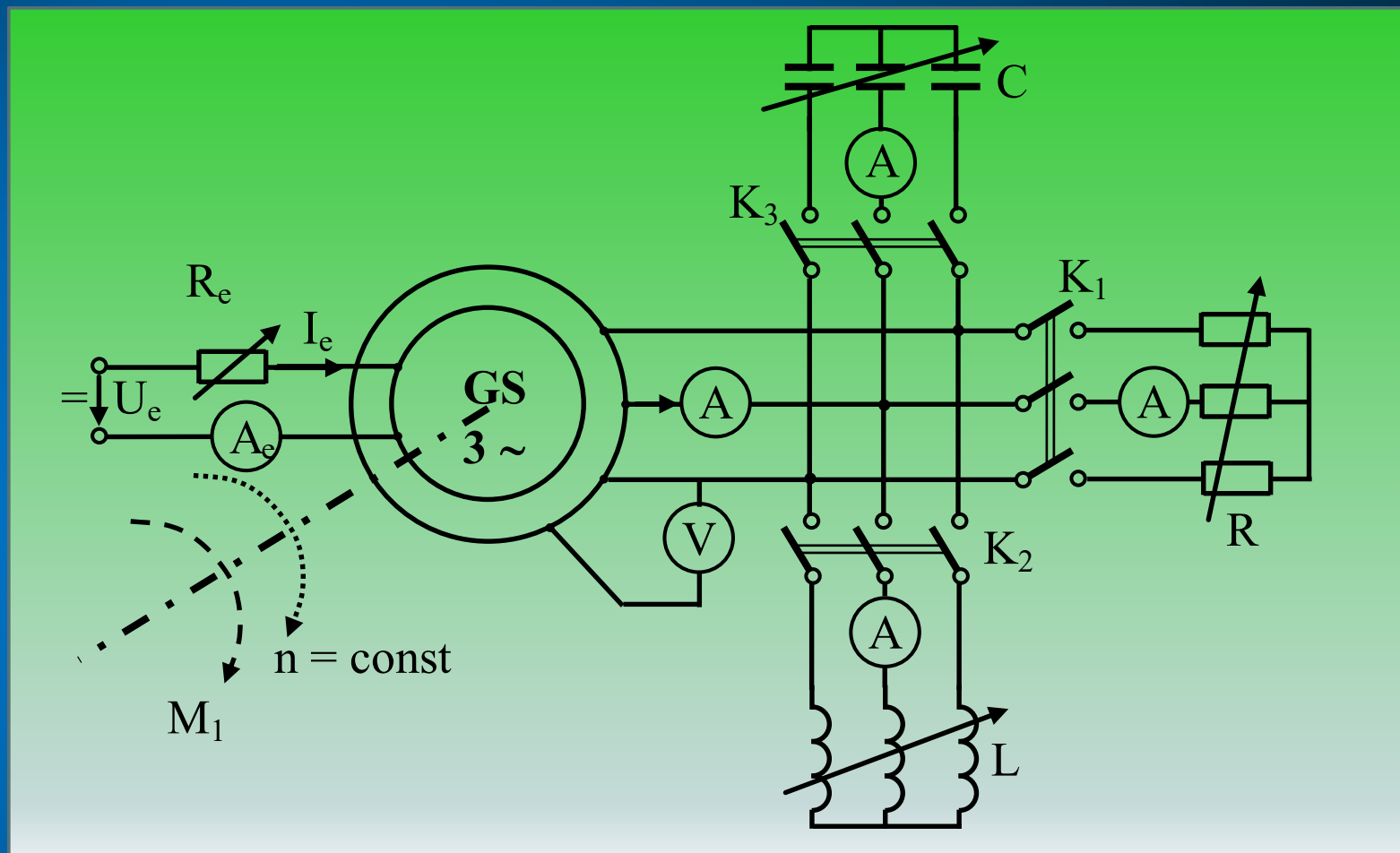
**GS CONECTAT
LA REȚEA**



GS AUTONOM



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 rotorică);

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

P_2 – puterea electrică disponibilă la bornele generatorului;

Θ - unghiul intern;

$\cos\varphi$ - factorul de putere;

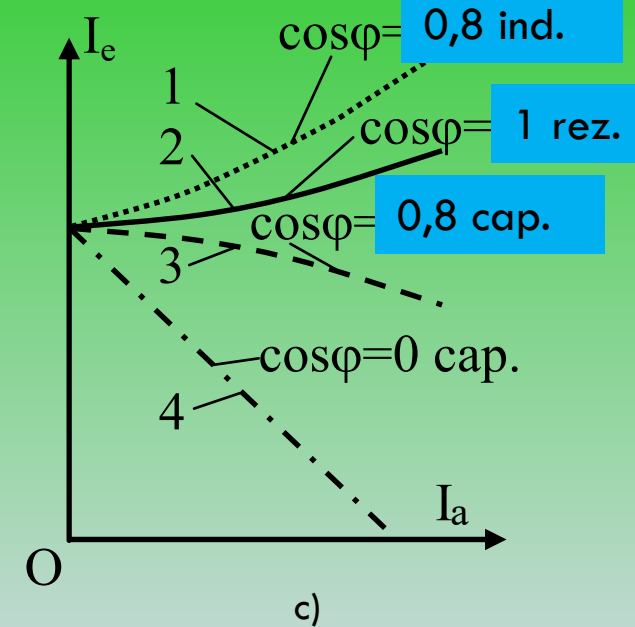
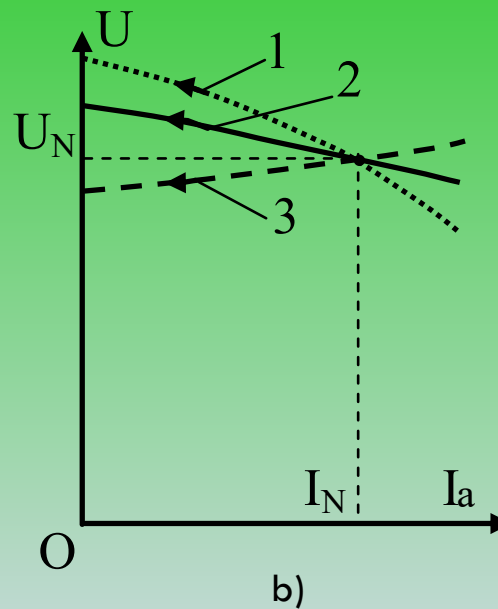
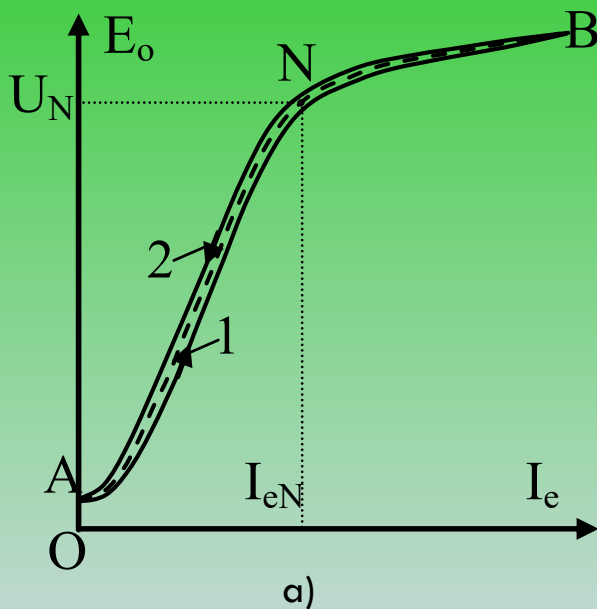
f – frecvența tensiunii la bornele generatorului.

Cele mai importante caracteristici de funcționare:

a) Caracteristica de funcționare in 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 în gol** care indică modul de variație a tensiunii induse în 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 CREȘTE 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**.

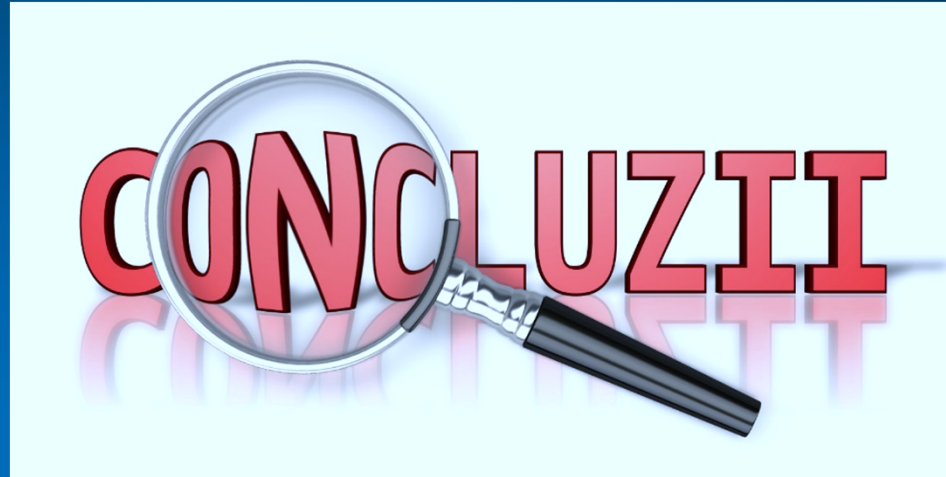
Evident, curentul de excitație trebuie crescut odată cu sarcina, dacă aceasta are caracter activ sau activ-inductiv, respectiv trebuie scăzut pentru sarcini capacitive.

Particularitățile funcționării autonome

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

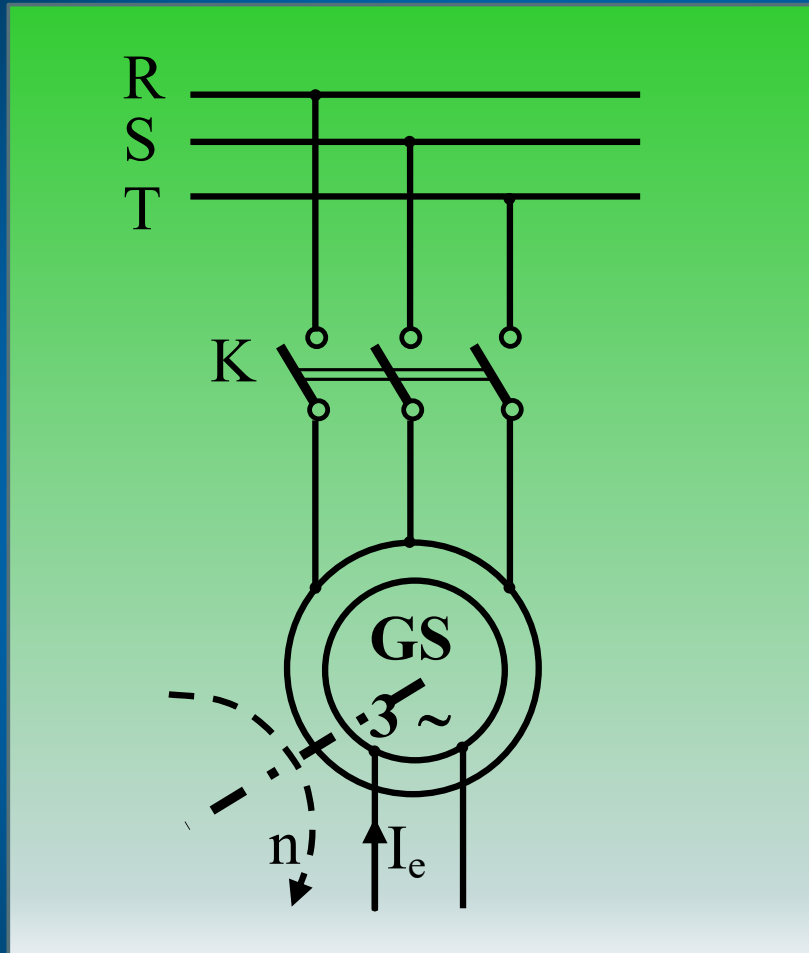
$$f = \frac{p \cdot n}{60}$$

- 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. „Funcționarea la sincronism” a generatorului sincron autonom rămâne un concept valabil cu mențiunea că viteza de sincronism este fixată de mașina de antrenare la orice valoare
- 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.

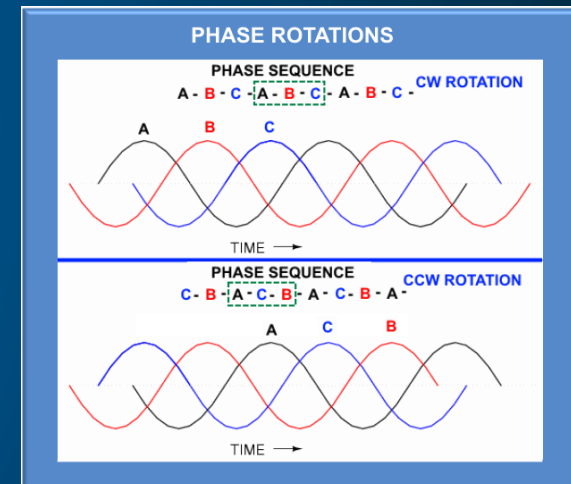
Închiderea întrerupătorului K, de cuplare a generatorului la rețea, nu se poate face decât dacă energia electrică produsă de generator este compatibilă cu cea a rețelei.

Cu alte cuvinte, înainte de închiderea întrerupătorului K, trebuie îndeplinite anumite condiții denumite *condiții de cuplare în paralel*.

II. Funcționarea în paralel pe o rețea

Condiții de cuplare in paralel

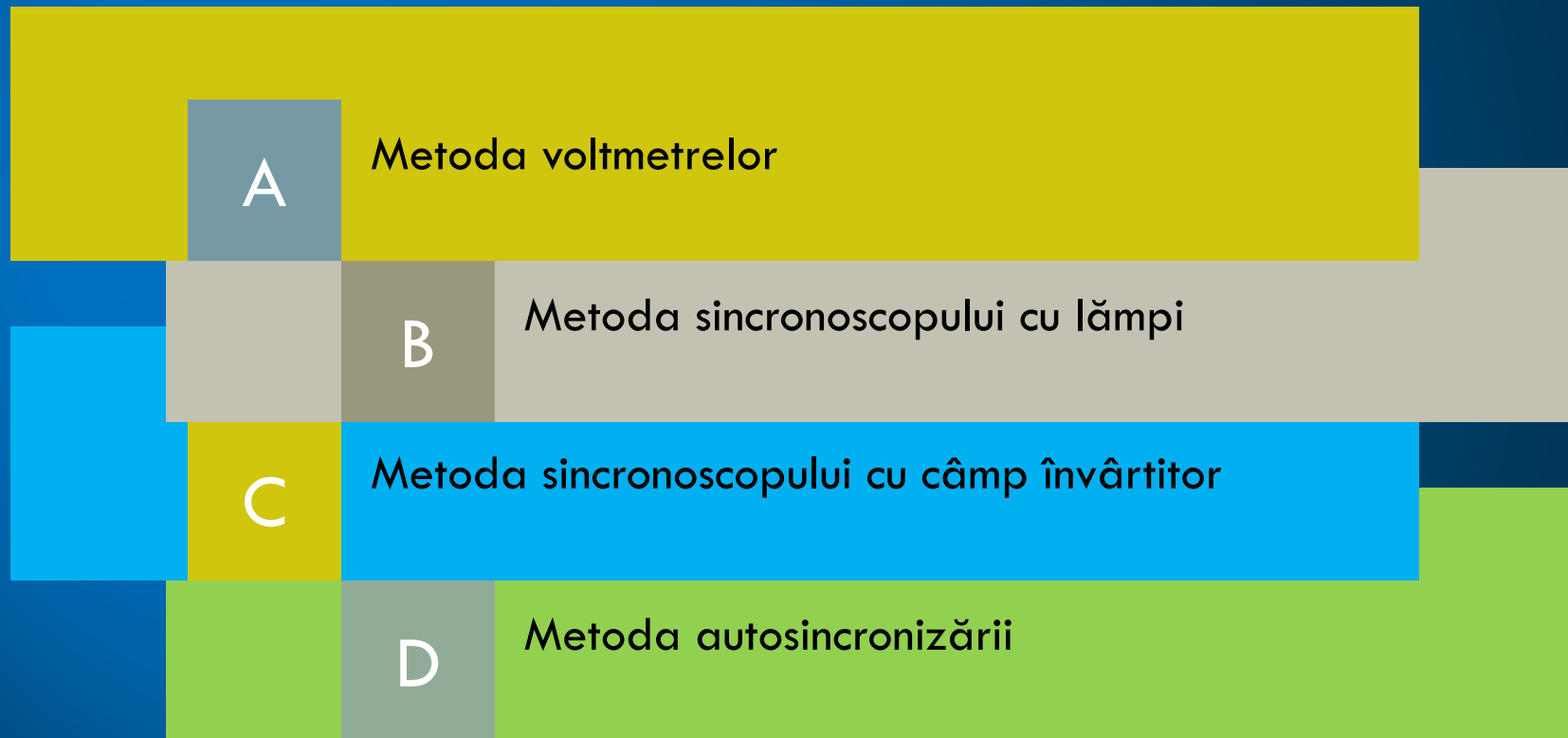
1. Egalitatea valorilor efective ale TENSIUNILOR (rețelei și generatorului)
2. Egalitatea FRECVENȚELOR tensiunilor
3. Aceeași ordine de succesiune a fazelor
4. Același tip de variație a tensiunilor (de preferință sinusoidală)



Momentul cuplării: când tensiunile sunt în fază

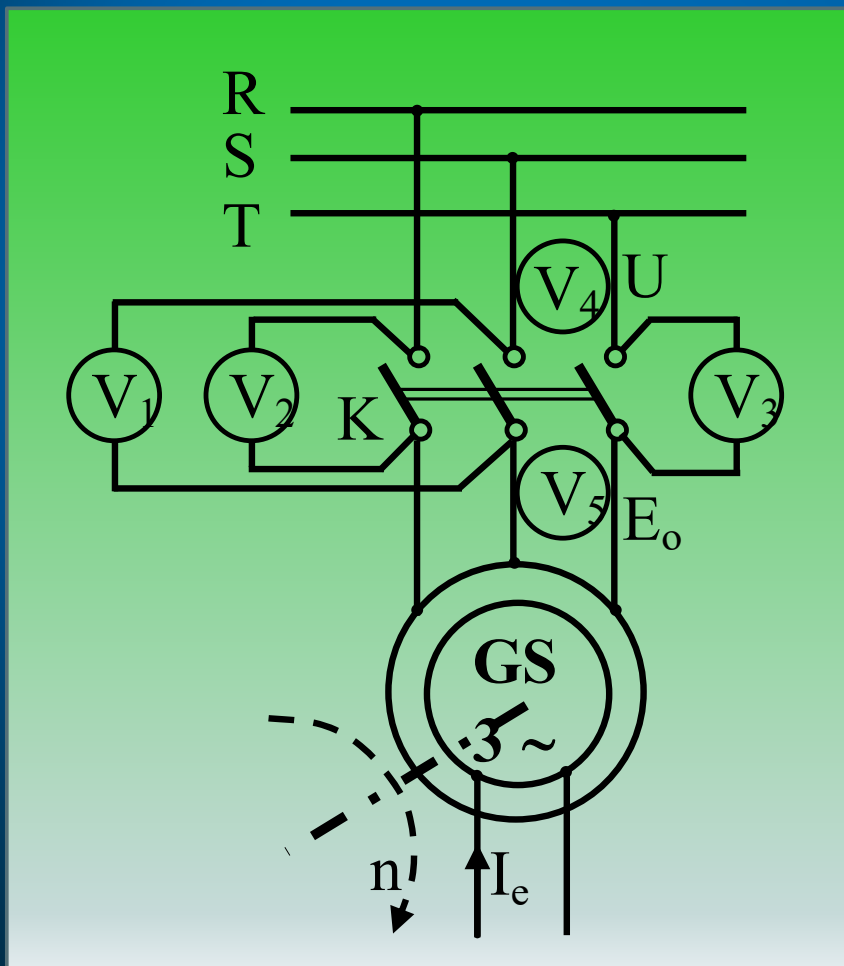
METODE DE SINCRONIZARE

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

În cazul în 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.*

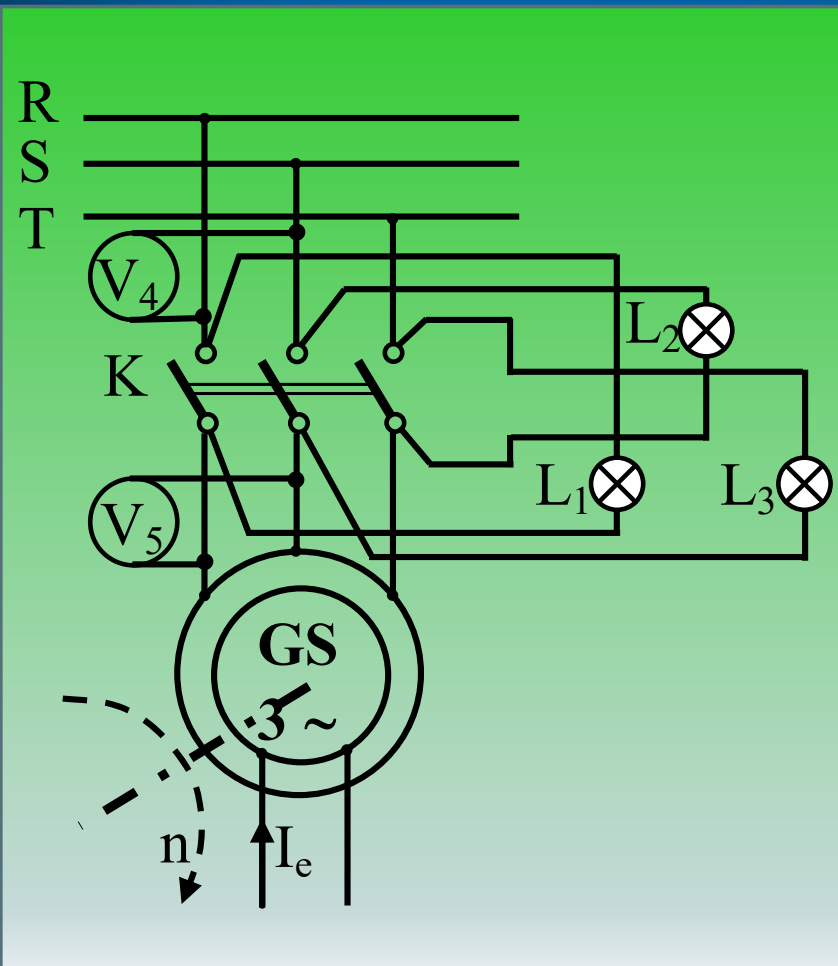
3'. Dacă acele voltmetrelor nu oscilează toate în același sens, simultan: *Se inversează două faze la bornele întrerupătorului K , fie de la generator fie de la rețea.*



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. V_4 și V_5 indică aceeași valoare

2. Lămpile L_1 , L_2 și L_3 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 L_1 se stinge

1'. Tensiunea V_5 se modifică din turație și din curentul de excitație

2'. Frecvențele se aduc la aceeași valoare din turație

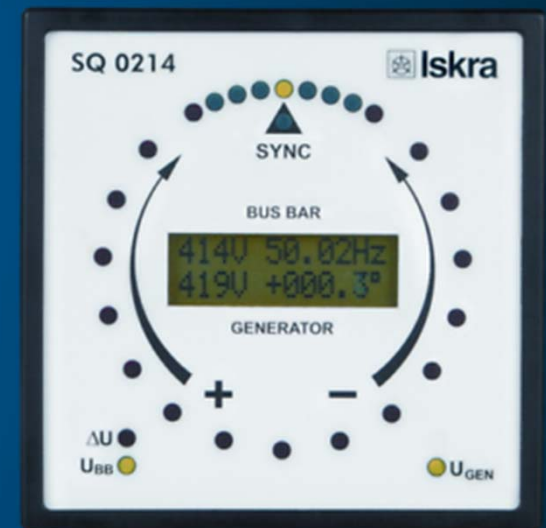
3'. Se inversează două faze la generator sau rețea

C. Metoda sincronoscopului cu câmp învârtitor

Rotirea acului 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.

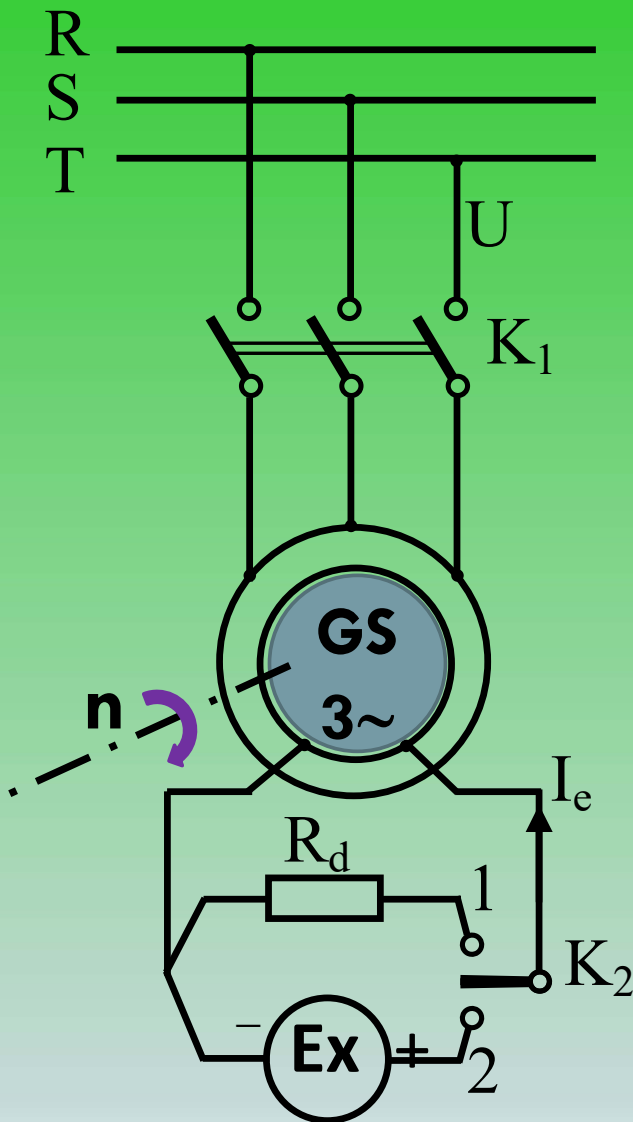
Modificând turația generatorului se obține încetinirea rotirii acului indicator.

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



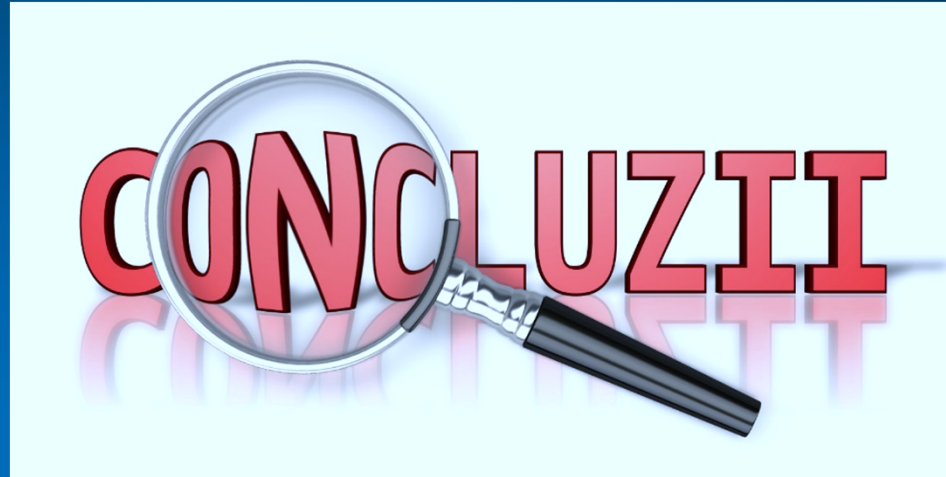
1. Se conectează înfășurarea de excitație pe o rezistență de protecție – K_2 poziția 1
2. Se antrenează generatorul până la o turație apropiată de sincronism
3. Se conectează K_1
4. Se conectează excitația – K_2 pe poziția 2
5. Apar oscilații ale rotorului după care mașina se sincronizează



Metoda se poate aplica NUMAI dacă, în prealabil, s-a creat aceeași succesiune a fazelor (pentru generator și rețea).

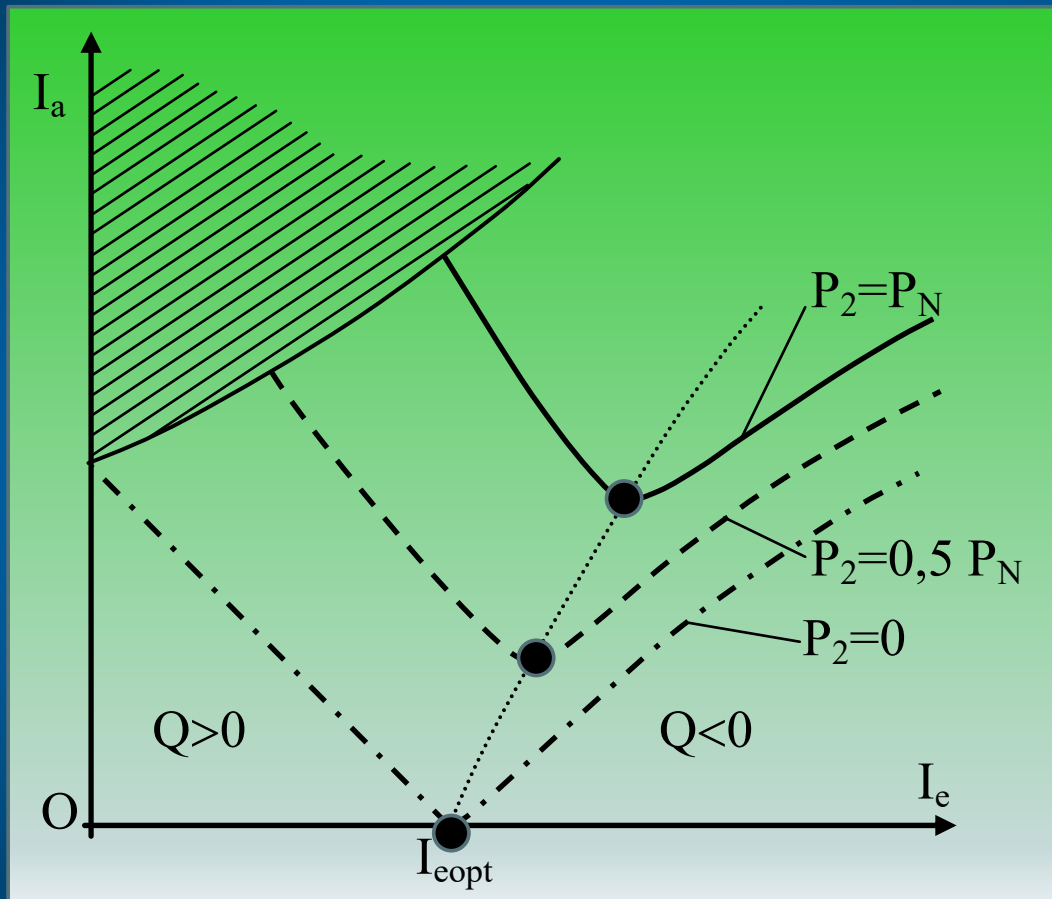
Consecințe ale nerespectării condițiilor de cuplare în paralel

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 în 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 și anume valoarea impusă de frecvența tensiunii rețelei**
- b) **TENSIUNEA la bornele mașinii este constantă și egală cu tensiunea rețelei**
- c) **FRECVENȚA la bornele mașinii este constantă și egală cu frecvența rețelei**

Funcționarea la putere constantă și curent de excitație variabil

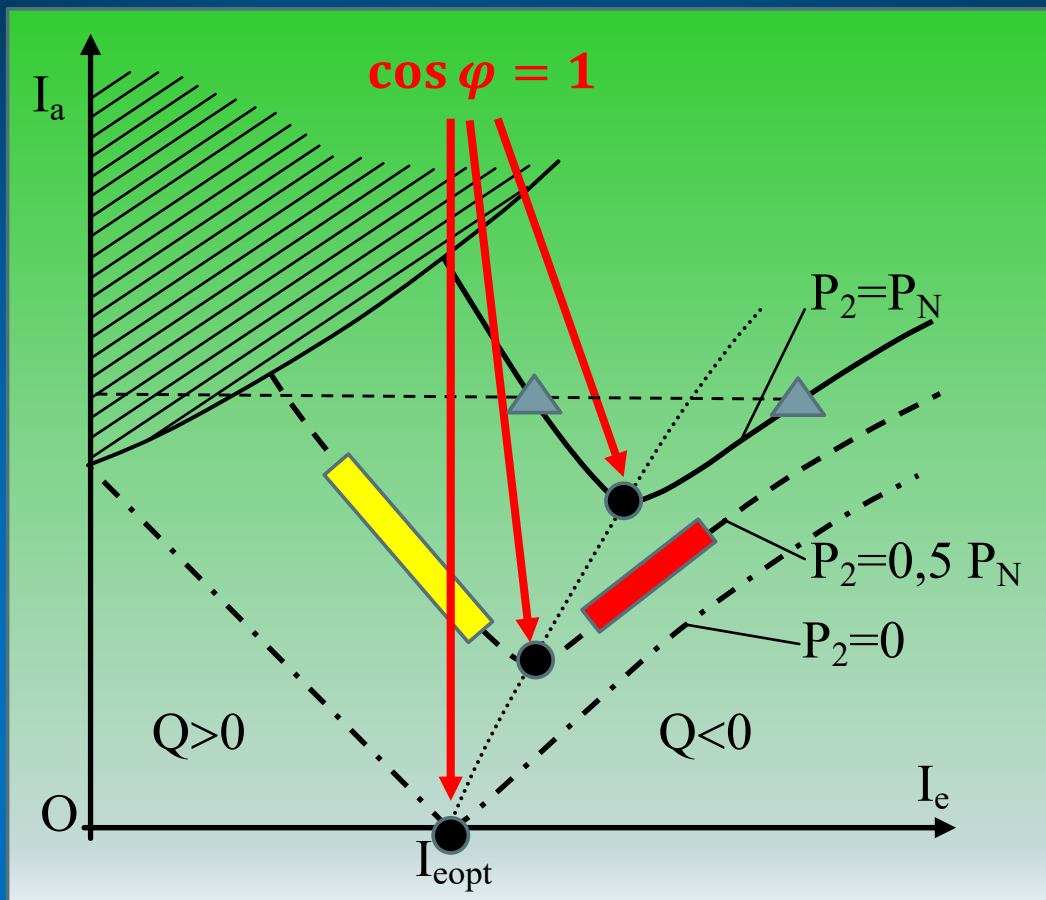


Curbele în V

Acest tip de funcționare arată dependența $I_a = f(I_e)$ atunci când mașina funcționează la putere furnizată constantă.

Se obțin așa numitele „curbe în 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 și curent de excitație variabil

- comentarii -

1. Generatorul sincron poate furniza aceeași putere (tensiunea menținându-se constantă 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 în rețea și a unei componente reactive de energie. Soluția este utilă pentru îmbunătățirea factorului de putere în rețea.
4. Funcționare la $I_e < I_{eopt}$ este o opțiune dezavantajoasă întrucât mașina funcționează la un curent statoric mai mare și în plus absoarbe putere reactivă din rețea.



Caracteristică unghiulară



Unghi intern pozitiv



Curent de excitație optim



Curbe în V



Sincronizare la rețea



Motorul sincron

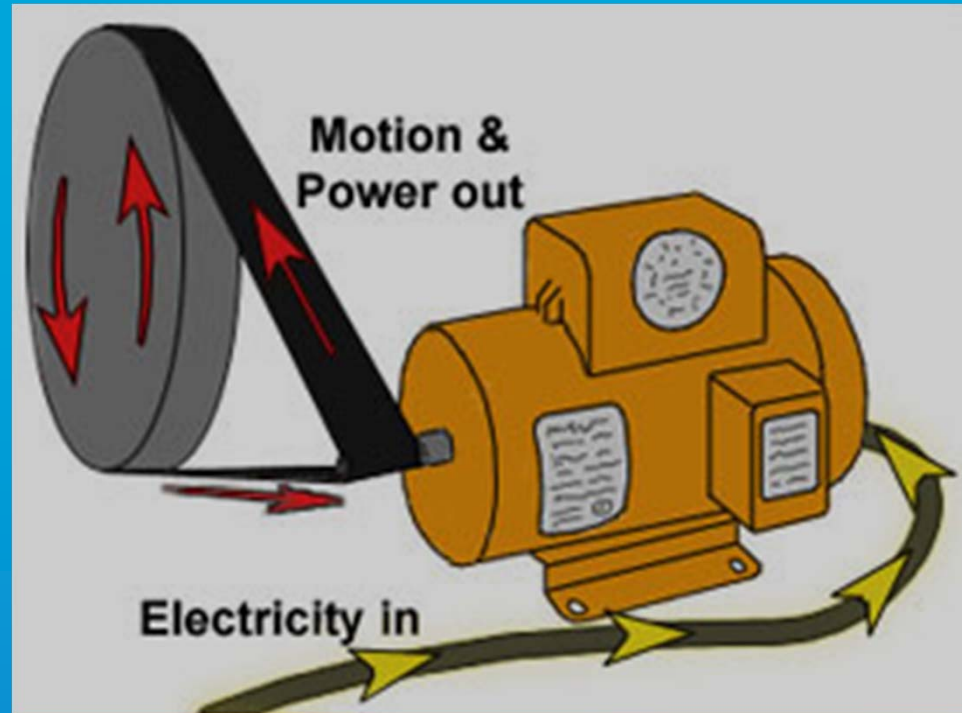
Cuprins



**Principiul de
funcționare**

**Caracteristici
de funcționare**

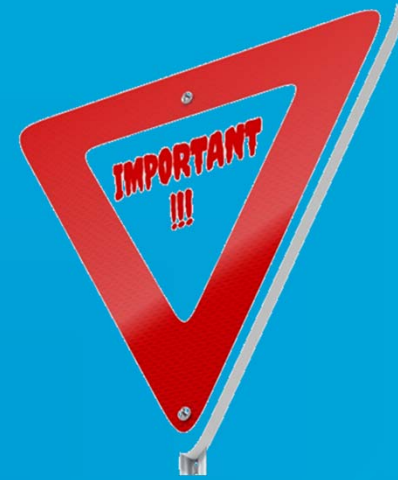
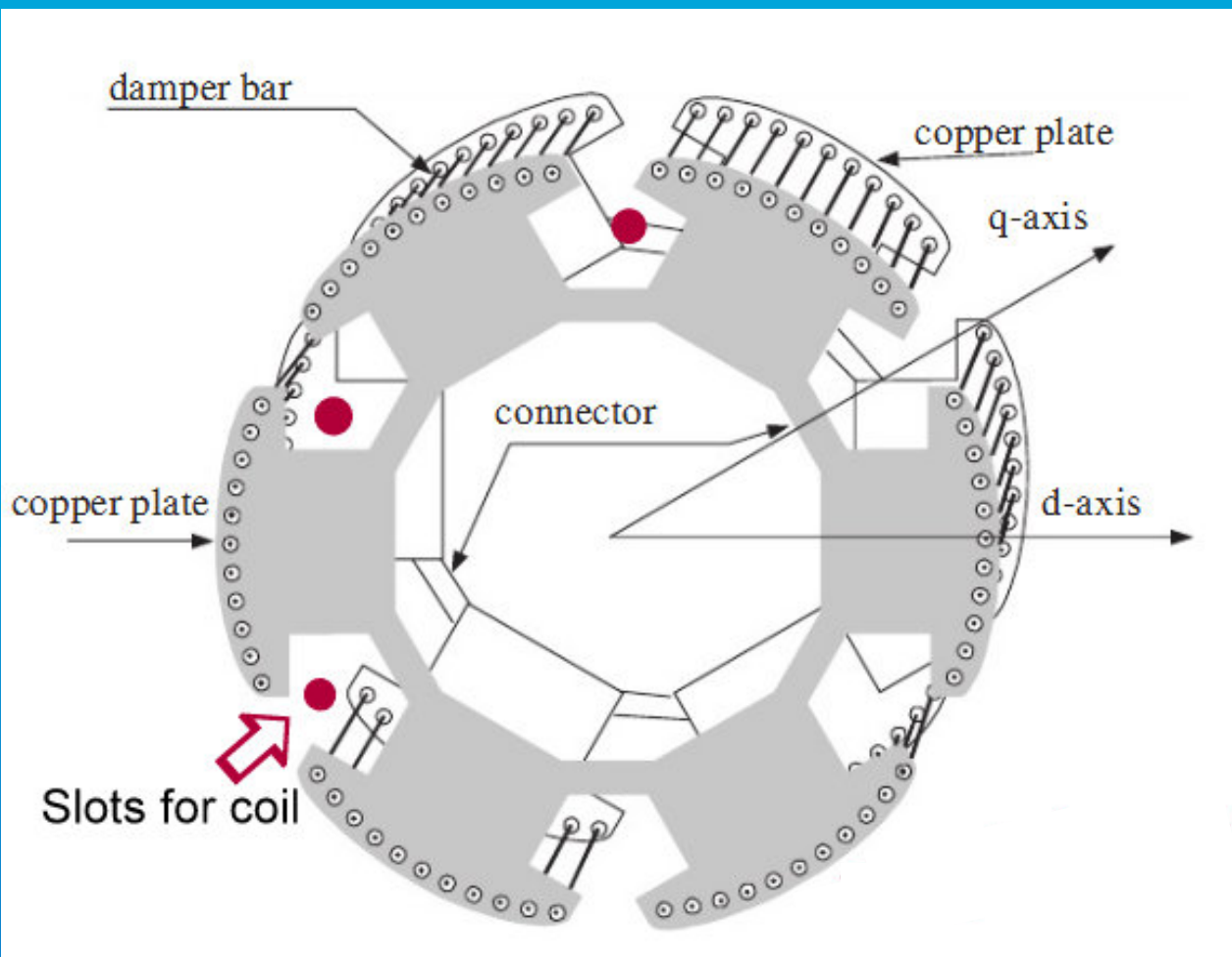
Pornirea motorului sincron



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.

În regim de motor, unghiul intern θ este negativ. Deci, câmpul rezultat Φ este defazat înaintea câmpului inductor Φ_0 .



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.

În cazul mașinii sincrone cu poli aparenti, sunt practicate crestături în piesele polare ale polilor inductori rotorici, în care sunt plasate bare de Cu sau Al, scurtcircuitate la capete (construcția este similară înfășurării în scurtcircuit de la mașina asincronă).

La mașina cu poli înecați, în istmurile crestăturilor rotorice sunt plasate pene feromagnetice. Acestea formează, de asemenea, o structură în scurtcircuit.

Cele două structuri descrise formează **înfășurarea de pornire** a mașinii sincrone funcționând în regim de motor.

Ele joacă, de asemenea, și rol de **înfășurare de amortizare** în ambele regimuri de funcționare a mașinii sincrone.

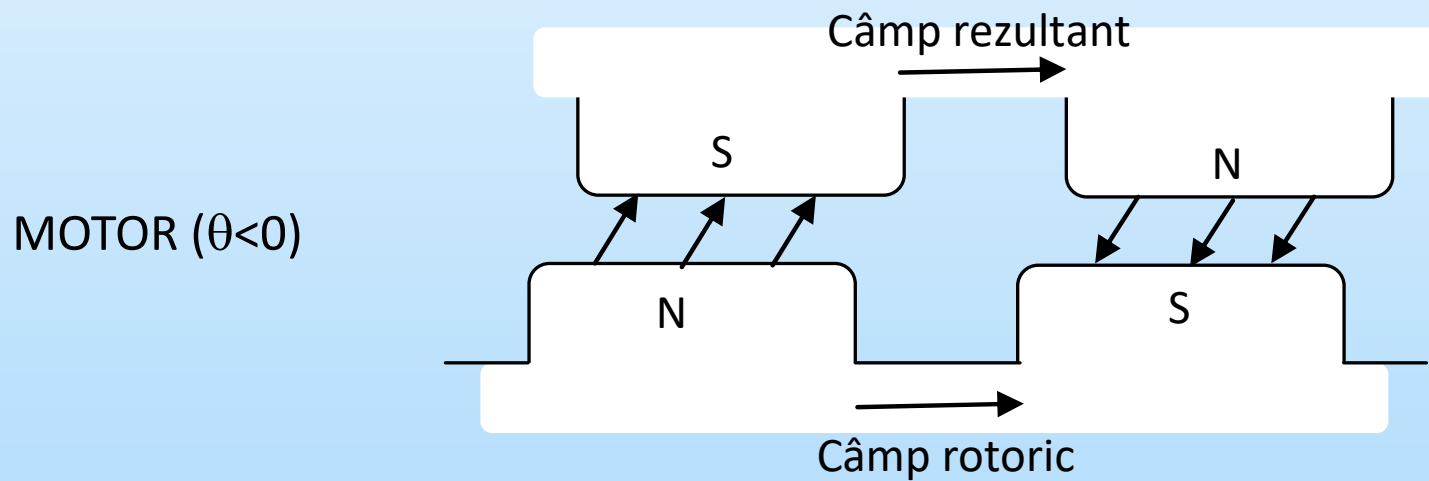
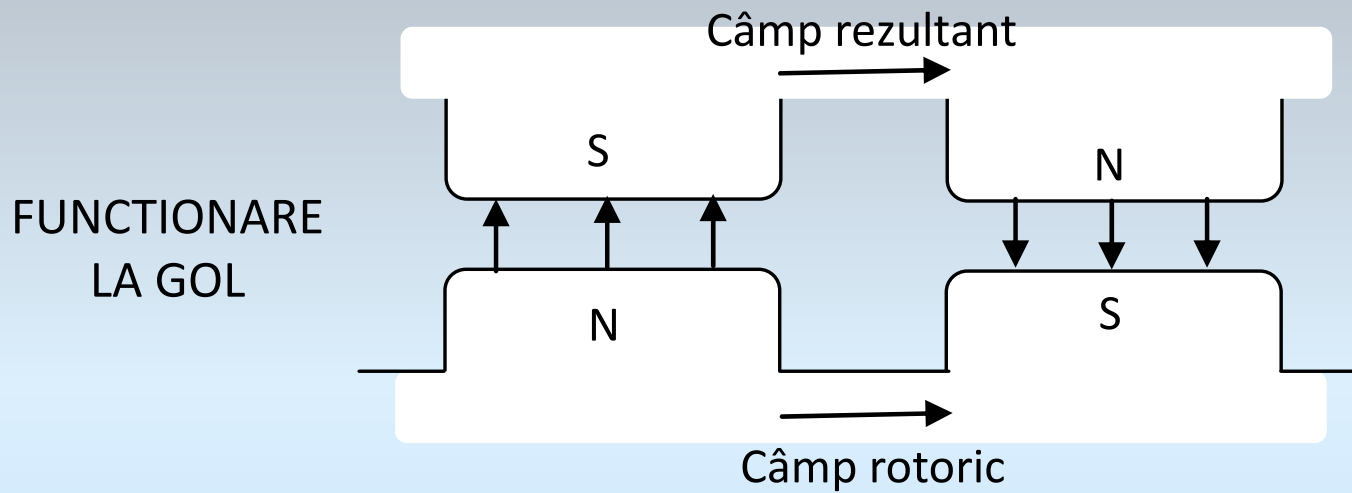
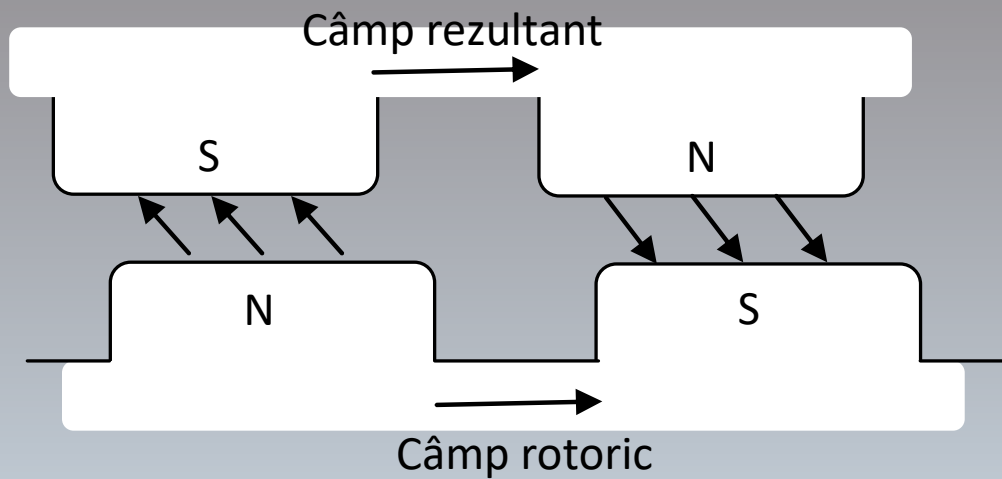
Această înfășurare NU joacă nici un rol atâta vreme cât mașina funcționează la sincronism (viteza relativă dintre câmpul învârtitor și rotor este zero, prin urmare nu se induc tensiuni și nu apar curenți).

Principiul de funcționare

1. Se alimentează înfășurare statorică de la o sursă de tensiune trifazată. Drept 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, rotoric și statoric, 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 rotoric de excitație (unghiul intern este negativ).



5. Motorul sincron dezvoltă cuplu electromagnetic NUMAI la sincronism.



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 principală a puterii electromagnetice:

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

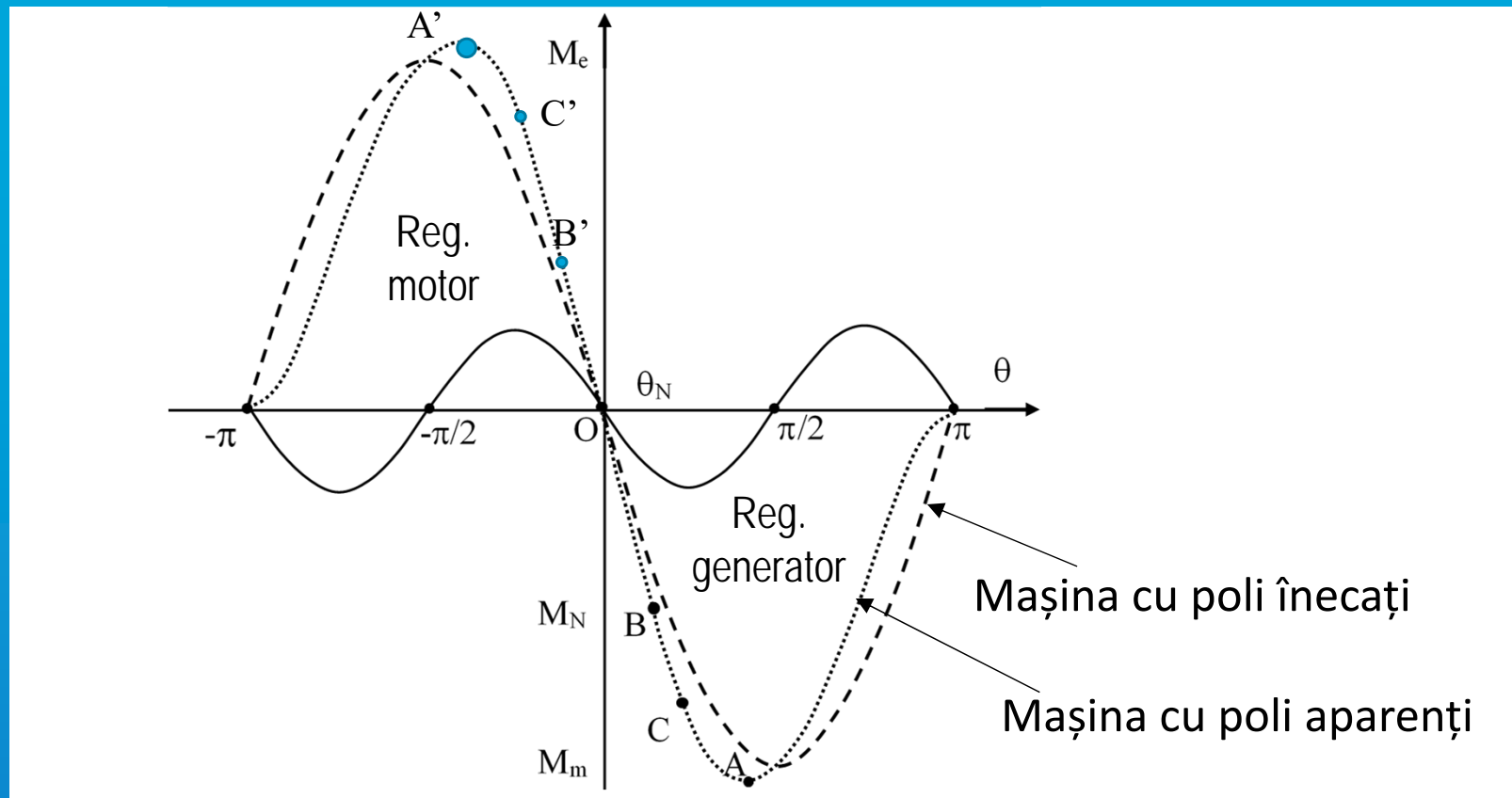
Componenta secundară (de reluctanță) a puterii electromagnetice ce apare numai la mașina cu poli aparenti:

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

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 $M_e=f(\theta)$



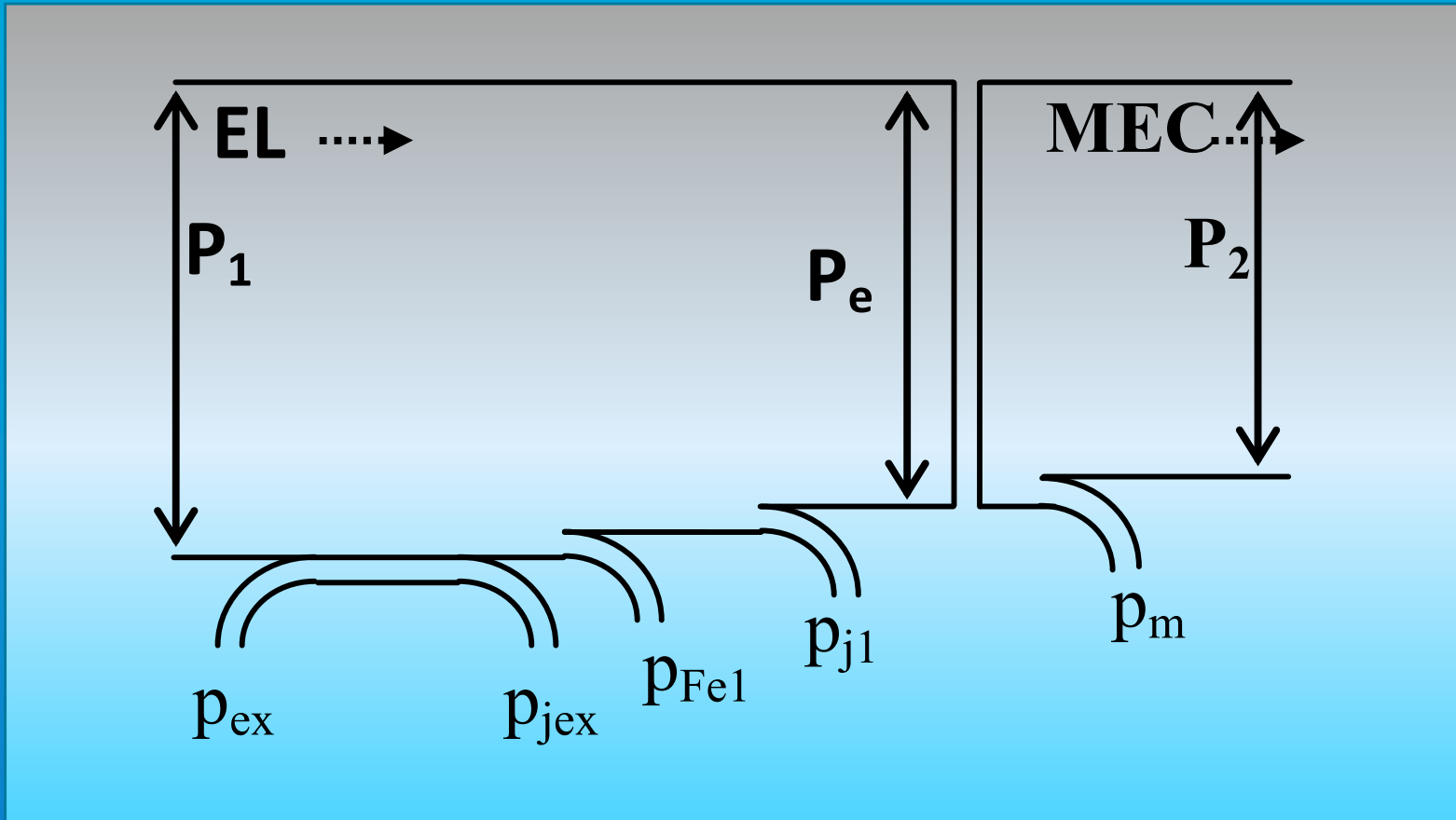
Zona de funcționare în regim de motor este situată în cadranul II ($M_e > 0$ și $\theta < 0$)

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.



Funcționarea mașinii sincrone în regim de **motor**, la **gol**, și **supraexcitat**, constituie regimul de COMPENSATOR SINCRON. El are drept scop îmbunătățirea factorului de putere al rețelei la care este conectată mașina sincronă.

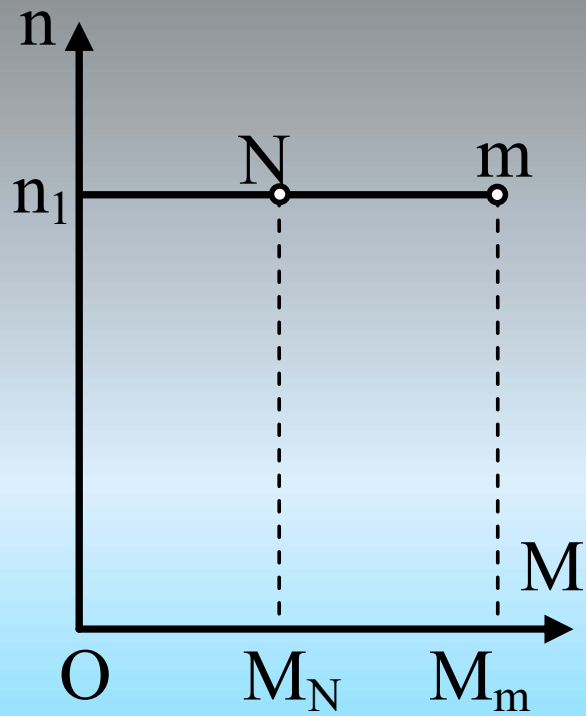
Diagrama bilanțului de puteri



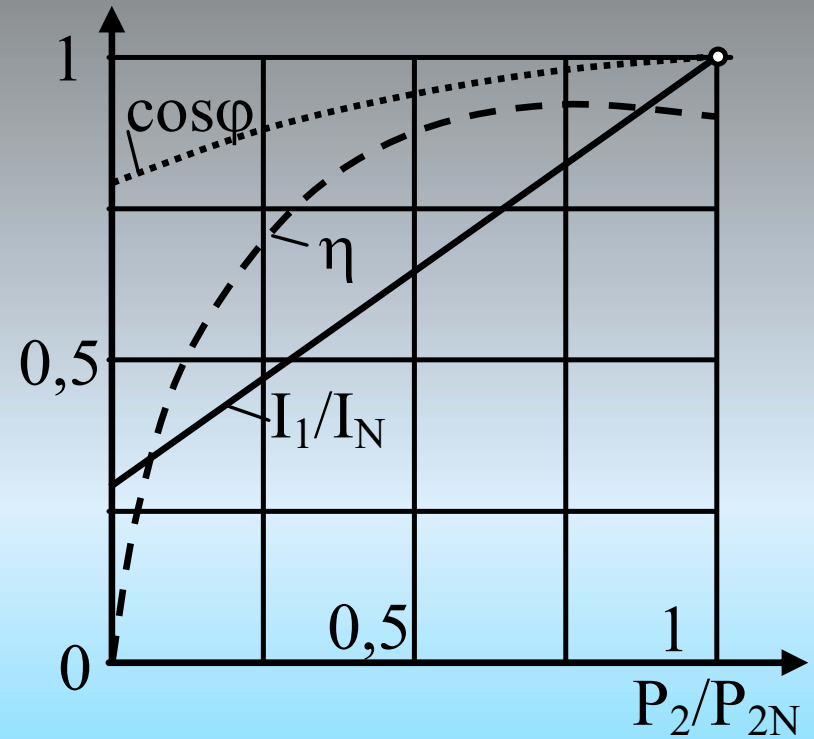
P_1 -puterea electrică absorbită; P_e -puterea electromagnetică; P_2 -puterea mecanică la ax;
 p_{jex} - pierderi în înfășurarea de excitație; p_{Fe1} -pierderi în fierul statoric; p_{j1} -pierderi în înfășurarea statorică; p_m -pierderi mecanice.

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

Caracteristicile de funcționare ale motorului sincron



a.



b.

- a. Caracteristica mecanică
- b. Caracteristici de performanță

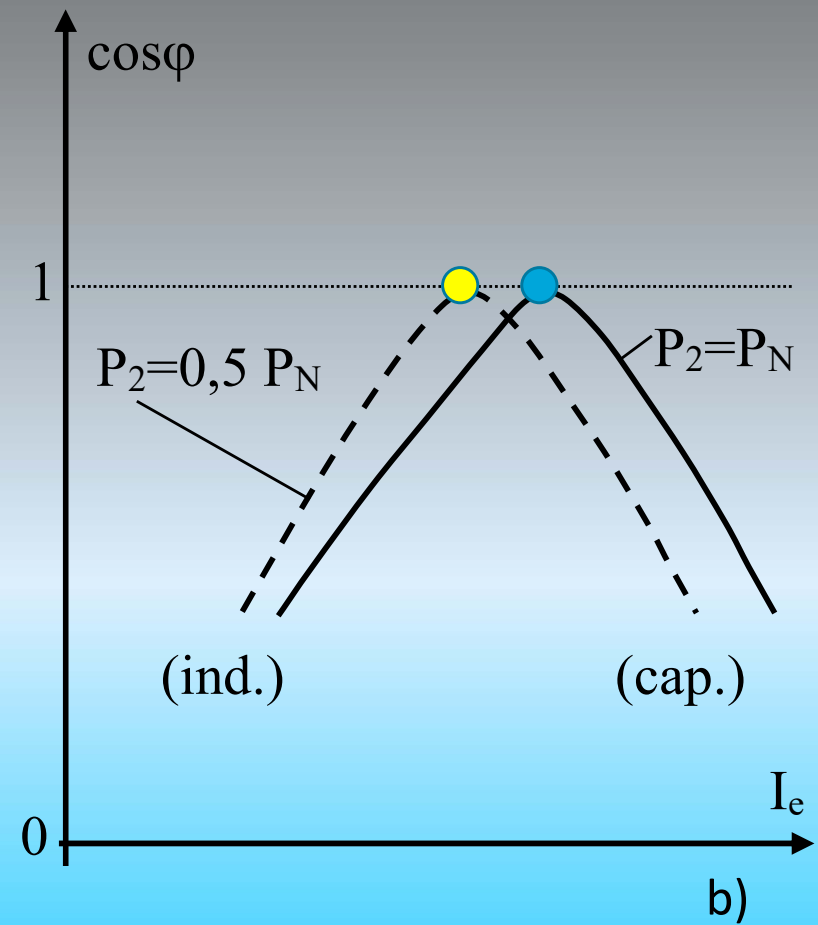
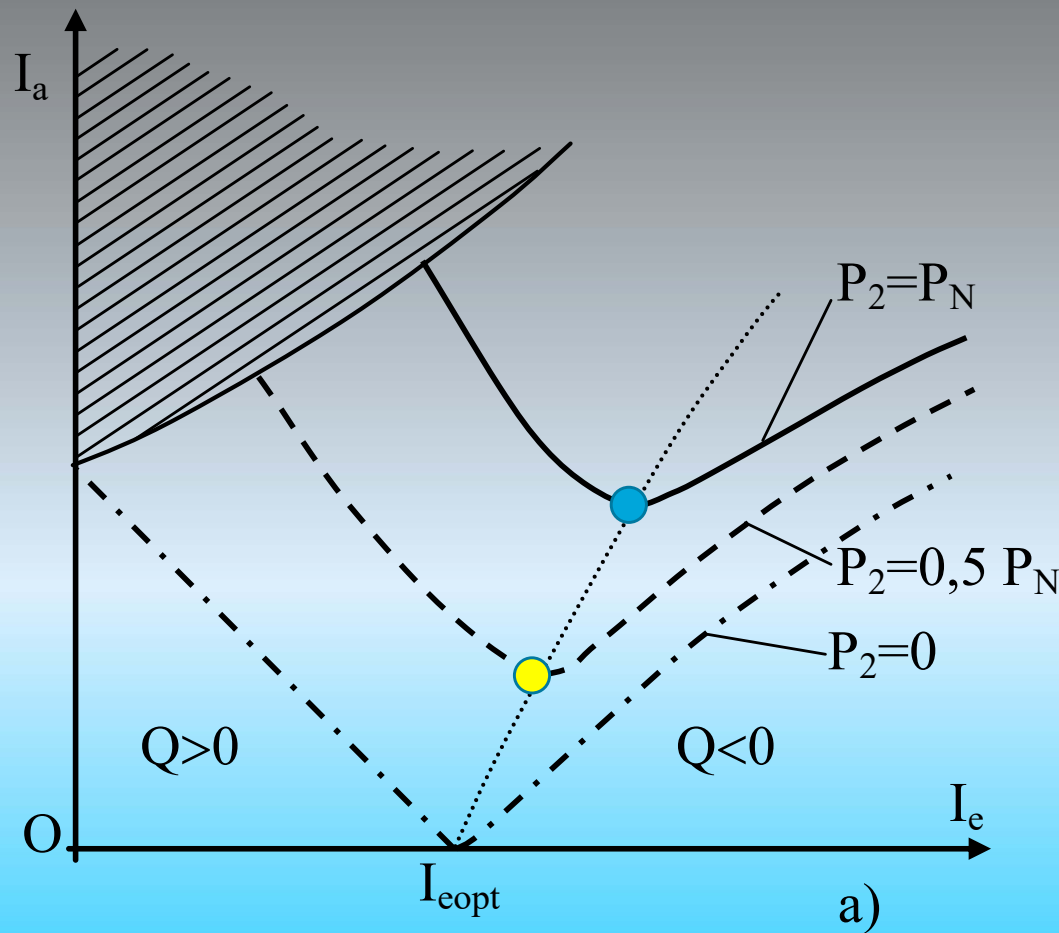
Caracteristica mecanică (fig. a) este o dreaptă paralelă cu abscisa, care subliniază faptul că motorul sincron își menține turația constantă indiferent de variația sarcinii între limitele „zero-cuplu maxim”. Punctul N corespunde funcționării la nominal iar punctul m semnalează funcționarea la cuplu maxim (între N și m este zona de funcționare la suprasarcină) .



Caracteristica factorului de putere evidențiază că motorul sincron poate funcționa și la factor de putere unitar.

Caracteristicile in "V"

- funcționare la putere constantă și curent de excitație variabil -



Când motorul sincron funcționează la putere electrică absorbită **CONSTANTA**, 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)

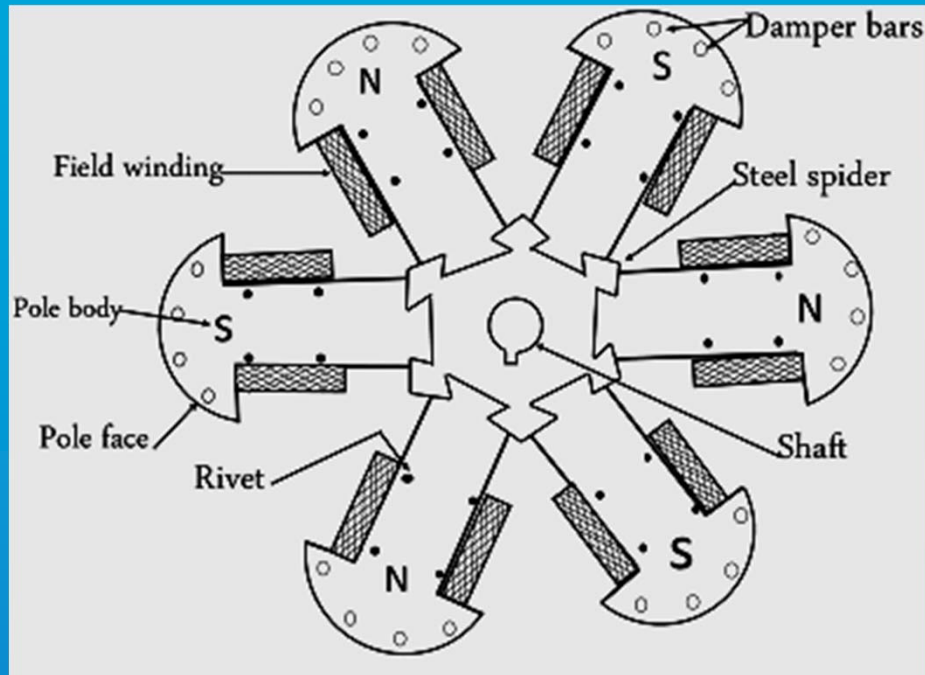
B

Pornirea cu frecvență și tensiune variabile (Se alimentează mașina sincronă, inițial, cu o tensiune de valoare mică și frecvență cât mai mică după care, dacă se reușește sincronizarea, se cresc valorile tensiunii și frecvenței până la nominal)

C

Pornirea în asincron

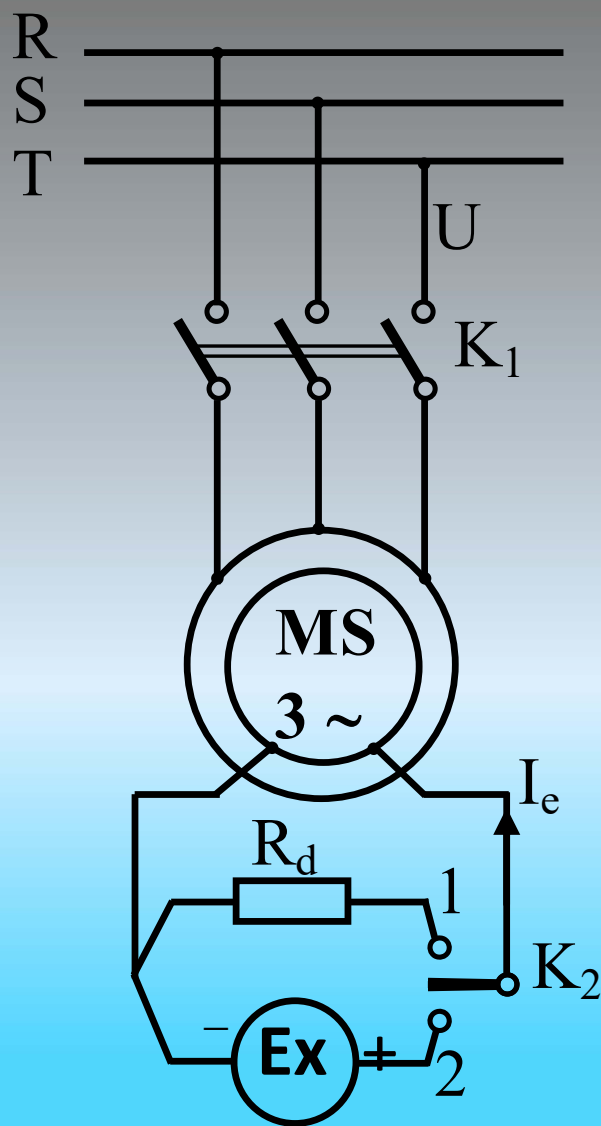
Pornirea în asincron



Pentru a putea fi pornită în asincron, mașina sincronă **TREBUIE** să aibă înfășurare de pornire.

Prin alimentarea înfășurării statorice de la rețea și apariția câmpului învârtitor, sunt create condițiile similare existente în motorul asincron.

Problema suplimentară ce trebuie rezolvată constă în protejarea înfășurării inductoare de pe polii rotorici și respectiv a sursei de alimentare a acesteia (excitatricea) întrucât, conform legii inducției electromagnetice, și în 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. (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.



Unghi intern negativ



Lipsa cuplu pornire



Înfășurare de pornire/amortizare



Pornire în asincron



Compensator sincron

Introduction





Mașina
de CC



Mașina electrică ce schimbă energie cu exteriorul (rețea de alimentare sau sarcină electrică) în **curent continuu.**

Elemente constructive

Stator (inductor)



1

Rotor (indus)



2

**Sistem colector + perii (redresor sau
invertor mecanic)**

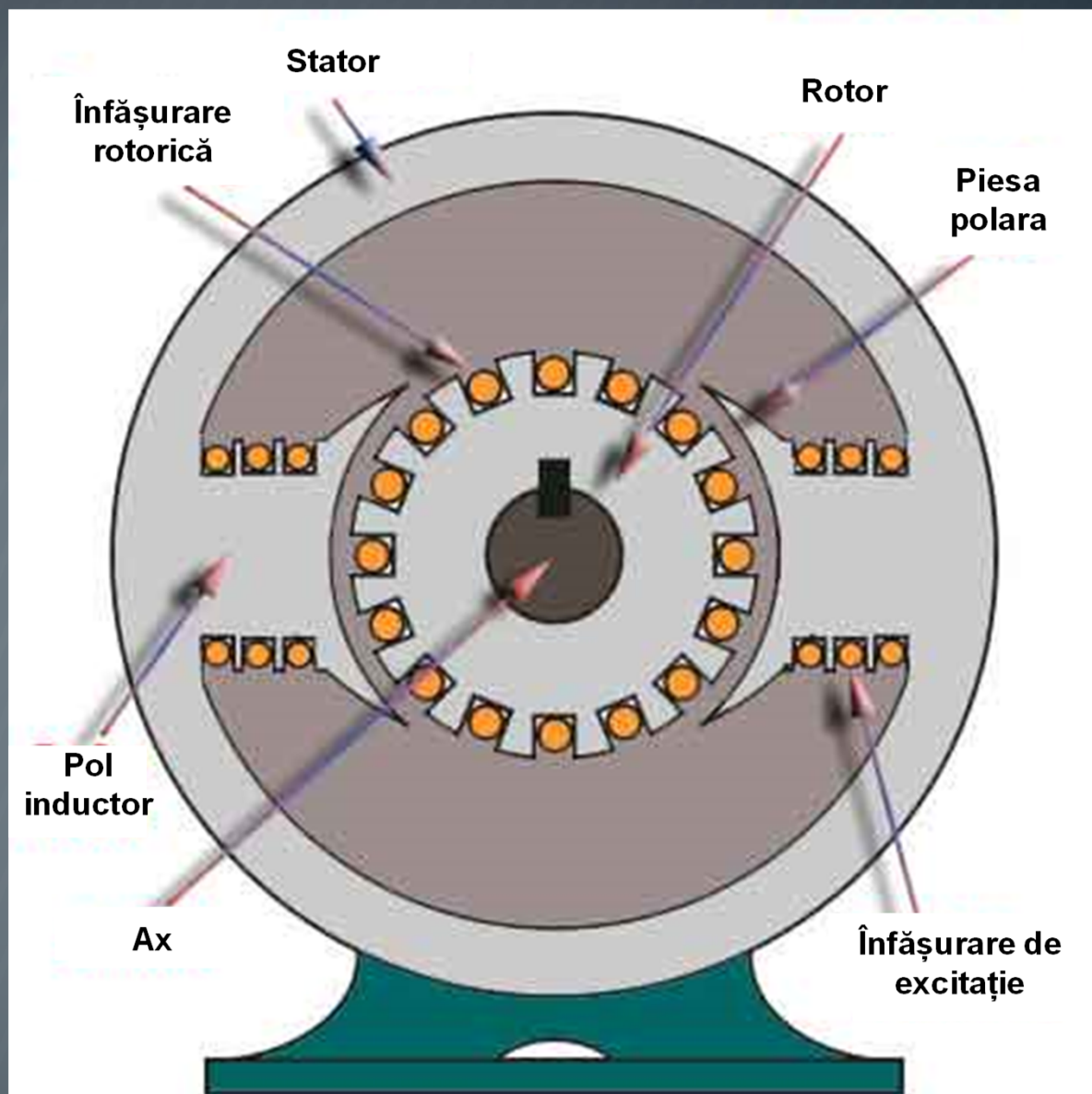


3

**Accesorii (ax, lagăre, capace laterale,
ventilator, cutie de borne, elemente de
susținere, etc.)**

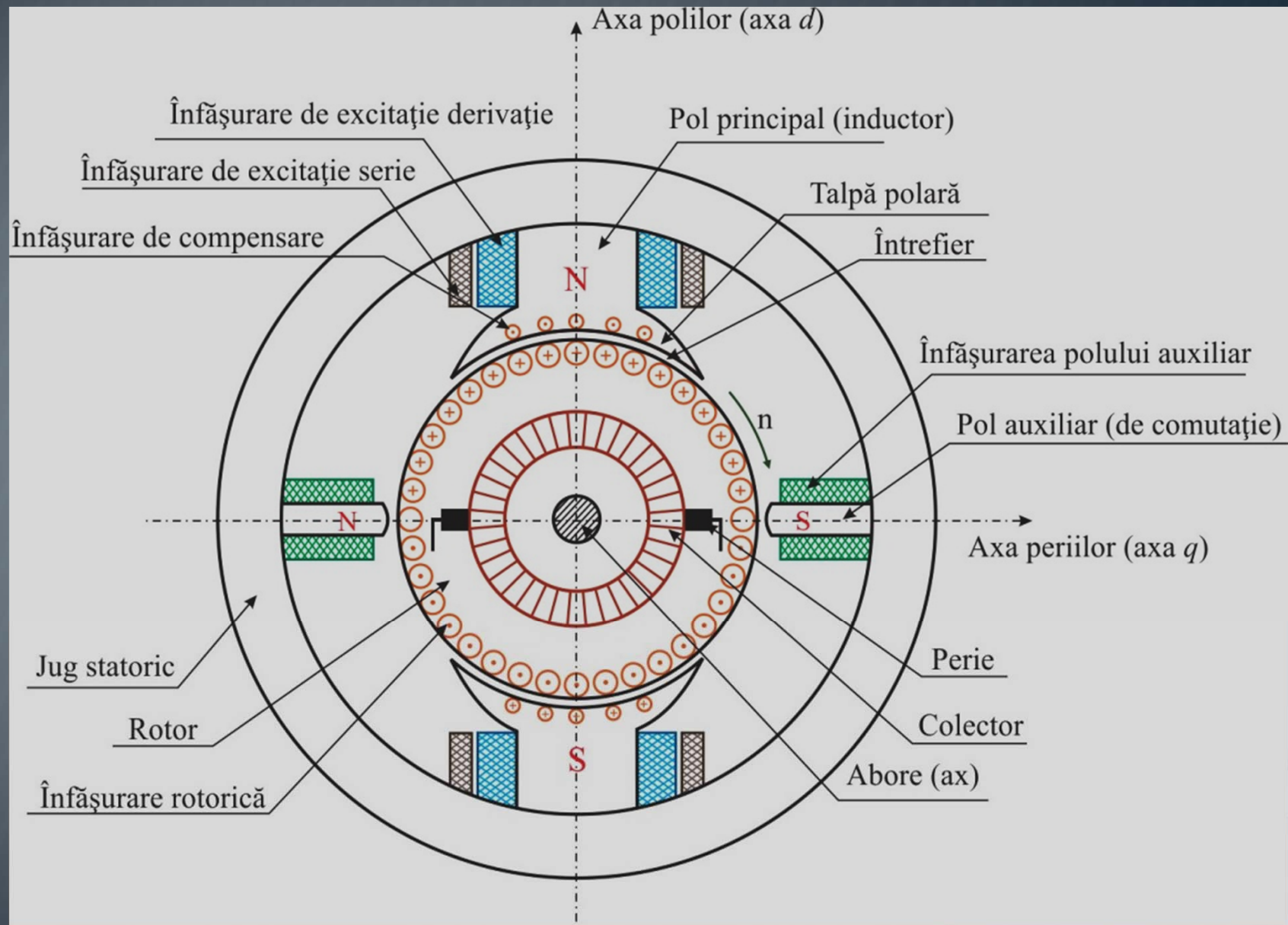


4

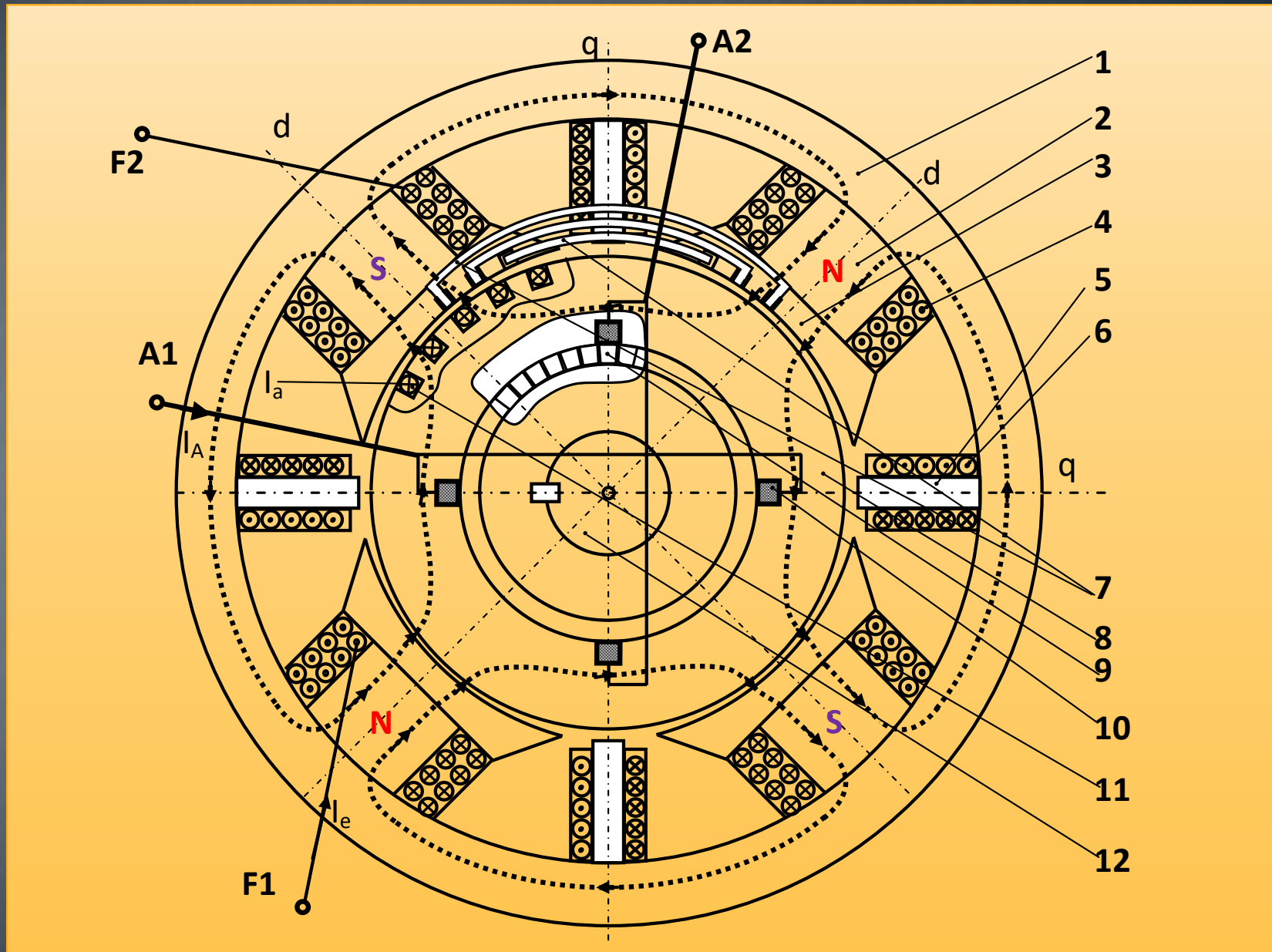


Secțiune transversală printr-o mașină de c.c. in construcție minimală

Structura unei mașini de c.c. prevăzută cu poli auxiliari



Structura unei mașini de c.c. în construcție completă



1-Jug statoric, 2-Pol principal, 3-Piesa polara, 4-Infasurare de excitație, 5-Pol auxiliar, 6-Înfășurarea polului auxiliar, 7- Înfășurare de compensare, 8-Jug rotoric, 9-Colector, 10-Perii, 11- Înfășurare rotorică, 12-Ax.

Statorul

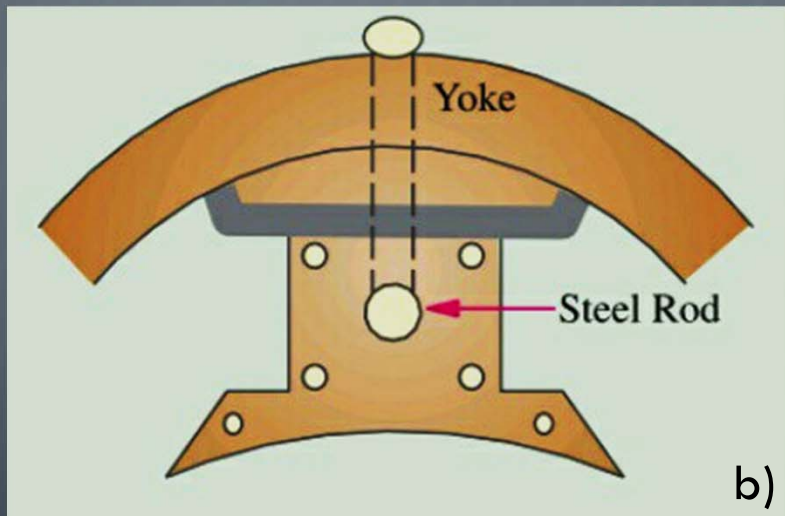
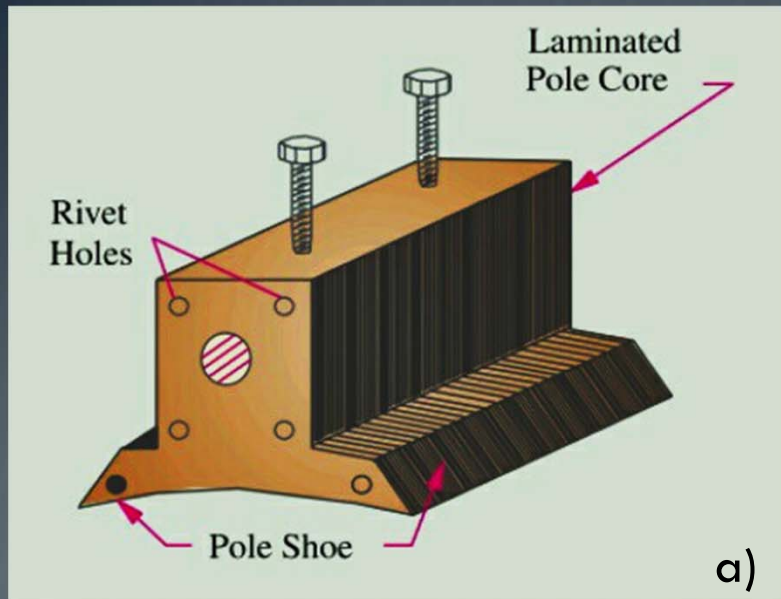
Reprezintă un ansamblu de piese după cum urmează:

- Jugul statoric ce este realizat din oțel masiv cu proprietăți feromagnetice. Liniile câmpului inductor se închid prin jugul statoric. El joacă rol și de carcasă a mașinii.
- Polii principali, denumiți și poli inductori, sunt în număr de $2p$, adică întotdeauna un număr par. Miezul feromagnetic al polilor inductori este realizat din oțel masiv sau tole din tablă feromagnetică cu grosimea cuprinsă între 0,5 mm și 2 mm, asamblate împreună prin buloane de strângere.
- Pe miezul polilor inductori sunt plasate înfășurările de excitație (bobinele de excitație). Aceste înfășurări sunt de tip concentrat, fiind realizate din conductor de cupru izolat cu email, fibră de sticlă sau alte materiale izolatoare. Înfășurările de excitație împreună cu miezul polilor alcătuiesc niște electromagneți. Bobinele de excitație sunt astfel conectate încât polii formați să aibă polarități alternante.

La mașinile de puteri mijlocii și mari, între polii inductori se plasează *polii auxiliari* denumiți și *poli de comutație*. Secțiunea miezului polilor auxiliari este mai mică decât secțiunea miezului polilor principali. Pe miezul polilor auxiliari sunt plasate înfășurări de tip concentrat, realizate din conductor de cupru izolat. Aceste înfășurări sunt astfel conectate încât și polii de comutație să formeze un sistem alternant de poli. Înfășurările polilor auxiliar sunt conectate ÎNTOTDEAUNA în SERIE cu înfășurarea de pe rotor.

Mașinile de puteri mari și foarte mari, precum și mașinile destinate acționărilor electrice rapide, se mai echipează cu o *înfășurare de compensare*. Această înfășurare este plasată în creștăturile prevăzute în acest scop în piesele polare ale polilor principali. Și această înfășurare, atunci când există, se leagă în serie cu înfășurarea de pe rotor.

Poli principali Înfășurare de excitație



a) Pol principal; b) pol principal prins de jugul statoric



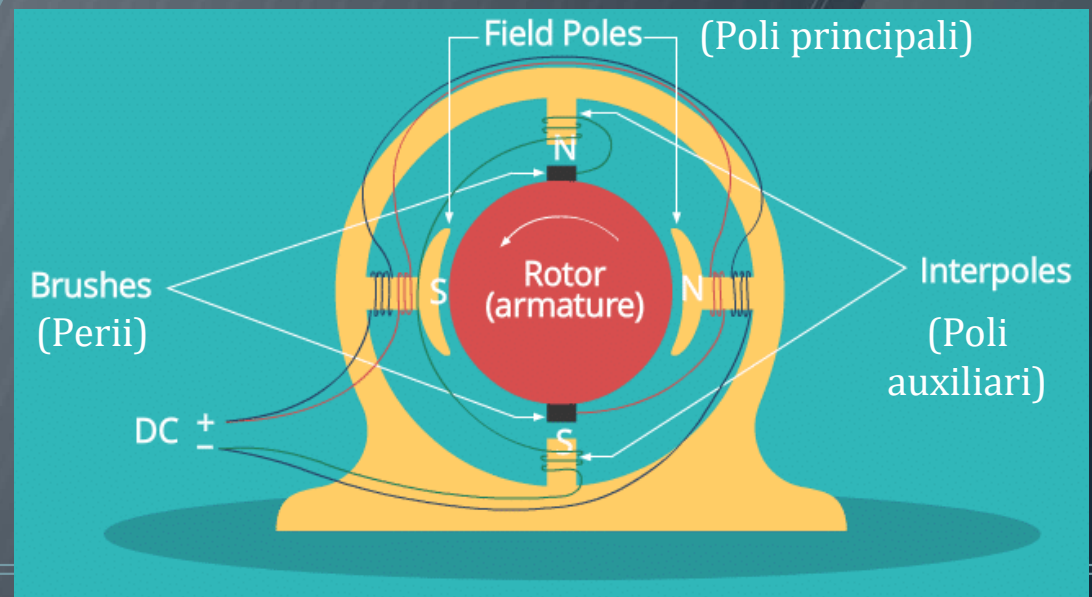
Bobine de excitație

Statorul

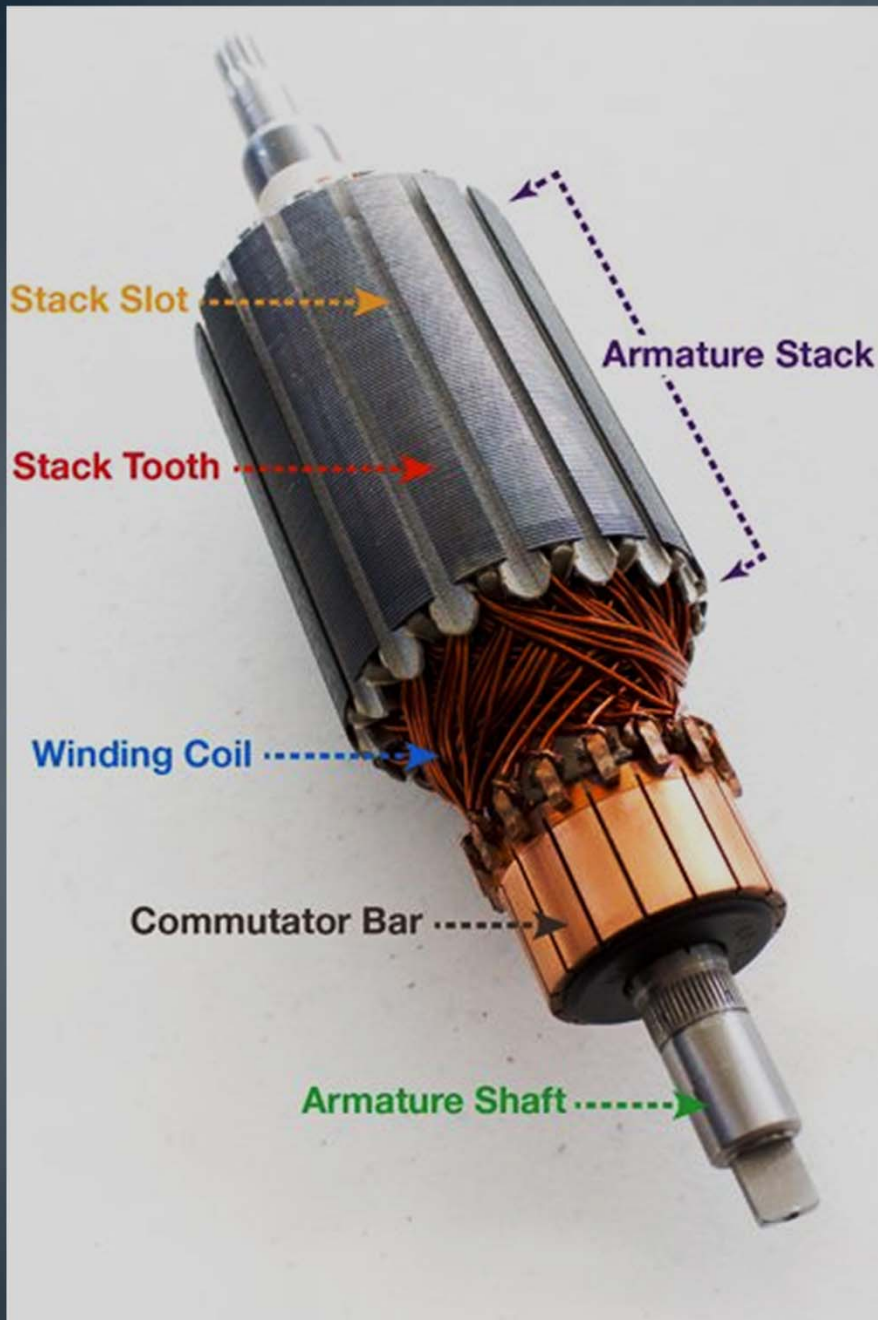


Stator de mașină de c.c. având 2 poli principali și 2 poli auxiliari

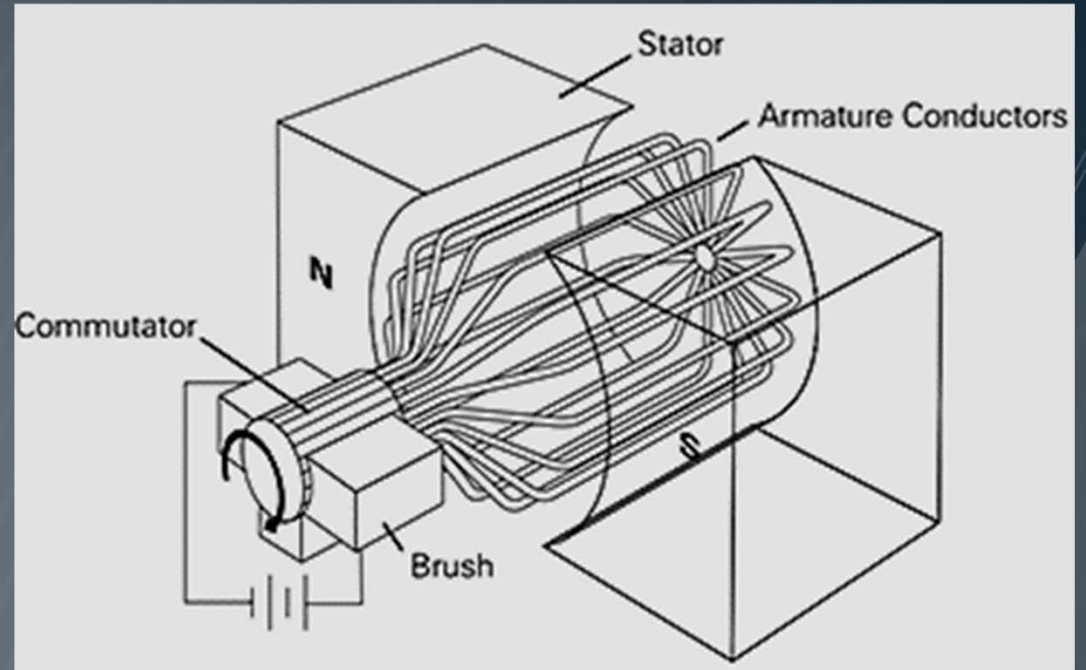
Poli auxiliari



Rotorul



Ansamblu rotor



Înfășurare rotorică



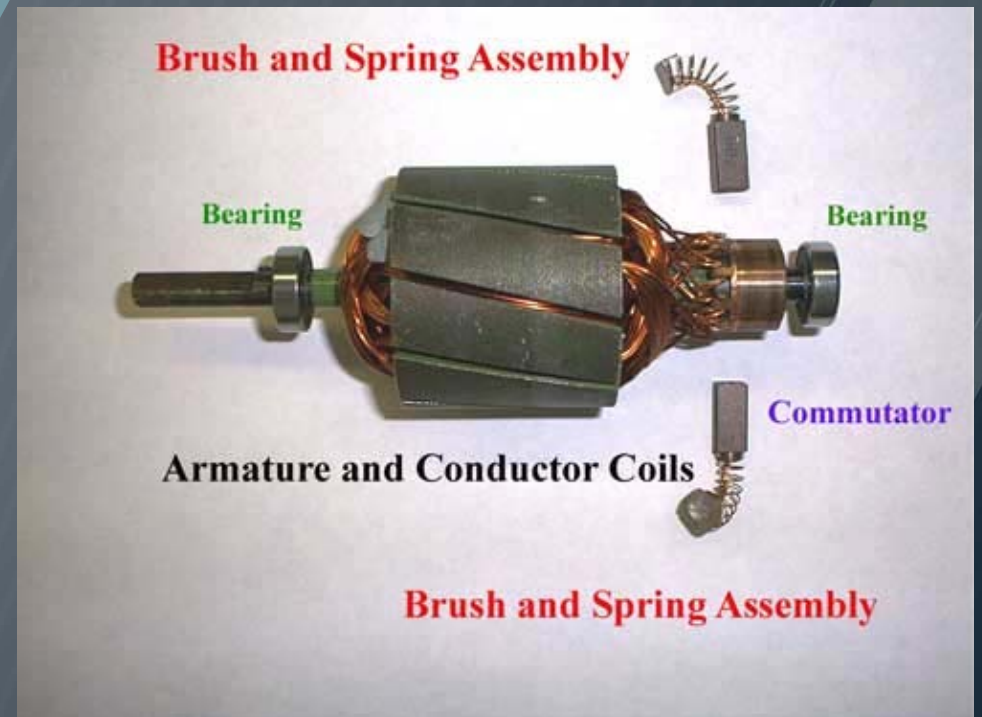
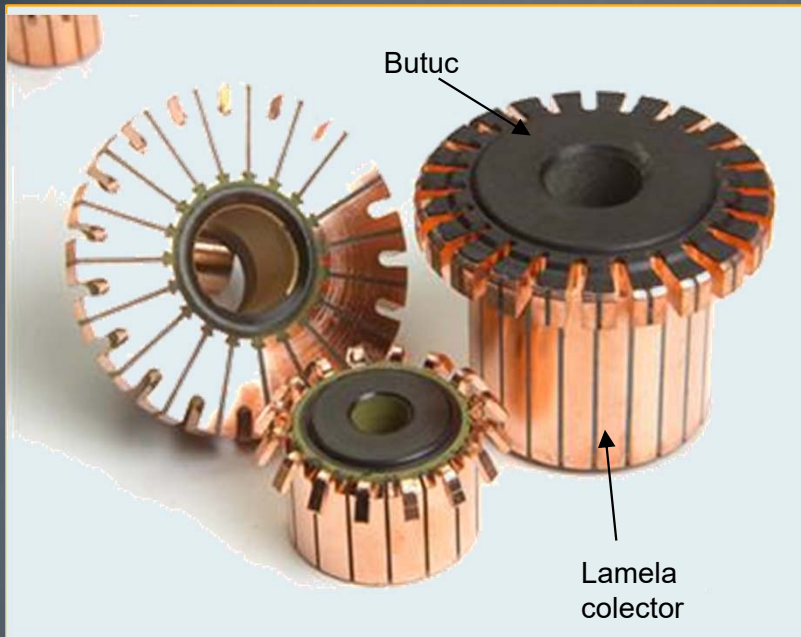
Miez rotoric

Rotorul

Rotorul este partea mobilă a mașinii de curent continuu și constituie indusul mașinii. Miezul feromagnetic al acestuia este realizat din tole de tablă silicioasă de 0,5 mm grosime, izolate între ele. La periferia tolelor rotorice sunt ștanțate creștături de diferite forme, repartizate uniform pe întreaga periferie a acestora. Tolele sunt împachetate fie direct pe axul mașinii, fie pe butucul rotorului.

Înfășurarea rotorului (indusului) este o înfășurare de tip repartizat, plasată în creștăturile rotorului. Se execută din conductor de cupru izolat cu diferite materiale, în funcție de tensiunea nominală a mașinii și de clasa de izolație a acesteia și se impregnează cu lac izolant. Capetele fiecărei bobine rotorice sunt conectate la lamelele colectorului.

Colectorul



Colectorul

Colectorul este format din lamele conductoare, executate din bandă de cupru și izolate între ele prin lamele de micanită. Lamelele sunt plasate pe un butuc și sunt izolate față de acesta.

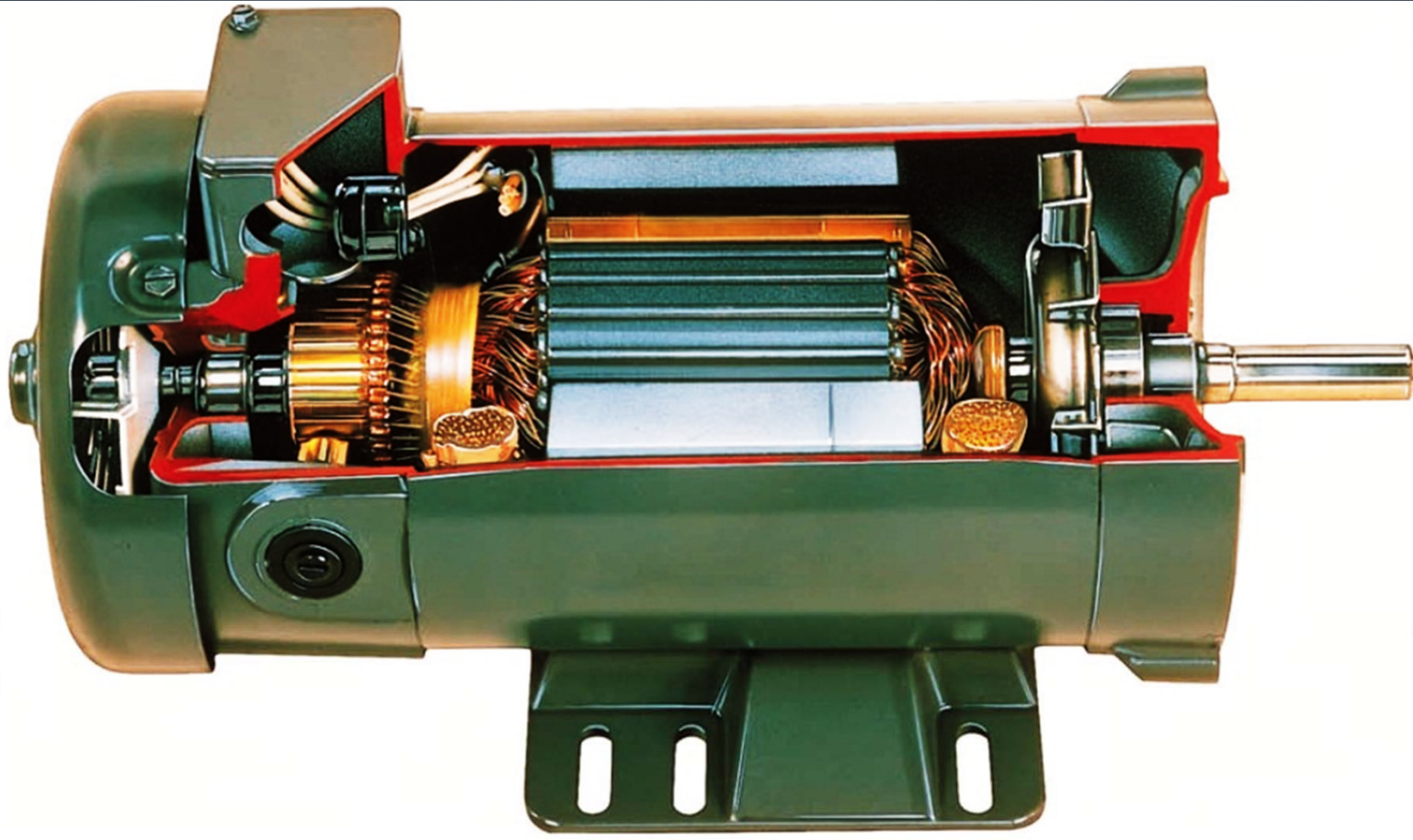
Periile

Pe lamelele colectorului calcă *periile*. Acestea sunt plasate în *portperii*. Portperiile sunt plasate cu ajutorul unor *tije portperie* pe un *colier*, care la rândul său este plasat pe scutul frontal din dreptul colectorului. Întregul sistem de susținere a periilor are rolul de a permite modificarea poziției axei periilor în raport cu axa polilor inductori.

Periile sunt confecționate în general din electrografit. La mașinile cu tensiunea nominală de până la 24 V, periile se execută din cupru grafitat.



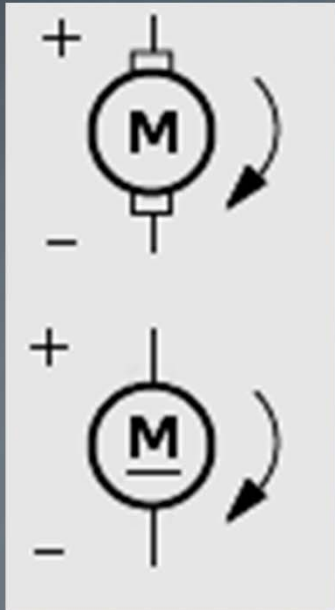
Periile împreună cu colectorul formează un sistem extrem de important în funcționarea mașinii de curent continuu: el joacă rol de redresor mecanic sau invertor mecanic.



DC motor, field structure, and armature assembly. (Courtesy Reliance Electric Co.)

Mașină de curent continuu – vedere secționată

Simbolizare

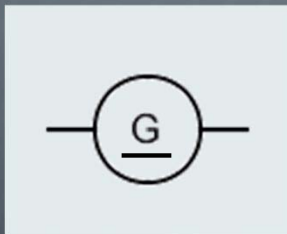


În circuitele electrice, mașina de c.c. este simbolizată ca în figurile alăturate, indicându-se eventual și regimul de funcționare: M - motor sau G - generator



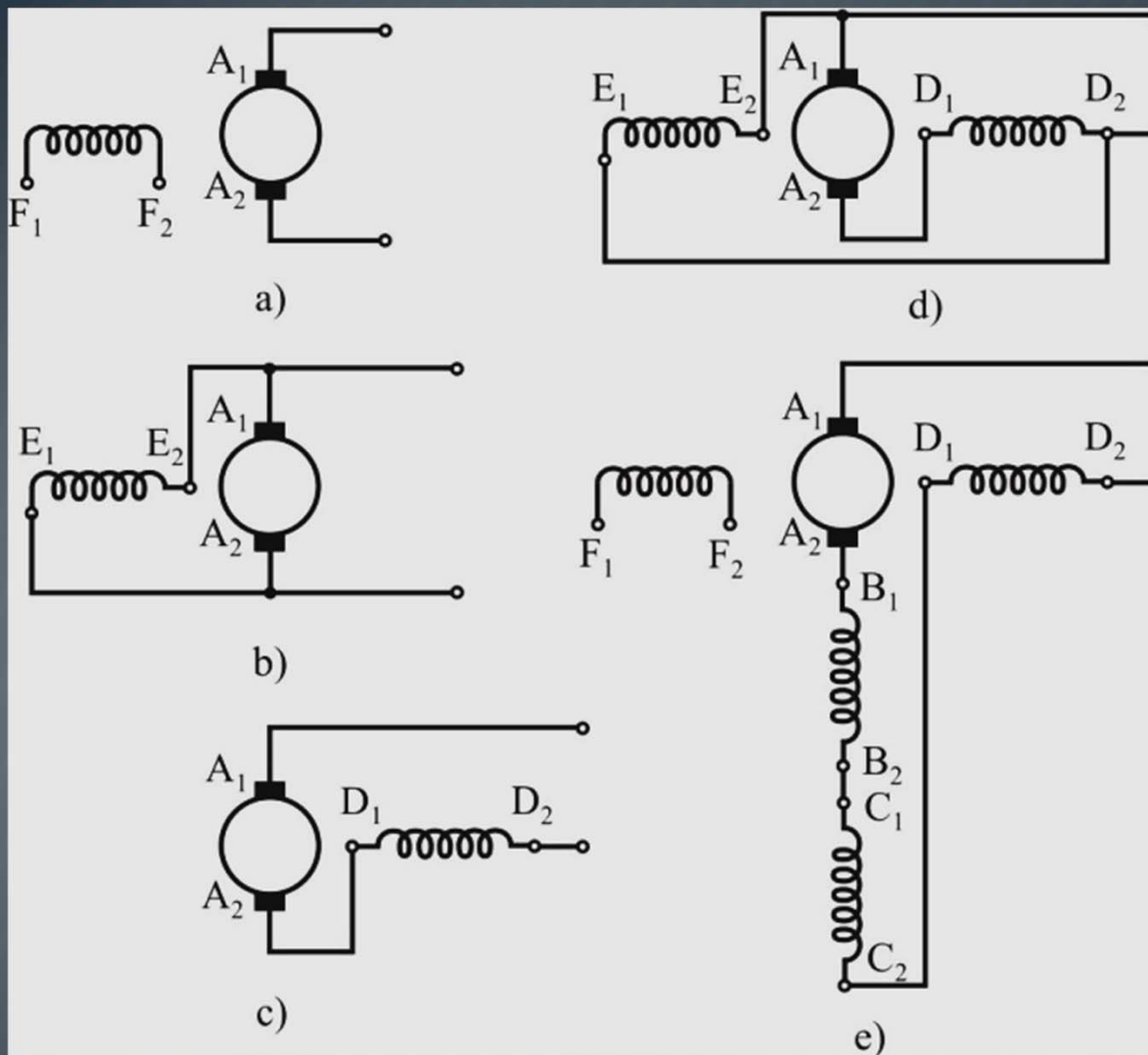
Motor – regim de funcționare în care mașina electrică absoarbe energie electrică pe la borne și furnizează energie mecanică pe la ax.

Generator - regim de funcționare în care mașina electrică absoarbe energie mecanică pe la ax și furnizează energie electrică pe la borne.



Mașina electrică = Convertor electromecanic

Clasificare



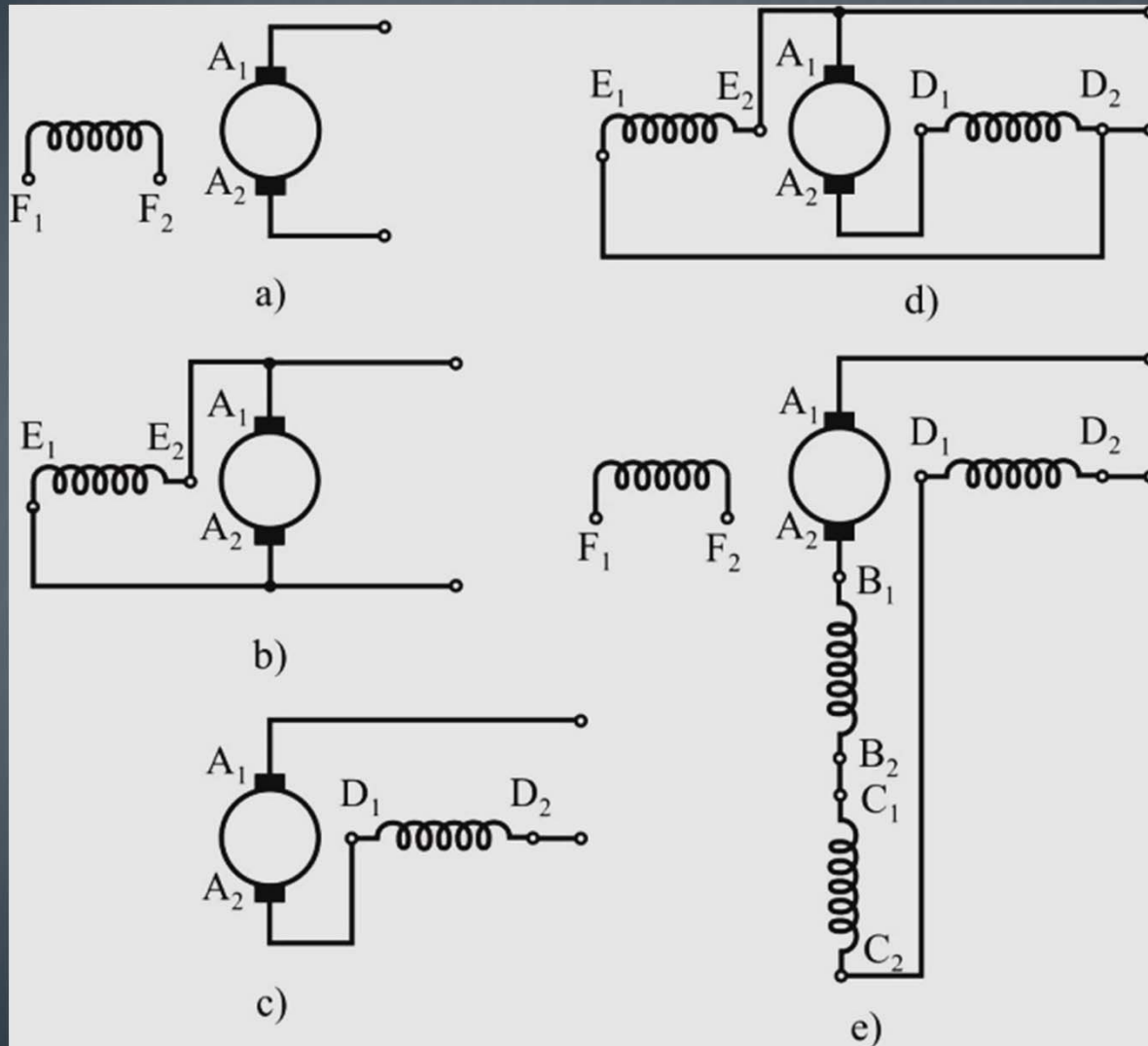
Serie – înfășurarea de excitație de pe stator este înseriată cu înfășurarea rotorului (c);

Derivație - înfășurarea de excitație de pe stator este conectată în paralel cu înfășurarea rotorului (b);

Separată – circuitul înfășurării de excitație și circuitul înfășurării rotorice sunt separate (a).

În funcție de modul în care înfășurarea de excitație (a polilor principali) este conectată față de înfășurarea rotorică, există următoarele tipuri de mașini de c.c. : a) MCC cu excitație separată; b) MCC cu excitație derivație; c) MCC cu excitație serie; d) MCC cu excitație mixtă (serie + derivație); e) MCC cu excitație mixtă (serie + separata).

Marcarea bornelor

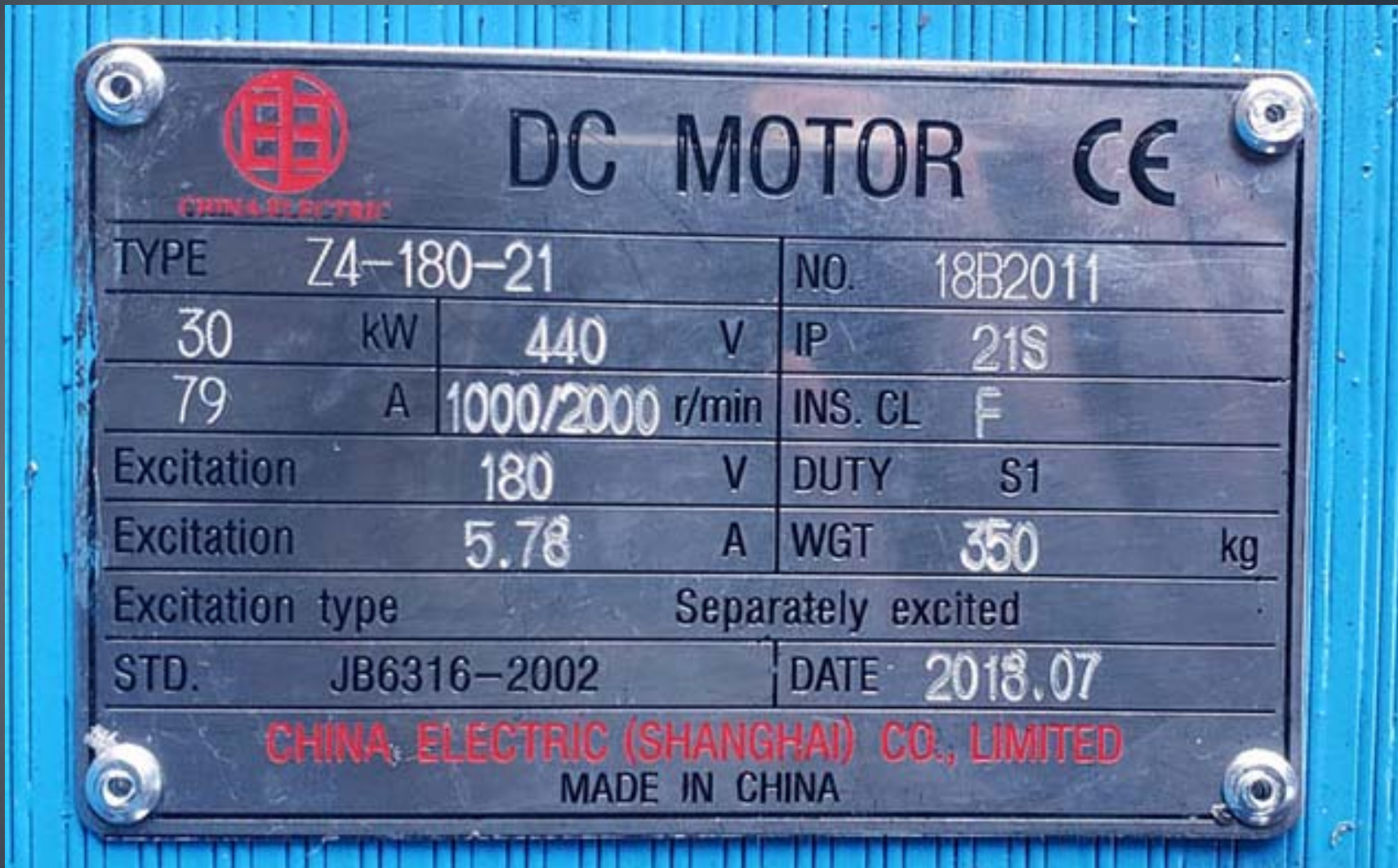


Marcarea extremităților înfășurărilor mașinii de curent continuu este standardizată după cum urmează:

- înfășurarea rotorică (indusului):
 $A_1 - A_2$;
- înfășurarea polilor auxiliari:
 $B_1 - B_2$;
- înfășurarea de compensare:
 $C_1 - C_2$;
- înfășurarea de excitație serie:
 $D_1 - D_2$;
- înfășurarea de excitație derivație:
 $E_1 - E_2$;
- înfășurarea de excitație separată:
 $F_1 - F_2$.

De regulă, literele ce precizează tipul înfășurării sunt inscripționate la placa de borne a mașinii electrice.

Plăcuța indicatoare



Orice mașină electrică este prevăzută cu o „plăcuță indicatoare” care este fixată pe carcasă.

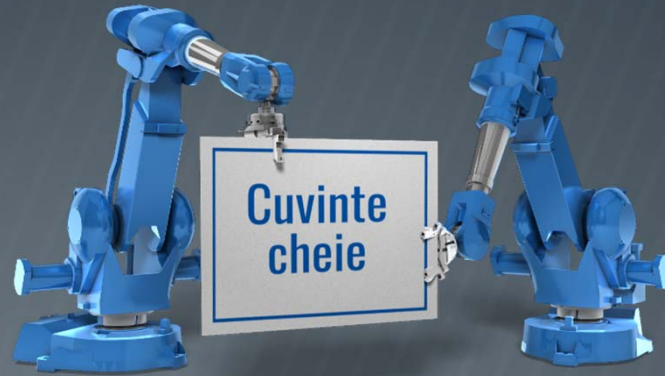
Pe plăcuța indicatoare sunt inscripționate datele nominale principale.

În exemplul prezentat se pot identifica următoarele date nominale:

- Este vorba despre o mașină de c.c. cu excitație separată;
- Puterea nominală este de 30 kW;
- Tensiunea de alimentare a înfășurării rotorice este de 400 V;
- Curentul nominal prin înfășurarea rotorică este de 79 A;
- Tensiunea de alimentare a înfășurării de excitație este de 180 V;
- Curentul de excitație nominal este de 5,78 A.



Mărimile nominale caracterizează funcționarea mașinii atunci când este încărcată la sarcină nominală (în cazul exemplului – 30 kW)



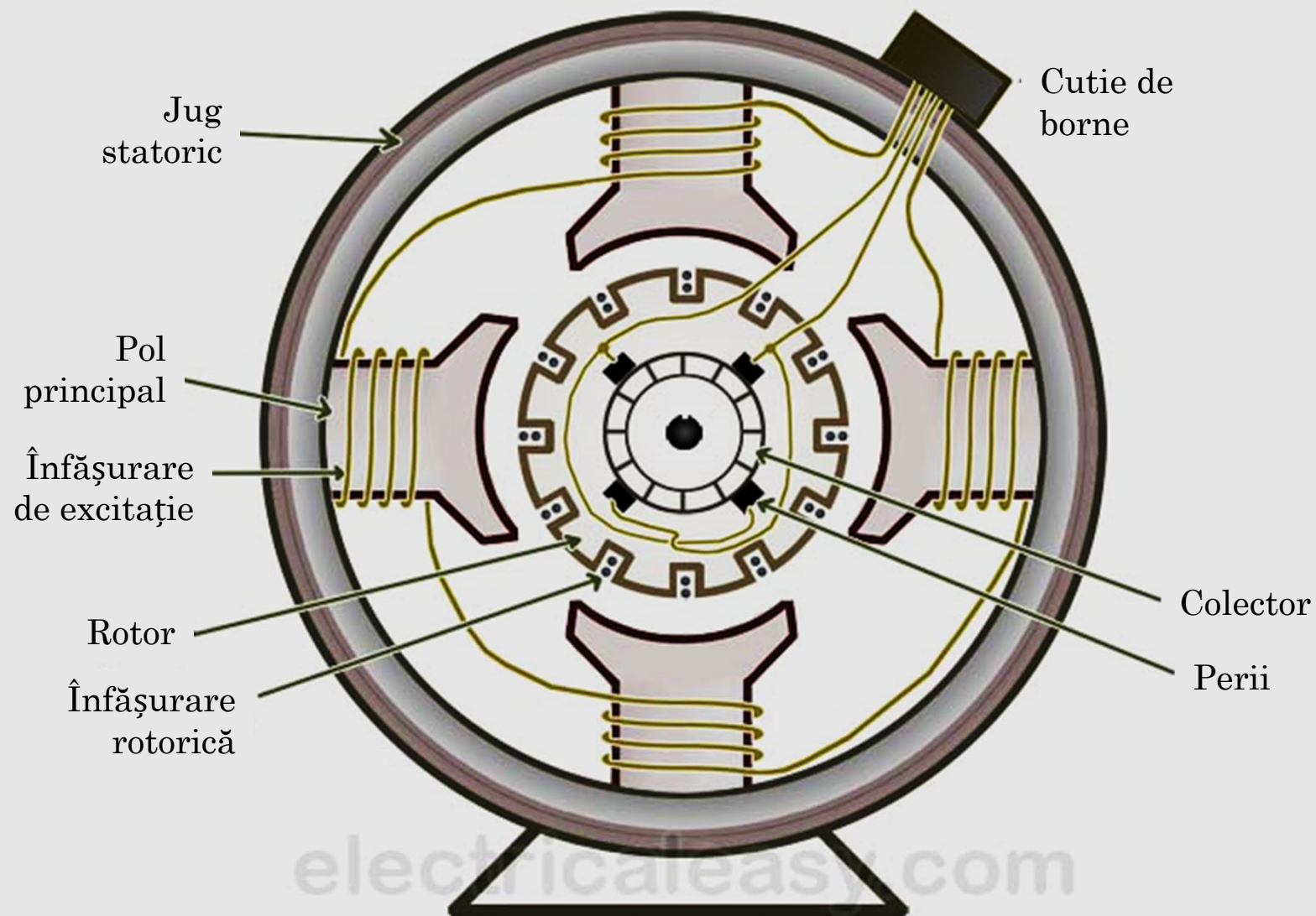
Stator – partea fixă a mașinii electrice de c.c. ce reprezintă inductorul (cel ce creează fluxul de excitație);

Rotor – partea mobilă a mașinii de c.c. ce reprezintă indusul (partea unde se află înfășurarea în care se induc tensiuni);

Sistem colector-perii – reprezintă redresorul mecanic sau invertorul mecanic al mașinii de c.c.

The background of the slide is a dark, reddish-brown textured surface, possibly a metal plate or a piece of aged paper. It features two prominent, glowing circular spots, one on the left and one on the right, which appear to be light sources or reflections. The overall lighting is dim, creating a moody and industrial atmosphere.

Principiul de funcționare a mașinii de curent continuu

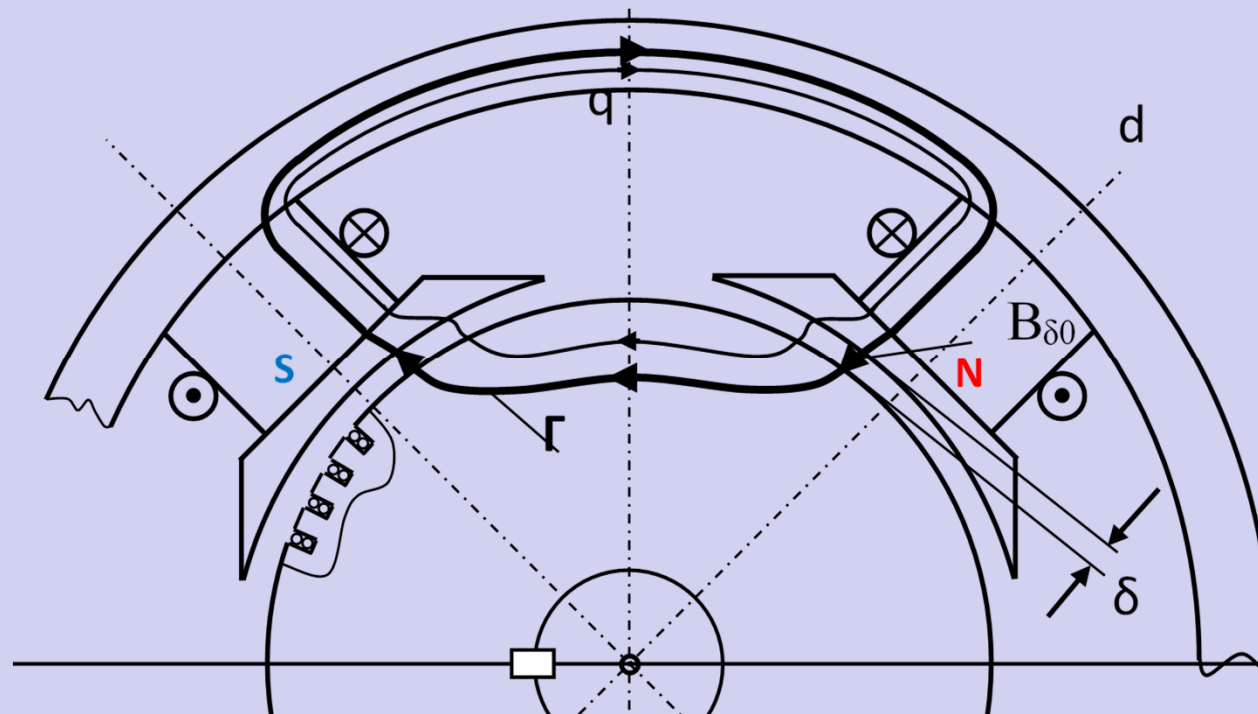


Secțiune transversală prin mașina de c.c. în construcție „minimală”

În mașina de c.c. se produc două câmpuri magnetice principale:

- *Câmpul magnetic inductor* : apare ca urmare a prezenței curentului de excitație prin înfășurarea plasată pe polii statorici. Câmpul magnetic inductor este câmpul principal în mașina de c.c.
- *Câmpul magnetic de reacție* : apare ca urmare a prezenței curentului prin înfășurarea rotorică. Acest câmp magnetic influențează negativ fenomenul de comutație, mai ales în mașinile fără poli auxiliari.
- Cele două câmpuri se compun dând câmpul rezultat în mașina de c.c.

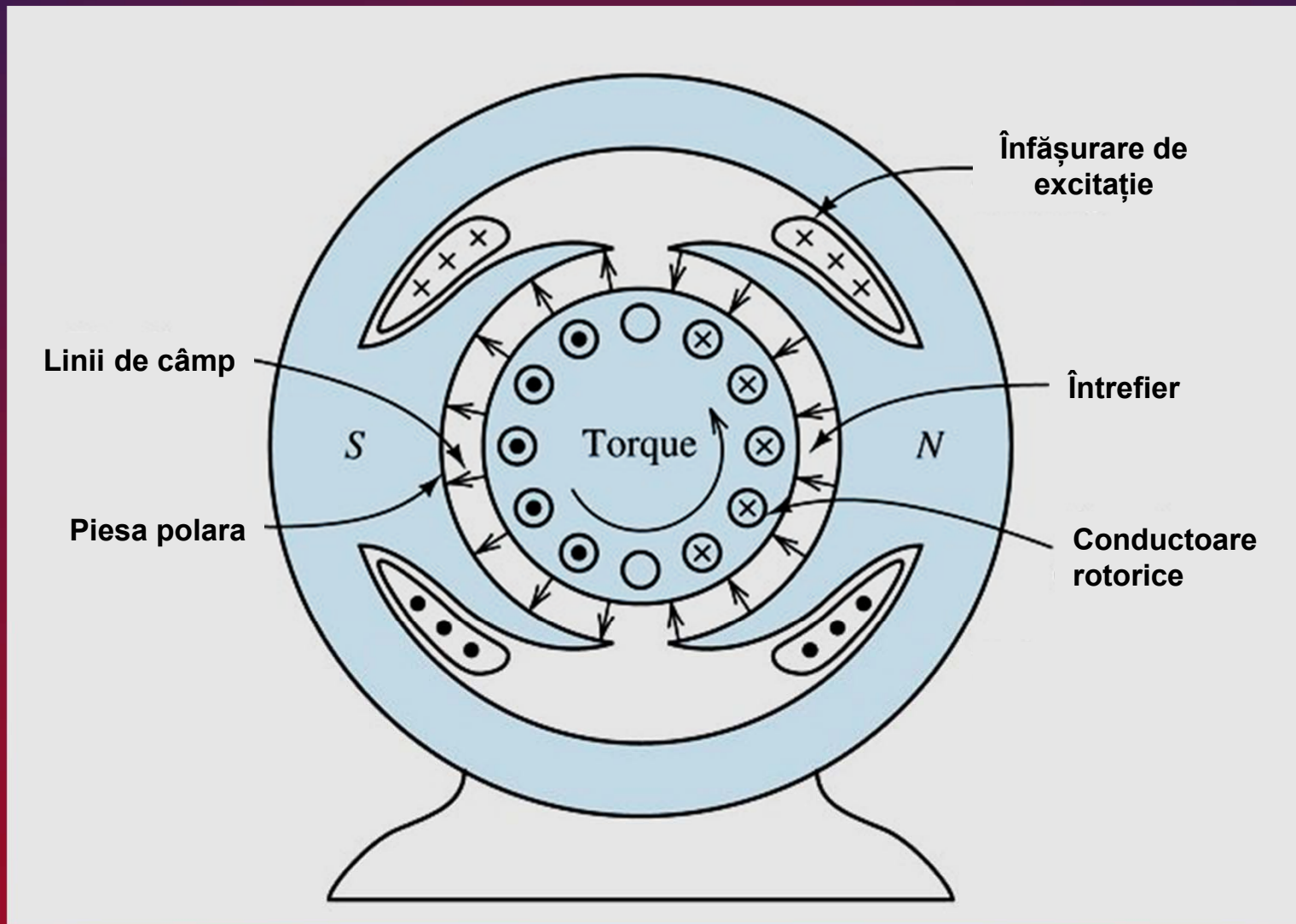




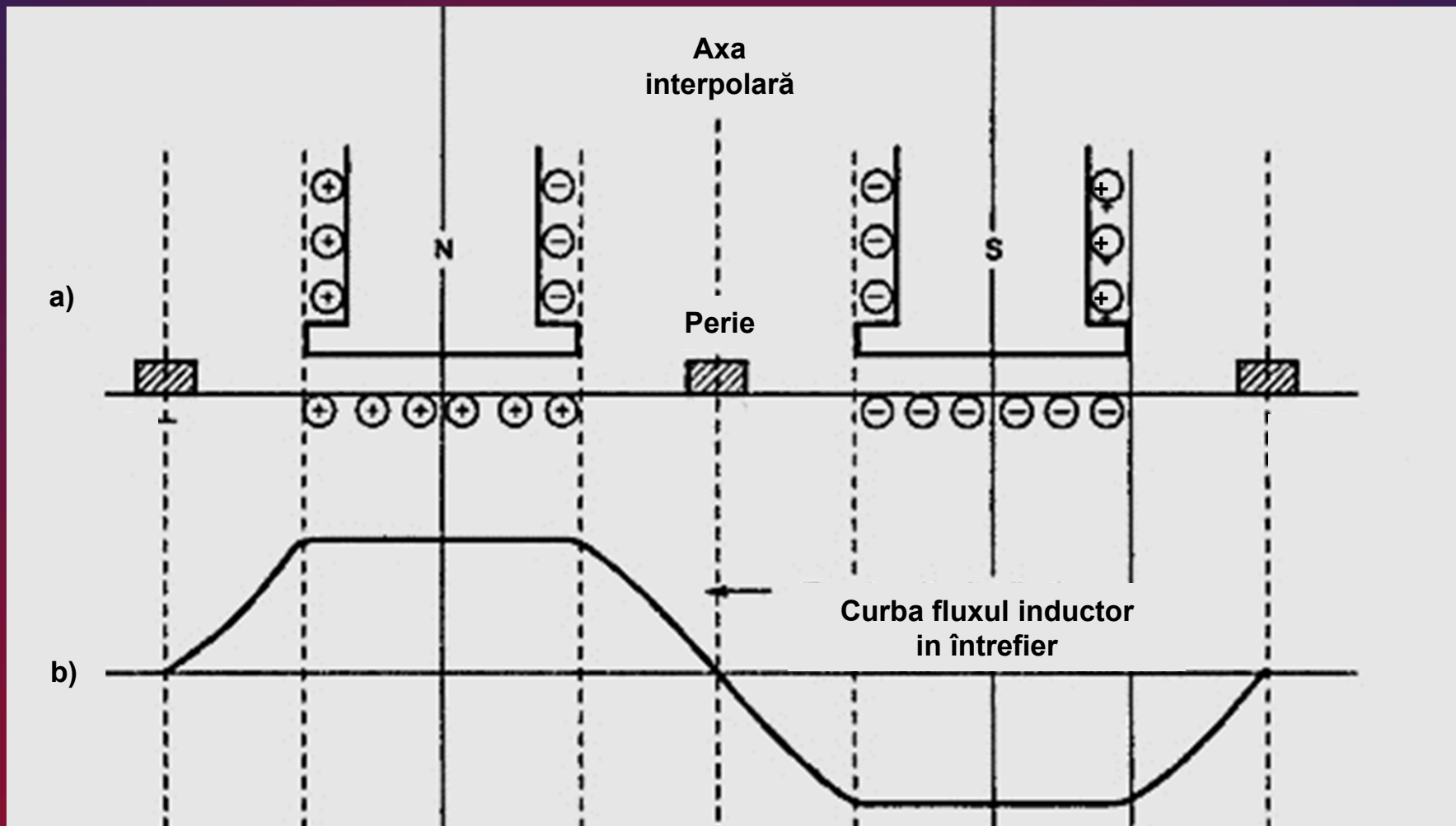
Camp magnetic inductor

Liniile câmpului magnetic inductor se închid între poli statorici vecini (care sunt de polaritate opusă) prin jugul statoric și prin rotor, traversând totodată și întrefierul (notat cu δ) prin dreptul pieselor polare ale polilor principali. Din acest motiv, toate aceste componente constructive sunt construite din material feromagnetic.

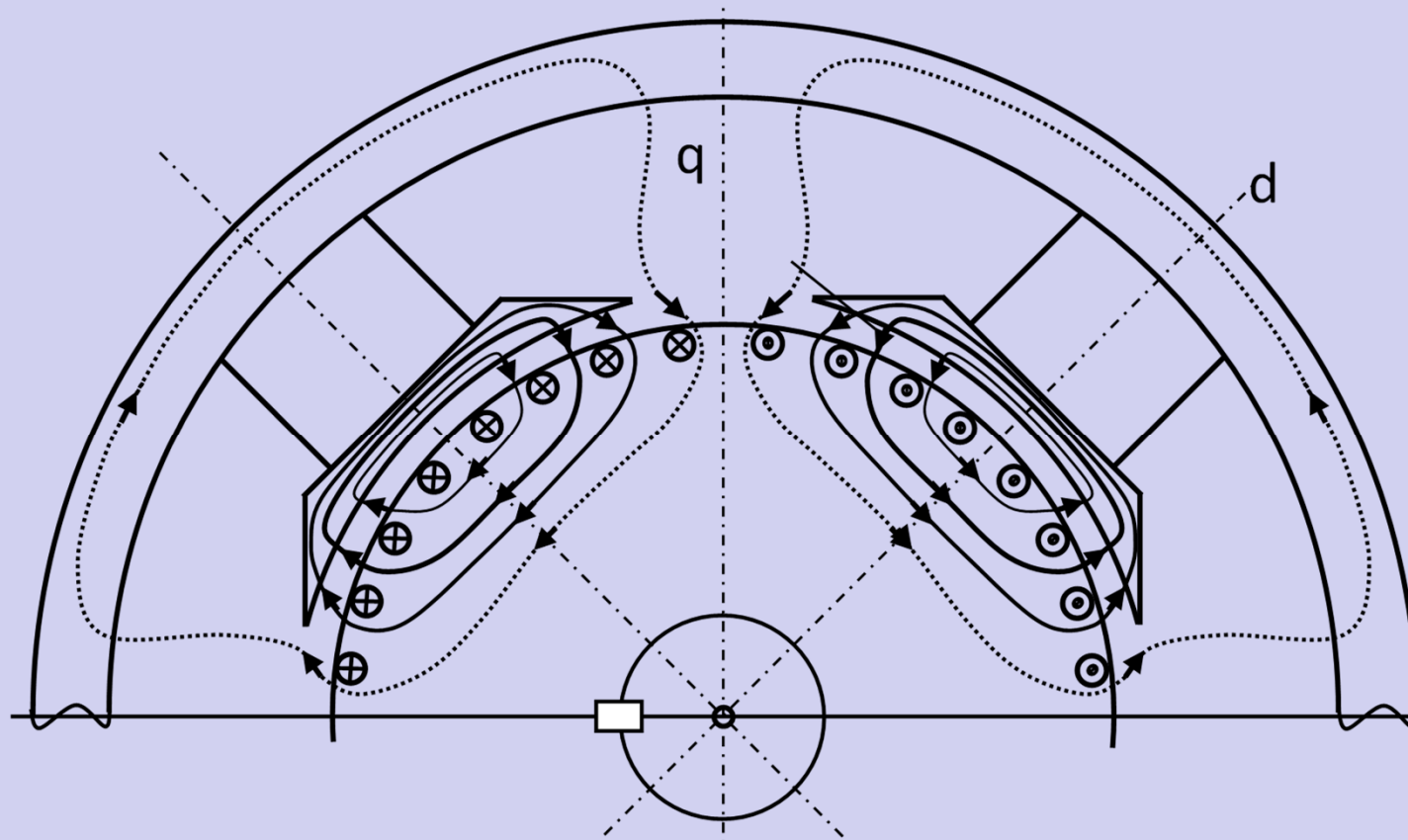
În figură este reprezentat, pentru exemplificare, un traseu notat cu Γ . Valoarea inducției în întrefier este notată cu $B_{\delta 0}$.



Se consideră că trecerea liniilor de câmp de la polii statorici către rotor și invers se face pe trasee radiale (în figură, săgețile din întrefier prezintă această situație).



Datorită neuniformității întrefierului (care este foarte mic sub polii inductori și foarte mare între poli), variația câmpului din întrefier are o formă trapezoidală: câmpul are o valoare maximă constantă în dreptul polilor și scade practic spre zero în axele interpolare.



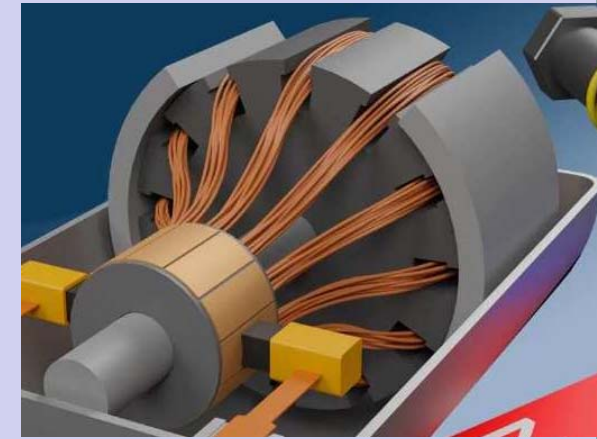
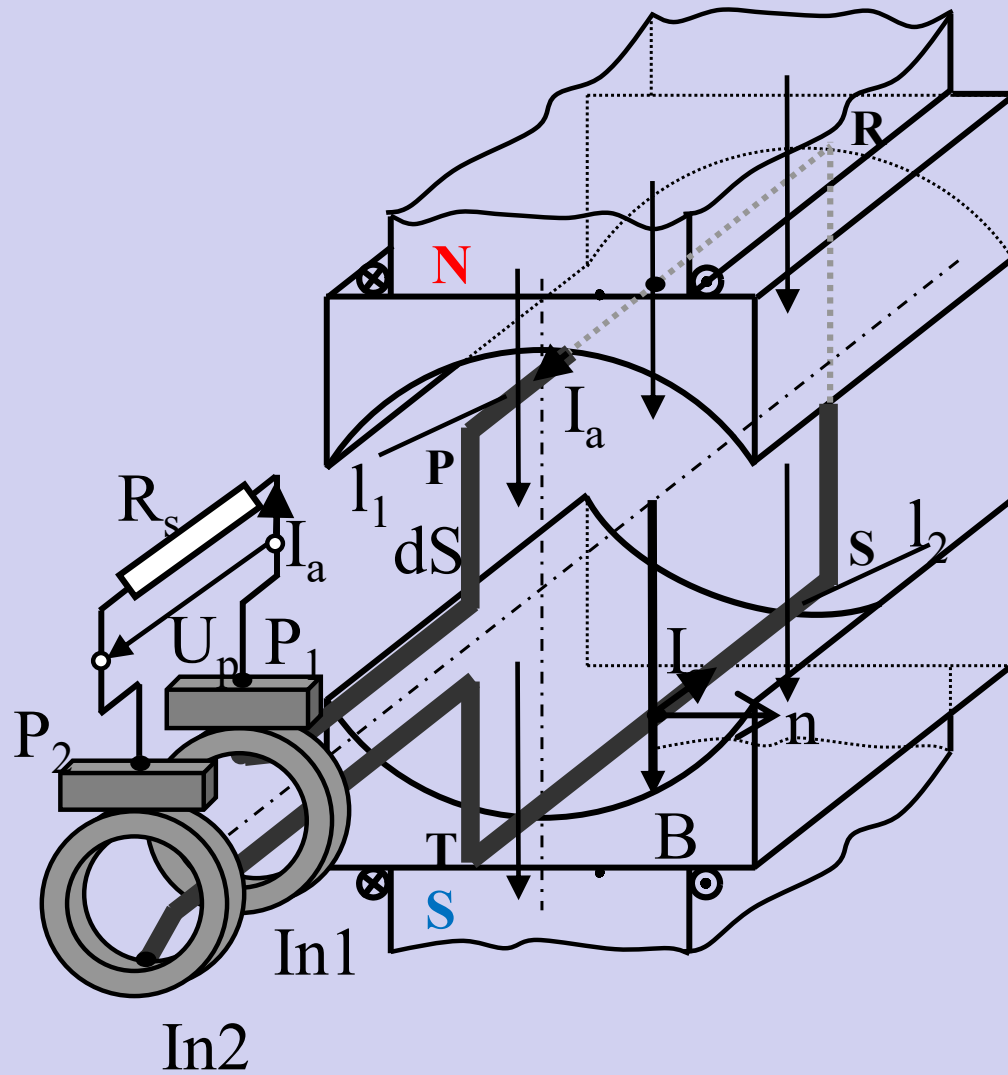
Câmp magnetic de reacție

d - axa longitudinală
(sau axa polilor);
 q - axa transversală
(sau interpolară).

Câmpul magnetic de reacție este creat de înfășurarea rotorică. Liniile de câmp se închid prin piesele polare ale polilor principali, rotor și întrefier. Practic, liniile câmpului de reacție au un traseu transversal față de cele ale câmpului inductor (liniile câmpului inductor se închid de-a lungul axei polilor, axă ce este notată cu d și se numește axa longitudinală, iar liniile câmpului de reacție sunt în principal perpendiculare pe această axă).

Producerea energiei electrice

Fig. 1



a) $t = 0$

Se consideră o structură electromagnetică formată din următoarele componente:

- Doi poli magnetici de polaritate opusă, N și S. Aceștia reprezintă două piese feromagnetice pe care este plasată câte o înfășurare parcursă de curent continuu. Sensul curentului (vezi conductoarele) determină polaritatea polilor. Sensul liniilor de câmp, respectiv polaritatea polilor, se determină cu *regula mâinii drepte*. Câmpul creat de cei doi poli este caracterizat de inducția B , ai cărui vectori, pe fig.1, sunt verticali.
- O spirală realizată din material conductor (de regula Cu). Spira are două laturi (l_1 și l_2) notate cu PR respectiv ST. Laturile spirei se găsesc între cei doi poli magnetici. Cele două capete ale spirei sunt conectate la două inele notate In1 și In2. Spira se rotește în interiorul polilor cu o turație constantă, n . Sensul de rotație este sensul trigonometric (indicat de săgeată).
- Două perii din material conductor (de regulă grafit) notate cu P_1 și P_2 . Aceste perii sunt în contact cu inelele omoloage (calcă pe inele).
- O rezistență de sarcină, R_s , care practic închide circuitul electric format din spirală, inele și perii.

Câmpul creat de cei doi poli este un câmp de amplitudine constantă și fix în spațiu (întrucât este creat de înfășurări parcurse de curent continuu). Dacă spira aflată în acest câmp este imobilă, din punct de vedere electromagnetic NU se va întâmpla nimic. Dacă însă spira se rotește în acest câmp, întrucât apare o mișcare relativă între un câmp magnetic și o spirală conductoare, se va induce o tensiune în spirală conform legii inducției electromagnetice. Această tensiune se poate măsura la capetele spirei sau la perii și este notată cu U_p .

În fig.1 este surprins momentul în care planul spirei este paralel cu planul de închidere a liniilor de câmp (în figură este vertical) și este notat ca momentul $t = 0$. În acest moment, cele două laturi ale spirei se găsesc chiar în axul polilor respectiv, în mișcarea lor de rotație și intersectează numărul maxim de linii de câmp. Drept urmare, tensiunea indusă în spirală are în acest moment valoare maximă.

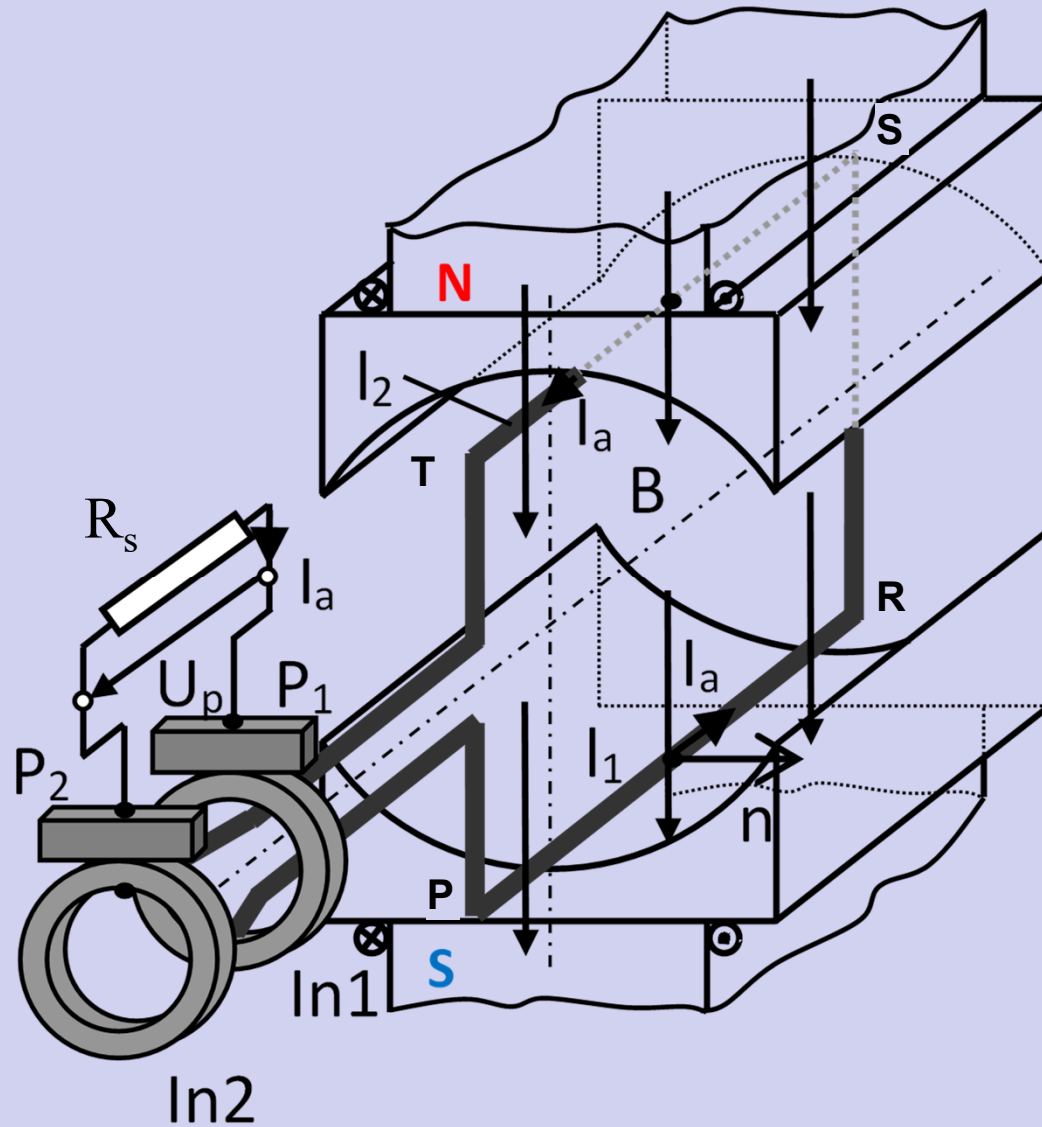
Întrucât rezistența de sarcină, R_s , închide circuitul electric al spirei, prezența tensiunii induse determină apariția unui curent electric. Sensul curentului electric prin cele două laturi ale spirei se determină cu regula mâinii drepte.

În fig.2 este prezentat momentul în care spira a efectuat un sfert de rotație, $t=T/4$. Pe măsura ce spira s-a rotit de la poziția inițial considerată spre poziția actuală, numărul de linii de câmp intersectate de laturile spirei s-a micșorat progresiv astfel încât, tensiunea indusă în spirală a scăzut. La acest moment, când planul spirei este perpendicular pe planul liniilor de câmp, tensiunea indusă este zero. Drept urmare, curentul prin spirală este, de asemenea, zero.



Producerea energiei electrice

Fig. 3



c) $t = 2T/4$

Următorul moment luat în discuție, fig.3, coincide cu poziția spirei care s-a rotit în continuare cu încă un sfert de rotație. Planul spirei a devenit din nou paralel cu planul liniilor de câmp iar tensiunea indusă în laturile spirei este din nou maximă. Practic, de la poziția din fig.2 și până la cea din fig.3, tensiunea indusă în spiră a crescut de la zero la valoarea maximă.

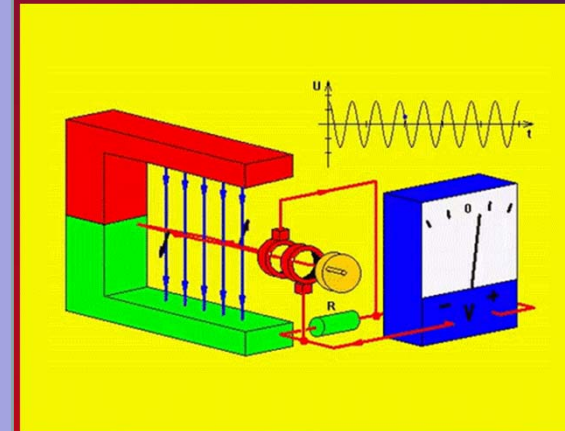
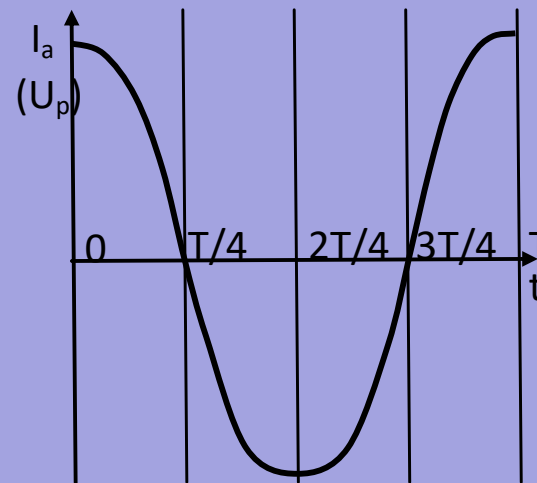
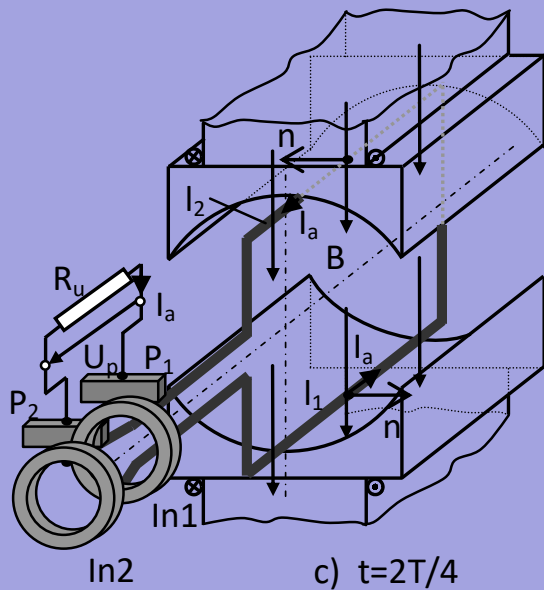
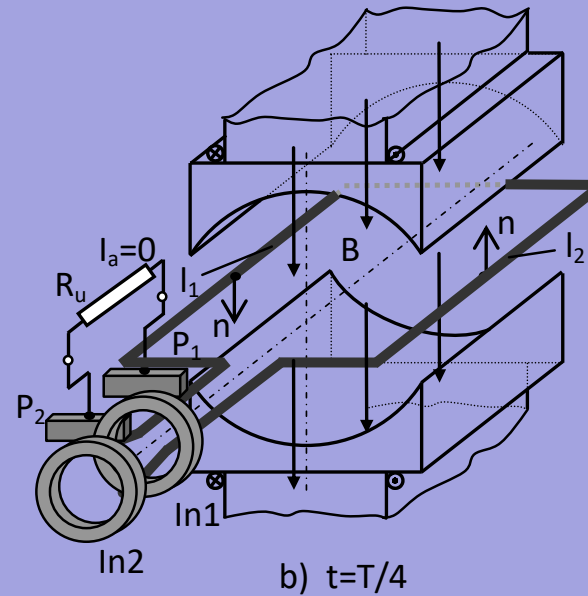
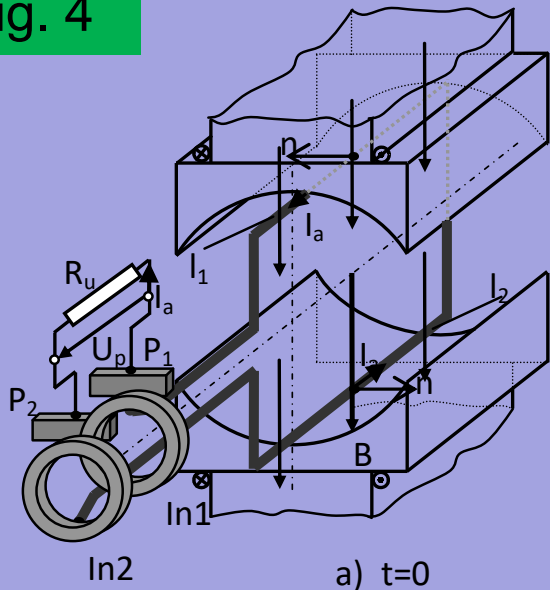
Însă, pentru poziția din fig.3, laturile spirei sunt plasate diferit față de situația din fig.1: latura l_1 este în vecinătatea polului S iar latura l_2 în vecinătatea polului N. Sensul tensiunilor induse și al curenților se determină cu aceeași regulă a mâinii drepte, însă, se poate vedea că, spre deosebire de situația din fig.1, sensul curenților prin cele două laturi s-a inversat. Inițial, în latura l_1 , sensul curentului era de la R la P iar după jumătate de rotație a spirei (fig.3) sensul curentului este de la P la R. Drept urmare, sensul curentului prin sarcina R_s , s-a inversat.

Rotirea spirei cu încă un sfert de rotație (nefigurată) duce spira într-o poziție asemănătoare cu cea din fig.2, deci tensiunea indusă scade până la valoarea zero.

Încheierea unei rotații complete a spirei, o aduce în poziția inițială, prezentată în fig.1. În acest ultim sfert de rotație, tensiunea crește din nou de la zero la valoarea maximă.

Producerea energiei electrice

Fig. 4



Rotirea spirei în câmpul creat de polii electromagnetici determină inducerea unei tensiuni ALTERNATIVE în laturile spirei. De asemenea, curentul prin laturile spirei dar și prin rezistența de sarcină este ALTERNATIV.

În fig.4d este reprezentată variația curentului dar și a tensiunii induse, care au o formă sinusoidală.

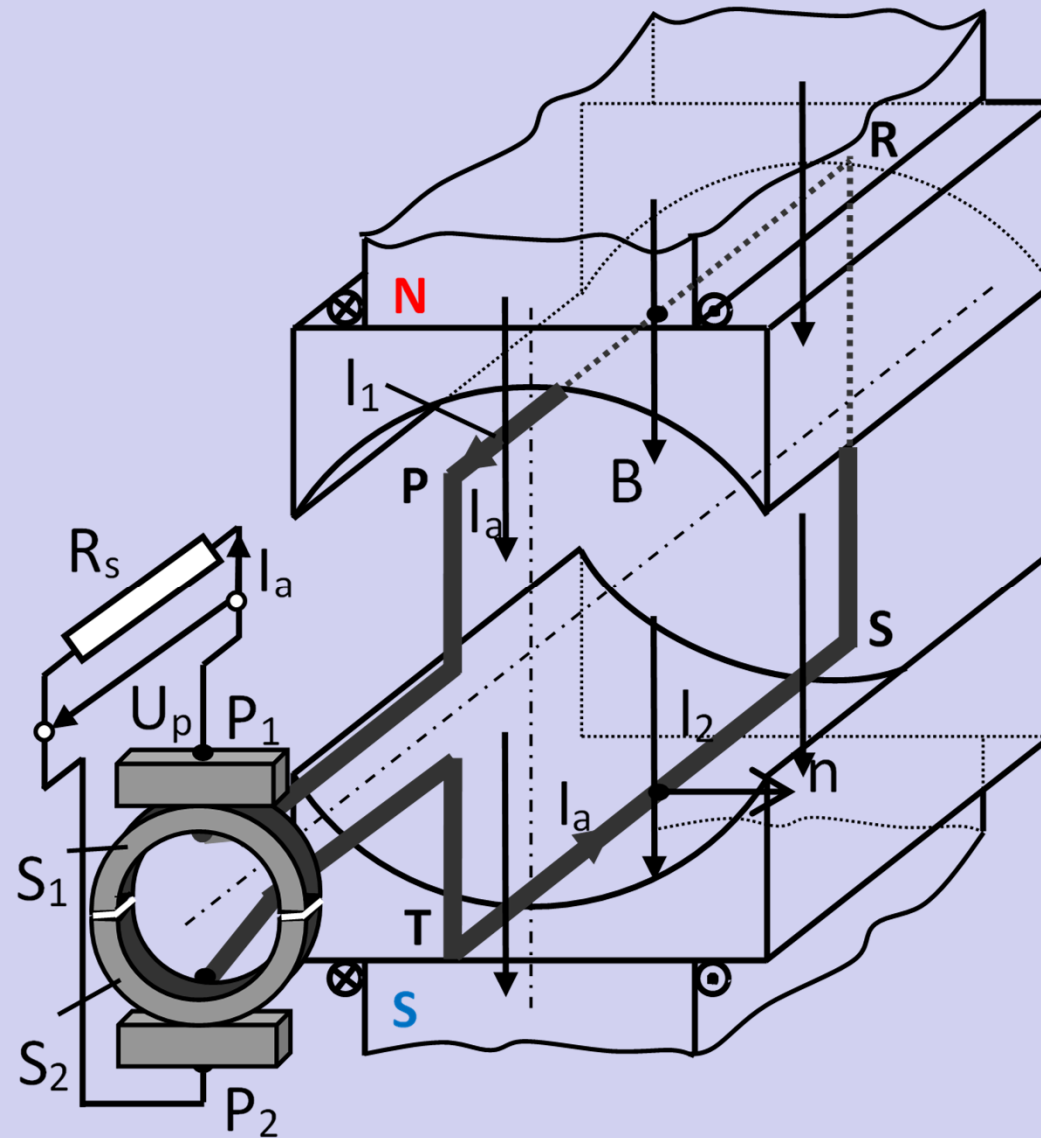
Pentru că structura aleasă are **2** poli, atunci pentru fiecare rotație completă a spirei, variația mărimilor electrice (tensiune indusă și curent electric) corespunde unei perioade T . Dacă structura ar fi avut **4** poli, atunci la fiecare rotație, mărimilor electrice le-ar fi corespuns două perioade (s.a.m.d.)

Structura prezentată reprezintă un *generator electric de curent alternativ*.



Principiul de funcționare în regim de generator de c.c.

Fig. 5



a) $t = 0$

În fig.5 se consideră aceeași structură electromagnetică la care însă apare o modificare importantă: cele două inele sunt înlocuite de două semi-inelul S_1 și S_2 . Capătul laturii ℓ_1 este conectat la semi-inelul S_1 , iar capătul laturii ℓ_2 la semi-inelul S_2 . Peria P_1 calcă pe semi-inelul S_1 iar peria P_2 calcă pe semi-inelul S_2 .

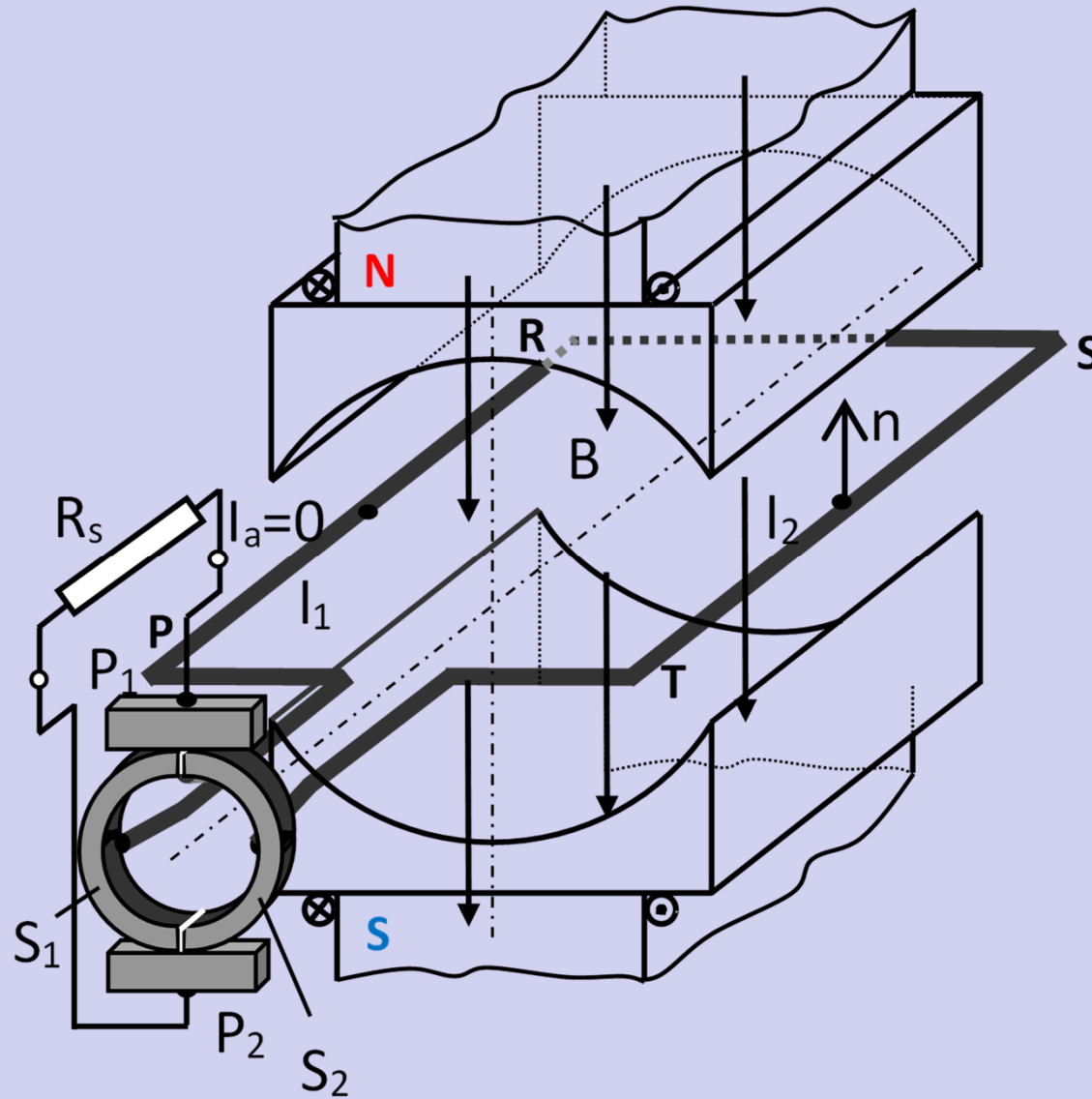
Situația prezentată în fig.5 este similară cu cea din fig.1. Spira, care se rotește în sens trigonometric, se află la momentul $t = 0$ în poziția figurată. Planul spirei este paralel cu liniile câmpului produs de polii electromagnetici și, în mișcarea ei de rotație, intersectează un număr maxim de linii de câmp .

Conform legii inducției electromagnetice, se induce în laturile spirei tensiuni și apare un curent al căror sens este dat de *regula mâinii drepte*. Curentul circulă de la R către P în latura ℓ_1 și de la T către S în latura ℓ_2 . Valoarea tensiunilor induse și a curentului este maximă.



Principiul de funcționare în regim de generator de c.c.

Fig. 6



b) $t = T/4$

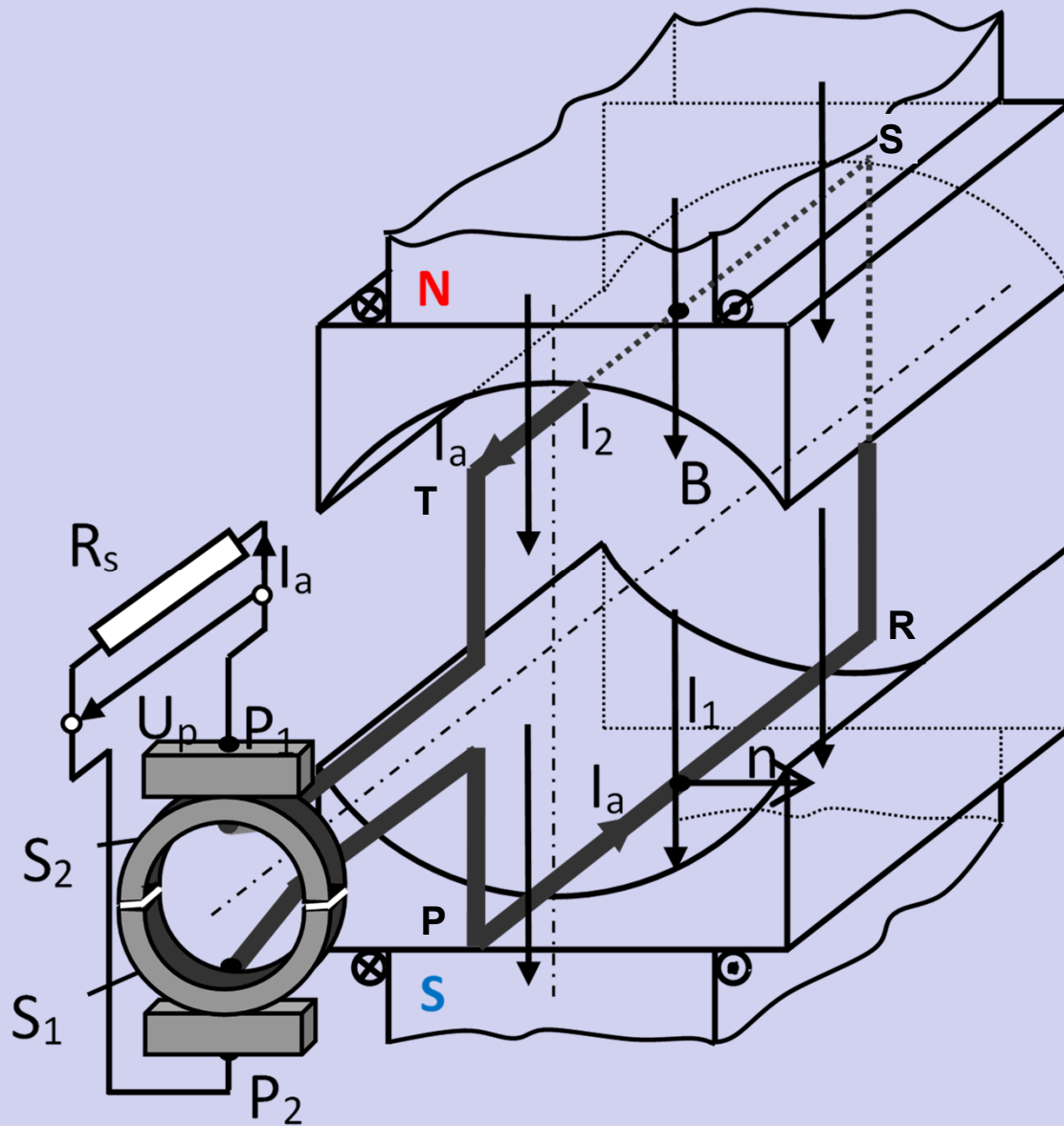
În fig.6 spira a efectuat un sfert de rotație, $t=T/4$. Se observă că, odată cu spira s-au rotit și cele două semi-inele. Pentru momentul prezentat, perile P_1 și P_2 scurt-circuitează cele două laturi, adică spira este în *scurt-circuit*.

De la momentul $t=0$ la $t=T/4$, tensiunea indusă a scăzut de la valoarea maximă la zero. Întrucât tensiunea indusă este zero, și curentul prin spirală este zero, deci scurtcircuitarea spirei nu are nici un efect asupra ei.



Principiul de funcționare în regim de generator de c.c.

Fig. 7



c) $t = 2T/4$

În fig.7 spira s-a rotit cu jumătate de rotație față de situația inițială și laturile ei ocupă pozițiile din dreptul axei polilor electromagnetici. Tensiunile induse sunt din nou maxime, ca și curentul care circulă prin laturile spirei.

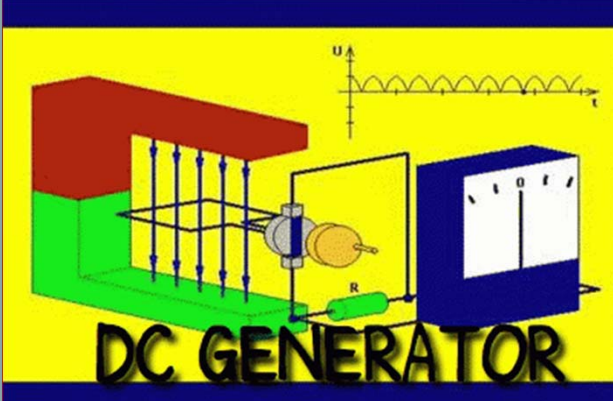
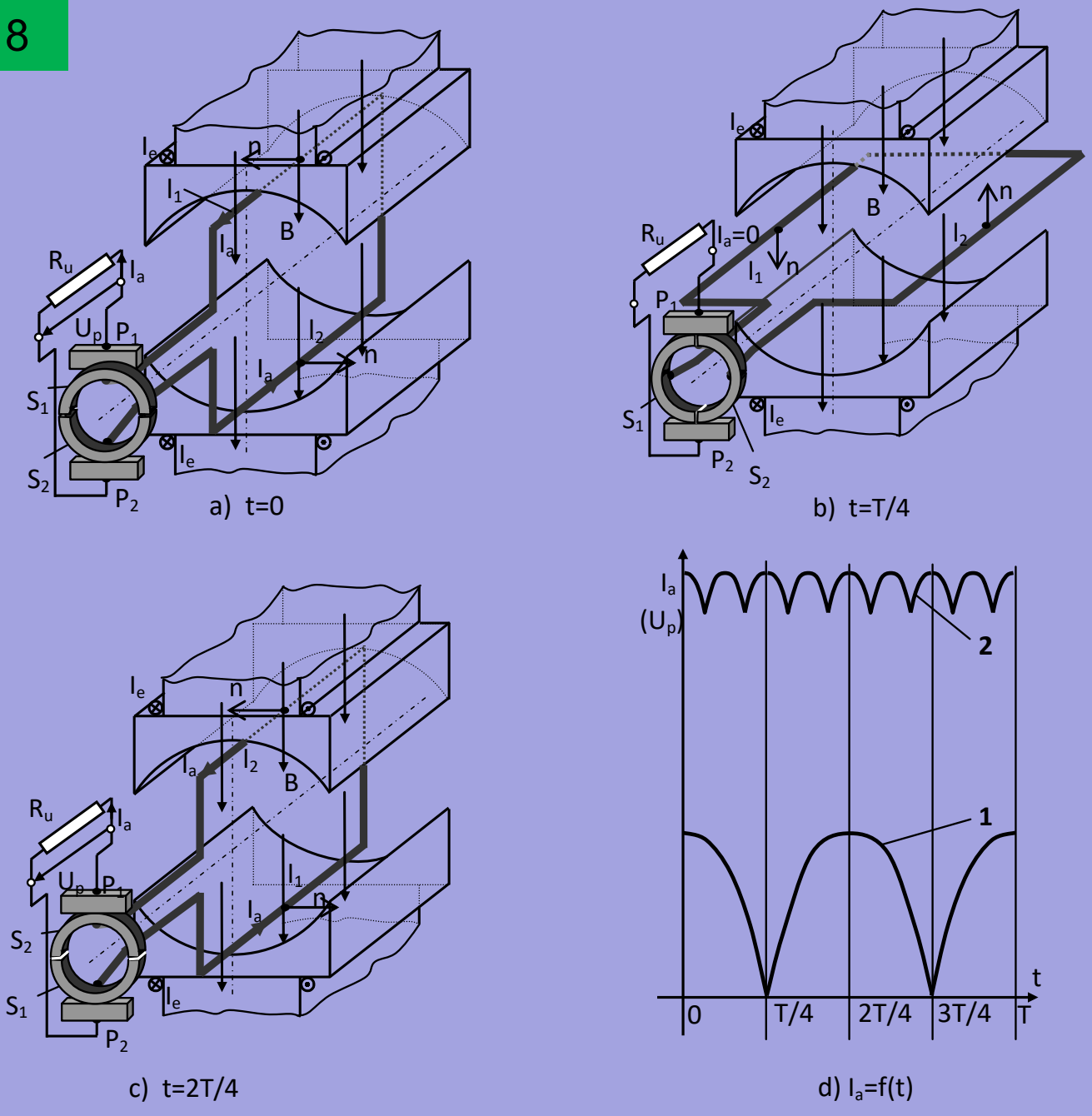
Întrucât laturile spirei și-au schimbat poziția față de situația din fig.5 (latura ℓ_1 este în vecinătatea polului S iar latura ℓ_2 în vecinătatea polului N), sensul tensiunii induse și al curentului s-au inversat.

Însă, odată cu rotirea spirei și a semi-inelelor, în acest moment, peria P_1 calcă pe semi-inelul S_2 iar peria P_2 calcă pe semi-inelul S_1 . Drept urmare, sensul curentului prin sarcina R_s NU s-a modificat.

Pentru următoarele două poziții intermediare care încheie o rotație completă a spirei, fenomenele se petrec similar cu cele descrise anterior.

Principiul de funcționare în regim de generator de c.c.

Fig. 8



Pentru noua structură la care inelele au fost înlocuite cu semi-inele, fenomenele electromagnetice NU se modifică în ceea ce privește spira: tensiunea indusă cât și curentul care circulă prin spirală rămân ALTERNATIVE.

Modificarea esențială apare în circuitul exterior, reprezentat de rezistența de sarcină R_s . Aici, pe toată durata rotirii spirei, curentul își păstrează sensul. În fig.8d, curba 1 indică acest lucru. Practic, curba sinusoidală din fig.4d „este redresată”. „Redresorul” este reprezentat de cele două semi-inele împreună cu cele două perii. Se poate vorbi de cel mai simplu „redresor mecanic”.

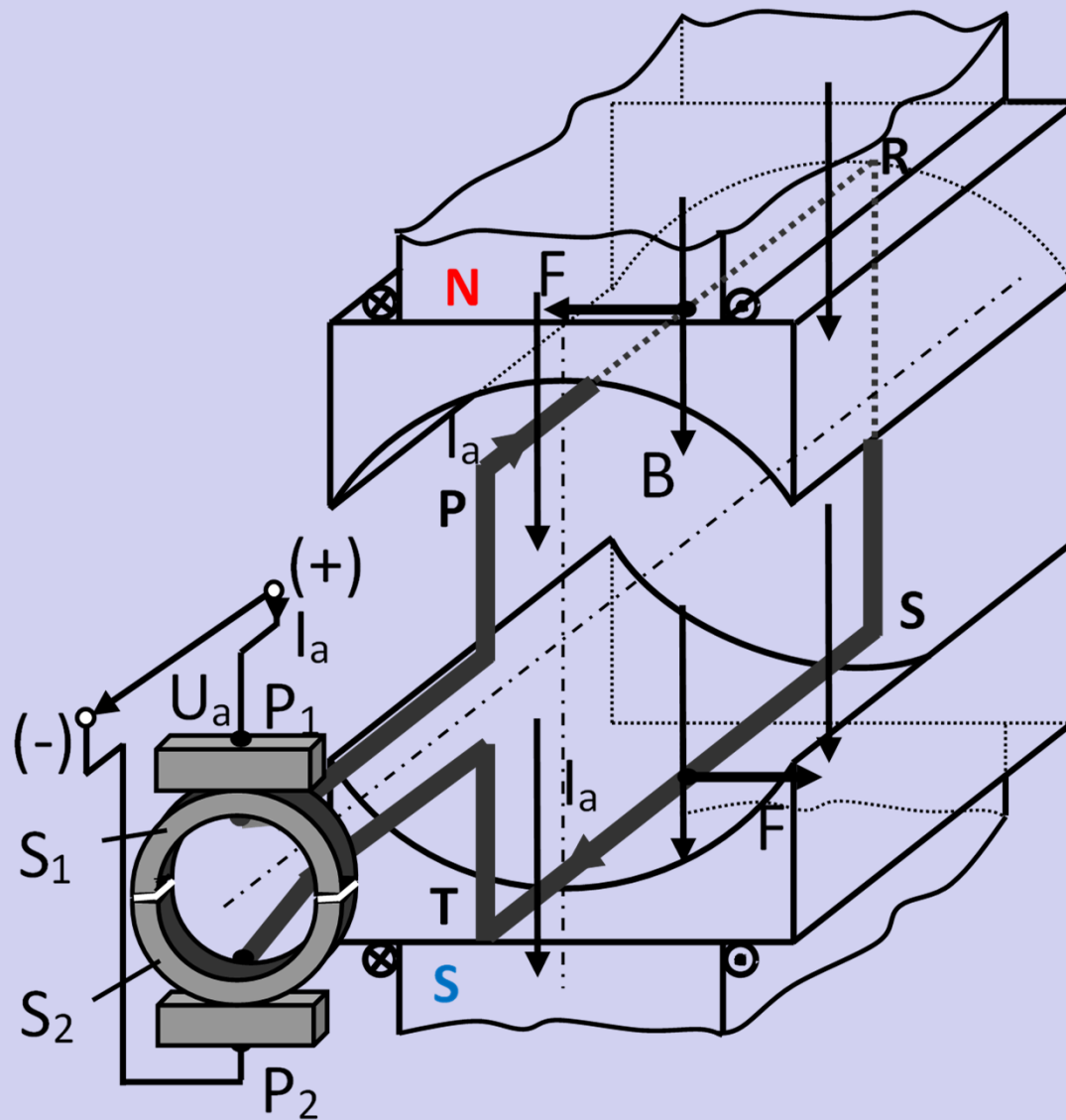
În construcția mașinilor electrice de c.c., numărul de spire și de semi-inele este mult mai mare. Ca urmare, redresarea curentului determină o curbă (curba 2 din fig.8d) ale cărei variații de amplitudine sunt mult diminuate astfel încât, curentul prin circuitul exterior poate fi considerat un *curent continuu* (Atenție, nu este același tip de curent pe care îl poate furniza un acumulator, de exemplu).

Semi-inelele devin, în realitate, lamele de colector care formează subansamblul numit colector. Cu cât numărul de lamele este mai mare cu atât variațiile de amplitudine ale curentului (și tensiunii la borne) sunt mai mici.

Structura prezentată reprezintă un *generator electric de curent continuu*.

Principiul de funcționare în regim de motor de c.c.

Fig. 9



a) $t = 0$

Pentru a funcționa în regim de motor, structura prezentată în fig.9 înlocuiește în circuitul exterior rezistența de sarcină cu o sursă de alimentare de *tensiune continuă*, notată cu U_a . Astfel, prin intermediul sistemului perii-inele, spira este alimentată și parcursă de curent. În cazul prezentat în figură, curentul I_a parcurge latura ℓ_1 de la P la R și latura ℓ_2 de la S la T (sensul curentului este determinat de polaritatea tensiunii U_a).

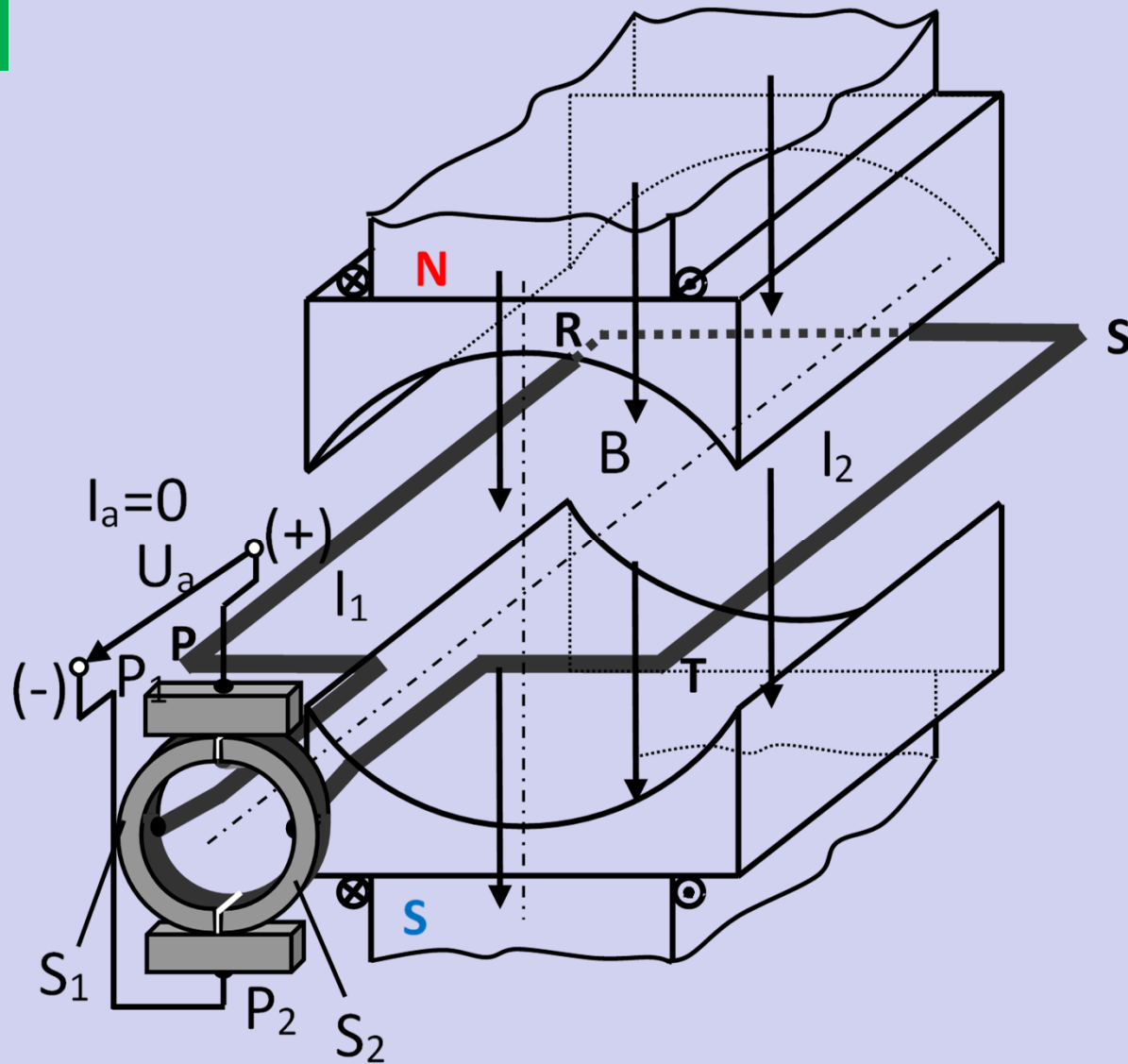
Polii electromagnetici creează câmpul magnetic caracterizat de inducția B (pe figură liniile de câmp se închid vertical între cei doi poli). Pentru a crea acest câmp, polii electromagnetici sunt și ei alimentați în curent continuu.

Întrucât orice conductor parcurs de curent și aflat într-un câmp magnetic este supus unei forțe (forța Laplace), rezultă că asupra laturilor ℓ_1 și ℓ_2 acționează forța F având sensul dat de *regula mâinii stângi*. Cele două forțe determină rotirea spirei în sens trigonometric.

Pentru poziția din fig.9 (planul spirei este paralel cu liniile de câmp) valoarea forței este maximă.

Principiul de funcționare în regim de motor de c.c.

Fig. 10



b) $t = T/4$

Odată cu rotirea spirei, forța Laplace scade, iar în poziția din fig.10, valoarea forței devine zero.

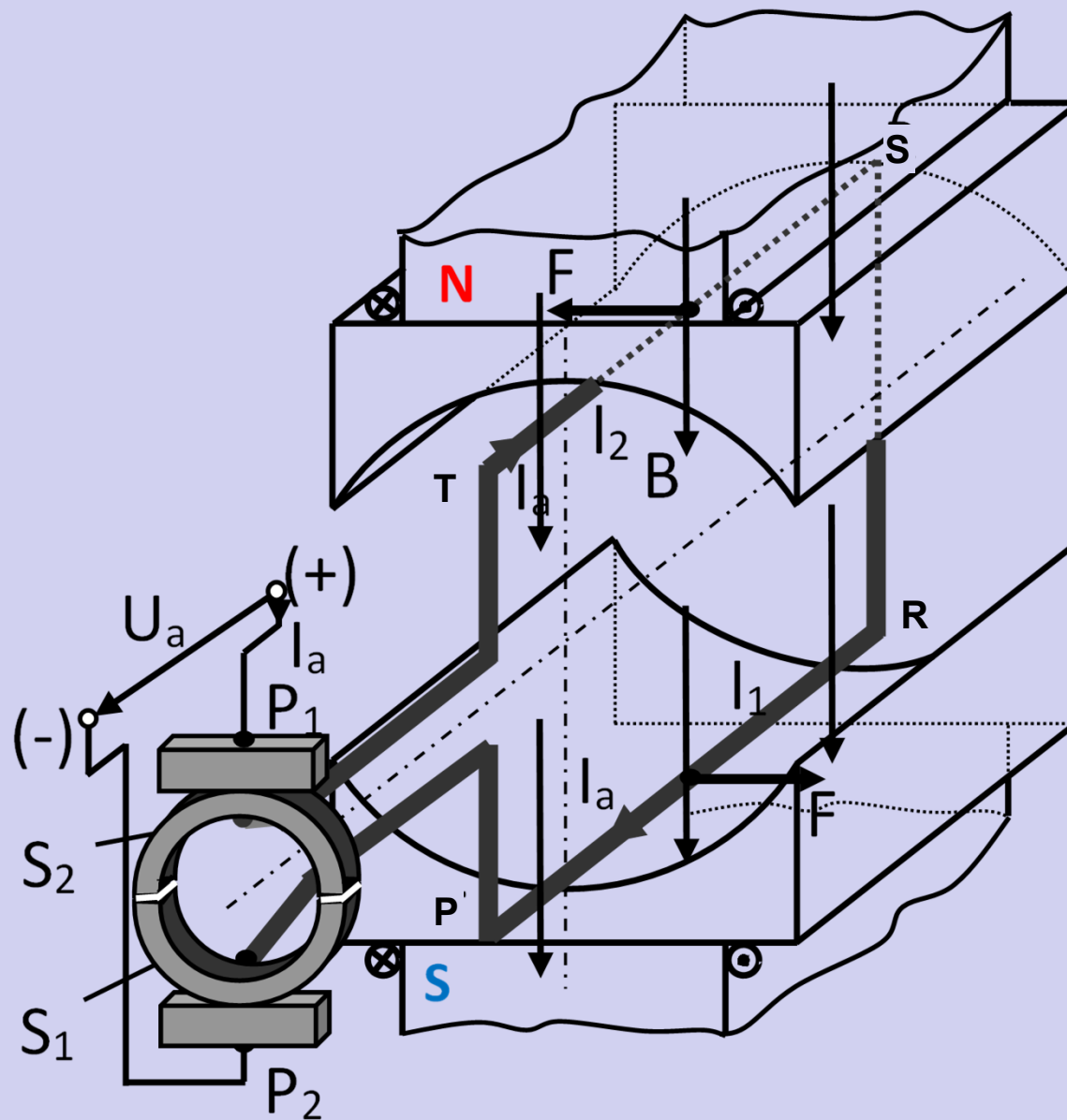
Tot în această poziție perile scurt-circuiteză cele două semi-inele. În mod ideal, curentul prin spiră devine zero.

Acceptăm ideea că rotirea spirei nu se oprește în această poziție ci se continuă în același sens.



Principiul de funcționare în regim de motor de c.c.

Fig. 11



c) $t = 2T/4$

Trecerea spirei în al doilea sfert de rotație determină reapariția curentului I_a . Acesta are sens schimbat prin cele două laturi față de situația din fig.9. Drept urmare, forța Laplace are aceeași direcție și spira se poate roti în același sens.

Trebuie remarcat faptul că, deși tensiunea de alimentare a spirei este continuă, curentul prin spirală este ALTERNATIV. În regim de motor, ansamblul perii-lamele de colector joacă rol de *invertor mecanic*.

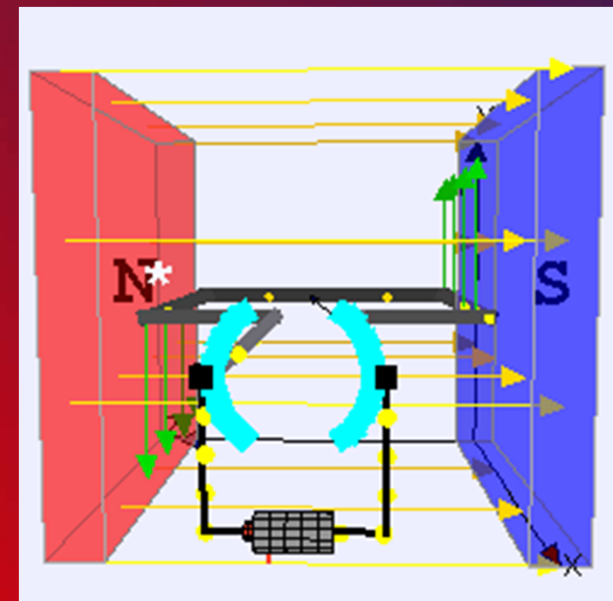
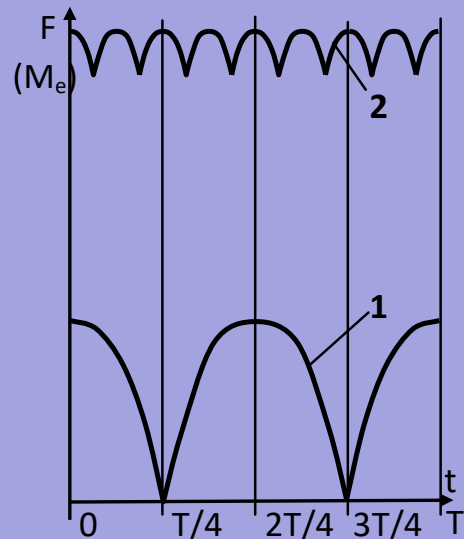
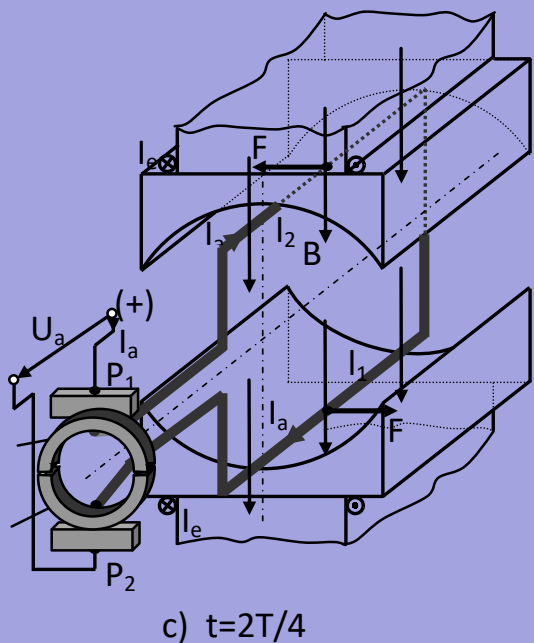
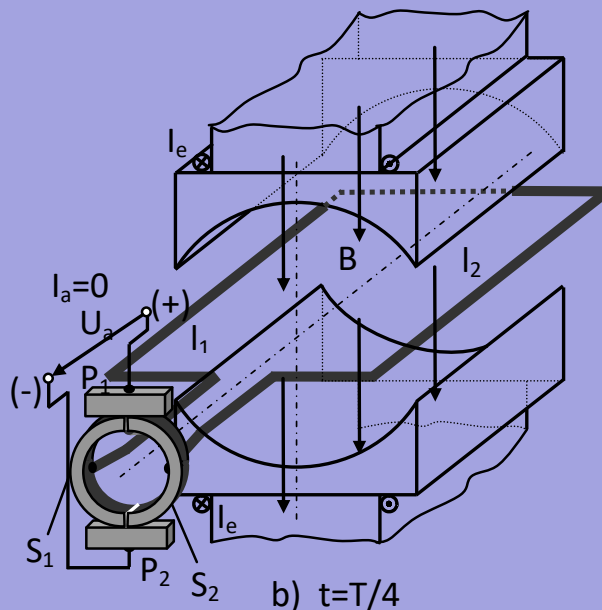
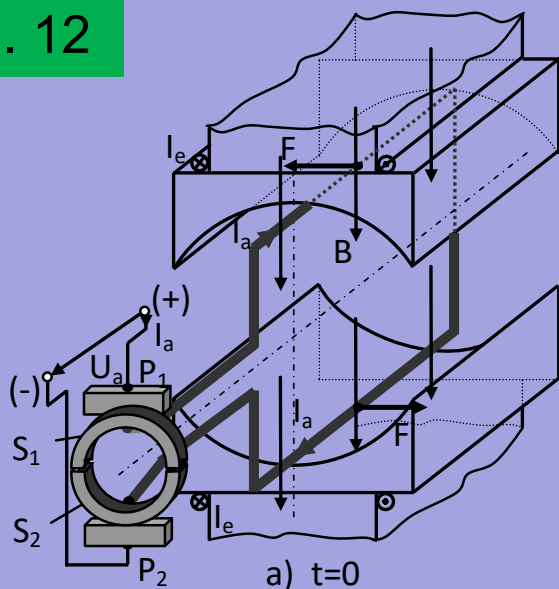
Amplitudinea forței crește și devine maximă atunci când planul spirei este paralel cu direcția liniilor de câmp.

Următoarele două sferturi de rotație respectă observațiile făcute până aici.



Principiul de funcționare în regim de motor de c.c.

Fig. 12



În fig.12d se remarcă faptul că forța care acționează asupra laturilor spirei și care determină rotirea acesteia este variabilă, prezentând așa-numite „pulsatii” (curba 1). În realitate, numărul de spire este mult mai mare astfel încât amplitudinea pulsațiilor este mult mai mică (curba 2). Cu cât numărul de lamele la colector este mai mare cu atât amplitudinea pulsațiilor este mai mică.

Având în vedere că mișcarea rotorului este o mișcare de rotație, forța Laplace ce acționează asupra laturilor spirei (spira fiind parcursă de curent) creează un cuplu, denumit cuplu electromagnetic. Variația cuplului electromagnetic (Fig. 12d) este identică cu a forței.

Practic, rotirea rotorului este cauzată de crearea acestui cuplu pe cale electromagnetică.





Câmp inductor (statoric)



Câmp de reacție (rotoric)



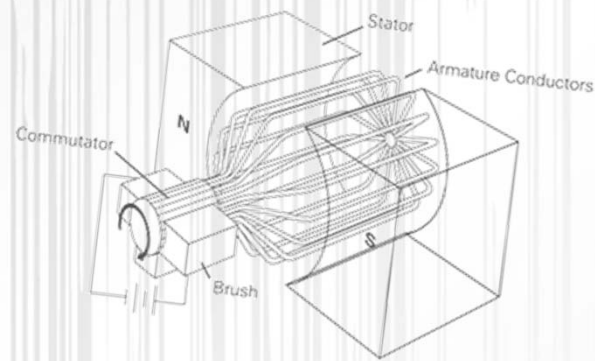
Redresor mecanic (colector + perii)



Forța Laplace



Înfășurările mașinilor de curent continuu



Clasificare

1

- Înfășurarea polilor principali
înfășurare inductoare (produce câmpul magnetic inductor)

2

- Înfășurarea polilor auxiliari
produce un câmp de anulare a reacției indusului

3

- Înfășurarea de compensare
produce un câmp suplimentar de anulare a reacției indusului

4

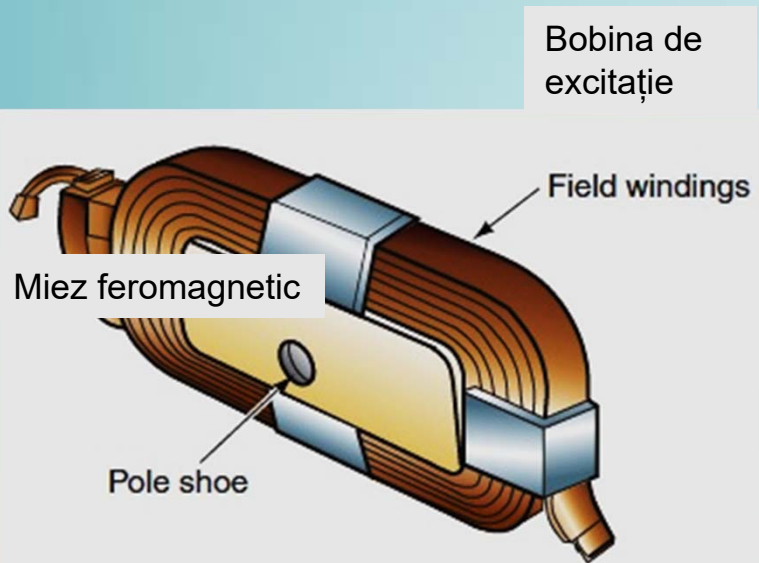
- Înfășurarea rotorului
înfășurarea indusă (sediul tensiunii induse de câmpul inductor)

1. Înfășurarea polilor principali

- Produce câmpul magnetic inductor. Este alimentată în c.c. iar bobinele sunt parcurse în așa fel încât să formeze poli alternanți ca polaritate.
- Este o înfășurare de tip concentrat, plasată pe polii inductori (statorici).
- Față de înfășurarea de pe rotor, ea poate fi conectată în serie, derivație sau poate fi separată (circuit electric separat).



Bobinele de excitație serie sunt complet diferite de cele de excitație derivație (sau separată). Cele pentru excitație serie au, de regulă, număr mic de spire de secțiune mare în timp ce bobinele pentru excitație separată au număr mare de spire de secțiune mică. Nu este permisă utilizarea lor decât pentru tipul de conexiune pentru care au fost dimensionate.



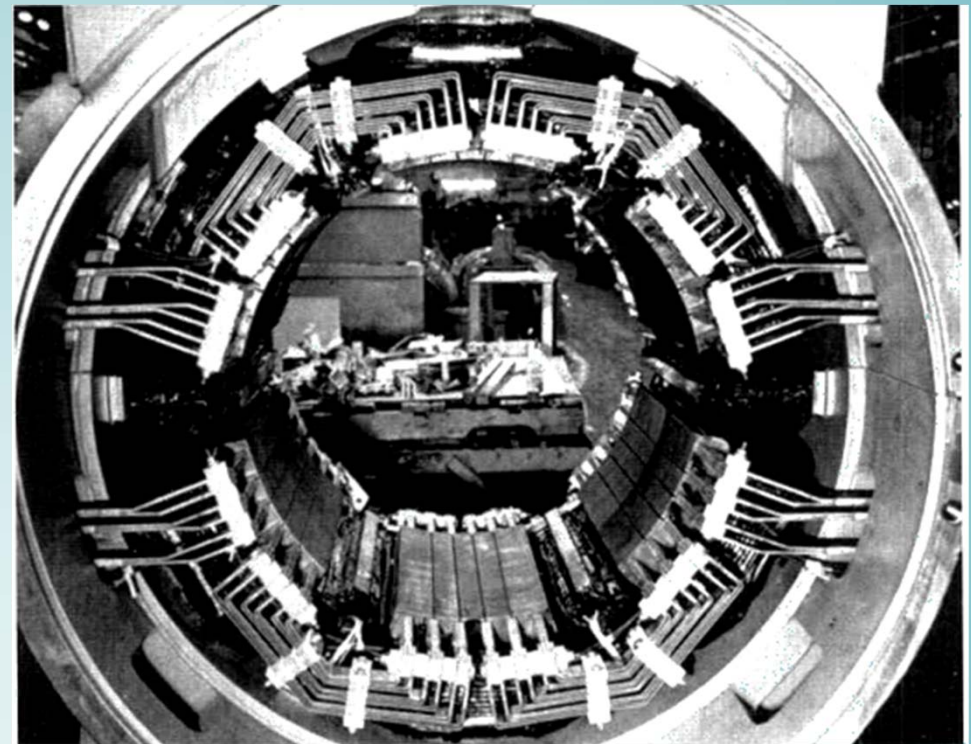
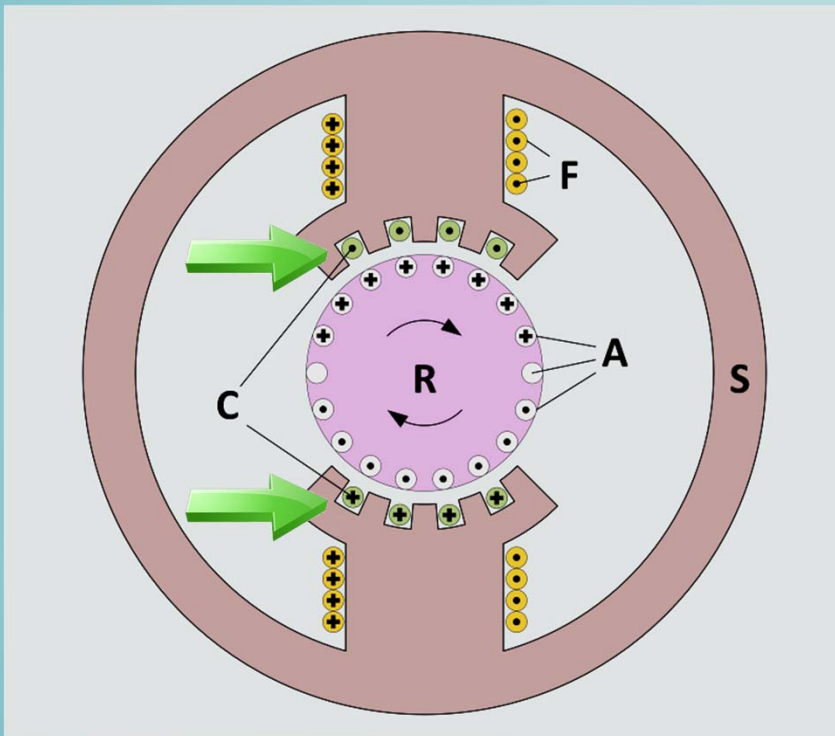
2. Înfășurarea polilor auxiliari

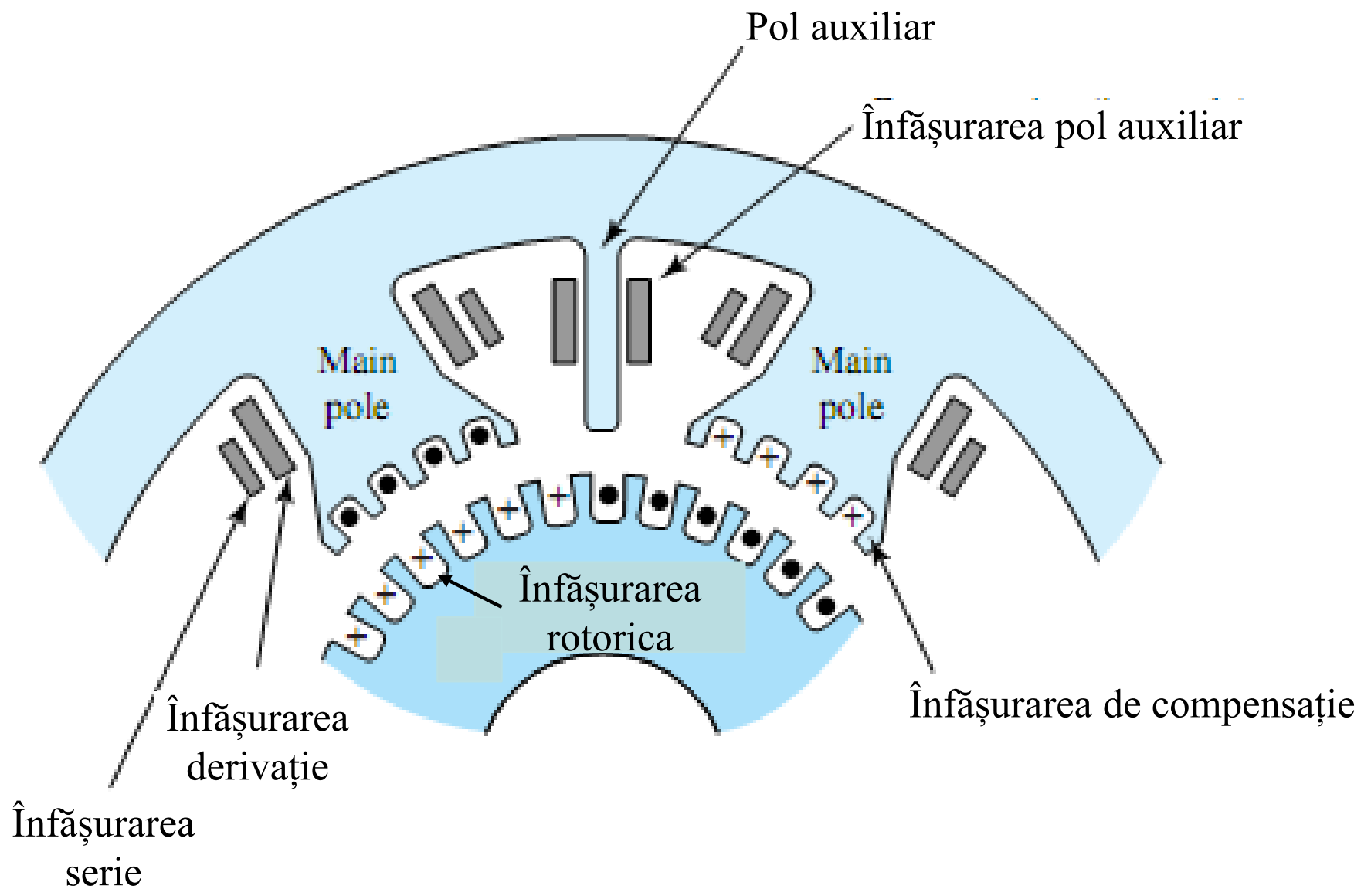
- a) Produce câmpul magnetic necesar anulării reacției indusului în zona interpolară (neutră).
- b) Înfășurare de tip concentrat, plasată pe polii auxiliari.
- c) Întotdeauna este conectată în serie cu înfășurarea indusului. În consecință, secțiunea conductoarelor este asemănătoare cu a celor din înfășurarea rotorică.



3. Înfășurarea de compensare

- a) Produce un câmp magnetic suplimentar pentru anularea reacției indusului (măsură suplimentară de îmbunătățire a comutației).
- b) Înfășurare de tip repartizat, plasată în creștături pe piesele polare ale polilor principali.
- c) Întotdeauna este conectată în serie cu înfășurarea indusului.





Plasarea înfășurărilor în mașina de c.c.

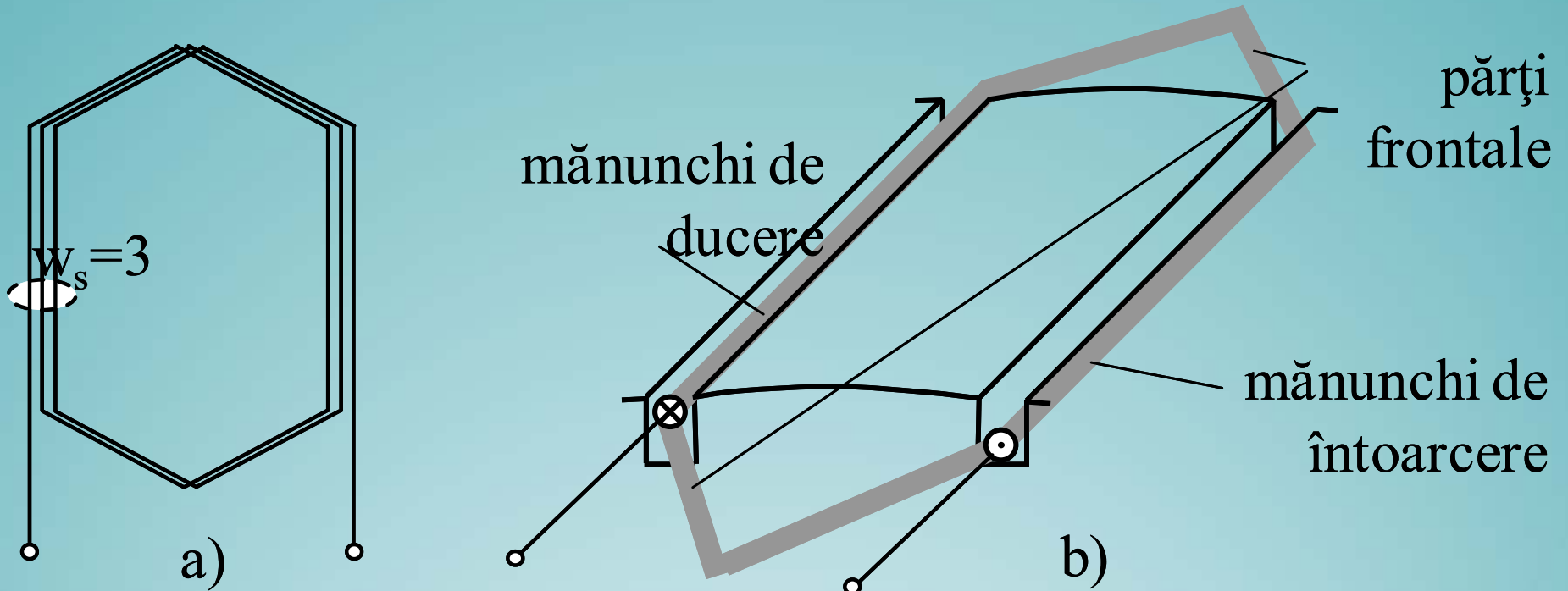
4. Înfășurarea indusului

- a) Este sediul tensiunii induse de către câmpul inductor.
- b) Înfășurare de tip repartizat, plasată în creștăturile rotorului.
- c) Înfășurare închisă ale cărei capete sunt legate la lamelele colectorului.

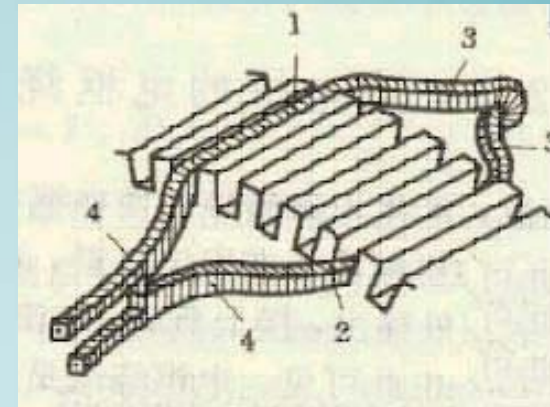


Elemente de construcție a înfășurărilor de c.c.:

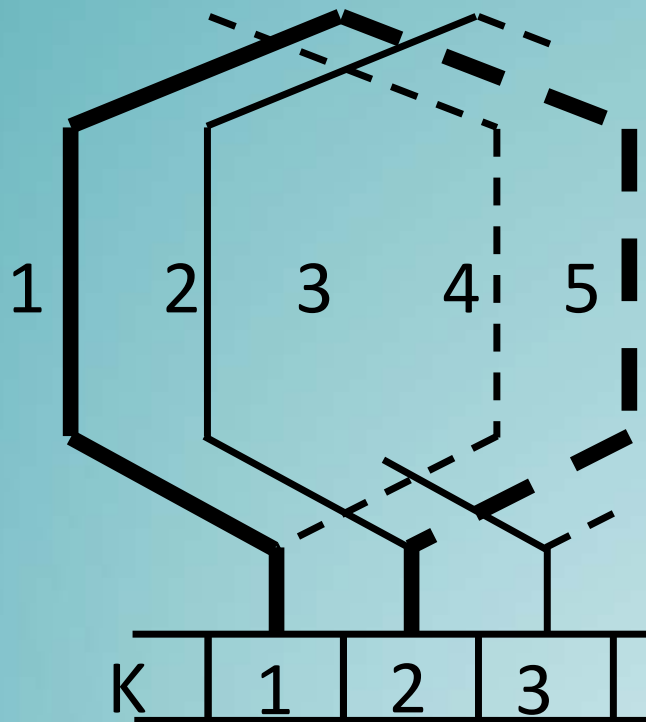
a) secție compusă din 3 spire înseriate, b) secție introdusă în creștături



Întrucât este necesar ca înfășurarea rotorică să aibă un număr mare de conductoare (pentru creșterea tensiunii induse), înfășurarea rotorică are secții care au mai multe spire înseriate. În fig.a este prezentată o secție formată din 3 spire ($w_s = 3$).



Notații, definiții:



Secția – totalitatea spirelor cuprinse între 2 lamele ale colectorului, succesive d.p.d.v. electric

- Numărul total de secții – S

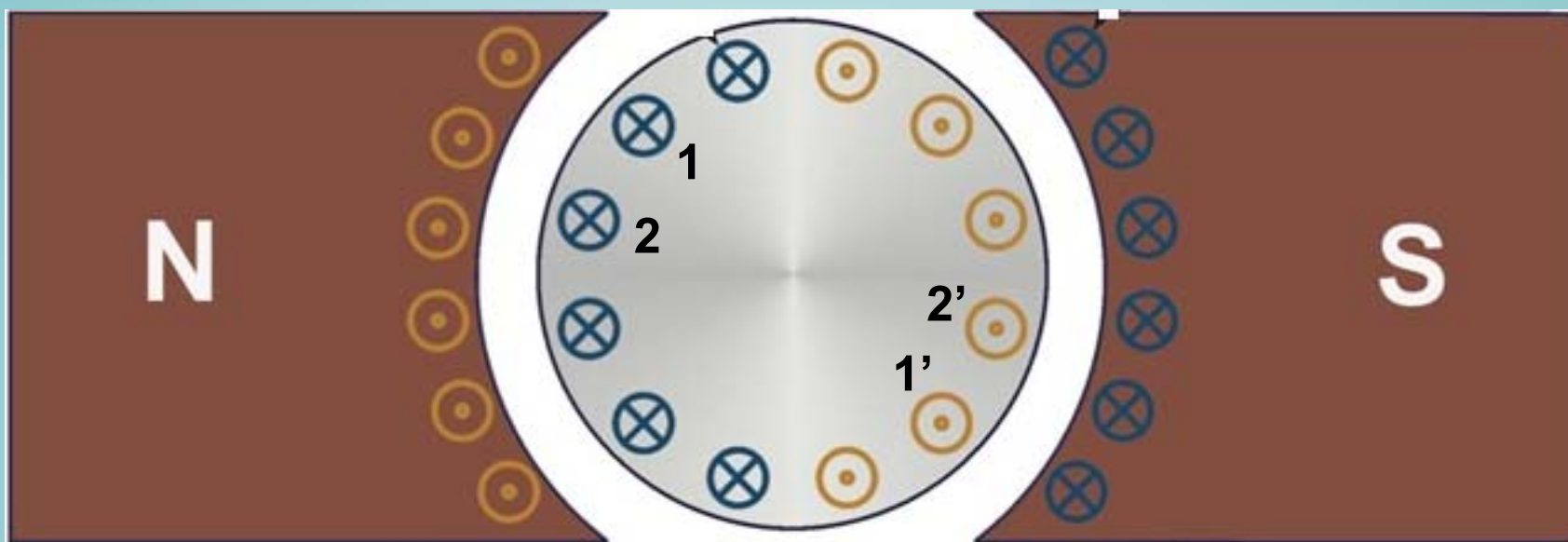
- Numărul total de lamele la colector – K

Deoarece la fiecare lamelă de colector sunt legate capetele a 2 secții, atunci:

$$S = K$$

Condiții funcționale de realizare a înfășurării rotorice:

1. Pentru ca tensiunile induse într-o spiră să se adune trebuie ca cele două laturi ale spirei să se găsească sub poli de polaritate opusă;
2. Pentru ca tensiunea în spiră să fie maximă este necesar ca cele două laturi ale spirei să ocupe aceeași poziție în câmpul magnetic, adică distanța între laturile spirei să fie egală cu pasul polar.



Pasul polar, τ : distanța, în număr de creștături rotorice, între axele a doi poli statorici consecutivi.

$$\tau = \frac{Z}{2p}$$

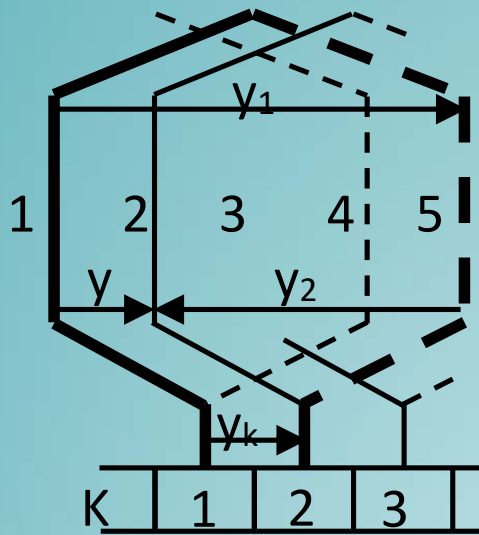
unde: Z = număr de creștături rotorice

$2p$ = număr de poli statorici (p =număr de perechi de poli statorici)

Dacă pasul înfășurării (adică distanța dintre latura de ducere și cea de întoarcere a fiecărei secții) este egal cu pasul polar, se spune că înfășurarea are *pas diametral*.

Există situații când pasul înfășurării poate fi mai mic („pas scurtat”) sau mai mare („pas alungit”).

Înfășurări buclate



$$y = y_1 - y_2$$

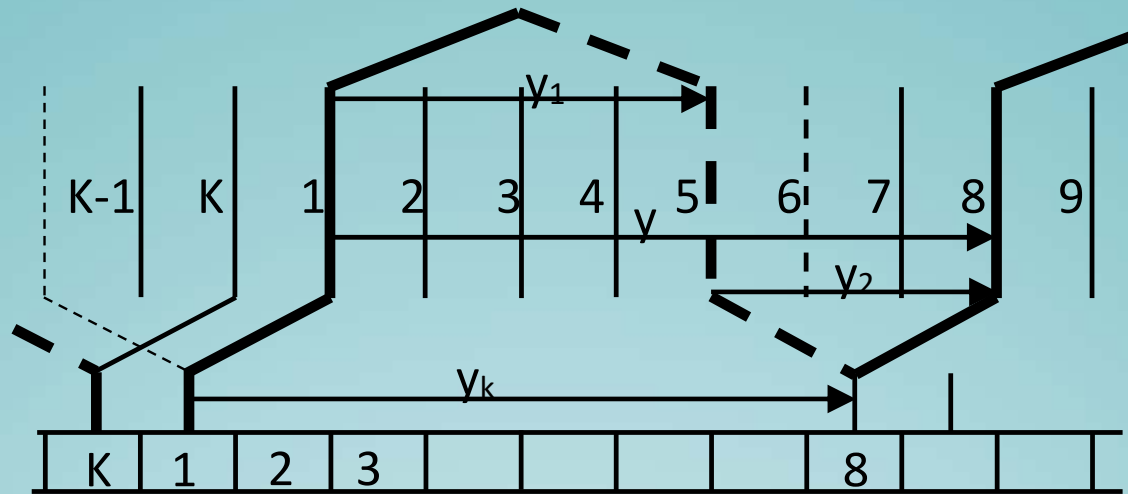
$$y_1 = \tau = \frac{Z}{2p}$$

1. Capetele fiecărei spire (secții) sunt legate (de regulă) la lamele alăturate ale colectorului;
2. Secțiile conectate în serie de pe aceeași *cale de curent* au laturile sub aceeași pereche de poli

Definiții:

- Pasul de întoarcere (pasul în spate): este distanța, măsurată în creștături, între latura de ducere și latura de întoarcere; se notează cu y_1
- Pasul de ducere (pasul în față): este distanța măsurată în creștături, între sfârșitul unei secții și începutul secției următoare; se notează cu y_2
- Pasul rezultat: este distanța măsurată în creștături, între laturile de ducere a două secții consecutive; se notează cu y

Înfășurări ondulate



$$y = y_1 + y_2$$

$$y_1 = \tau = \frac{Z}{2p}$$

y_k = pasul la colector

1. Capetele fiecărei spire (secții) sunt legate la lamele distanțate ale colectorului;
2. Secțiile conectate în serie de pe aceeași cale de curent au laturile sub toți polii mașinii.

Relațiile de calcul ale pașilor înfășurării rotorice pentru cele două tipuri de înfășurări sunt:

Înfășurare buclată

$$y = y_1 - y_2$$

$$y_1 = \frac{K}{2p} \mp \varepsilon$$

$$2a = 2p$$

Înfășurare ondulată

$$y = y_1 + y_2$$

$$y = \frac{K \mp 1}{p}$$

$$2a = 2$$

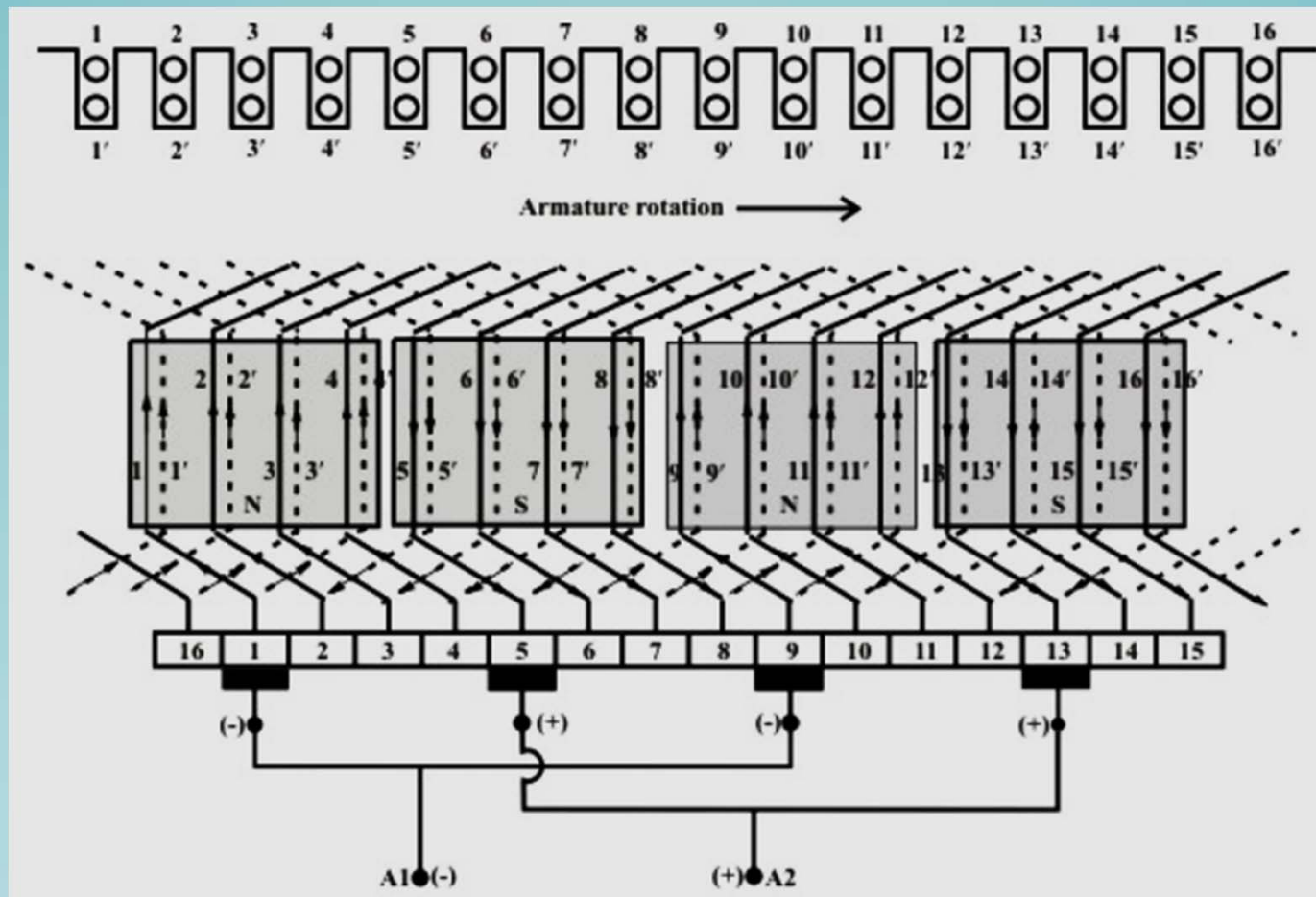
$$\mathbf{K} = \mathbf{S} = \mathbf{Z}_e = \mathbf{u} \cdot \mathbf{Z}$$

Observație: Atunci când numărul de poli ai mașinii este egal cu numărul de căi de curent ($2a=2p$), se realizează înfășurare buclată. Dacă numărul de căi de curent este egal cu 2, atunci se realizează înfășurare ondulată.

Definiție:

Calea de curent – porțiune de înfășurare (secții înseriate) dintre două perii consecutive de semn (polaritate) contrar. In calea de curent tensiunile induse au același semn și se adună.

$2a$ = numărul total de căi de curent dintr-o mașină



Exemplu : Lamela 1, creșătura 1 (dus), creșătura 5' (întors), lamela 2, creșătura 2 (dus), creșătura 6' (întors), lamela 3, creșătura 3 (dus), creșătura 7' (întors), lamela 4, creșătura 4 (dus), creșătura 8' (întors), lamela 5 → 4 secții înseriate între periele de pe lamelele 1 și 5.

Înfășurare buclată simplă:

$Z=16=K=S$, $2p=4$ - cu pas diametral

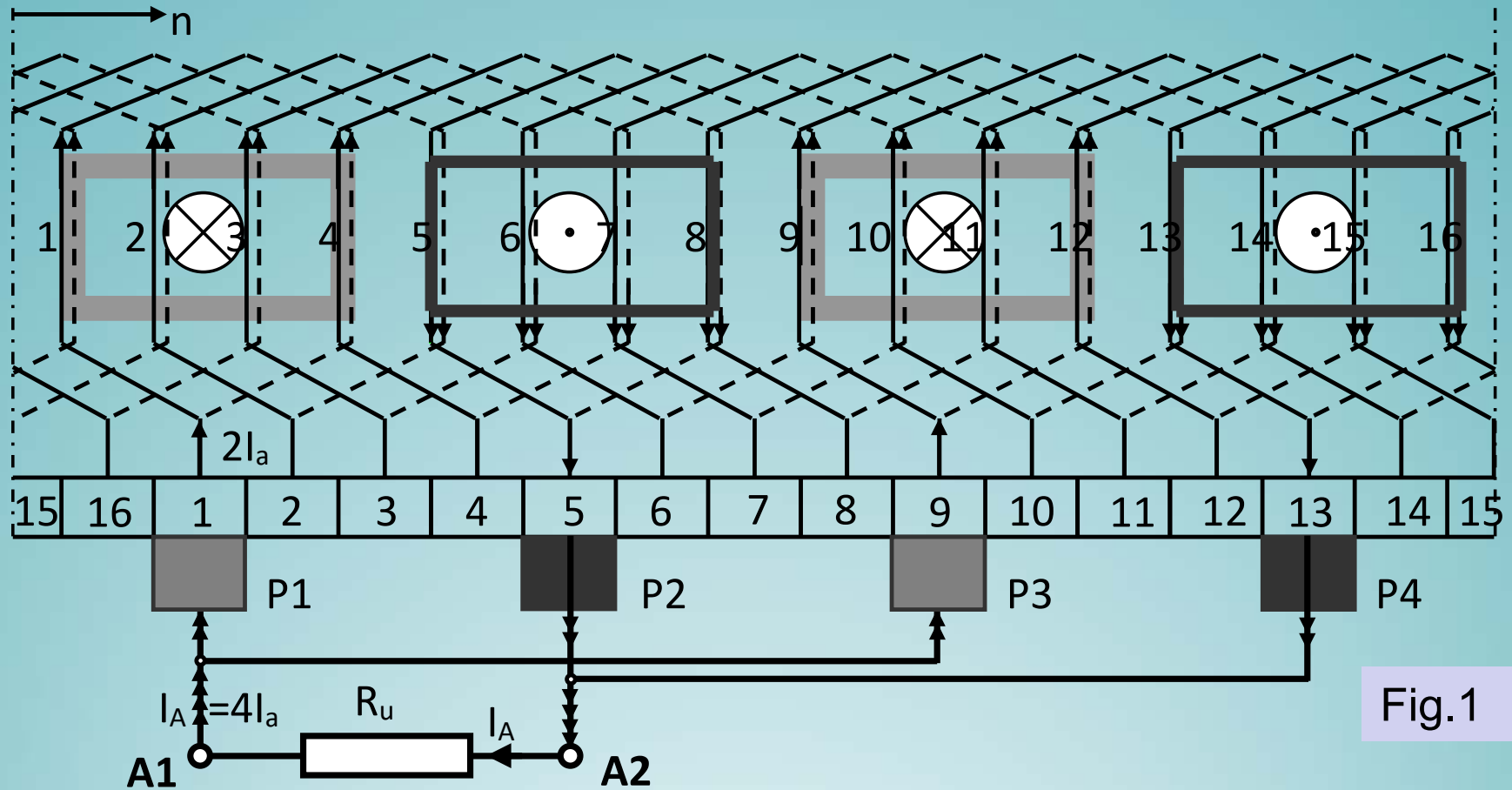


Fig.1

$$y_1 = \frac{Z}{2p} = \frac{16}{4} = 4;$$

$$y = y_k = +1;$$

$$y_2 = y_1 - y = 4 - 1 = 3$$

În fig.1 este prezentată o înfășurare buclată realizată pentru o mașină cu 4 poli statorici. Numărul de creștături rotorice, Z , este egal cu numărul de lamele de colector, K și cu numărul de secții, S . Poziția celor 4 poli statorici este figurată cu dreptunghiuri. Pe cele 16 lamele de colector calcă cele patru perii P_1 - P_4 (momentul ales pentru reprezentare este momentul în care fiecare perie calcă integral pe o singură lamelă). Ele sunt plasate simetric, la egală distanță una de alta. Periile de aceeași polaritate sunt legate între ele astfel încât capetele înfășurării rotorice sunt legate la bornele A_1 - A_2 . Rezistența R_u reprezintă circuitul extern al mașinii, respectiv sarcina.

Calcularea pașilor înfășurării (y , y_1 și y_2) permite realizarea secțiilor, plasarea acestora în creștături și conectarea la lamelele de colector.

Exemplu de secție: un capăt conectat la lamela 1, latura de ducere (linie plină) este plasată în creștătura 1, latura de întoarcere (linie punctată) în creștătura 5 (deoarece $y_1=4$), cel de-al doilea capăt al secției conectat la lamela 2. Urmează secția a doua care pornește de la lamela 2, trece prin creștătura 2 și se întoarce prin creștătura 6 și se leagă la lamela 3. Toate celelalte secții urmează aceeași regulă.

Modul de conectare a secțiilor între ele și legăturile la perii sunt prezentate în fig.2.

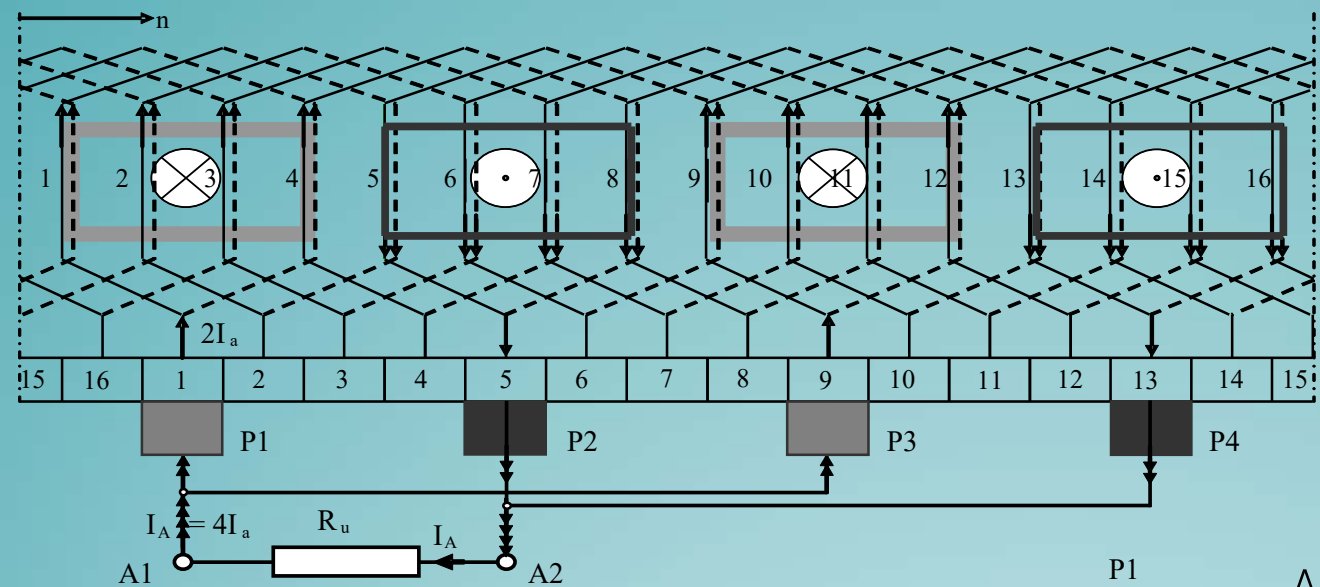
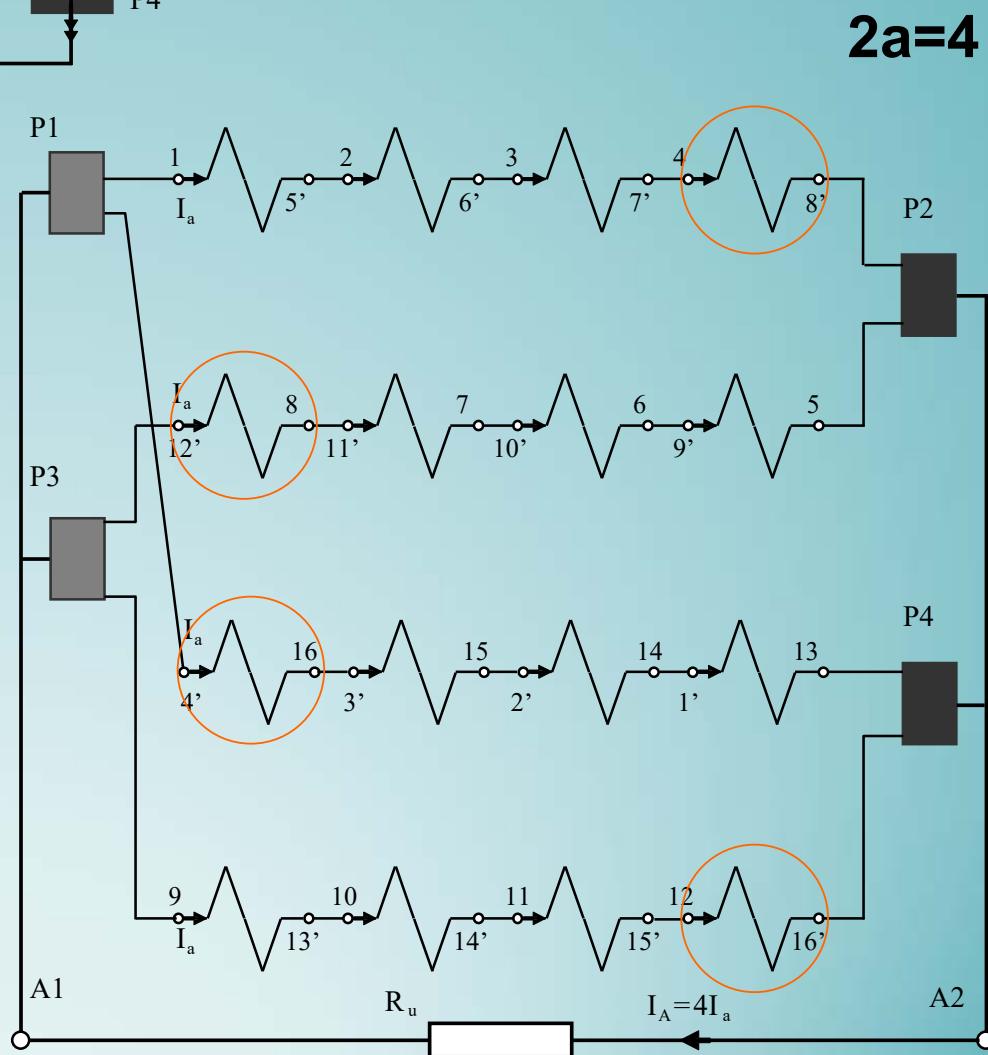


Diagrama circuitului electric corespunzătoare momentului in care periile calcă doar pe o lamelă de colector.

Se observă existența a 4 căi de curent ($2a=4$) fiecare fiind formată din câte 4 secții. Prin fiecare cale de curent circulă un curent notat cu I_a . Curentul prin sarcină este $I_A=4I_a$.

Fig.2



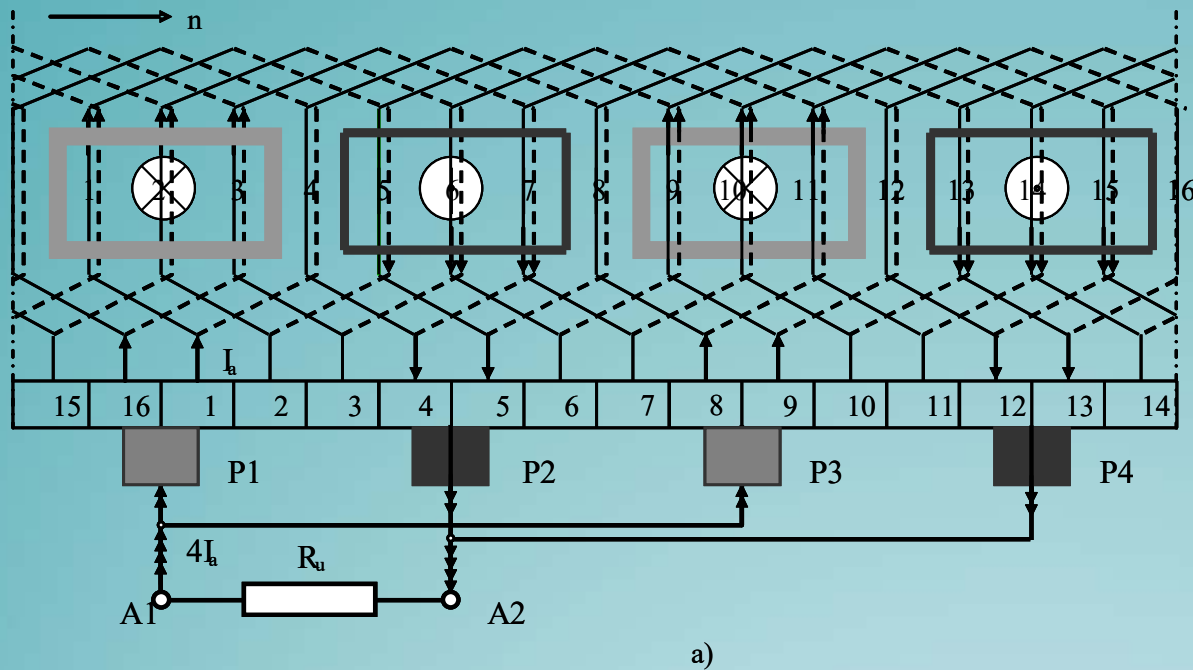
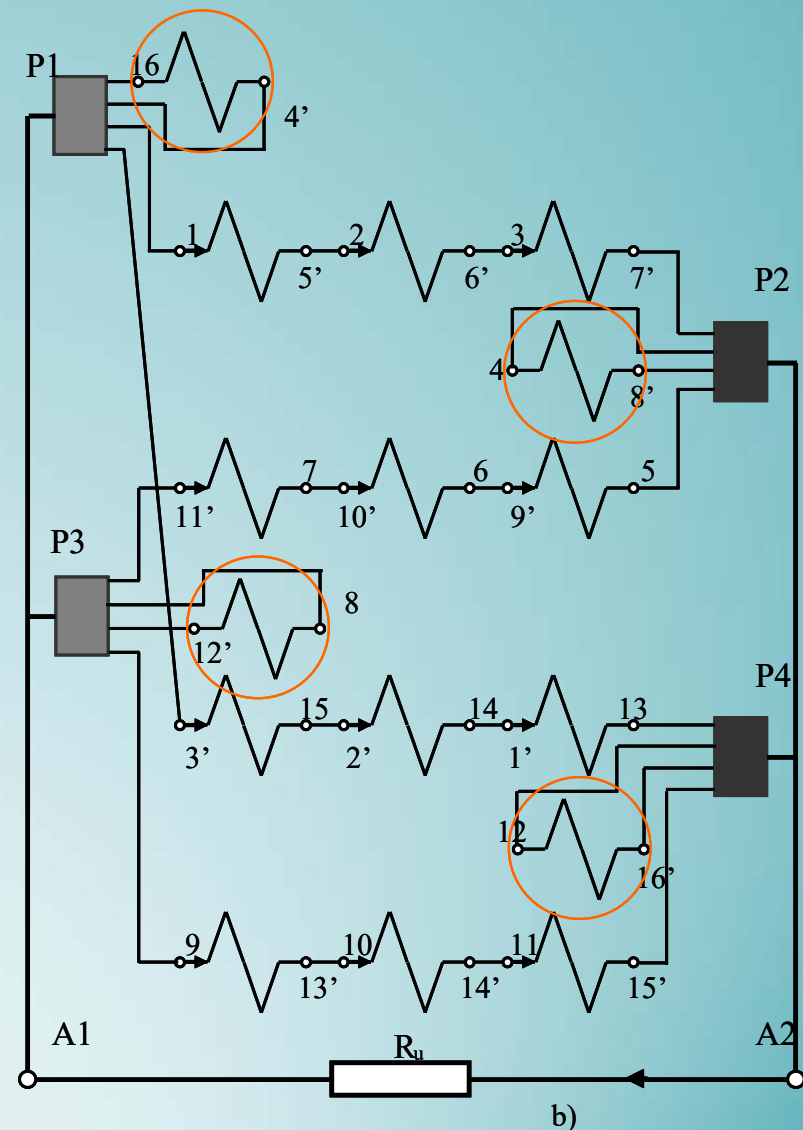


Diagrama circuitului electric corespunzătoare momentului în care periile calcă pe două lamele vecine de colector. Drept urmare, unele dintre secții sunt scurtcircuitate (cele încercuite). Rămân tot 4 căi de curent însă acum fiecare dintre ele conține doar 3 secții.

Este important ca în acest moment de scurtcircuitare, laturile secțiilor respective să se afle în zona interpolară. Acolo, teoretic, câmpul este nul, deci tensiunea indusă în secție este zero, iar scurtcircuitarea ei nu are nici un efect negativ.

Fig.3



Înfășurare ondulată simplă:

$$Z=17=K=S, 2p=4$$

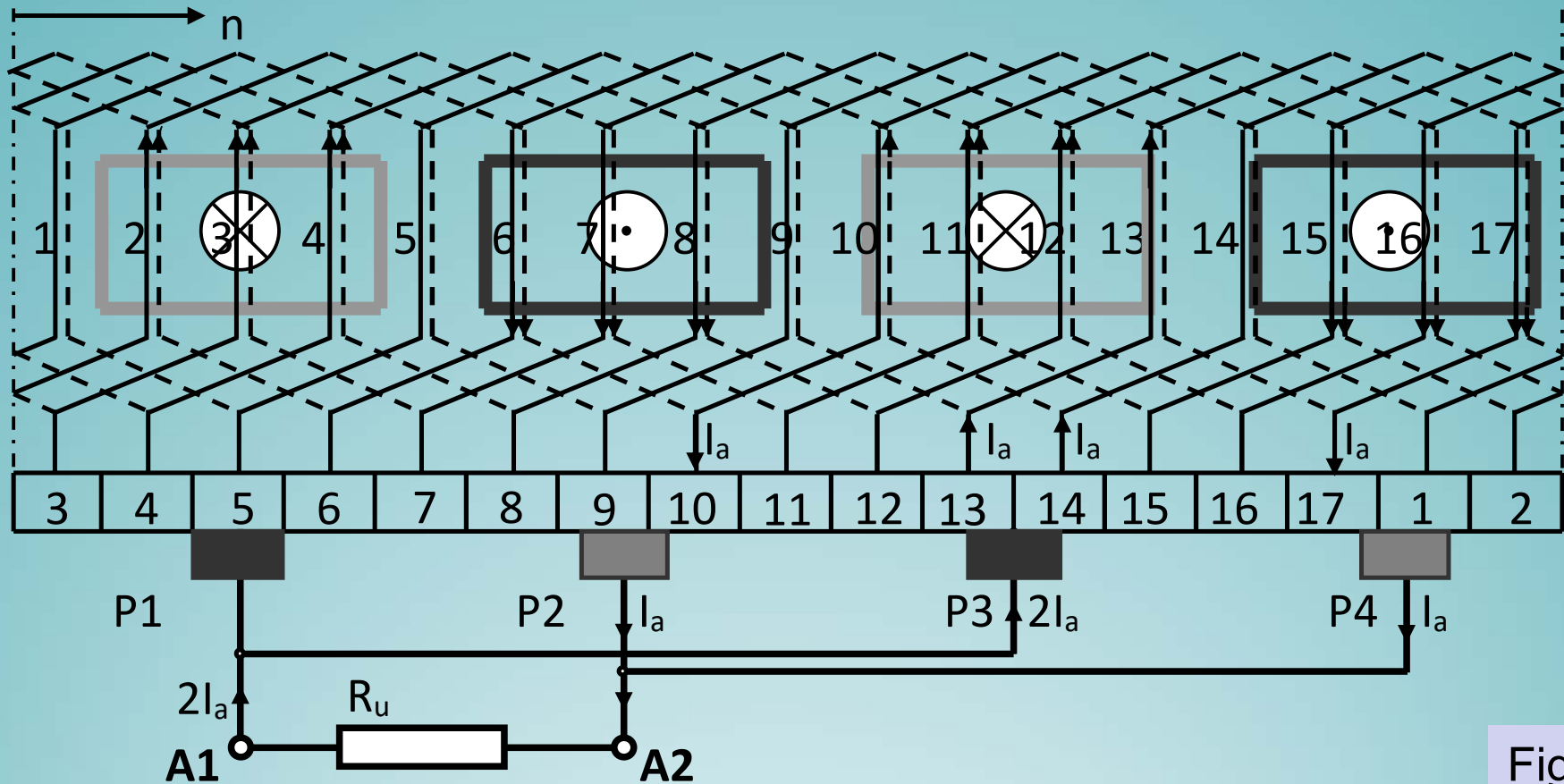


Fig.4

$$y_1 = \frac{Z}{2p} = \frac{17}{4} \neq \text{n.î.} \quad \text{Aleg } y_1=4$$

$$y = y_k = \frac{K \pm 1}{p} = \frac{17 \pm 1}{2} = 8$$

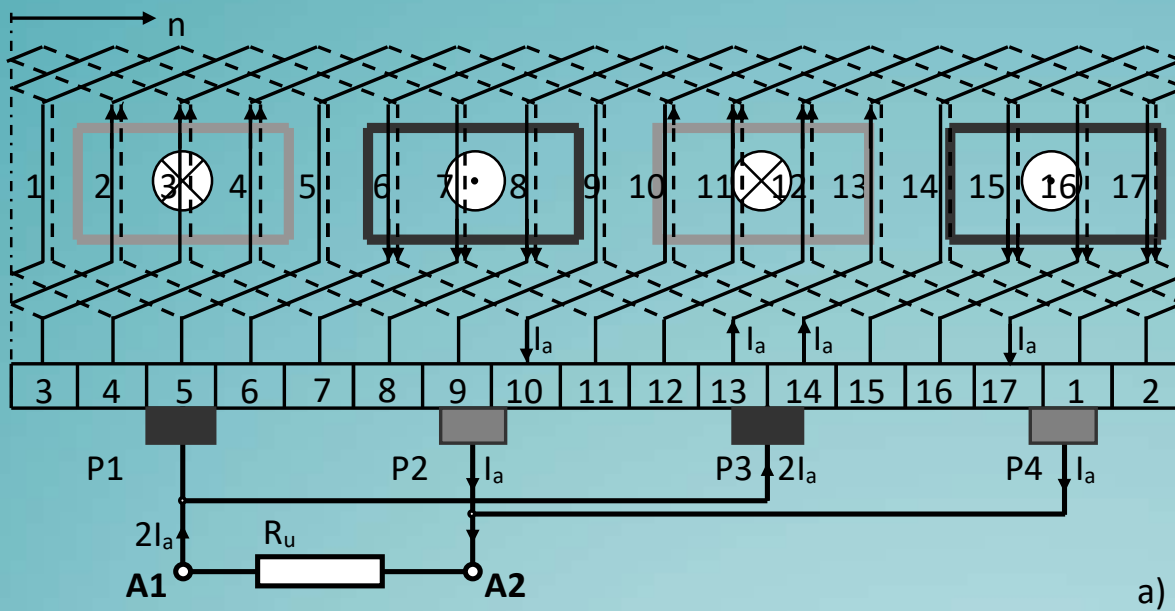
$$y_2 = y - y_1 = 8 - 4 = 4$$

În fig.4 este prezentată o înfășurare ondulată realizată tot pentru o mașină cu 4 poli statorici. Numărul de creștături rotorice, Z , este egal cu numărul de lamele de colector, K și cu numărul de secții, S dar este un număr impar (astfel încât înfășurarea să se poată „închide”). Pe cele 17 lamele de colector calcă cele patru perii P_1 - P_4 dar, de această dată, poziția periilor pe lamele este diferită: în timp ce peria P_1 calcă doar pe lamela 5, celelalte trei perii calcă pe câte două lamele de colector, scurtcircuitând anumite secții.

La calcularea pașilor înfășurării (y , y_1 și y_2) se observă că pasul de ducere nu rezultă un număr întreg. Fizic însă el nu poate fi decât număr întreg (este număr de creștături). Se alege numărul întreg imediat inferior sau imediat superior. În cazul pasului rezultat, y și a pasului la colector, y_k s-a ales semnul minus din relație (în mod egal se poate alege semnul plus).

Exemplu de secție: un capăt conectat la lamela 5, latura de ducere (linie plină) este plasată în creștătura 5, latura de întoarcere (linie punctată) în creștătura 9 (deoarece $y_1=4$), cel de-al doilea capăt al secției conectat la lamela 13 (deoarece $y_k=8$). Urmează secția a doua care pornește de la lamela 13, trece prin creștătura 13 (deoarece $y=8$) și se întoarce prin creștătura 17 și se leagă la lamela 17. Toate celelalte secții urmează aceeași regulă.

Modul de conectare a secțiilor între ele și legăturile la perii sunt prezentate în fig.5.



Înfășurare ondulată simplă:
 $Z=17=K=S$, $2p=4$

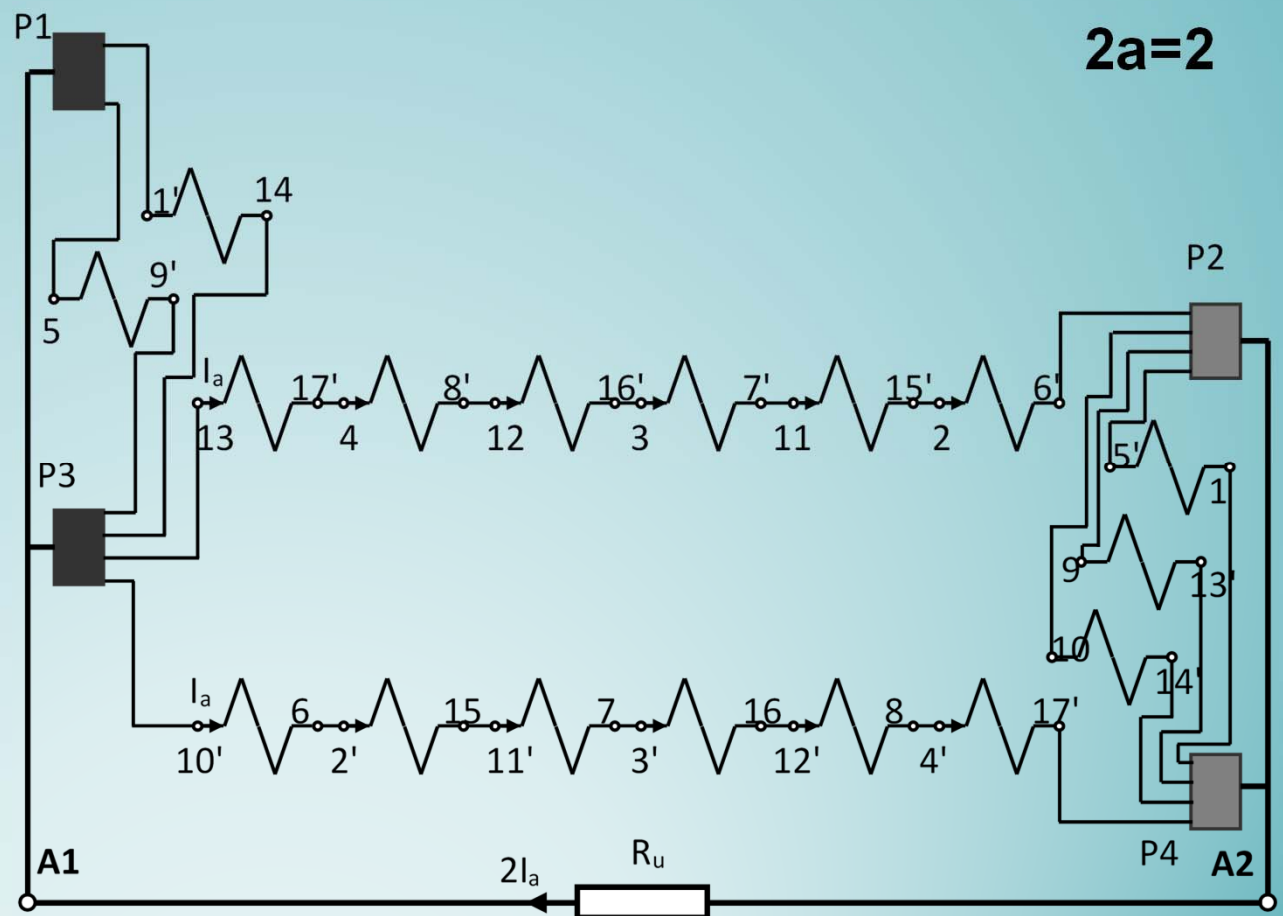


Fig.5

Poziția periilor determină scurtcircuitarea a 5 secții: 1'-14 și 5-9' între periile P_1 și P_3 respectiv 5'-1, 9-13' și 10-14' între periile P_2 și P_4 .
Restul secțiilor formează 2 căi de curent ($2a=2$).


Curentul prin sarcină este $I_A=2I_a$.



Atât în cazul înfășurării buclate cât și în cazul înfășurării ondulate, datorită rotirii rotorului și a modificării poziției periilor pe lamelele colectorului, secțiile scurtcircuitate se schimbă și prezența secțiilor într-o anumită cale de curent se schimbă, de asemenea.



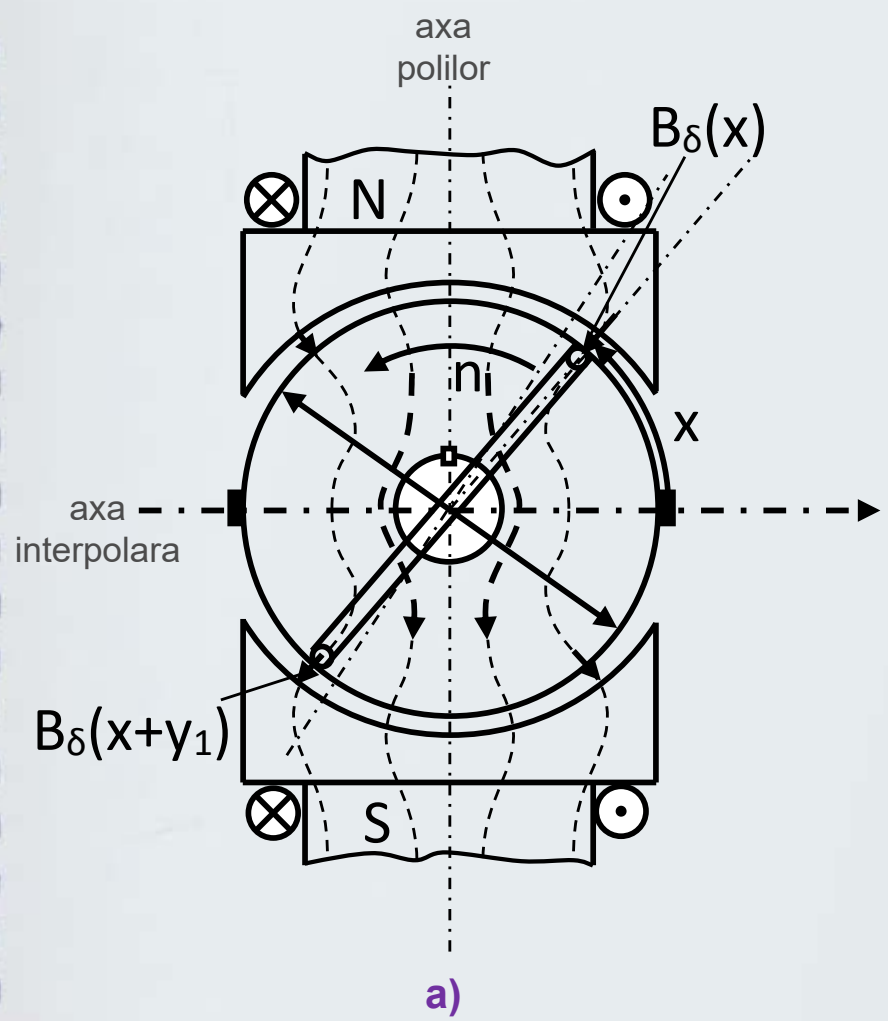
- *Înfășurare inductoare*
- *Înfășurare indusă*
- *Înfășurare concentrată*
- *Înfășurare repartizată*
- *Înfășurare ondulată*
- *Înfășurare buclată*

A silver fountain pen is positioned diagonally in the upper right corner of the page, resting on the spiral-bound notebook. The notebook is light blue with a silver spiral binding on the left side. The text is centered on the page in a bold, dark blue font.

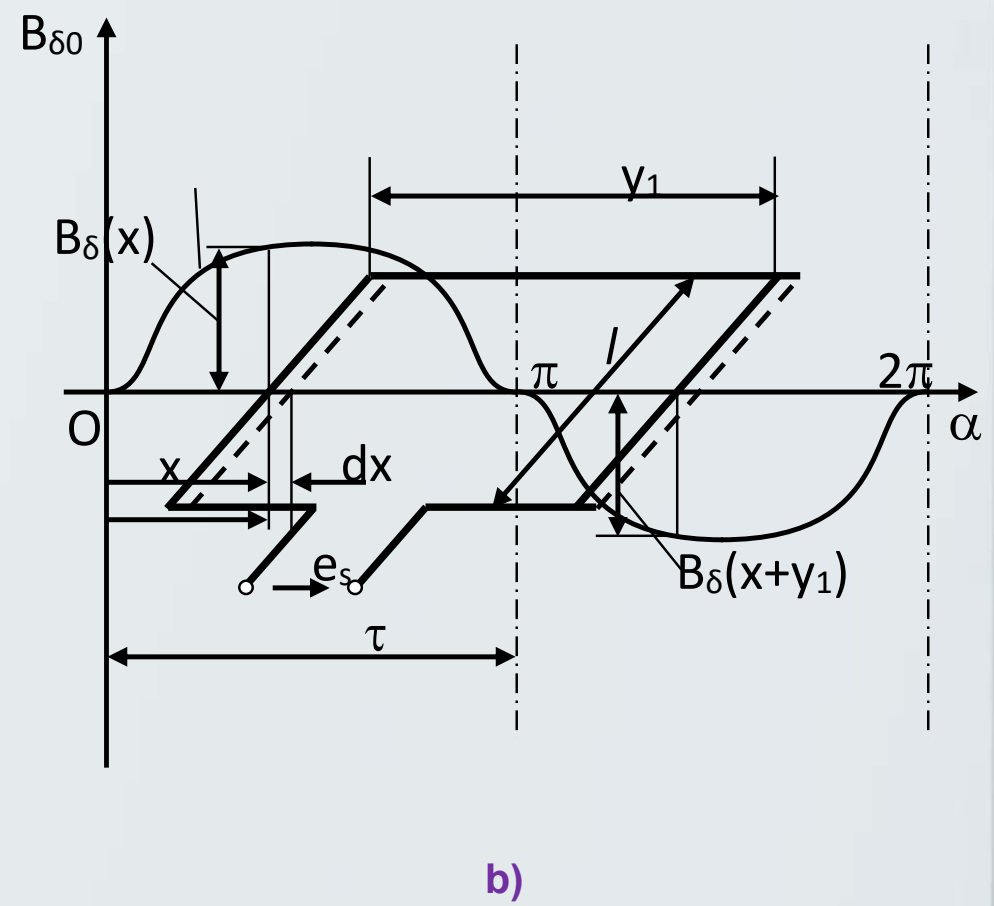
Expresia tensiunii induse la periile mașinii de C.C.
Expresia cuplului electromagnetic al mașinii de C.C.
Reacția indusului la mașina de C.C.

Expresia tensiunii la bornele mașinii de C.C.

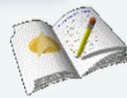
Fig.1



Secțiune transversala MCC

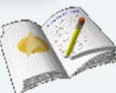


Variația inducției în întrefier



Expresia tensiunii la bornele mașinii de C.C.

- Se consideră o mașină de c.c. bipolară având polaritatea polilor indicată în fig.1a. Liniile câmpului magnetic inductor se închid pe traseul pol N, întrefier, rotor, întrefier, pol S și jugul statoric (care nu este figurat pe desen). Densitatea liniilor de câmp este aproximativ constantă sub poli și teoretic zero în axa interpolară (din acest motiv ea se mai numește și axa neutră a mașinii). Variația câmpului în întrefier arată ca în fig.1b unde, prin convenție, s-a considerat că în dreptul polului N câmpul este pozitiv iar în dreptul polului S câmpul este negativ. Forma de variație a câmpului este oarecum trapezoidală (câmpul este maxim și aproximativ constant sub poli și devine rapid zero între poli).
- Pentru simplitate, se consideră o singură secție, plasată în două creștături rotorice diametral opuse.
- Secțiunea se rotește odată cu rotorul, cu viteza n , în sensul indicat (sens trigonometric) și intersectează liniile câmpului inductor.



Expresia tensiunii la bornele mașinii de C.C.

Conform legii inducției electromagnetice, datorită rotirii secției în câmpul magnetic inductor, se induce o tensiune data de expresia generală:

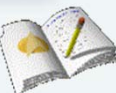
$$e_s = -\frac{d\Psi}{dt}$$

unde Ψ reprezintă fluxul inductor total ce înlanțuie conductoarele înfășurării rotorice

Exprimând fluxul prin mărimi specifice construcției și funcționării mașinii de curent continuu, se obține expresia tensiunii induse ce se regăsește la bornele înfășurării rotorice:

$$E_0 = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{60} \cdot n \cdot \Phi_0$$

unde p – numărul de perechi de poli ai mașinii; N – numărul total de conductoare ale înfășurării rotorice; n – turația rotorului; Φ_0 - fluxul inductor la funcționarea în gol; a – numărul de cai de curent.



Expresia tensiunii la bornele mașinii de C.C.

Daca se notează: $\frac{p}{a} \cdot \frac{N}{60} = k_e$ (constantă ce ține cont de parametrii constructivi)

atunci rezulta:

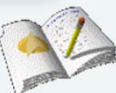


$$E_0 = k_e \cdot n \cdot \phi_0$$

funcționare la gol

$$E = k_e \cdot n \cdot \phi$$

funcționare în sarcină



Expresia cuplului electromagnetic al mașinii de C.C.

Cuplul, sau momentul forței, este o mărime fizică ce exprimă cantitativ capacitatea forței de a roti un rigid în jurul unei drepte.

Cuplul electromagnetic rezultă ca urmare a forței Laplace ce acționează asupra conductoarelor rotorice, parcurse de curent și aflate în câmpul magnetic al polilor principali. Întrucât forța Laplace acționează tangențial la suprafața rotorului, ea determină apariția unui cuplu, ce este de natură electromagnetică. În timpul funcționării mașinii de c.c., cuplul electromagnetic acționează permanent asupra rotorului.

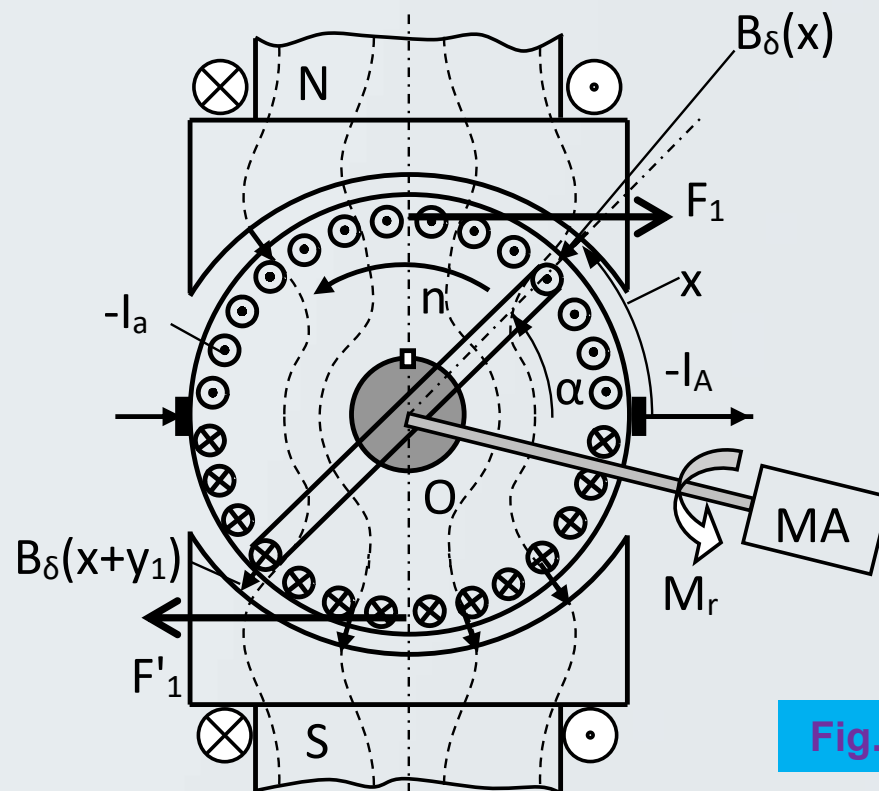
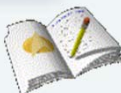


Fig.2



Expresia cuplului electromagnetic al mașinii de C.C.

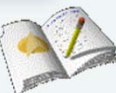
În fig.2 se consideră aceeași structură de mașină de c.c. ca în fig.1. De această dată sunt luate în considerare toate secțiunile care sunt parcurse de curent. Sensul curentului este indicat cu „punct” și „x” după cum curentul iese sau intră în planul figurii (toate secțiunile dintr-o cale de curent sunt parcurse de curentul I_a cu un anumit sens).

Mașina de antrenare, notată MA, rotește rotorul în sens trigonometric cu turația n . Întrucât conductoarele rotorului sunt parcurse de curent și se găsesc în câmpul magnetic creat de polii inductori, rezultă că asupra lor acționează forța Laplace, a cărei sens este dat de regula mâinii stângi.

Expresia generală a cuplului electromagnetic determinat de această forță este:

$$M = \frac{dW_m}{d\alpha}$$

unde: W_m – energie magnetică a sistemului
 $d\alpha$ – coordonata unghiulară generalizată



Expresia cuplului electromagnetic al mașinii de C.C.

Exprimând energia magnetica prin mărimi caracteristice construcției și funcționării mașinii de curent continuu se obține:

$$M = -\frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi} \cdot I_A \cdot \Phi$$

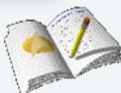
sau:

$$M = k_m \cdot \Phi \cdot I_A$$

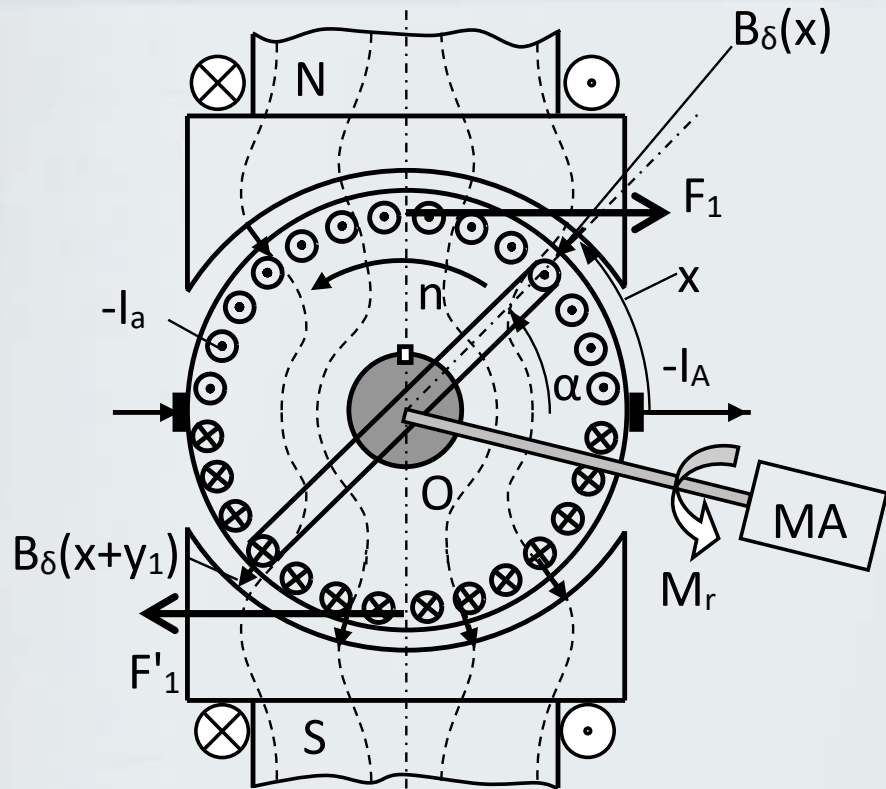
unde k_m este o constantă constructivă $k_m = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi}$

iar I_a reprezintă curentul total prin înfășurarea rotorică.

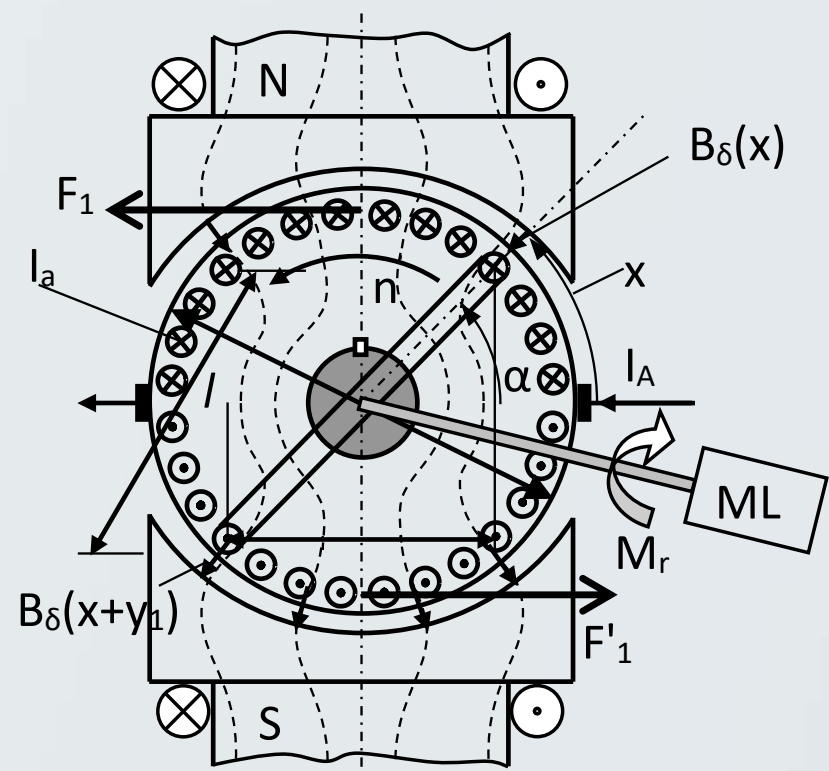
Semnul minus indică faptul că sensul cuplului este contrar sensului ales pentru coordonata generalizată α



Expresia cuplului electromagnetic al mașinii de C.C.



Generator

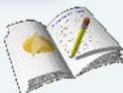


Motor



La funcționarea în regim de **generator**, cuplul electromagnetic este în sens invers sensului de rotație al rotorului (se manifestă ca un cuplu de frânare).

La funcționarea în regim de **motor**, cuplul electromagnetic este în același sens cu sensul de rotație al rotorului (el determină rotirea rotorului).



Reacția indusului



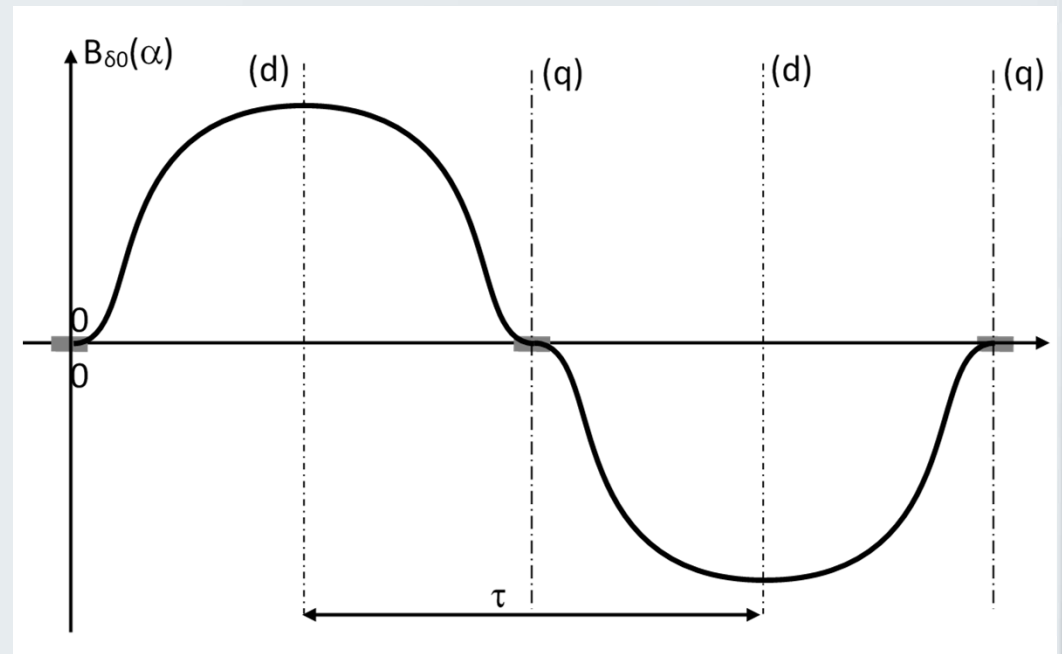
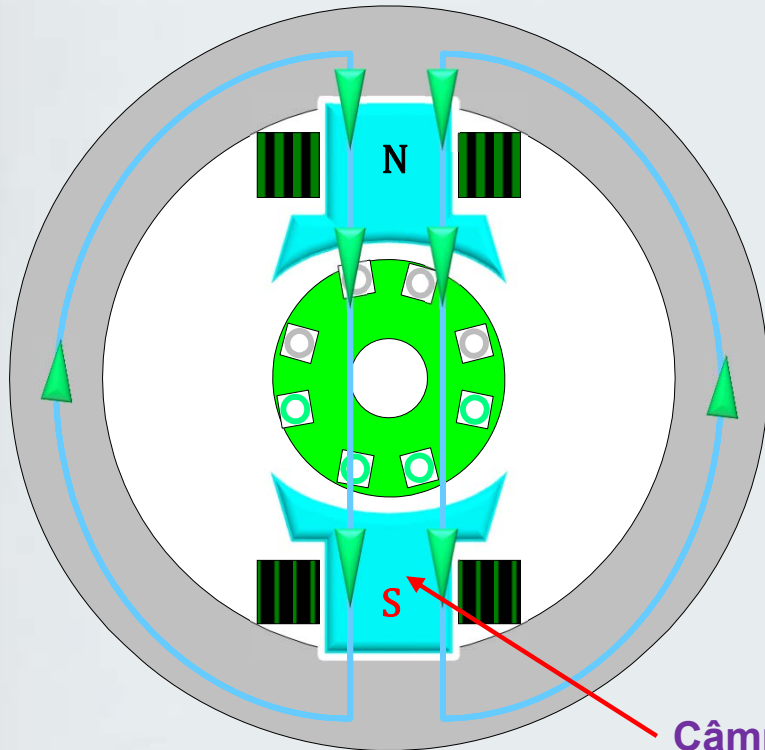
Reacția indusului desemnează toate fenomenele electromagnetice care au loc atunci când înfășurarea rotorică este parcursă de curent.

În înfășurarea rotorică apare curent electric atunci când mașina de c.c. funcționează în regim de generator în sarcină, motor sau frână.

Reacția indusului se datorează câmpului creat în mașina de c.c. de către curentul care circulă prin înfășurarea rotorică.



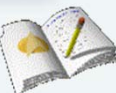
Reacția indusului



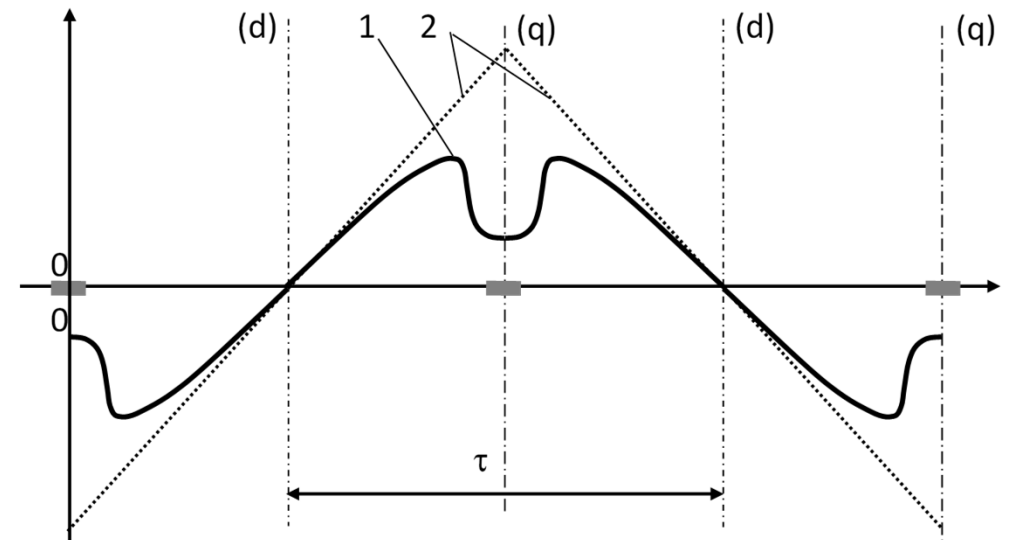
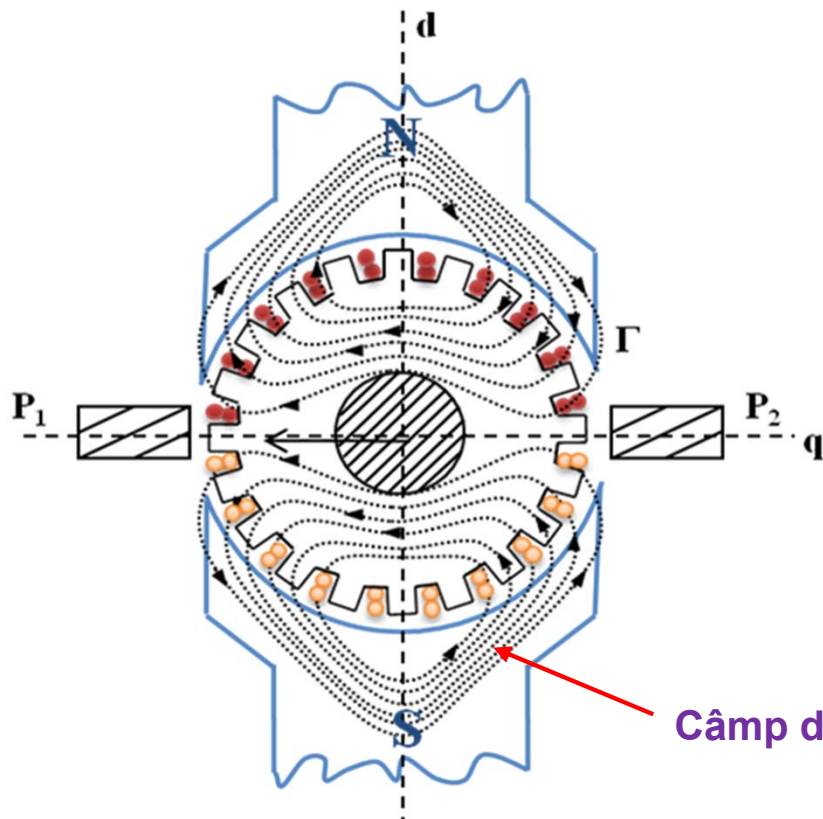
Câmp inductor

Atunci când înfășurarea de excitație este alimentată, ea creează câmpul inductor (sau câmpul de excitație), care reprezintă câmpul principal al mașinii.

Liniile de câmp ale câmpului inductor se închid pe axa polilor mașinii (axa longitudinală, d) și prin jugul statoric.



Reacția indusului

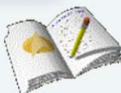


Câmp de reacție

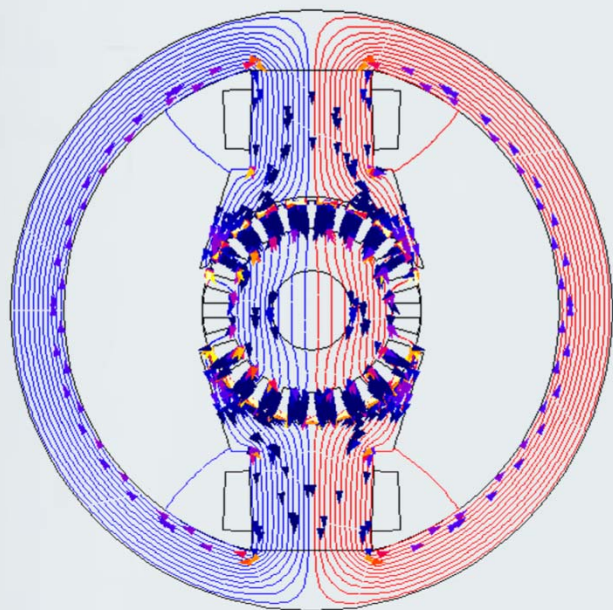
Când înfășurarea rotorică este parcursă de curent, ea creează un câmp ale cărei linii se închid după un traseu transversal față de polii inductori (de-a lungul axei interpolare, q, și prin piesele polare ale polilor principali).

Prezența acestui câmp se face puternic simțită în axa interpolară (axa periilor), axă ce ar trebui să fie *neutră* din punct de vedere magnetic.

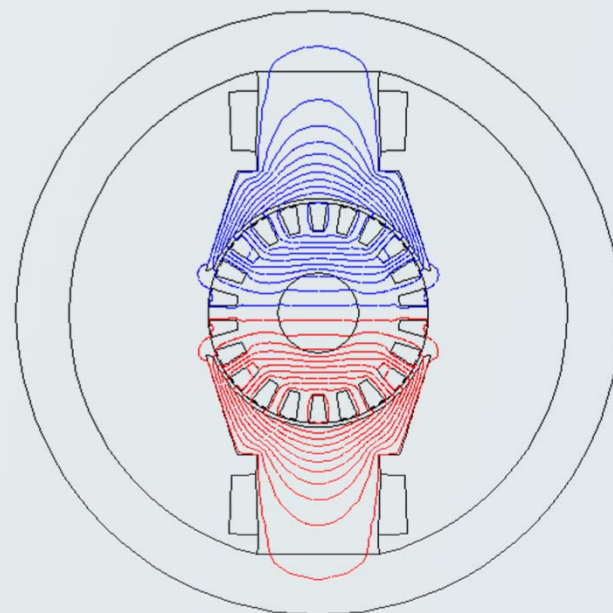
În figură este prezentată curba ideală a câmpului de reacție în întrefier (curba 2) și curba reală (curba 1) la care se remarcă o cădere accentuată a valorii inducției ca urmare a întrefierului extins.



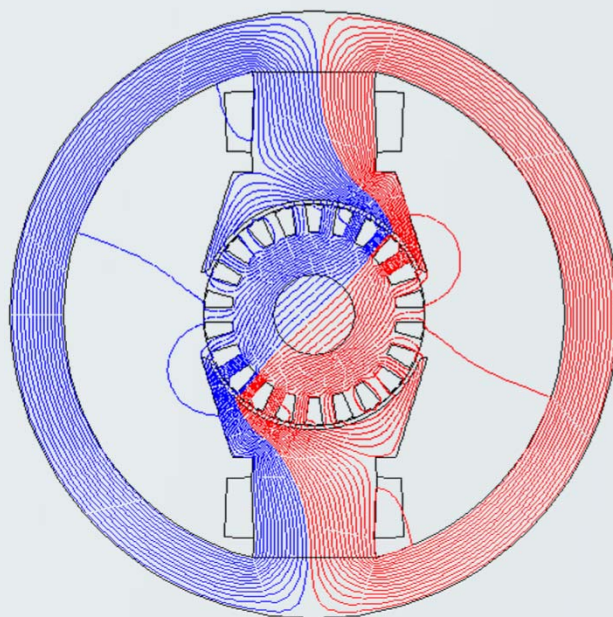
Reacția indusului



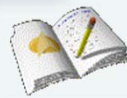
Câmp inductor



Câmp de reacție



Câmp rezultat



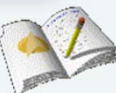
Reacția indusului

Existența celor două câmpuri în mașina de c.c. duce la compunerea acestora și apariția unui câmp rezultat.

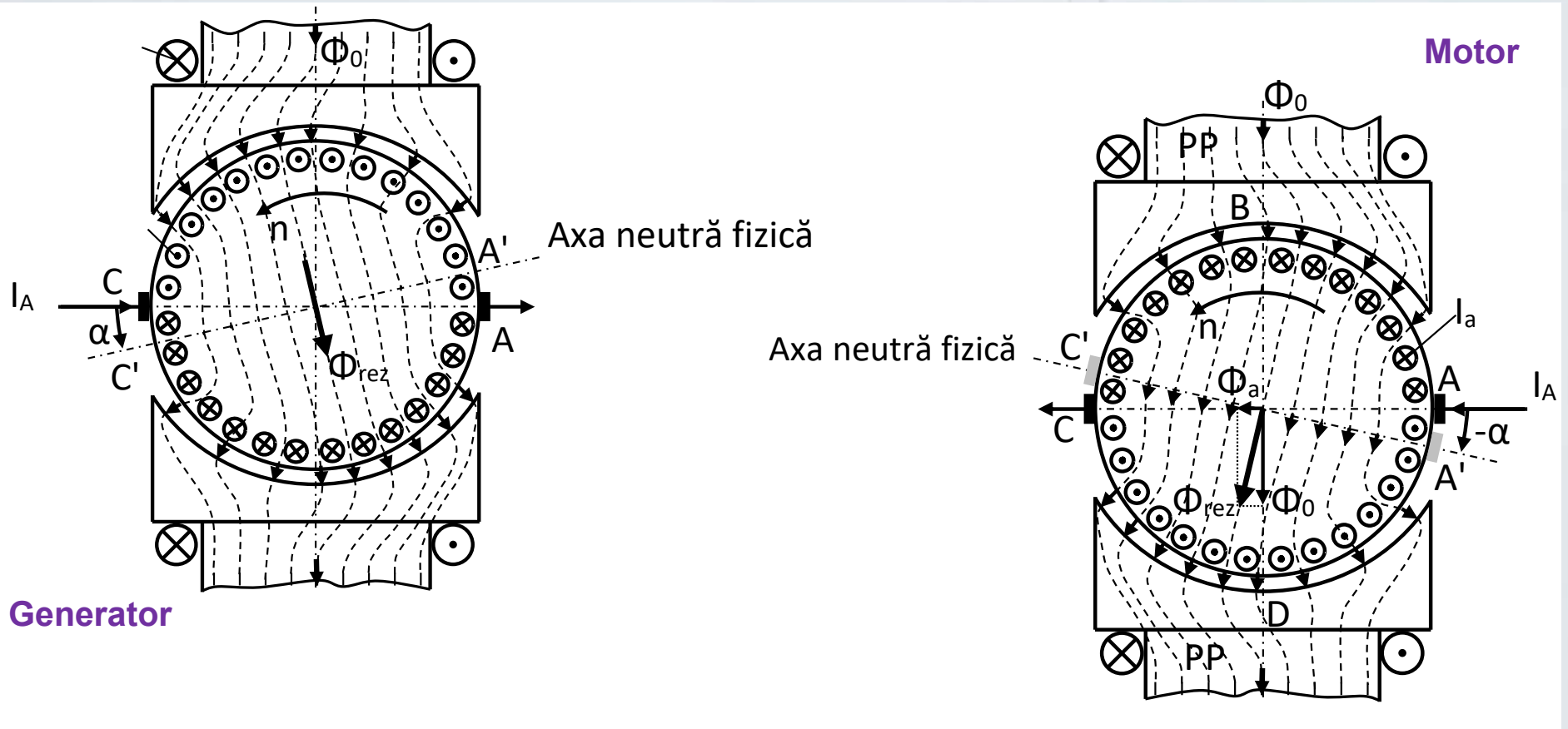
Întrucât pe o jumătate de pol inductor liniile celor două câmpuri sunt în același sens, iar pe cealaltă jumătate liniile de câmp au sensuri contrare, apare o „deformare” a câmpului rezultat din mașină care are ca rezultat:

- a) O distribuție neuniformă a inducției în miezul magnetic al polilor principali dar și în miezul magnetic al rotorului;
- b) O rotire a axei neutre a mașinii din axa periiilor cu un anumit unghi.

Ambele fenomene aduc probleme nedorite în funcționarea mașinii de c.c. Astfel, distribuția neuniformă a câmpului magnetic poate încălca circuitul magnetic, pe anumite porțiuni, până la saturație; de asemenea, rotirea axei neutre a mașinii înrăutățește condițiile de comutație.



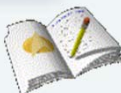
Reacția indusului



Generator

Motor

Rotirea axei neutre este diferită în funcție de regimul de funcționare a mașinii: la funcționarea în regim de generator, axa neutră se decalează cu un unghi α în sensul de rotație a rotorului. La funcționarea în regim de motor, axa neutră se decalează cu un unghi α în sens invers sensului de rotație a rotorului.



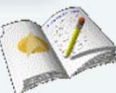
Reacția indusului

Faptul că axa neutră se decalează din axa periiilor are consecințe extrem de nefavorabile asupra funcționării mașinii de c.c.

Reamintesc, atunci când calcă pe două lamele de colector, periiile realizează o scurtcircuitare a unei secții. Construcția înfășurării rotorice este realizată în așa fel încât, în momentul scurtcircuitării secției, laturile acesteia să se găsească în axa neutră a mașinii. Acest lucru este necesar pentru ca, în lipsa câmpului magnetic, să nu se inducă tensiuni în secție. Dacă s-ar induce tensiuni, atunci ar exista și curent prin secția respectivă, iar la părăsirea periei de pe lamele s-ar întrerupe scurtcircuitul și ar apărea (de regulă) scânteii. Prin urmare, este imperios necesar ca axa interpolară să rămână neutră din punct de vedere magnetic. Însă, reacția indusului strică întotdeauna această regulă.



Prezența scânteilor la perii duce la distrugerea prematură a periiilor și colectorului și respectiv scoatere din funcțiune a mașinii de c.c.

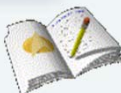


Reacția indusului



Pentru refacerea neutralității zonei interpolare se pot practica mai multe metode dintre care:

- Plasarea unor poli auxiliari în zonele interpolare care să creeze un câmp de polaritate opusă câmpului de reacție (este metoda cea mai folosită). Înfășurarea polilor auxiliari este conectată în serie cu înfășurarea rotorică astfel încât, orice modificare a câmpului de reacție odată cu sarcina să fie urmată și de modificarea câmpului polilor auxiliari.
- Plasarea unei înfășurări de compensare în piesele polare ale polilor principali care să creeze un câmp de polaritate opusă câmpului de reacție. Și această înfășurare este conectată în serie cu înfășurarea rotorică.





✓ Tensiune indusa

✓ Cuplu electromagnetic

✓ Reactia indusului

$$E = k_e \cdot n \cdot \phi$$

$$M = k_m \cdot \phi \cdot I_A$$





Funcționarea mașinii de c.c. în regim de motor

Cuprins

01

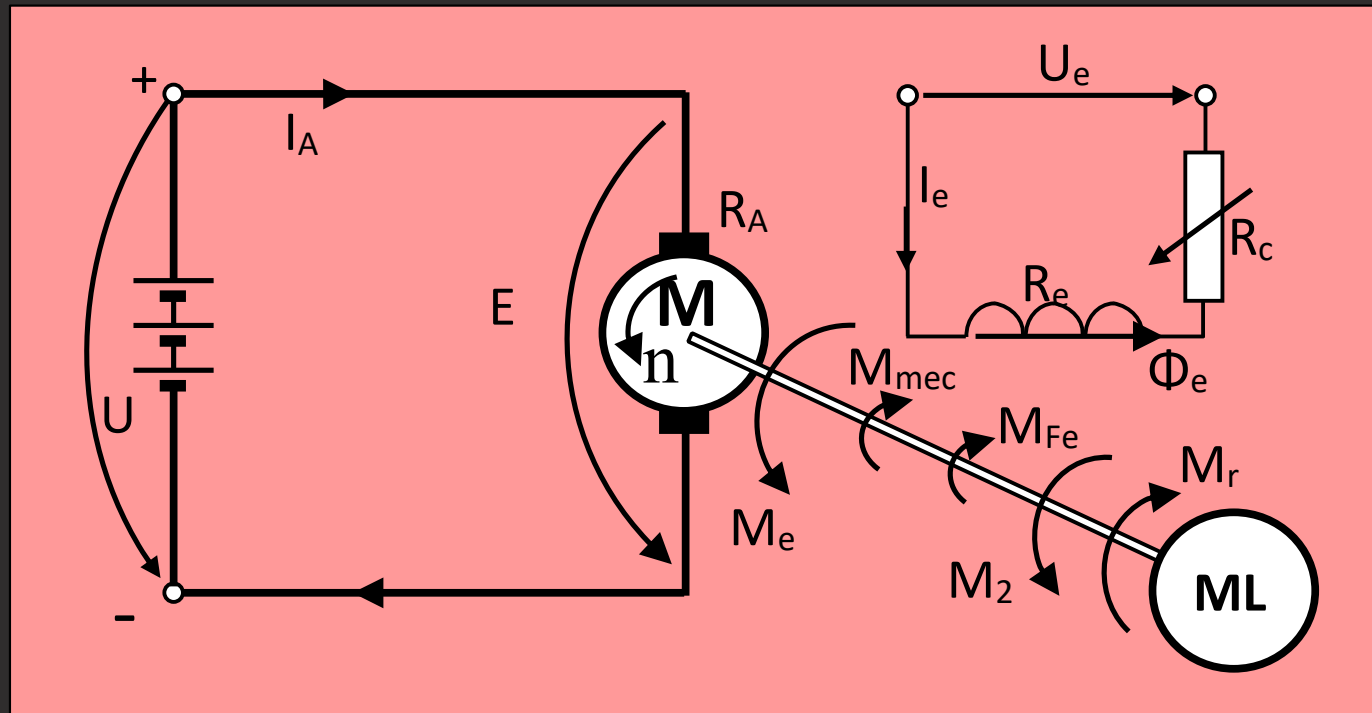
Generalități –
funcționarea în
regim de motor

02

Caracteristici de
pornire

03

Caracteristici de
funcționare



Funcționarea mașinii de c.c. în regim de motor presupune că mașina primește energie electrică pe care o convertește în energie mecanică.

Prin urmare, mașina este alimentată de la o sursă de tensiune continuă U . Energia mecanică obținută la arbore este utilizată pentru antrenarea unei mașini de lucru, ML

Dacă mașina este cu excitație separată, este necesară o sursă de tensiune continuă și pentru alimentarea înfășurării de excitație.

La arborele (axul) mașinii electrice acționează o serie de cupluri, după cum urmează:

- Cuplul electromagnetic M_e dezvoltat de mașina de c.c. Acesta determină rotirea rotorului cu viteza n în sensul indicat pe figura.
- Cuplurile datorate pierderilor mecanice, M_{mec} și pierderilor în fierul rotorului M_{fe} .
- Cuplul rezistent M_r determinat de mașina de lucru.

Ecuția de echilibru mecanic în regim dinamic este:

$$M_e - M_m - M_{Fe} - M_r = J \cdot \frac{d\Omega}{dt}$$

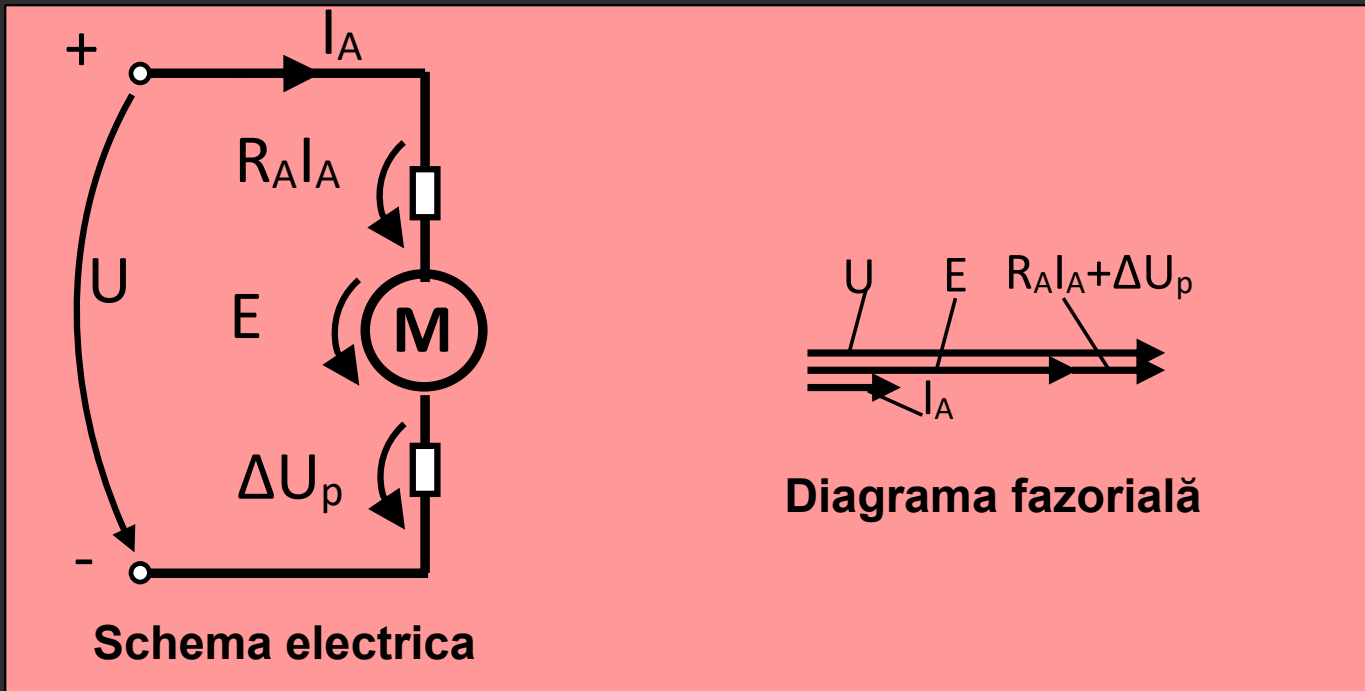
unde:

$$M_e = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi} \cdot I_A \cdot \phi = k_m \cdot \phi \cdot I_A \quad \text{este expresia cuplului electromagnetic}$$

$$\text{iar: } J \cdot \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{reprezintă momentul de inerție al sistemului (m.c.c. + ML)}$$

În regim stabilizat ($\Omega = \text{ct}$; adică la viteză constantă), ecuația de echilibru a cuplurilor devine:

$$M_e = M_m + M_{Fe} + M_r$$



Schema electrică a motorului de c.c. pune în evidență următoarele elemente: tensiunea de alimentare, U ; curentul prin înfășurarea indusului, I_A ; tensiunea indusă în înfășurarea rotorică de către câmpul inductor conform legii inducției electromagnetice, E ; căderea de tensiune pe înfășurarea indusului, $R_A \cdot I_A$; căderea de tensiune la perii, ΔU_p .

$$E = -\frac{p}{a} \cdot \frac{N}{60} \cdot n \cdot \phi = -k_e \cdot n \cdot \phi$$

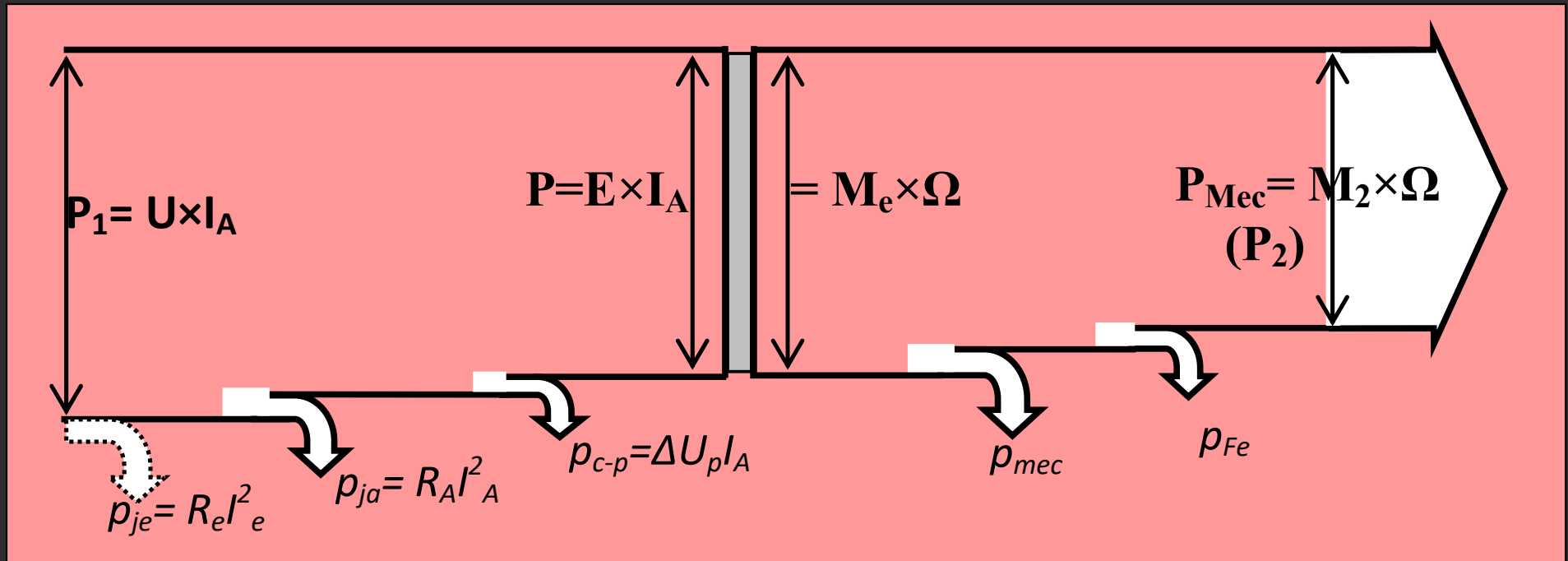
- Expresia tensiunii induse

$$U_A = E + R_A \cdot I_A + \Delta U_p$$

- Ecuația de echilibru al tensiunilor

DIAGRAMA DE BILANȚ ENERGETIC

Această diagramă exprimă echilibrul puterilor în mașina de c.c. în regim de motor.



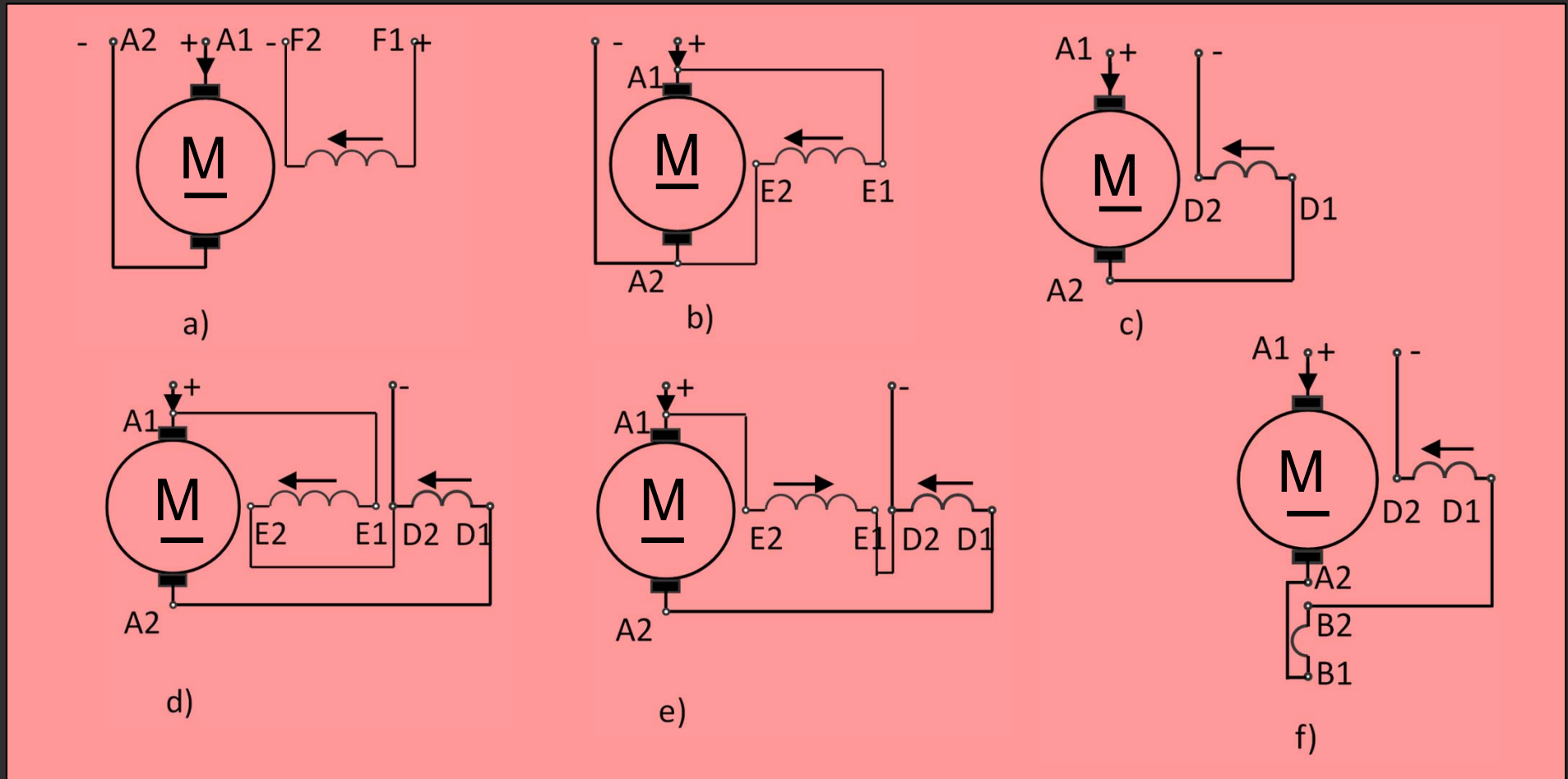
- P_1 – puterea absorbită (putere electrică)
- P – puterea electromagnetică
- P_2 – puterea cedată (putere mecanică)

- p_{je} – pierderi în înfășurarea de excitație
- p_{ja} – pierderi în înfășurarea rotorica
- p_{c-p} – pierderi la contactul perie colector
- p_{mec} – pierderi mecanice și de ventilație
- p_{Fe} – pierderi în fier (în miezul rotoric)

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

$$\sum p = p_{je} + p_{ja} + p_{c-p} + p_{mec} + p_{Fe}$$

CLASIFICAREA MAȘINILOR DE C.C. DUPĂ TIPUL EXCITAȚIEI



Simbolizarea motoarelor de c.c.

a) Motor – excitație separată; b) Motor – excitație derivație; c) Motor – excitație serie; d) Motor - excitație mixt adițională; e) Motor - excitație mixt diferențială; f) Motor – excitație serie + poli auxiliari.

Caracteristicile motoarelor de c.c.

Caracteristici de pornire

Caracteristici de funcționare

Caracteristici de reglare a vitezei

Caracteristici de frânare

I. Caracteristici de pornire

Studiul pornirii motorului de c.c. are în vedere următoarele aspecte:



Determinarea metodei de pornire, a aparatului utilizat și a economicității din punctul de vedere a energiei disipate



Variația cuplului de pornire M_p și determinarea raportului M_p/M_n



Variația în timp a curentului de pornire și determinarea raportului I_p/I_n

Ecuția de tensiuni a motorului de c.c. , neglijând căderea de tensiune la perii, ΔU_p , este:

$$U_A = E + R_A \cdot I_A = k_e \cdot n \cdot \phi_0 + R_A \cdot I_A$$

Întrucât la pornire viteza rotorului este zero ($n=0$), rezultă că expresia curentului prin înfășurarea rotorului este:

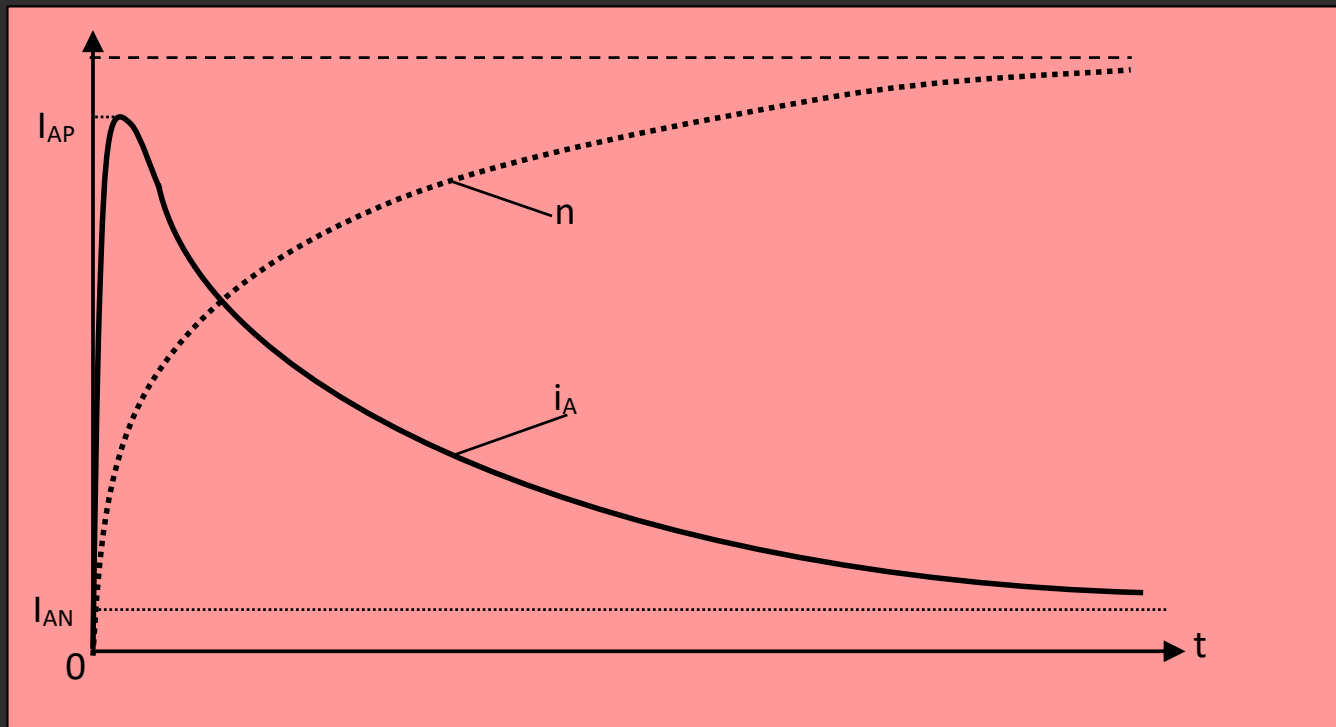
$$I_{Ap} = \frac{U_A}{R_A} + L_A \frac{di_A}{dt}$$

Componenta încercuită apare numai când curentul variază prin înfășurarea rotorică deci și pe perioada regimului tranzitoriu de pornire. Această componentă are o valoare mică și poate fi neglijată.

Cu alte cuvinte, la pornire, curentul prin indus este limitat doar de rezistența înfășurării rotorice, a cărei valoare este foarte mică. Drept urmare, la pornirea motorului de c.c., curentul poate lua valori foarte mari :

$$I_{Ap} = (10 \dots 20) I_A$$

Variația curentului prin indus și a turației rotorului pe perioada pornirii motorului de c.c.



La pornire, curentul I_A crește brusc până la o valoare maximă după care, odată cu accelerarea rotorului și apariția tensiunii induse (E) în înfășurarea rotorică, începe să scadă până la o valoare determinată de valoarea sarcinii motorului (între valoarea de mers în gol și valoarea nominală).

Pornirea este diferită la motorul de c.c. în funcție de tipul excitației.

La motoarele cu excitație separată și derivație:

- a) Este indicat ca excitația să fie alimentată înaintea alimentării înfășurării rotorice. Astfel mașina va avea fluxul inductor necesar dezvoltării unui cuplu de pornire semnificativ;**
- b) Trebuie avut grijă ca, în cazul în care există un reostat de reglaj pe circuitul de excitație, acesta să fie poziționat pe o valoare relativ mică (curentul de excitație să aibă valoarea nominală) astfel încât fluxul inductor să fie semnificativ și să existe un cuplu mare de pornire ($M=k_m \cdot \phi \cdot I_A$)**

La motoarele cu excitație serie:

- a) Deoarece curentul de excitație coincide cu curentul prin înfășurarea indusului, motorul serie pornește mai repede, întrucât dezvoltă un cuplu mai mare.**

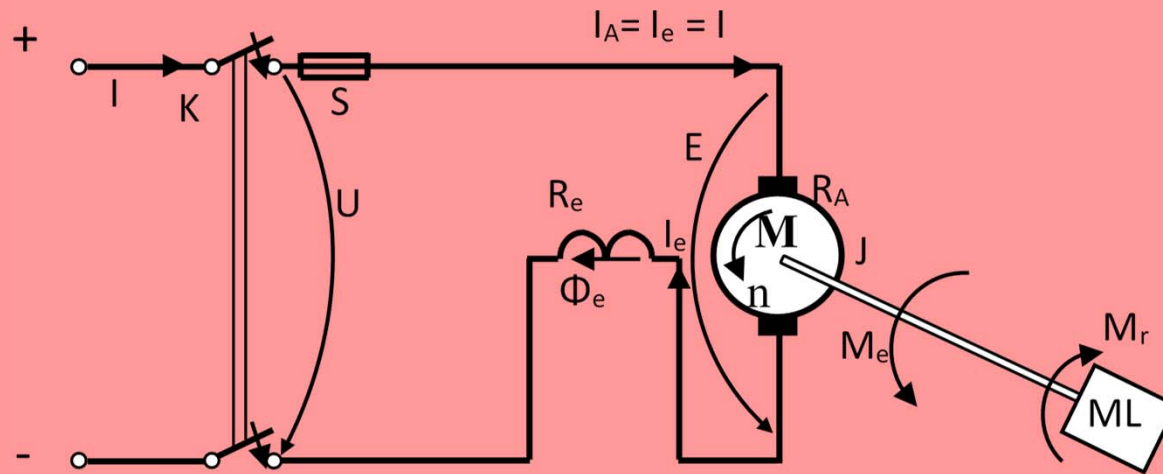
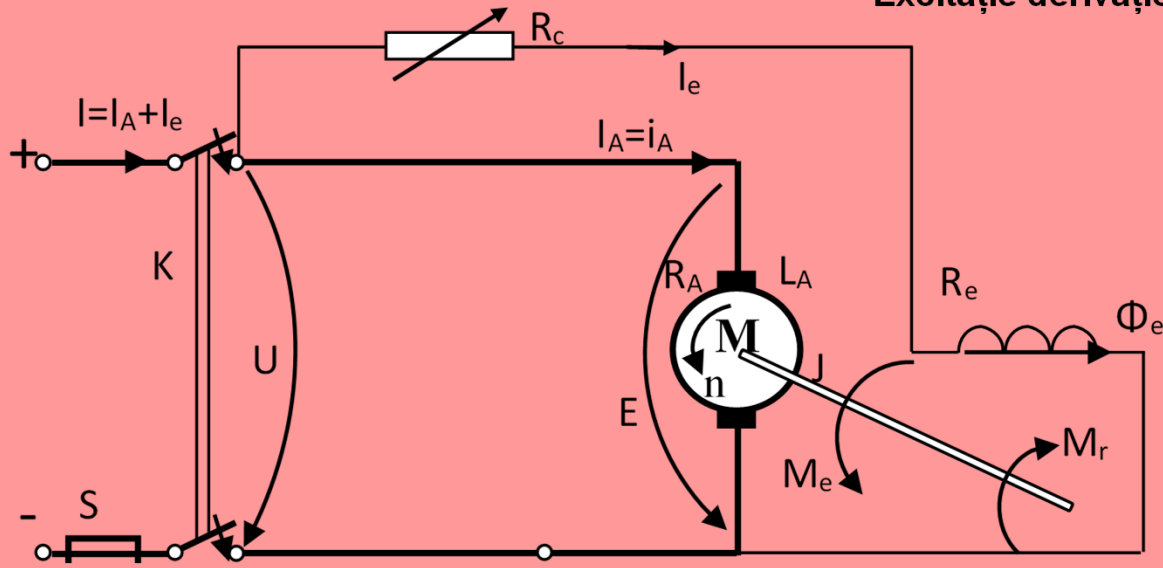
Prezența curentului mare la pornire poate avea efecte nedorite asupra motorului de c.c. Astfel, valoarea mare a curentului, chiar dacă nu determină „arderea” imediată a înfășurării rotorice, duce la deteriorarea prematură a acesteia. De asemenea, valorile mari ale curentului, ce determină valori mari ale cuplului de pornire ($M_p = k_m \cdot \phi \cdot I_{ap}$), determină solicitări nedorite ale cuplajului dintre motor și mașina de lucru.

Pentru evitarea acestor efecte și având în vedere expresia curentului de pornire ($I_{ap} = U_A / R_A$) se utilizează următoarele tipuri de pornire:

- a) Pornirea directă**
- b) Pornirea cu reostat înseriat în circuitul indusului**
- c) Alimentarea cu tensiune variabilă**

1. Pornirea directă

Excitație derivație



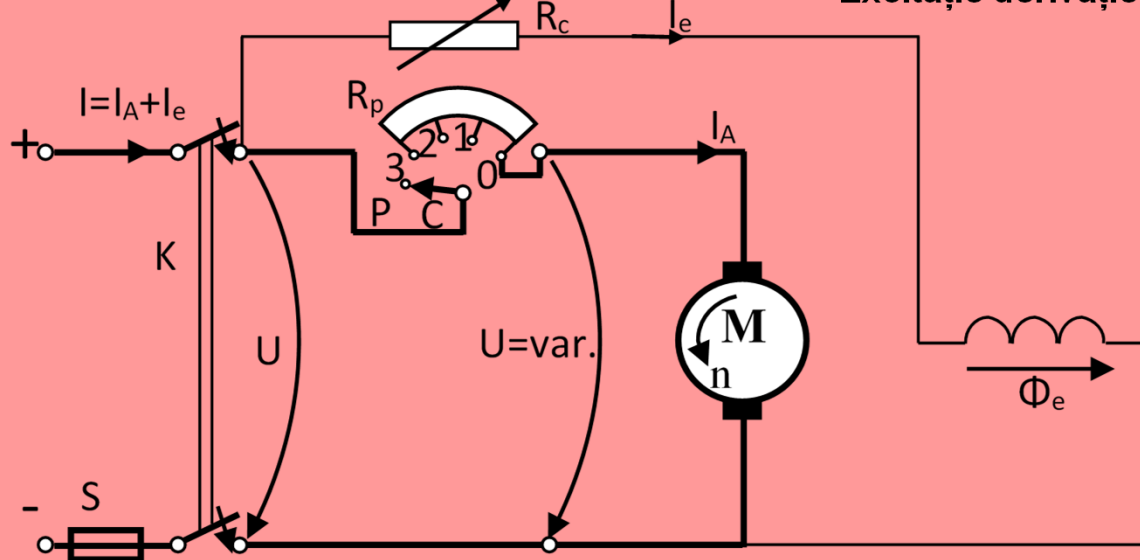
Excitație serie

În cazul motoarelor de mică putere (până în 5kW) și la care pornirile nu sunt dese, se acceptă conectarea directă la tensiunea de alimentare.

Curentul de pornire atinge valori de $(6 \div 8)I_N$.

2. Pornirea cu reostat

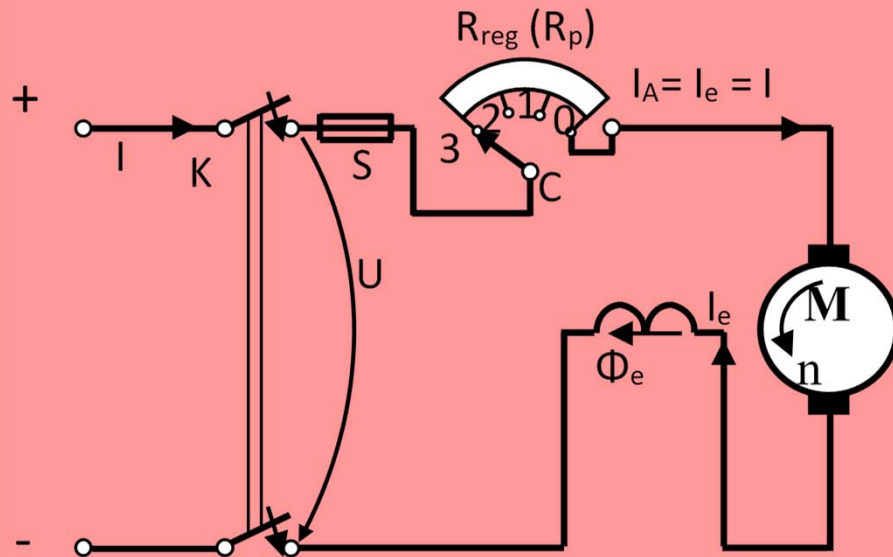
Excitație derivație



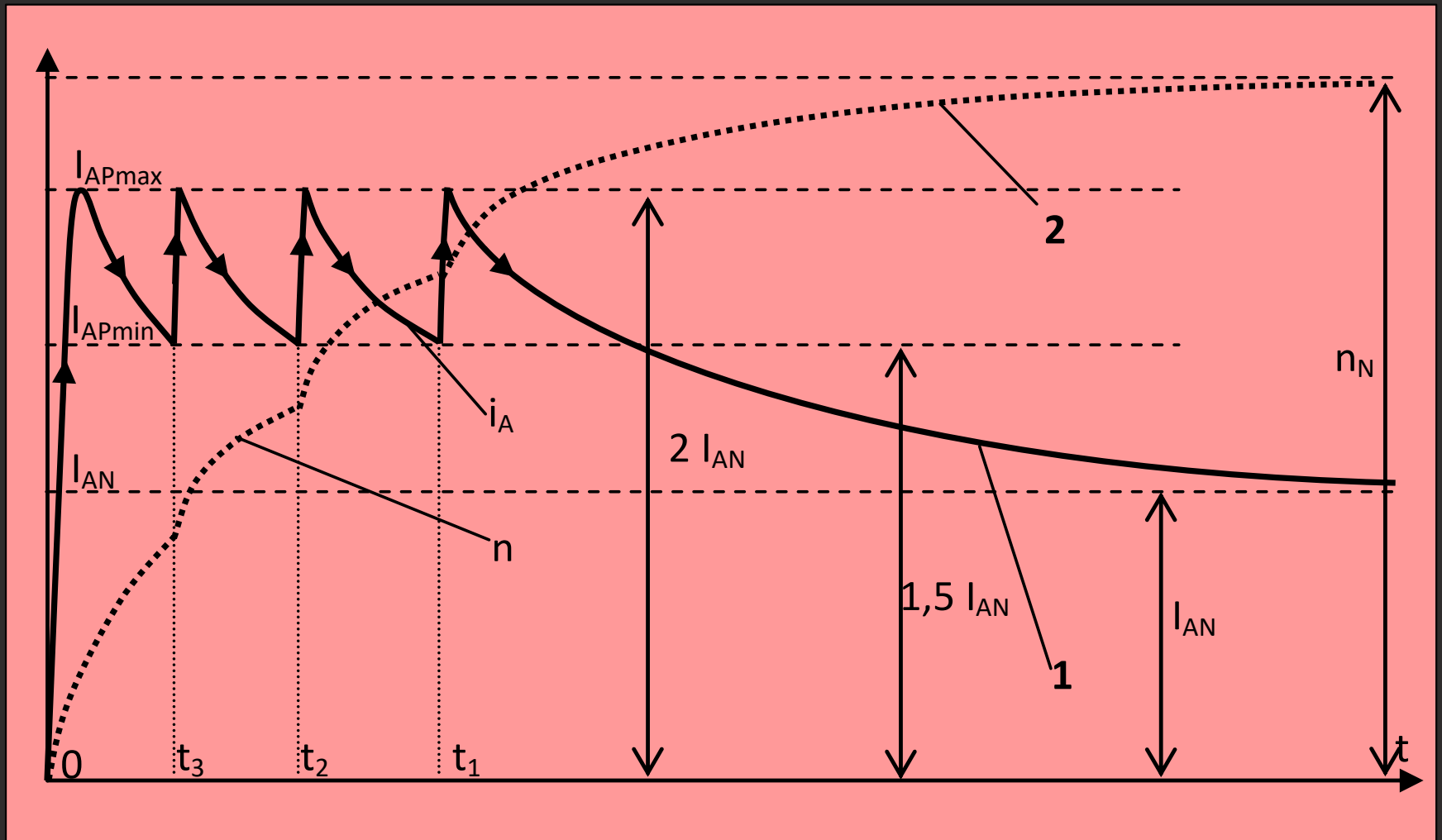
Limitarea curentului se face prin înserierea unei rezistențe variabile în circuitul înfășurării rotorice. În acest fel, curentul de pornire are expresia:

$$I_p = \frac{U}{R_A + R_p}$$

Calculul reostatului de pornire (R_p) este făcut în așa fel încât valoarea curentului de pornire să se încadreze în plaja de valori $(1,5 \div 2)I_N$.



Excitație serie



Curba 1 – variația curentului de pornire folosind un reostat cu ploturi (reostat la care variația rezistenței se face în trepte de pe un plot pe altul)

Curba 2 – variația vitezei pe perioada pornirii

Inițial, reostatul de pornire este plasat pe poziția 3, ce corespunde valorii maxime. La cuplare, curentul crește brusc, până la o valoare maximă ce nu depășește $2I_N$. Apoi începe să scadă odată cu accelerarea rotorului.

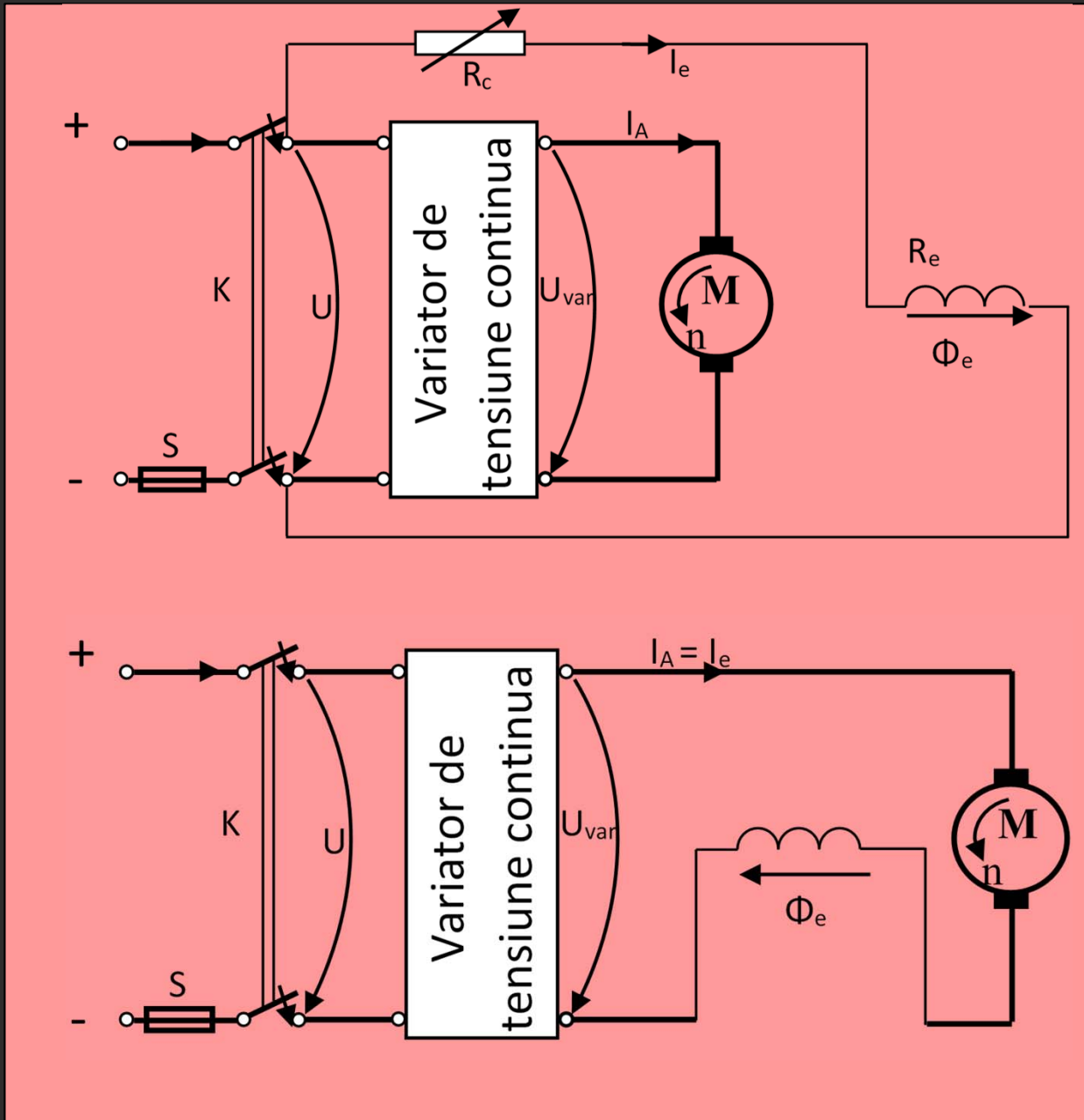
În momentul când curentul atinge o valoare minimă (de exemplu $1,5I_N$), se mută reostatul pe poziția 2 (scade rezistența de pornire). Curentul crește din nou până la valoarea maximă, după care scade din nou.

Se trece apoi pe poziția 1 și în final se scurtcircuitează complet, eliminându-se astfel rezistența de pornire din circuit.



Reostatul de pornire NU are voie să rămână conectat în circuit după perioada pornirii. El este dimensionat pentru un timp scurt de funcționare.

3. Alimentarea cu tensiune variabilă



Pornirea motorului se face prin alimentarea cu tensiune redusă, ce duce evident la reducerea curentului.

În cazul motorului cu excitație derivație, trebuie avut grijă ca excitația să fie alimentată cu tensiunea nominală.

În cazul motorului cu excitație serie, reducerea tensiunii la pornire înseamnă și un flux de excitație mai mic, ceea ce determină un cuplu de pornire mult mai mic.

II. Caracteristici de funcționare

Exprimă relațiile dintre principalele mărimi ce caracterizează funcționarea motorului: turație (n), cuplu (M), curent absorbit (I), randament (η), putere cedată (P_2) în condițiile în care tensiunea de alimentare se păstrează constantă și, de asemenea, rezistențele din circuitul indusului și circuitul de excitație.



Caracteristica de
viteză:
 $n=f(I_e)$



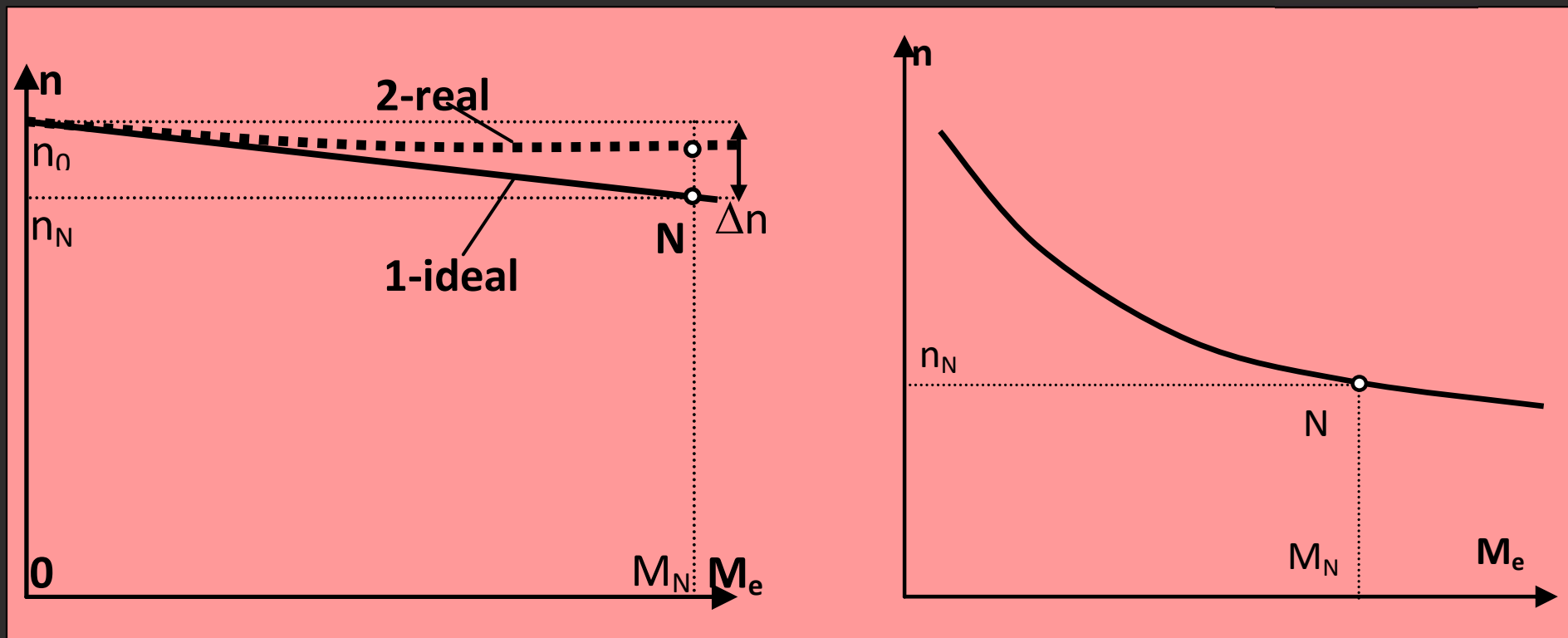
Caracteristica
mecanică:
 $n=f(M_2)$



Caracteristici
de funcționare
propriu-zise:
 $n=f(P_2);$
 $M=f(P_2);$
 $\eta=f(P_2)$

Caracteristica mecanică

Foarte important!



MCC cu excitație derivație

MCC cu excitație serie

Caracteristica mecanică arată modul în care se modifică viteza motorului de c.c. atunci când variază cuplul rezistent la arbore.

Expresia turației, dedusă din ecuația de tensiuni, este:

$$n = \frac{U_A - R_A \cdot I_A}{k_e \cdot \phi} = \frac{U_A}{k_e \cdot \phi} - \frac{R_A \cdot I_A}{k_e \cdot \phi} = n_0 - \frac{R_A \cdot I_A}{k_e \cdot \phi}$$

Întrucât expresia cuplului este:

$$M = k_m \cdot \phi \cdot I_A$$

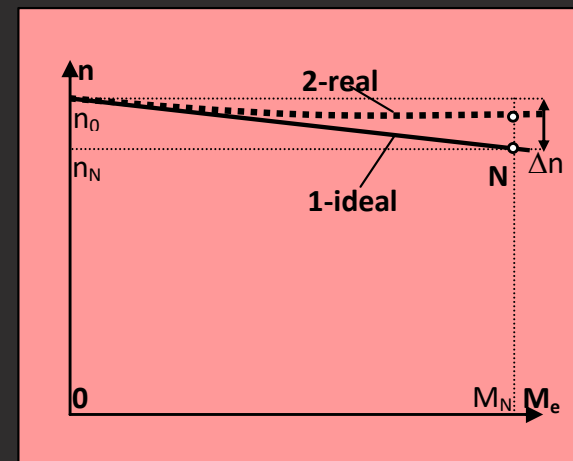
rezultă că:

$$n = n_0 - \frac{R_A}{k_e \cdot k_m \cdot \phi^2} \cdot M$$

unde n_0 reprezintă turația de mers la gol (cuplul rezistent este nul).

La mașina cu excitație derivație (separată): pe măsură ce cuplul rezistent crește, turația scade. Scăderea turației este relativ mică. Se spune ca motorul de c.c. cu excitație derivație are o *caracteristică mecanică rigidă*.

- ✓ Față de caracteristica 1 (caracteristica ideală), caracteristica 2 arată modul real de variație a turației. Aceasta scade pe o porțiune după care, datorită intensificării reacției indusului (ce modifică fluxul Φ), turația se menține constantă sau chiar poate crește ușor.
- ✓ Punctul de funcționare N reprezintă punctul nominal de funcționare – corespunde puterii indicate pe plăcuța indicatoare a mașinii.
- ✓ Δn reprezintă căderea de turație: $\Delta n = n_0 - n_N$



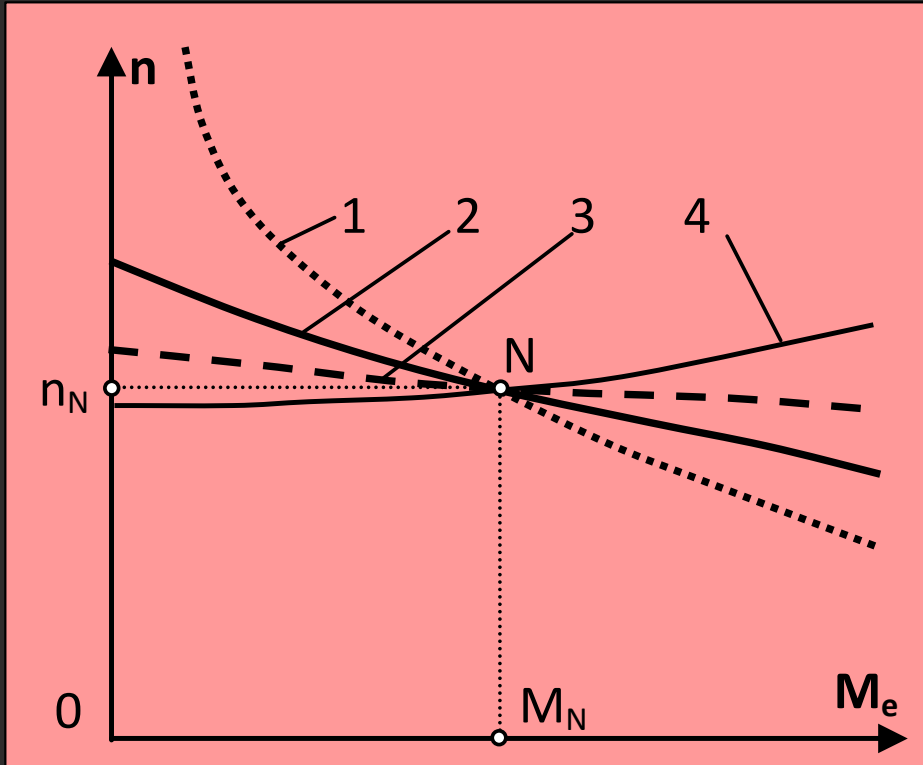
La mașina cu excitație serie: odată cu creșterea cuplului rezistent la arbore are loc o scădere pronunțată a vitezei motorului de c.c. Se spune că motorul de c.c. cu excitație serie are o *caracteristică mecanică căzătoare (sau suplă)*.

Se poate demonstra matematic faptul că, forma caracteristicii mecanice în zona de funcționare „gol-nominal” este hiperbolică. Peste valoarea nominală, când apare saturația circuitului magnetic, scăderea turației devine liniară.

Funcționarea motorului de c.c. cu excitație serie are o particularitate ce se poate vedea și pe caracteristică: caracteristica mecanică NU intersectează axa ordonatelor, iar valoarea turației crește spre valori inadmisibile atunci când cuplul la arbore scade spre zero. Din acest motiv, motorul de c.c. cu excitație serie NU are voie să rămână în gol, întrucât turația crește până mașina cedează din punct de vedere mecanic. Este fenomenul cunoscut sub numele de „**ambalarea motorului de c.c.**”. Acest lucru se explică ușor: întrucât curentul prin excitație este același cu curentul prin indus, atunci când mașina este la gol, fluxul de excitație scade foarte mult și, drept urmare, turație crește foarte tare.



$$n = \frac{U_A - R_A \cdot I_A}{k_e \cdot \phi}$$



1 – Excitație serie

2 – Excitație mixt adițional

3 – Excitație derivație

4 – Excitație mixt diferențial

În cazul motorului de c.c. cu **excitație mixtă**, unde există atât înfășurări de excitație serie cât și derivație, se pot realiza două tipuri de funcționare, în funcție de modul în care sunt create fluxurile de excitație:

- Funcționare mixt adițional – fluxurile de excitație se adună;
- Funcționare mixt diferențial – fluxurile de excitație se scad.

$$n = \frac{U_A - R_A \cdot I_A}{k_e \cdot (\phi_{deriv} \pm \phi_{serie})}$$

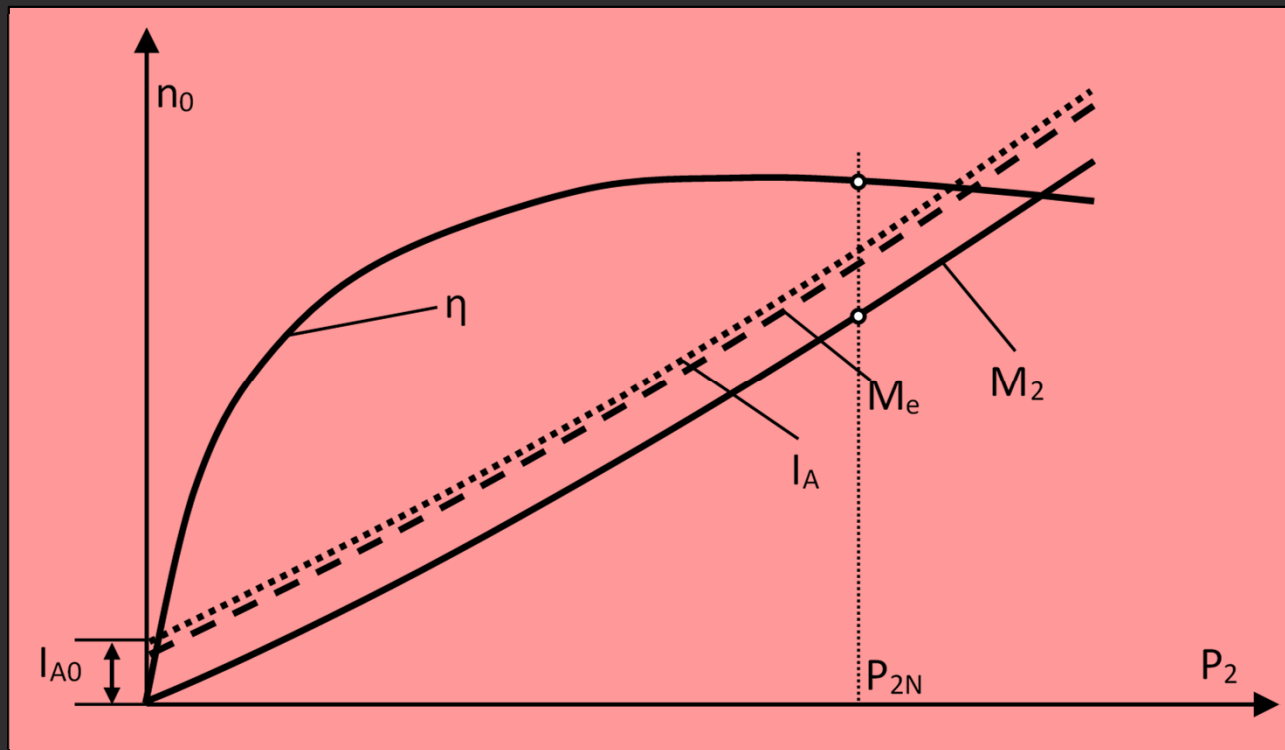
Funcționarea tip mixt adițional – caracteristica 2. Este o caracteristică mai căzătoare decât cea a motorului derivație, dar la care se elimină pericolul ambalării, specific motorului serie.

Fluxurile create de cele două tipuri de excitație nu sunt, de regulă, egale. Atunci când este predominant fluxul serie, caracteristica mecanică este mai căzătoare. Practic, caracteristica mecanică se situează între cea derivație și cea serie și se apropie mai mult de acea caracteristică a cărei înfășurare dă fluxul predominant.

Funcționarea tip mixt diferențial – caracteristica 4. Este o caracteristică la care, odată cu creșterea cuplului rezistent la arbore, are loc și o creștere a vitezei motorului. Acest lucru se datorează faptului că are loc o descreștere a fluxului rezultat în mașină.

Funcționarea de tip mixt diferențial în regim de motor este, de regulă, evitată, întrucât funcționarea este instabilă (au loc variații necontrolate ale vitezei) .

Caracteristici de funcționare propriu-zise

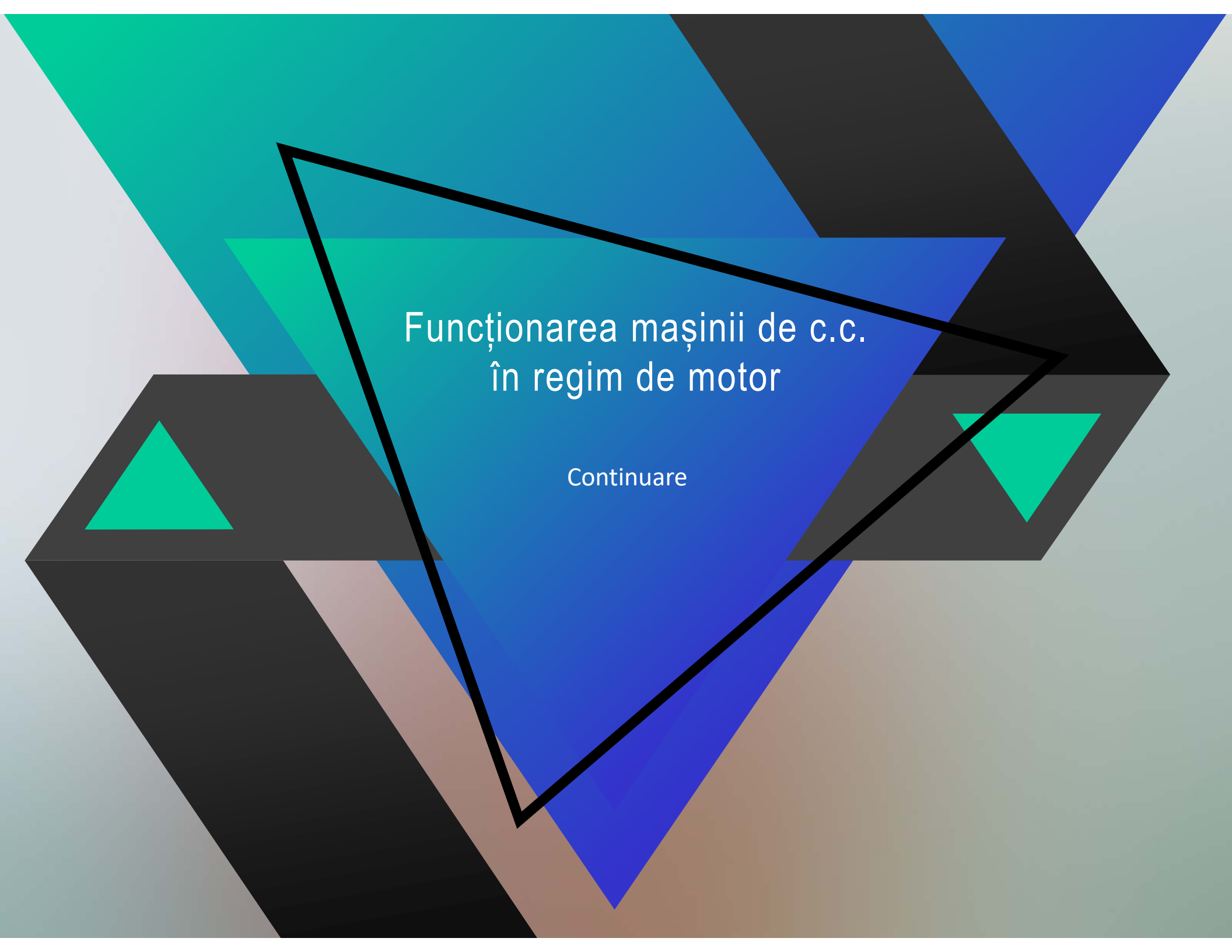


Aceste caracteristici exprimă comportarea și performanțele motorului de c.c. Sunt trasate, de regulă, în funcție de puterea utilă, P_2 .

$$\eta=f(P_2); M_e=f(P_2); M_2=f(P_2); I_A=f(P_2);$$



- ✓ *Curent de pornire*
- ✓ *Metoda de pornire*
- ✓ *Cuplu de pornire*
- ✓ *Caracteristica mecanica*



Funcționarea mașinii de c.c. în regim de motor

Continuare

Cuprins:

I1

Uhj øũhd#y}h#
p rwruxα#gh#f1f1

III1

Iqyhũdũhd#
vhqvxα#####
gh#urwũh#

1#F d u d f w h u l w i f l # g h # h j o u h # d # y l h } h l

Reglarea vitezei motorului de c.c. are în vedere următoarele aspecte:

a. Domeniul de reglare a vitezei dat de raportului

$$n_{\max}/n_{\min}$$

b. Modul de reglare a vitezei (continuu sau în trepte)

c. Determinarea metodei de reglaj, a aparatajului utilizat și a economicității din punctul de vedere al energiei disipate

Expresia turației la motorul de c.c. este:

$$n = \frac{U_A - R_A \cdot I_A}{k_e \cdot \phi}$$

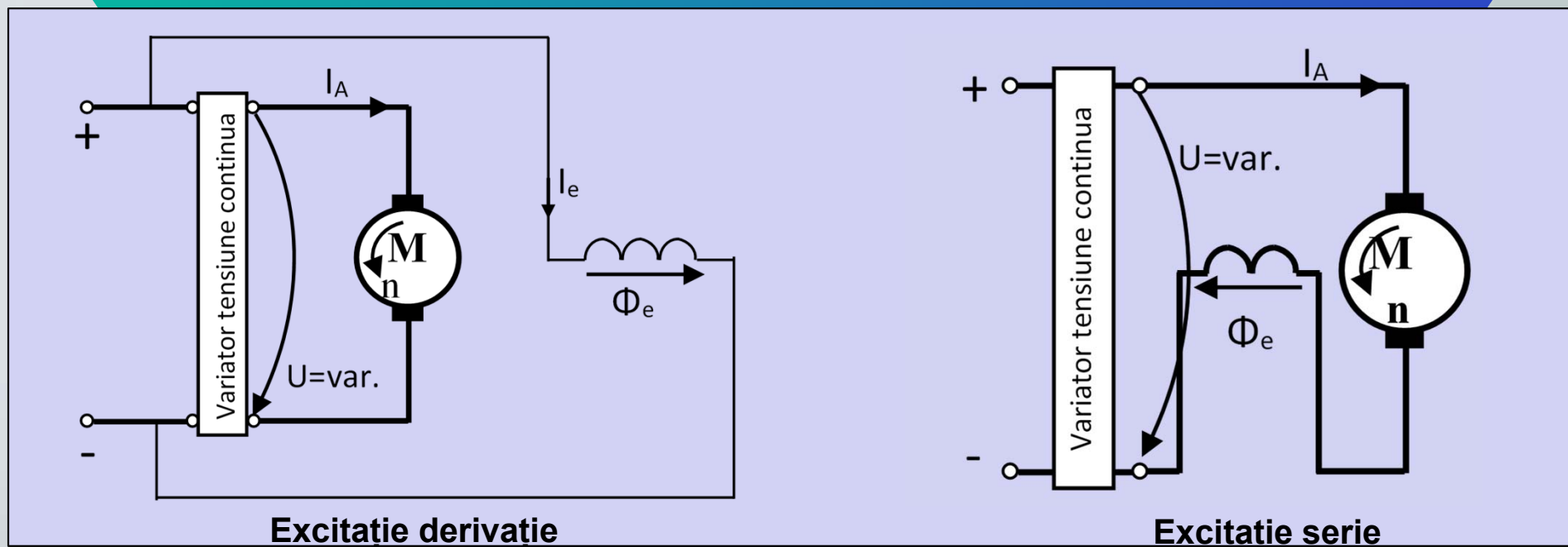
Modalitățile de variație a turației la motorul de c.c. sunt date de:

I. Variația tensiunii de alimentare

II. Variația rezistenței circuitului rotoric

III. Variația fluxului de excitație

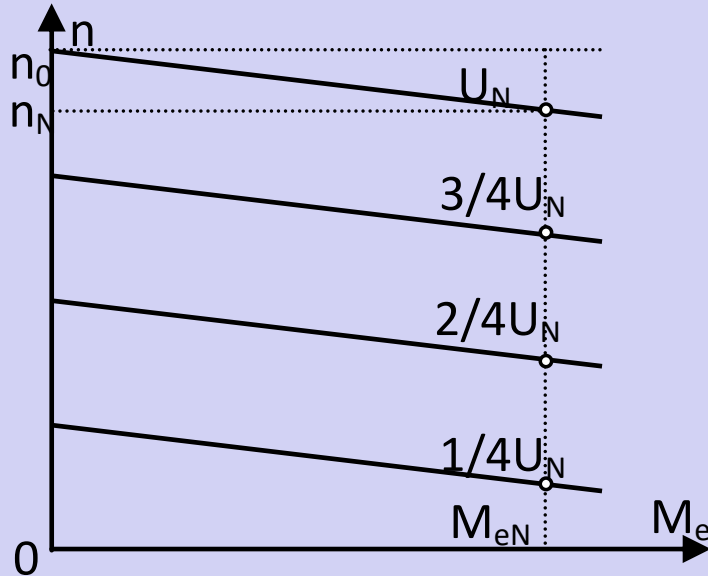
I. Variația tensiunii de alimentare



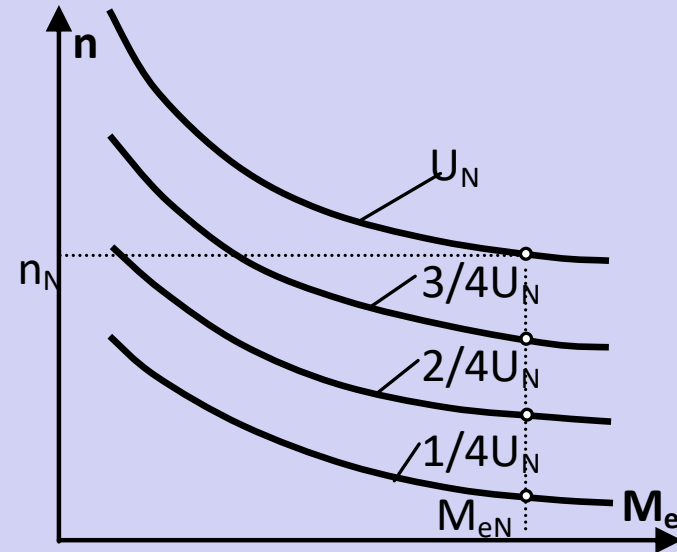
Ca și în cazul metodei de pornire, este necesar un VTC sau un chopper, ceea ce face ca metoda să necesite aparatură suplimentară scumpă.

În cazul motorului cu excitație derivație, trebuie avut grijă ca tensiunea variabilă să fie aplicată numai pe înfășurarea indusului.

La motorul cu excitație serie, variația tensiunii de alimentare implică și modificarea fluxului de excitație.



Excitație derivată



Excitație serie

Expresia turației se poate descompune în doi termeni:

$$n = \frac{U}{k_e \cdot \phi} - \frac{R_A}{k_e \cdot k_m \cdot \phi^2} \cdot M \quad \text{unde s-a folosit relația:} \quad I_A = \frac{M}{k_m \cdot \phi}$$

Caracteristicile obținute pentru valoarea nominală (în acest caz, U_N) se numesc *caracteristici naturale*. Cele obținute pentru valori diferite de cele nominale se numesc *caracteristici artificiale*.

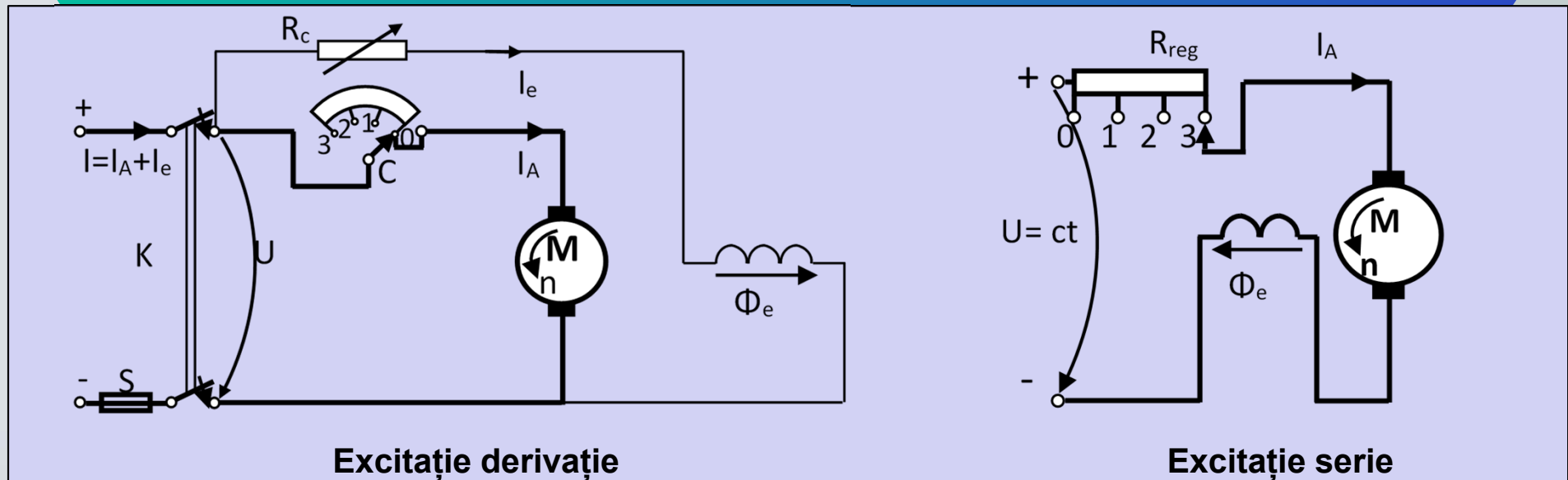
La motorul cu excitație derivație, primul termen se modifică odată cu variația tensiunii, în timp ce al doilea rămâne constant. Drept urmare, caracteristicile au aceeași înclinare (și rămân paralele) modificându-se doar punctul de intersecție cu ordonata (adică valoarea lui n_0).

La motorul cu excitație serie, deși se modifică ambii termeni (atât tensiunea de alimentare cât și curentul de excitație), caracteristicile obținute sunt de asemenea cvasi-paralele.

Concluzii:

- a. **Reglaj eficient, în limite foarte largi, dar NUMAI pentru viteze sub viteza de mers în gol, n_0 (tensiunea de alimentare nu se poate crește, de regulă, peste valoarea nominală);**
- b. **Este necesar aparataj scump (variator de tensiune continuă, chopper);**
- c. **Metoda poate fi folosită și la pornire.**

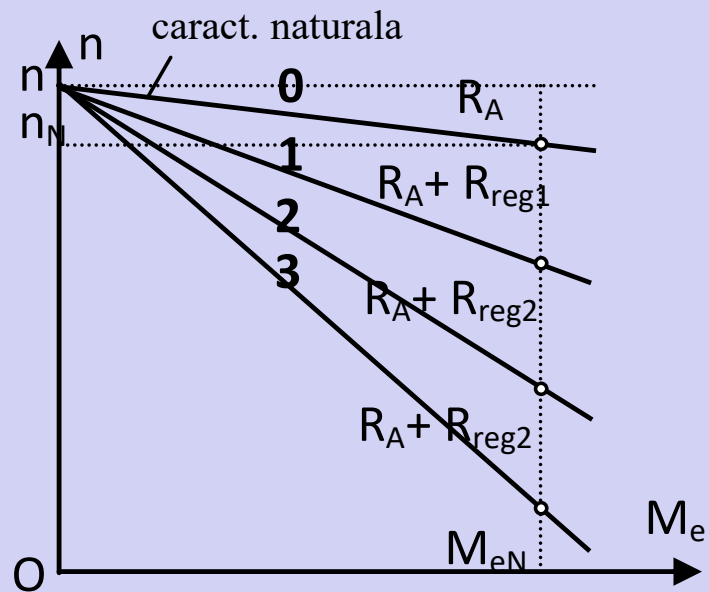
II. Variația rezistenței circuitului rotoric



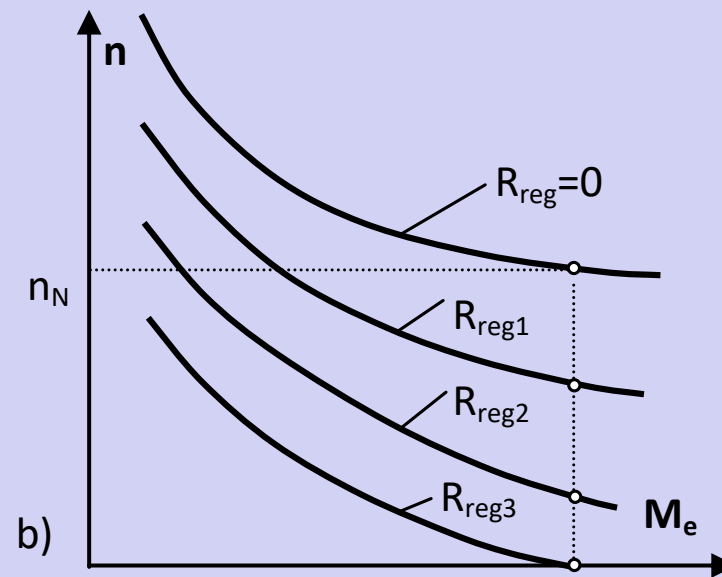
În cazul acestei metode, variația turației se obține prin modificarea rezistenței circuitului rotoric. În acest scop, se înscriază în circuitul indusului o rezistență variabilă (continuu sau în trepte așa cum este figurat pe desen)

Rezistența trebuie dimensionată în așa fel încât să funcționeze pe termen nelimitat, fără să se încălzească excesiv. Această rezistență poate fi folosită și la pornire.

Bornele înfășurării de excitație trebuie conectate direct la sursa de alimentare (rezistența din circuitul indusului NU trebuie să influențeze curentul de excitație).



Excitație derivație



Excitație serie

Expresia turației se poate scrie sub forma:

$$n = n_0 - \frac{R_A}{k_e \cdot k_m \cdot \phi^2} \cdot M$$

La motorul cu excitație derivație, primul termen rămâne constant, în timp ce al doilea crește odată cu creșterea rezistenței. Drept urmare, caracteristicile mecanice pornesc din același punct, ce corespunde turației de mers în gol, n_0 , dar au înclinare diferită (ce crește odată cu valoarea rezistenței de reglare, R_{reg}).

La motorul cu excitație serie se modifică ambii termeni (atât rezistența circuitului indusului cât și curentul de excitație), iar caracteristicile obținute au o înclinare diferită.

Concluzii:

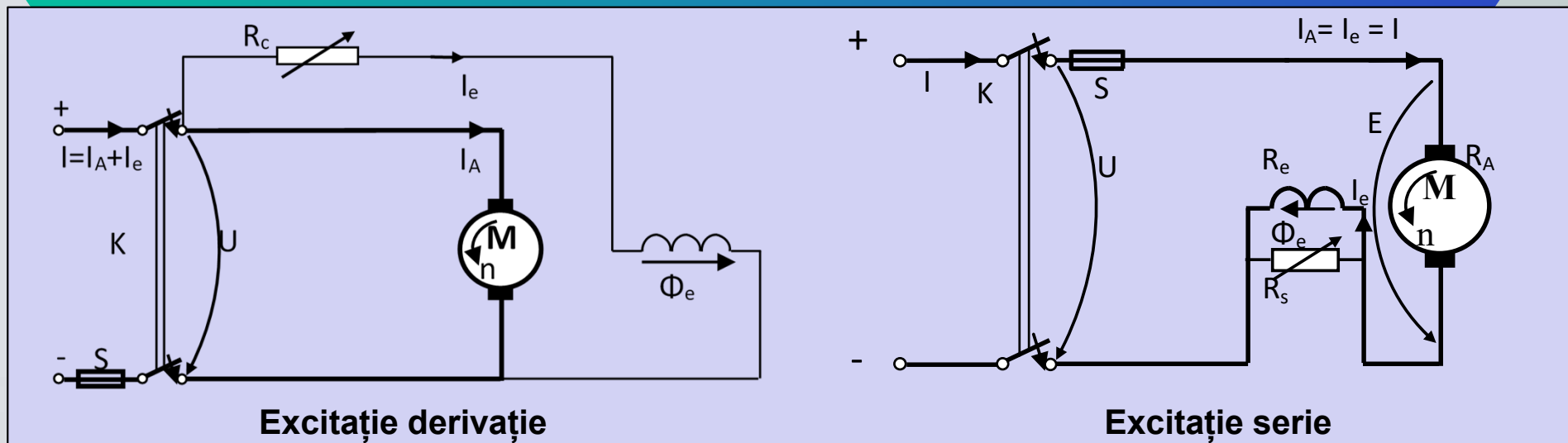
- a. Reglaj eficient, în limite foarte largi, dar NUMAI pentru viteze sub viteza de mers în gol, n_0 (deoarece rezistența circuitului rotoric nu poate fi decât crescută);
- b. Aparatajul utilizat este ieftin (rezistență variabilă);
- c. Variația vitezei este însoțită de pierderi de energie importante (prin efect Joule pe rezistență);
- d. În cazul motoarelor serie utilizate în tracțiune, metoda este folosită frecvent și pentru oprirea vehiculului.



Reostatul de pornire NU poate fi utilizat pentru reglarea vitezei dar reostatul de reglare a vitezei poate fi utilizat pentru pornire

III. Variația fluxului de excitație

$$n = \frac{U_A - R_A \cdot I_A}{k_e \cdot \phi}$$



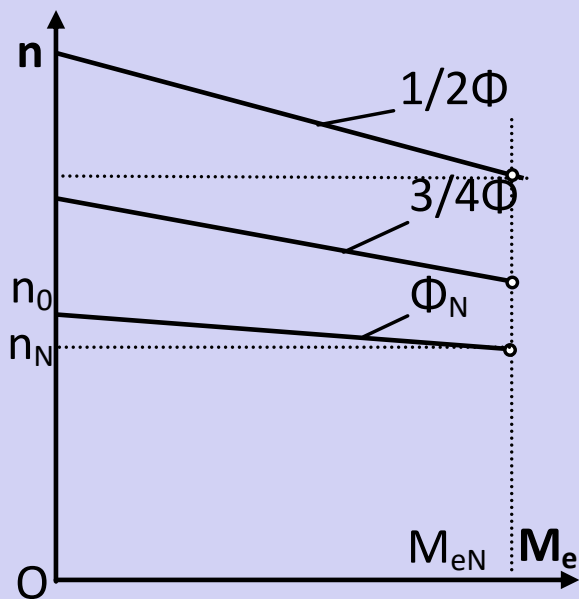
Metoda constă în modificarea curentului de excitație și, drept urmare, a fluxului de excitație.

Modul cel mai simplu este inserierea unei rezistențe variabile în circuitul de excitație (la motorul cu excitație derivație).

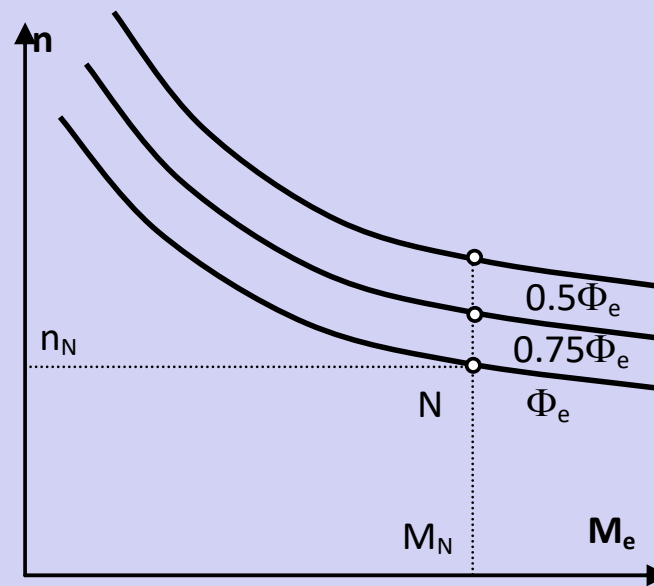
La motorul cu excitație serie, rezistența se conectează în paralel pe înfășurarea de excitație.

Din expresia turației se observă că fluxul se află la numitorul expresiei. La motorul derivație, prin scăderea fluxului (adică scăderea curentului de excitație prin *mărirea* valorii rezistenței R_c) se pot obține viteze mai mari decât viteza de mers în gol.

La motorul serie, scăderea fluxului se obține prin *micșorarea* valorii rezistenței R_s obținându-se astfel viteze mai mari.



Excitație derivație



Excitație serie

Caracteristicile mecanice pun în evidență faptul că, odată cu scăderea fluxului inductor (practic, introducerea unei rezistențe nu poate decât să scadă fluxul inductor) se obțin caracteristici artificiale situate deasupra caracteristicii naturale, adică viteze mai mari.

Concluzii:

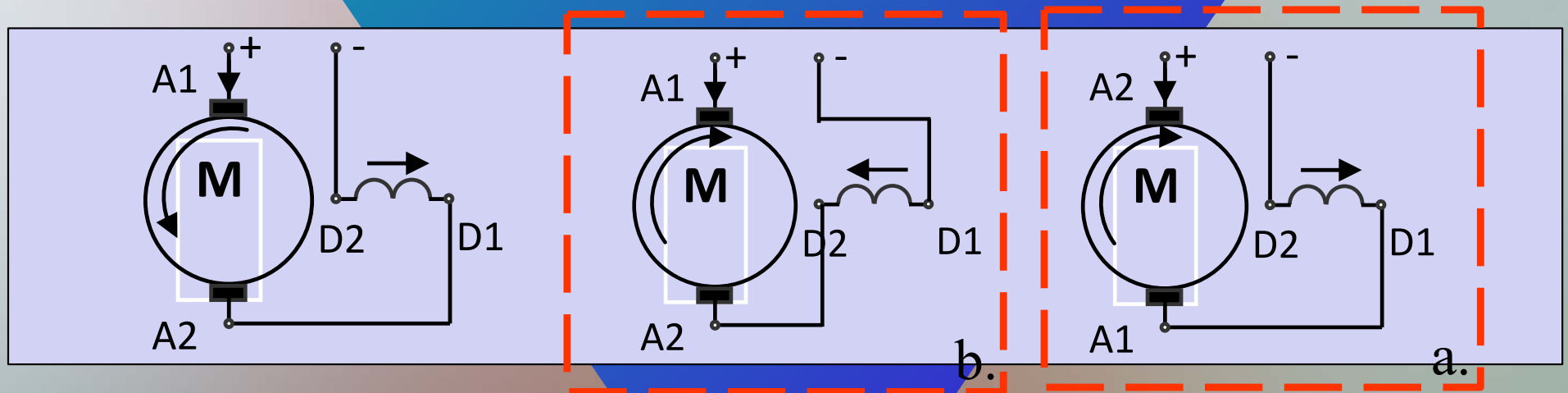
- a. Este singura metodă ce permite și reglajul vitezei peste valoarea de mers în gol.
- b. Aparatajul utilizat este ieftin (doar o rezistență variabilă).
- c. Pierderile de energie prin efect Joule pe rezistența de câmp sunt mult mai mici decât în cazul anterior folosirii rezistenței înseriate în circuitul indusului.
- d. În cazul reglajului vitezei peste n_0 , dacă se menține constant cuplul rezistent, atunci are loc o creștere semnificativă a curentului prin rotor ($M = k_m \cdot \phi \cdot I_A$). Este preferabilă o scădere a cuplului rezistent în această situație.
- e. O scădere accentuată a fluxului inductor (defluxare) poate duce la o funcționare instabilă a motorului.

Inversarea sensului de rotație

$$M_e = k_m \cdot I_A \cdot \phi$$

a. Inversarea sensului curentului I_A \longrightarrow Inversare capetelor înfășurării rotorice (A_1 cu A_2)

b. Inversarea sensului fluxului inductor ϕ \longrightarrow Inversarea sensului curentului de excitație I_e \longrightarrow Inversarea bornelor înfășurării de excitație (D_1 cu D_2 de exemplu)



NICIODATĂ inversarea sensului de rotație nu se obține inversând “ + ” cu “ - ” la sursa de alimentare.

Inversarea sensului de rotație

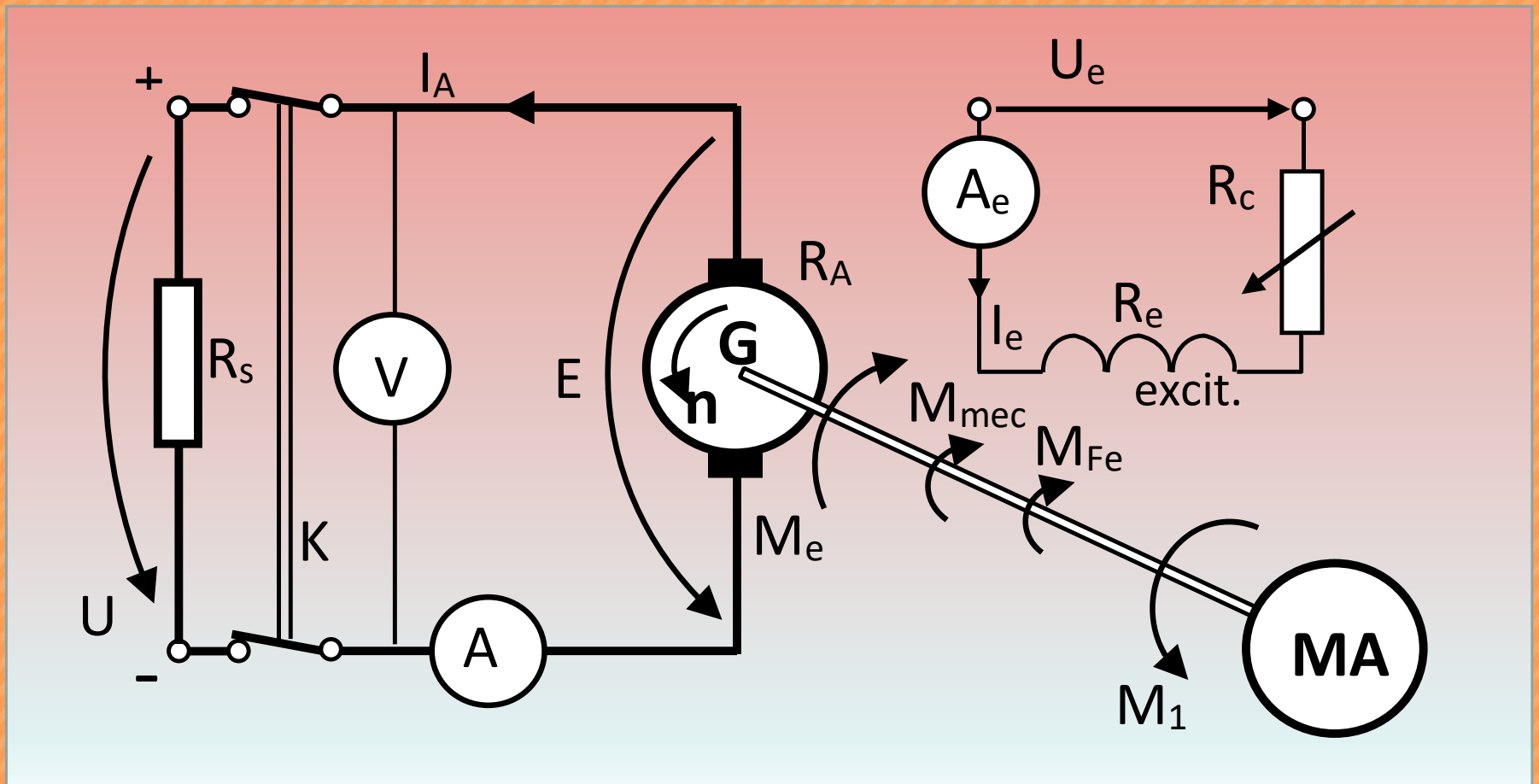
Cele două metode de inversare a sensului de rotație sunt valabile pentru toate motoarele de c.c. cu excitație serie, derivație sau separată.



În cazul motoarelor de c.c. cu excitație mixtă se preferă metoda inversării sensului curentului rotorice I_A , adică inversare capetelor înfășurării rotorice (A_1 cu A_2). Soluția inversării sensului curentului de excitație ar trebuie realizată pe ambele înfășurări de excitație altminteri există pericolul schimbării tipului de funcționare din mixt adițional în mixt diferențial sau invers.

Studiul generatoarelor de C.C.





Funcționarea mașinii de c.c. în regim de generator presupune că mașina primește energie mecanică furnizată de o mașină de antrenare, MA, pe care o convertește în energie electrică disponibilă la borne.

Sarcina mașinii este reprezentată de rezistența de sarcină, R_s .

La arborele (axul) mașinii electrice acționează o serie de cupluri, după cum urmează:

- Cuplul motor M_1 (de antrenare) furnizat de mașina de antrenare;
- Cuplul electromagnetic M_e dezvoltat de mașina de c.c. Acesta se opune rotirii rotorului și are, prin urmare, un caracter rezistent;
- Cuplurile datorate pierderilor mecanice, M_{mec} și pierderilor în fierul rotoric M_{fe} . Și acestea au un caracter opozant cuplului de antrenare.

Ecuția de echilibru mecanic în regim dinamic este:

$$M_1 - M_{mec} - M_{Fe} - M_e = J \cdot \frac{d\Omega}{dt}$$

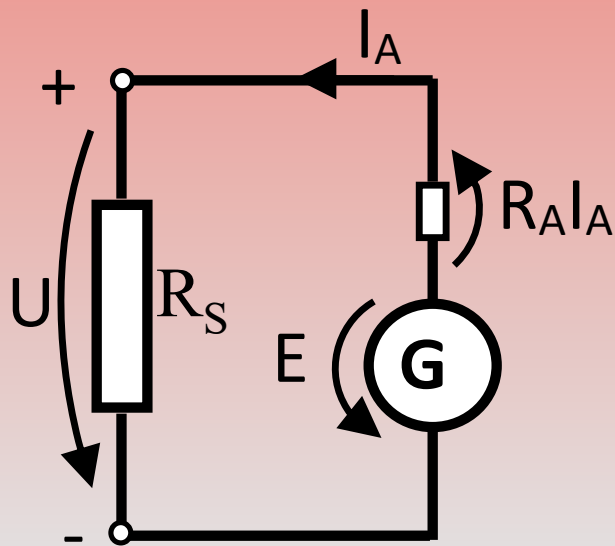
unde:

$$M_e = -\frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi} \cdot I_A \cdot \phi = -k_m \cdot \phi \cdot I_A$$

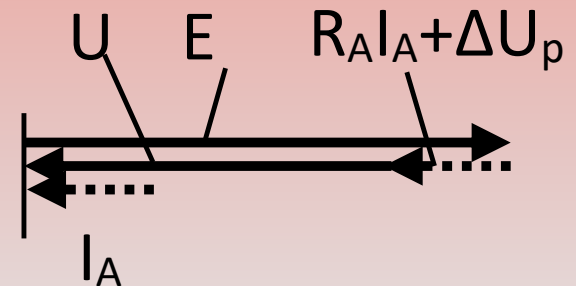
iar: $J \cdot \frac{d\Omega}{dt}$ reprezintă momentul de inerție al sistemului (m.c.c. + ML)

În regim stabilizat ($\Omega=ct$; adică la viteză constantă), ecuația de echilibru a cuplurilor devine:

$$M_1 = M_{mec} + M_{Fe} + M_e$$



a. schema circuitului electric



b. diagrama fazorială

Schema electrică a generatorului de c.c. pune în evidență următoarele elemente: tensiunea la borne, U ; curentul prin înfășurarea indusului, I_A ; tensiunea indusă în înfășurarea rotorică de către câmpul inductor conform legii inducției electromagnetice, E ; căderea de tensiune pe înfășurarea indusului, $R_A \cdot I_A$; căderea de tensiune la perii, ΔU_p .

$$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{60} \cdot n \cdot \phi = k_e \cdot n \cdot \phi$$

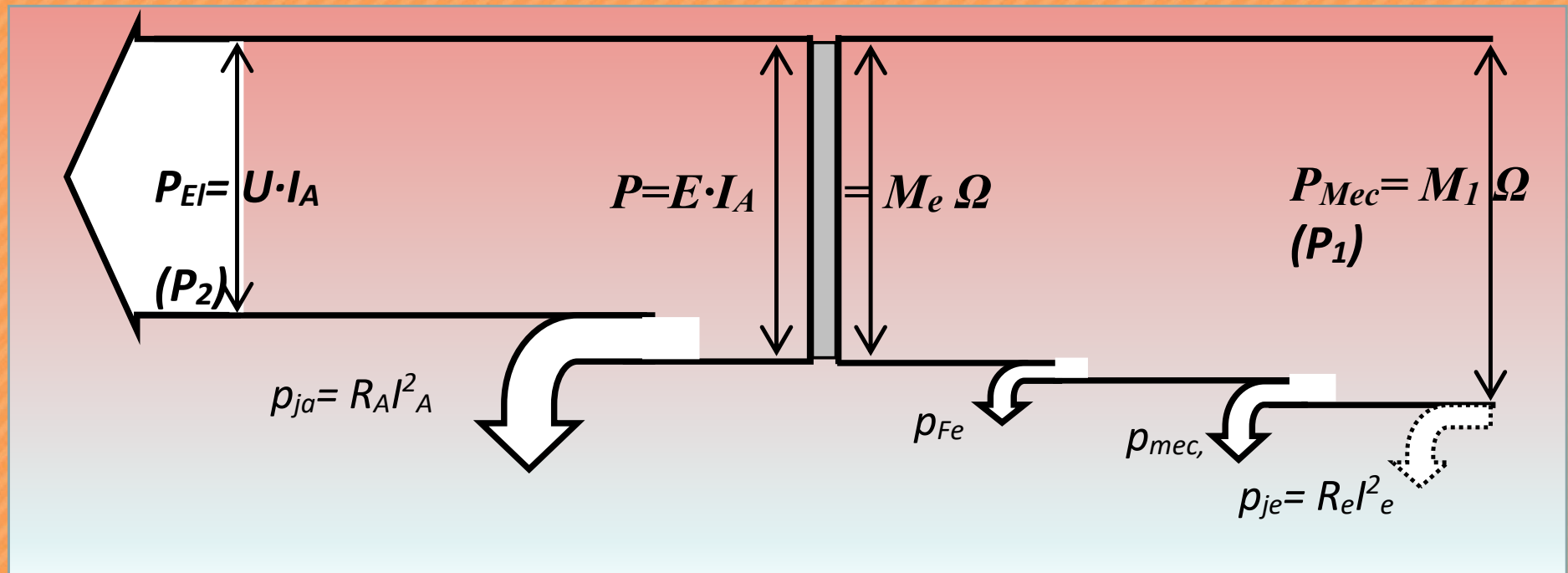
- Expresia tensiunii induse

$$E = U_A + R_A \cdot I_A + \Delta U_p$$

- Ecuația de echilibru al tensiunilor

DIAGRAMA DE BILANȚ ENERGETIC

Aceasta diagrama exprima echilibrul puterilor în mașina de c.c. în regim de generator.



- P_1 – puterea absorbită (putere mecanică la arbore);
- P – puterea electromagnetică
- P_2 – puterea cedată (putere electrică)

- p_{je} – pierderi în înfășurarea de excitație
- p_{ja} – pierderi în înfășurarea rotorică
- p_{mec} – pierderi mecanice și de ventilație
- p_{Fe} – pierderi în fier (în miezul rotoric)

Randamentul generatorului de c.c. are expresia:

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

unde: $\sum p = p_{je} + p_{ja} + p_{mec} + p_{Fe}$ reprezintă suma pierderilor

Caracteristicile de funcționare a generatoarelor

Aceste caracteristici exprimă dependența dintre două *mărimi caracteristice* în condițiile în care celelalte se mențin constante.

Mărimi caracteristice: Tensiunea indusă la gol - E_0 ; Tensiunea la borne - U_A ; Curentul prin indus - I_A ; Curentul de excitație - I_e ;

1. Caracteristica de mers în gol: $E_0 = f(I_e)$ pt. $n = \text{ct.}$, $I_A = 0$

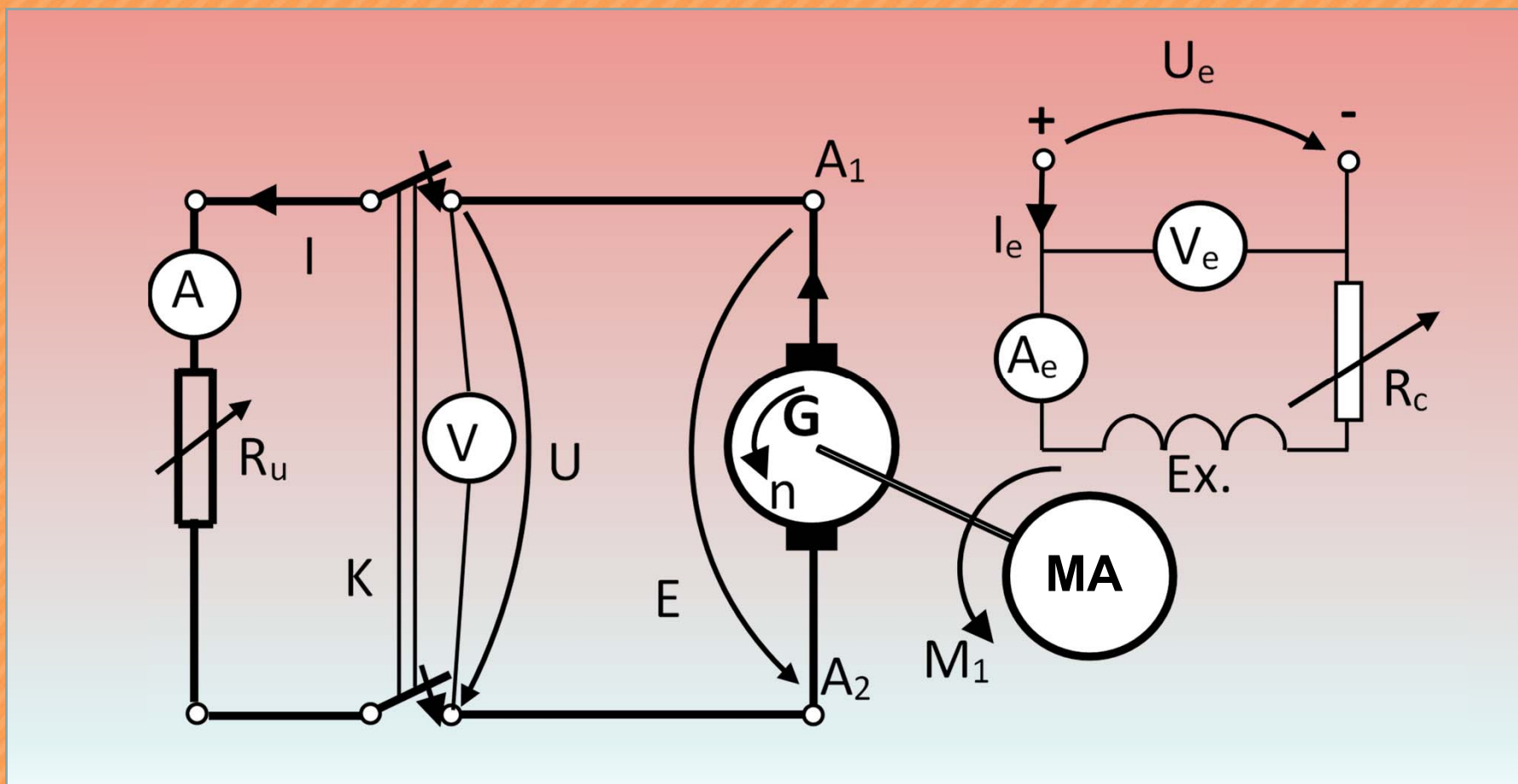
2. Caracteristica internă (de sarcină): $U_A = f(I_e)$ pt. $n = \text{ct.}$, $I_A = \text{ct.}$

3. Caracteristica externă: $U_A = f(I_A)$ pt. $n = \text{ct.}$, $I_e = \text{ct.}$

4. Caracteristica de reglaj: $I_e = f(I_A)$ pt. $n = \text{ct.}$, $U_A = \text{ct.}$

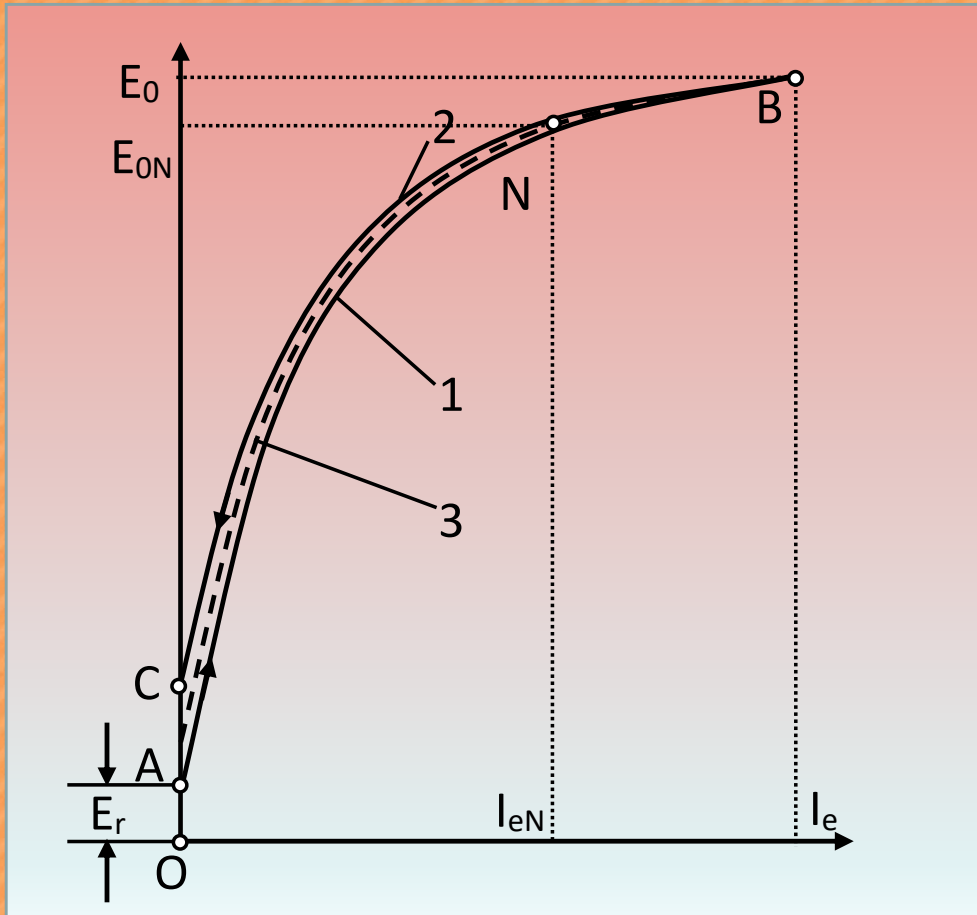
5. Caracteristica de scurt-circuit: $I_A = f(I_e)$ pt. $n = \text{ct.}$, $U_A = 0$

I. Generatorul cu excitație separată



Obținerea caracteristicilor de funcționare presupune realizarea unui montaj ca cel din figură. Acesta conține ampermetre și voltmetre plasate în circuitul indusului și în circuitul de excitație, o rezistență de sarcină, R_u , o rezistență de câmp R_c pentru modificarea curentului de excitație și mașina de antrenare MA .

Caracteristica de mers în gol



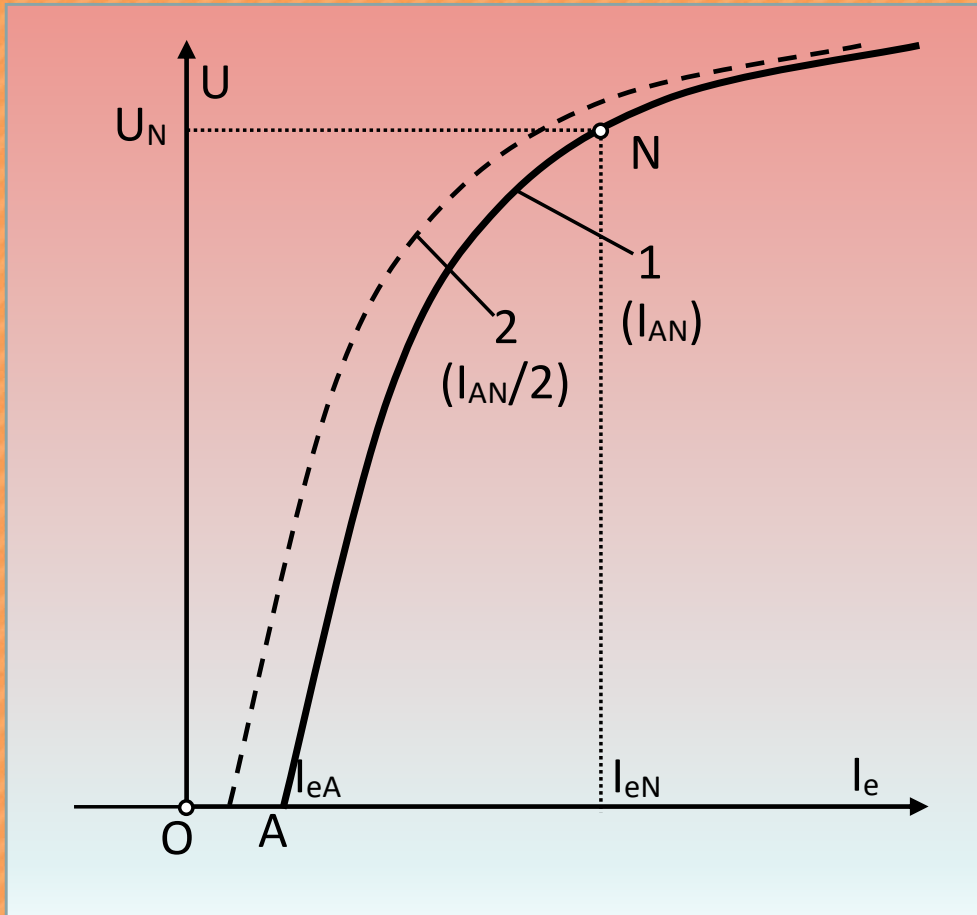
Arată modul de variație a tensiunii induse în funcție de curentul de excitație.

Această caracteristică se obține la funcționarea în gol (întrerupătorul K este deschis) crescând curentul de excitație de la zero până la o valoare ușor mai mare decât valoarea nominală și apoi scăzându-l din nou până la zero.

Caracteristica obținută seamănă cu caracteristica de magnetizare a circuitului magnetic.

Chiar și în lipsa curentului de excitație (a câmpului inductor), la rotirea rotorului apare o tensiune indusă mică, E_r (1-2volți), datorată câmpului remanent.

Caracteristica internă

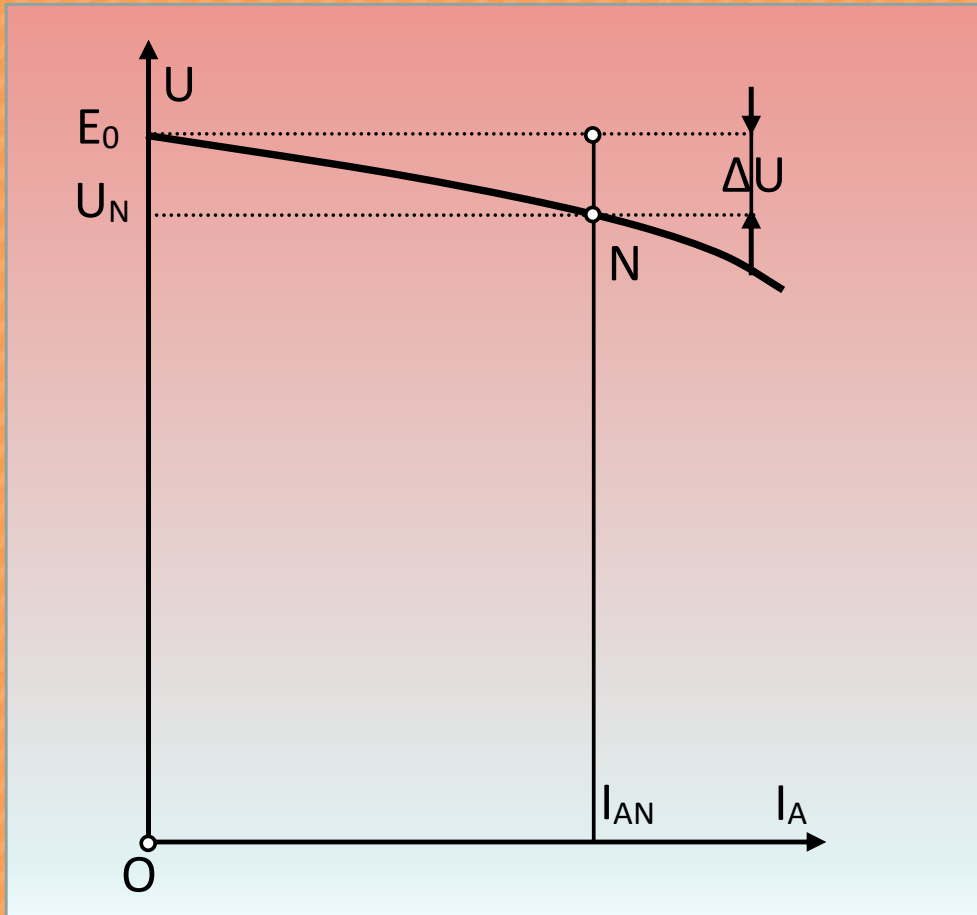


Arată cum poate fi variată tensiunea la bornele generatorului, prin curentul de excitație, atunci când există o anumită sarcină constantă.

Această caracteristică se obține la funcționarea în sarcină (întrerupătorul K este închis) pornind, de regulă de la punctul de funcționare nominală, N , către valoarea zero (curba 1). Curentul de sarcină trebuie menținut constant la valoarea sa nominală.

Caracteristica internă se poate trasa și pentru o altă valoare a curentului de sarcină (de ex $I_{AN}/2$ – curba 2). Se obține o caracteristică paralelă cu cea nominală dar translată spre stânga.

Caracteristica externă



Arată cum variază tensiunea la bornele generatorului atunci când variază sarcina.

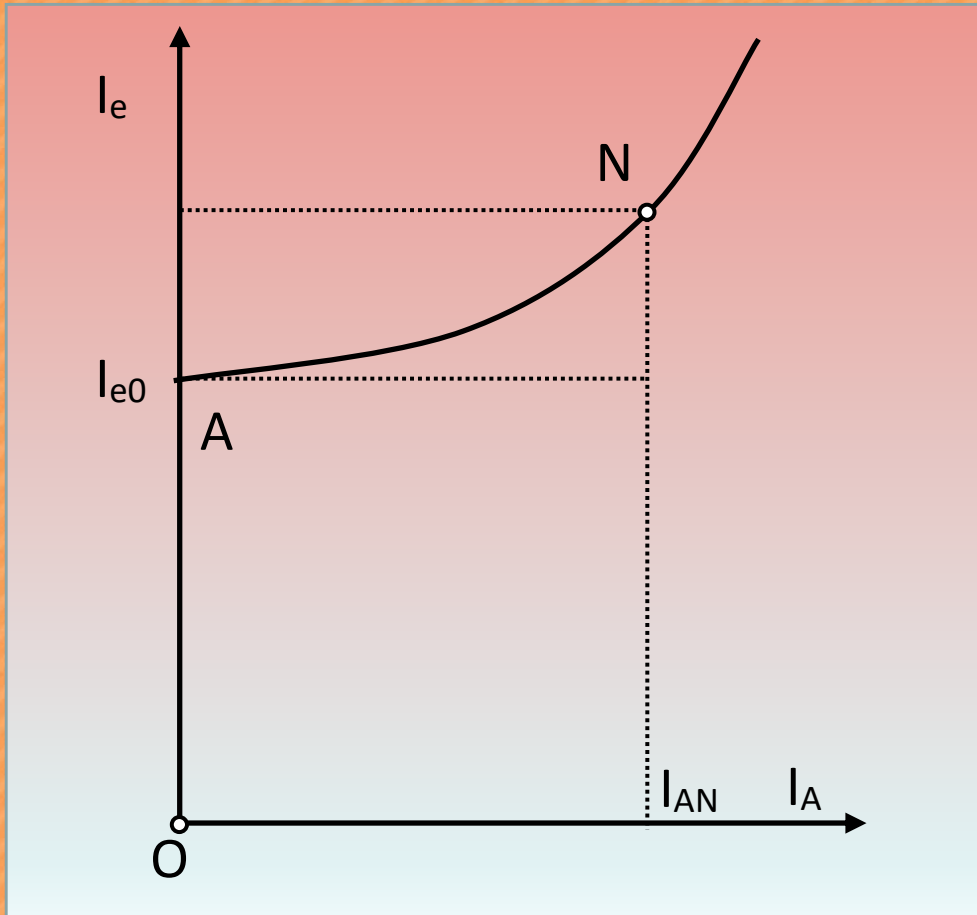
Este cea mai importantă caracteristică a generatorului!

Această caracteristică se obține la funcționarea în sarcină (întrerupătorul K este închis) modificând curentul de sarcină (cu ajutorul rezistenței de sarcină, R_u) de la valoarea nominală la zero.

Odată cu creșterea sarcinii se constată o scădere a tensiunii la bornele mașinii. Această scădere se exprimă prin *variația relativă de tensiune* a cărei expresie este:

$$\Delta u^r = \frac{E_0 - U_N}{U_N} \cdot 100 \in (5 \div 15)\%$$

Caracteristica de reglaj

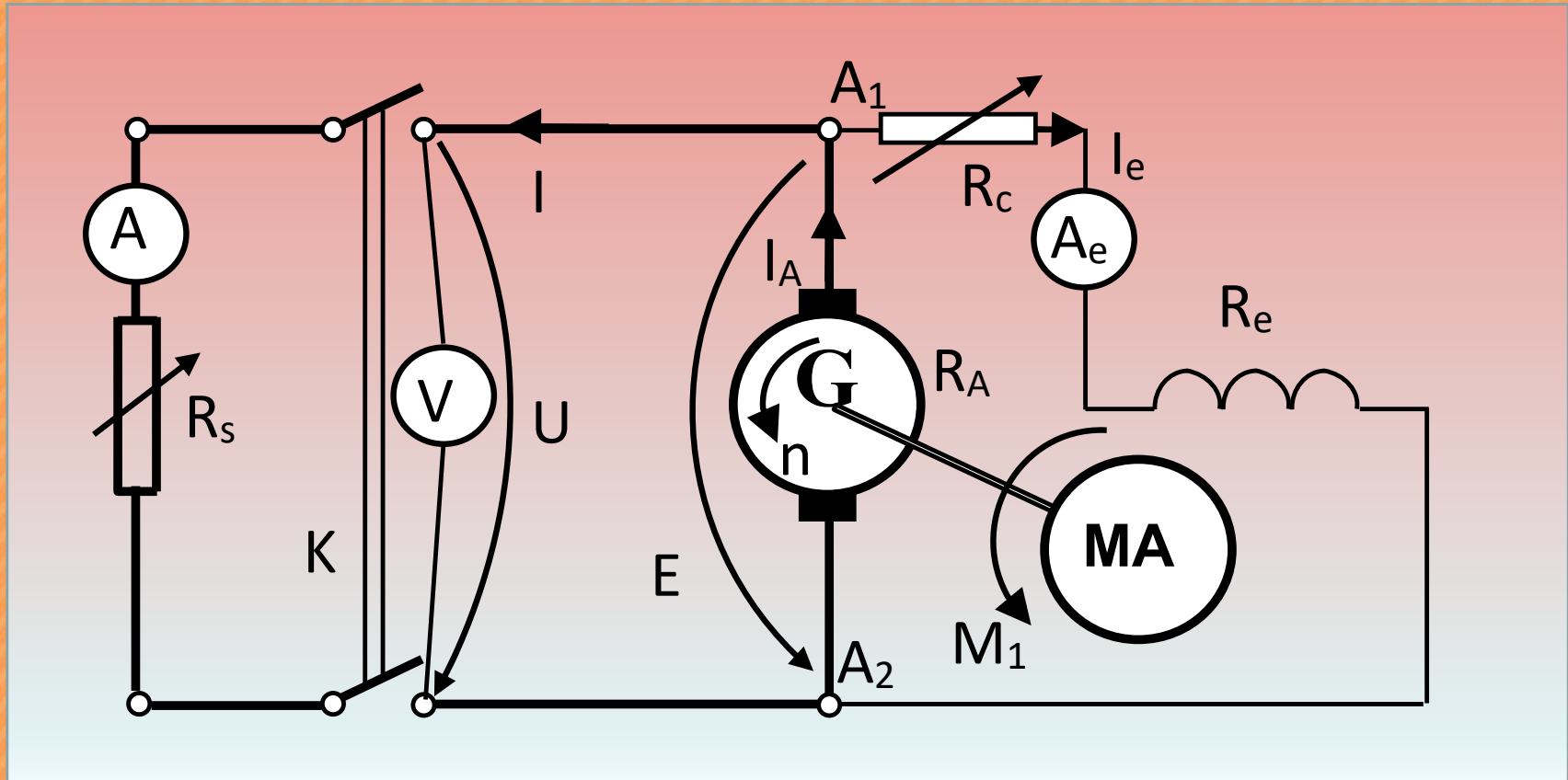


Arată cum TREBUIE variază curentul de excitație pentru a avea la borne o tensiune constantă atunci când variază sarcina.

Această caracteristică se obține la funcționarea în sarcină (întrerupătorul K este închis) modificând curentul de excitație (prin intermediul rezistenței de câmp R_c) astfel încât tensiunea să rămână constantă atunci când variază sarcina (prin rezistența de sarcină, R_u) de la valoarea nominală la zero.

Se constată că, pentru menținerea constantă a tensiunii la borne, odată cu creșterea sarcinii este necesară mărirea fluxului inductor prin intermediul curentului de excitație.

II. Generatorul cu excitație derivație



La mașina cu excitație derivație, circuitul de excitație este conectat în paralel cu înfășurarea indusului. Prin urmare, NU mai există sursa de tensiune pentru crearea câmpului inductor.

Funcționarea mașinii în regim de generator este posibilă NUMAI dacă mașina se poate autoexcita.

Autoexcitarea (sau Amorsarea) reprezintă fenomenul electromagnetic care duce la apariția tensiunii la bornele mașinii, când aceasta se rotește, la o valoare apropiată de cea nominală.

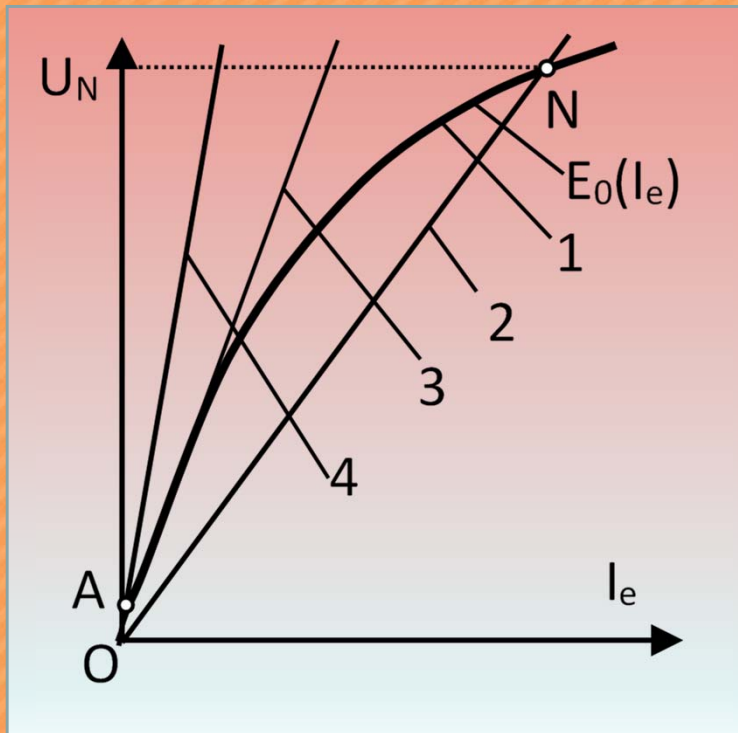
Pentru ca autoexcitarea să fie posibilă trebuie îndeplinite trei condiții:

Condiții de amorsare:

1. Să existe câmp remanent în polii principali ai mașinii. Acest lucru are loc în mod natural la mașinile care au mai funcționat (circuitul magnetic păstrează un câmp remanent). În cazul mașinilor noi sau a celor care nu au mai funcționat o perioadă mai lungă de timp, magnetismul remanent trebuie creat printr-o pornire a mașinii în regim de motor.

2. Fluxul magnetic creat de înfășurarea de excitație să fie în același sens cu fluxul remanent. Întrucât fluxul remanent este similar cu cel creat de un magnet permanent, este posibil ca alimentarea înfășurării de excitație să creeze un câmp de sens contrar celui remanent. Pentru autoexcitare trebuie inversat sensul curentului de excitație.

3. Rezistența circuitului de excitație să fie mai mică decât o așa-numită rezistența critică.



Aceasta problemă se pune atunci când există rezistența de câmp în circuitul înfășurării de excitație.

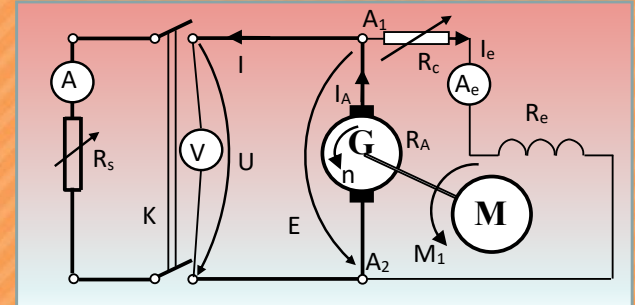
În figura alăturată sunt reprezentate: curba $E_0=f(I_e)$ – curba 1, ce reprezintă caracteristica de mers în gol și drepte caracteristice circuitului de excitație date de relația $E_0=(R_c+R_e)I_e$.

Dacă dreapta 2 intersectează curba 1 (aici în punctul N) atunci mașina se poate amorsa și va funcționa în punctul lor de intersecție.

Dacă dreapta 3 este tangentă la curba 1 avem situația limită de amorsare a mașinii.

În cazul în care dreapta 4 nu intersectează curba 1 atunci mașina nu se poate amorsa și este necesară diminuarea valorii rezistenței de câmp, poate chiar până la scurtcircuitarea ei.

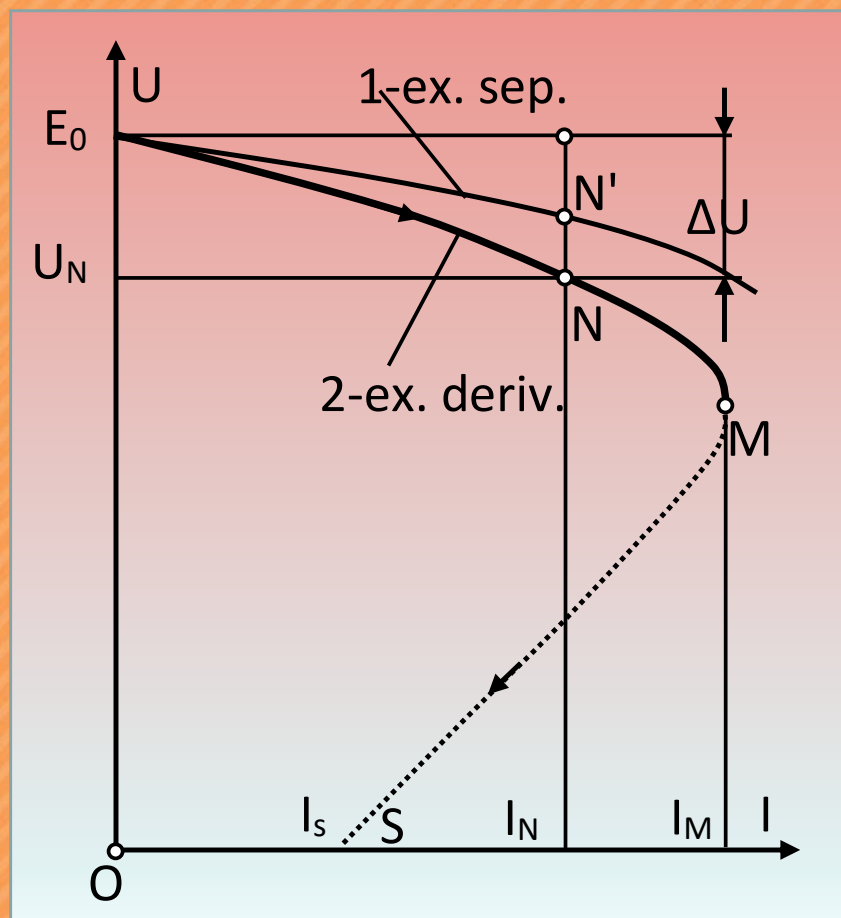
AMORSAREA



- Câmpul remanent se manifestă similar cu câmpul creat de magneții permanenți însă este extrem de slab. Altfel spus, polii inductorii ai mașinii sunt polarizați magnetic.
- Prin rotirea rotorului în acest câmp se induce o tensiune extrem de redusă în înfășurarea rotorului.
- Deoarece înfășurarea de excitație este conectată în paralel cu înfășurarea indusului, tensiunea indusă determină apariția unui curent prin înfășurarea de excitație și deci a unui câmp inductor foarte slab.
- Dacă acest câmp inductor este în același sens cu câmpul remanent, rezultă un câmp mai puternic ce determină o tensiune indusă mai mare.
- Apare deci un curent de excitație mai mare, un câmp inductor mai mare, o tensiune indusă mai mare, s.a.m.d.
- Fenomenul se stabilizează în apropierea tensiunii nominale ca urmare a saturării circuitului magnetic.

Caracteristica externă

La generatorul cu excitație derivație această caracteristică se trasează menținând $R_c = \text{ct.}$

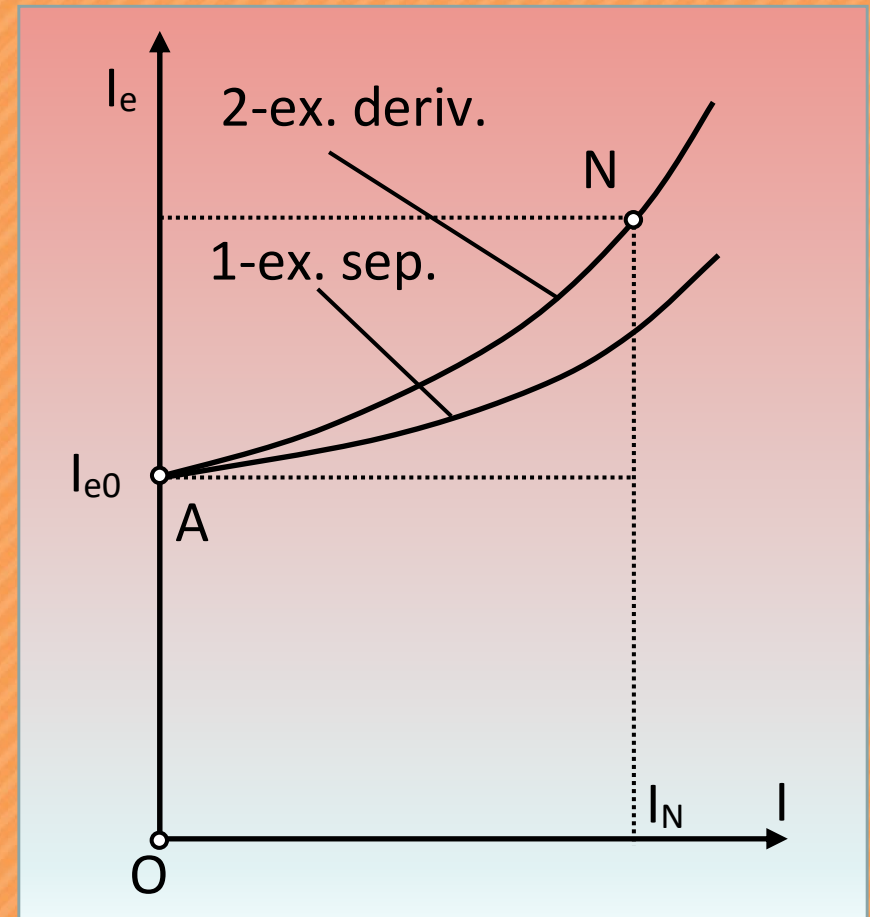


Și în cazul generatorului cu excitație derivație are loc o scădere a tensiunii la borne odată cu creșterea sarcinii. Însă aceasta scădere de tensiune este mai pronunțată decât la generatorul cu excitație separată. Principalul motiv constă în faptul că, odată cu creșterea sarcinii scade tensiunea indusă în înfășurarea rotorică, tensiune ce reprezintă și sursa de alimentare a excitației. Practic, la generatorul cu excitație derivație tensiunea la bornele excitației nu mai rămâne constantă ca în cazul excitației separate.

Variația relativă de tensiune are aceeași expresie însă are valori mai mari:

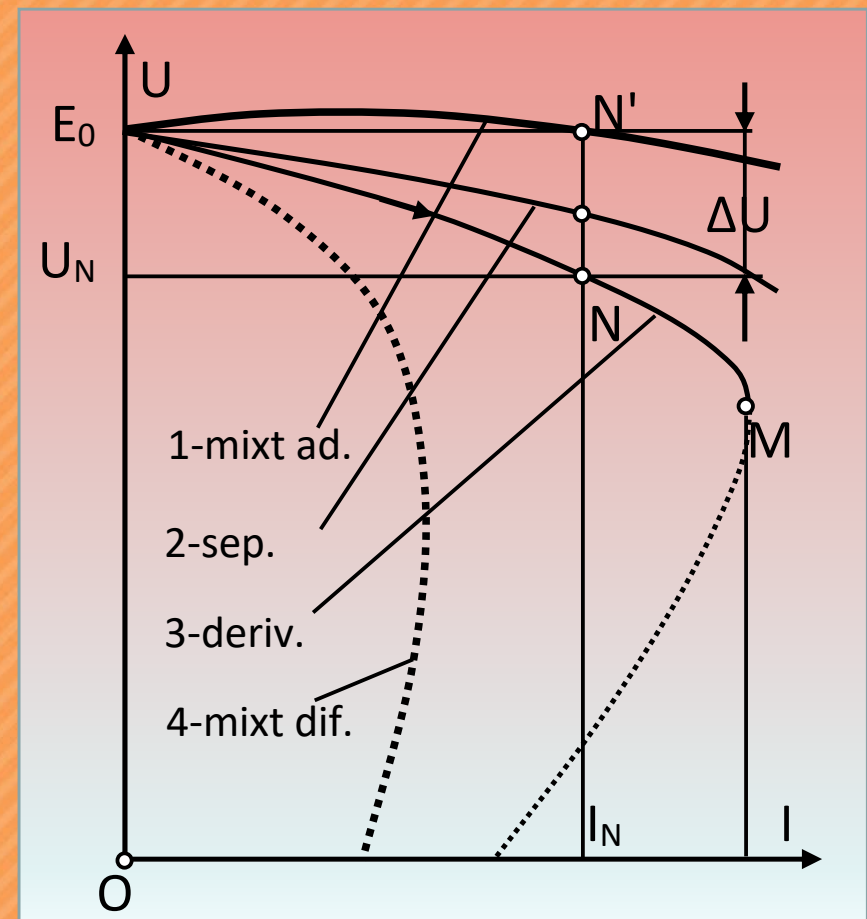
$$\Delta u^r = \frac{E_0 - U_N}{U_N} \cdot 100 \in (15 \div 30)\%$$

Caracteristica de reglaj



Având în vedere scăderea mai pronunțată a tensiunii la bornele mașinii odată cu creșterea sarcinii este evident că, pentru menținerea tensiunii constante este necesară o creștere mai pronunțată a curentului de excitație (curba 2).

Caracteristica externă



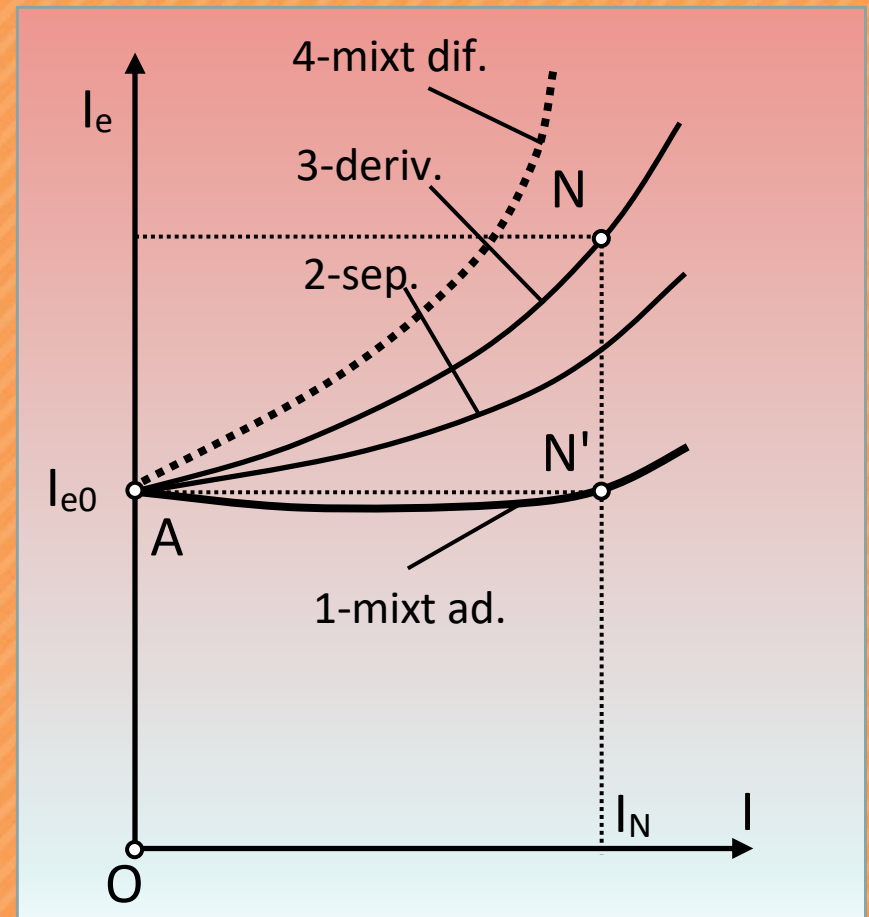
Expresia tensiunii la bornele mașinii se scrie sub forma:

$$U_A = E - R_A \cdot I_A - \Delta U_p = k_e \cdot n \cdot (\phi_{deriv} \pm \phi_{serie}) - R_A \cdot I_A - \Delta U_p$$

În cazul mașinii cu montaj adițional, odată cu creșterea sarcinii se intensifica și fluxul serie care determină creșterea fluxului total în mașină și deci creșterea ușoară a tensiunii la borne – curba 1.

În cazul mașinii cu montaj diferențial, odată cu creșterea sarcinii are loc o scădere pronunțată a fluxului total în mașină, ceea ce determină o scădere abruptă a tensiunii la borne – curba 4. Acest mod de variație este potrivit funcționării generatorului cu excitație mixtă diferențial ca *generator de sudură*.

Caracteristica de reglaj

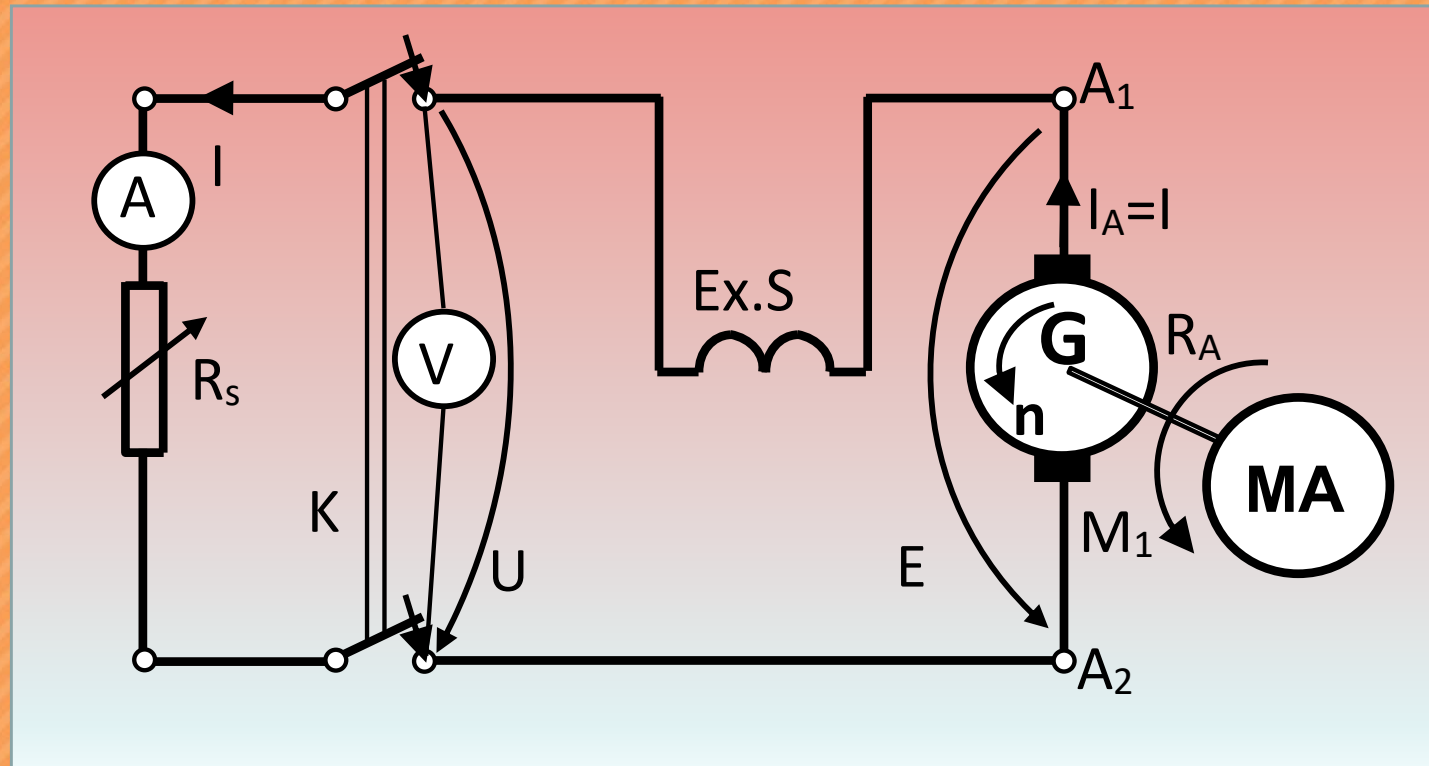


Caracteristicile de reglaj confirmă caracteristicile externe prin modul de variație a curentului de excitație necesar menținerii constante a tensiunii la borne.



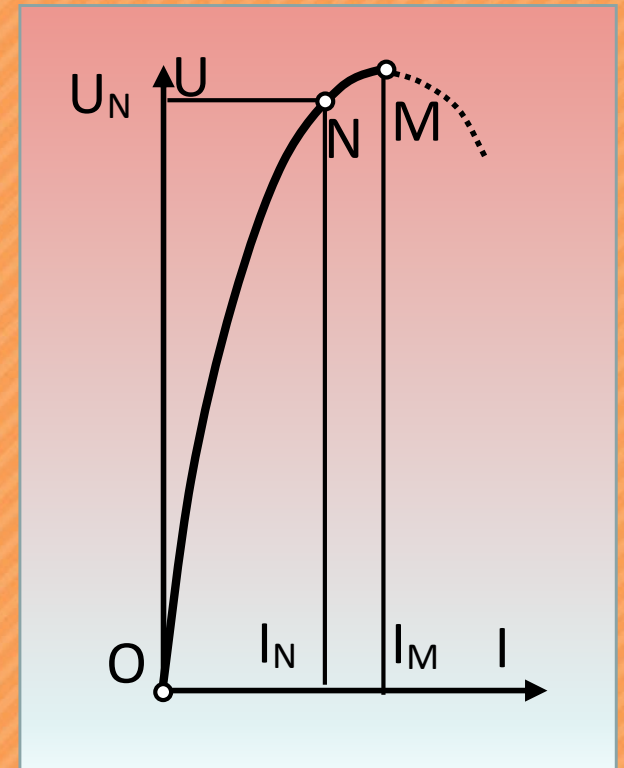
Caracteristicile montajului mixt sunt influențate și de ponderea celor două înfășurări de excitație; de regulă, aceste înfășurări nu creează fluxuri de excitație identice. Este posibil ca preponderent să fie fluxul înfășurării derivație (cel mai adesea) sau cel al înfășurării serie.

IV. Generatorul cu excitație serie



La mașina cu excitație serie, fenomenul de autoexcitare poate avea loc numai în sarcină (întrerupătorul K este închis) și evident depinde de valoarea rezistenței de sarcină.

Caracteristica externă

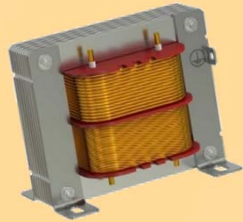


La generatorul cu excitație serie se poate trasa numai caracteristica externă care are o alură complet diferită – tensiunea la borne crește odată cu creșterea sarcinii (datorită creșterii fluxului de excitație).

De regulă, generatorul cu excitație serie nu are o utilizare concretă.



- Generator = regim de functionare
- Caracteristica externa
- Caracteristica de reglaj
- Amorsare (autoexcitare)



TRANSFORMATORUL ELECTRIC





**Transformatorul este un aparat static ce realizează
modificarea valorii mărimilor electrice ale puterii
(*TENSIUNE* și *CURRENT*),**

în curent alternativ

FRECVENȚA* rămânând însă *NEMODIFICATĂ

CLASIFICARE

I. După destinație

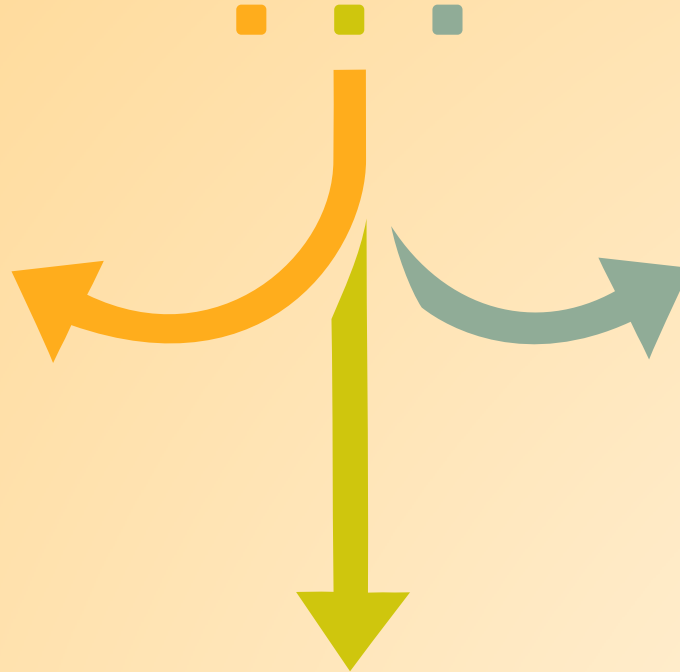
1. Transformatoare de putere
2. Transformatoare speciale

III. După modul de răcire

1. Transformatoare uscate
2. Transformatoare cu ulei

II. După numărul de faze

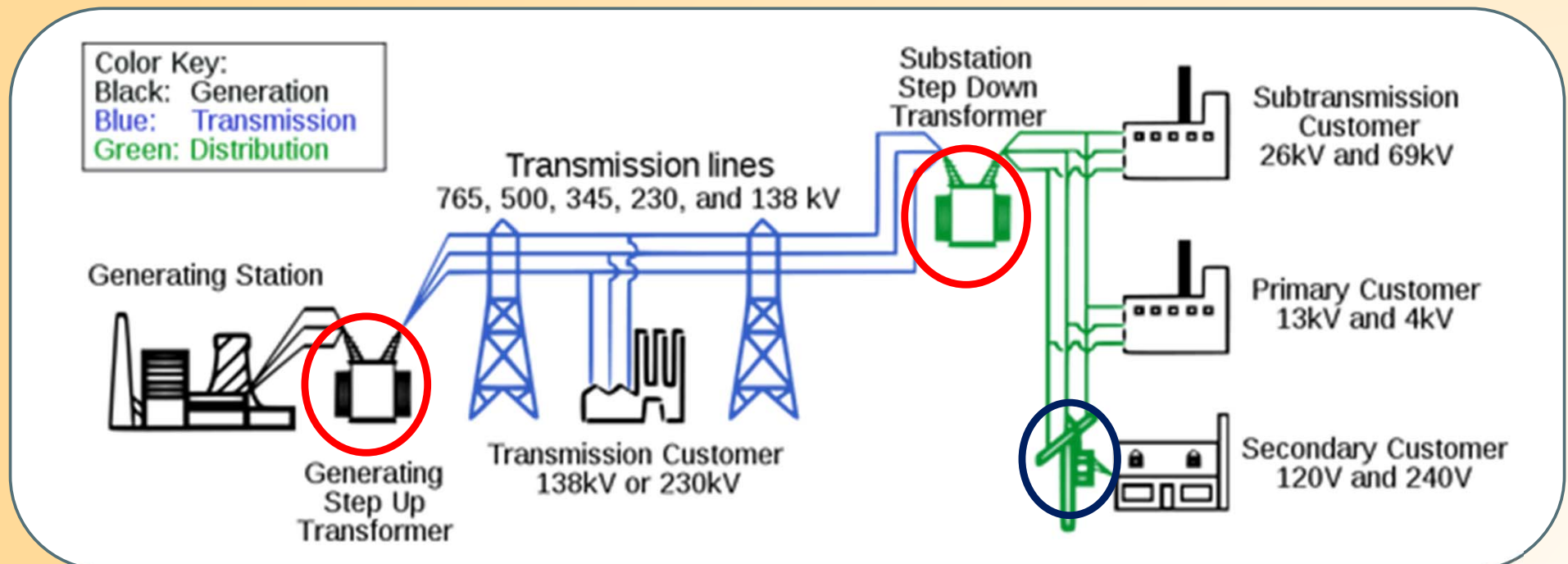
1. Transformatoare monofazate
2. Transformatoare trifazate



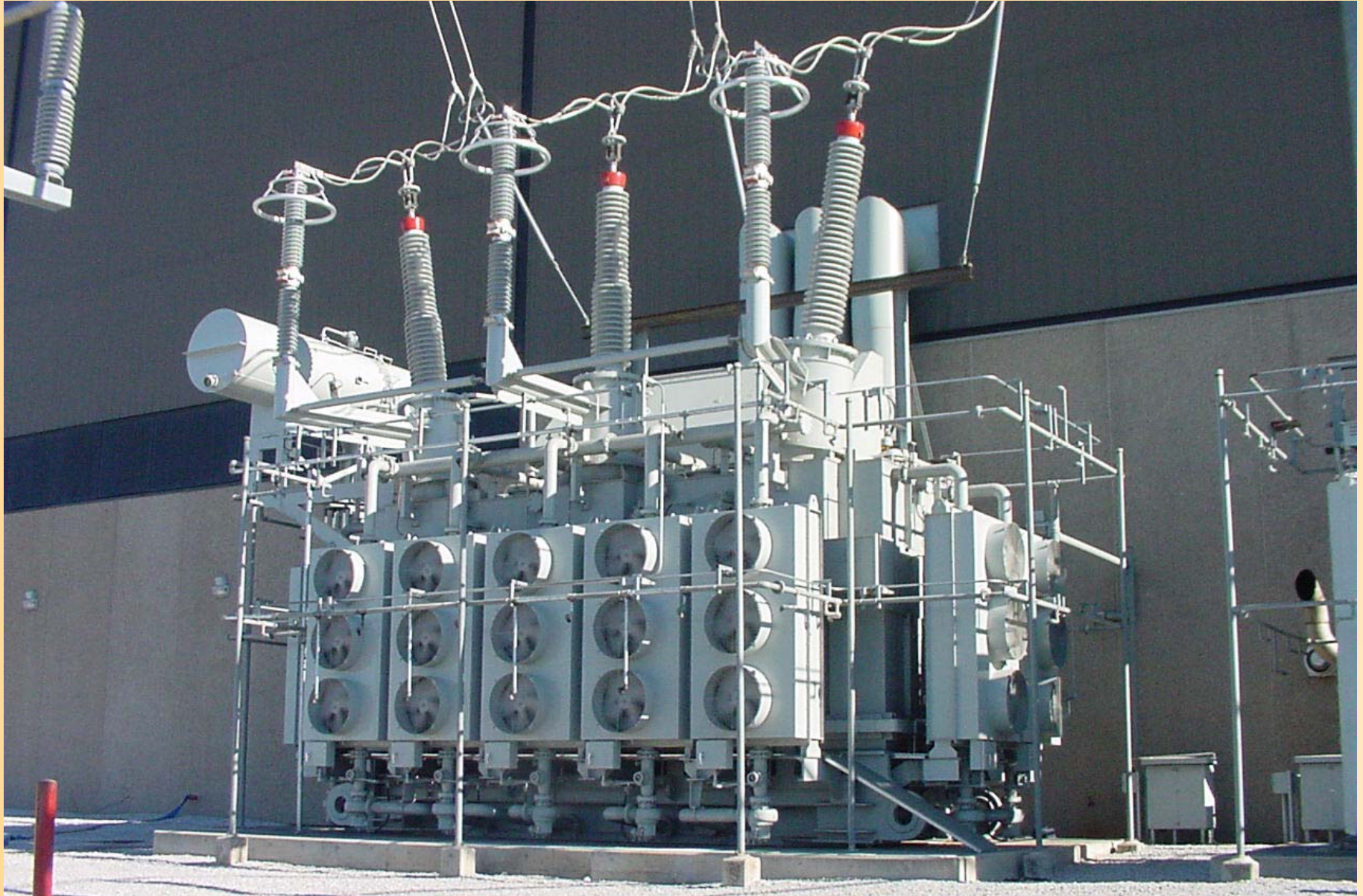
I. După destinație

1A. Transformatoare de putere

- sunt folosite în sistemele energetice pentru interconectarea unor rețele cu parametri electrici diferiți sau pentru alimentarea consumatorilor (întreprinderi, arii rezidențiale, etc)



Transformator de putere



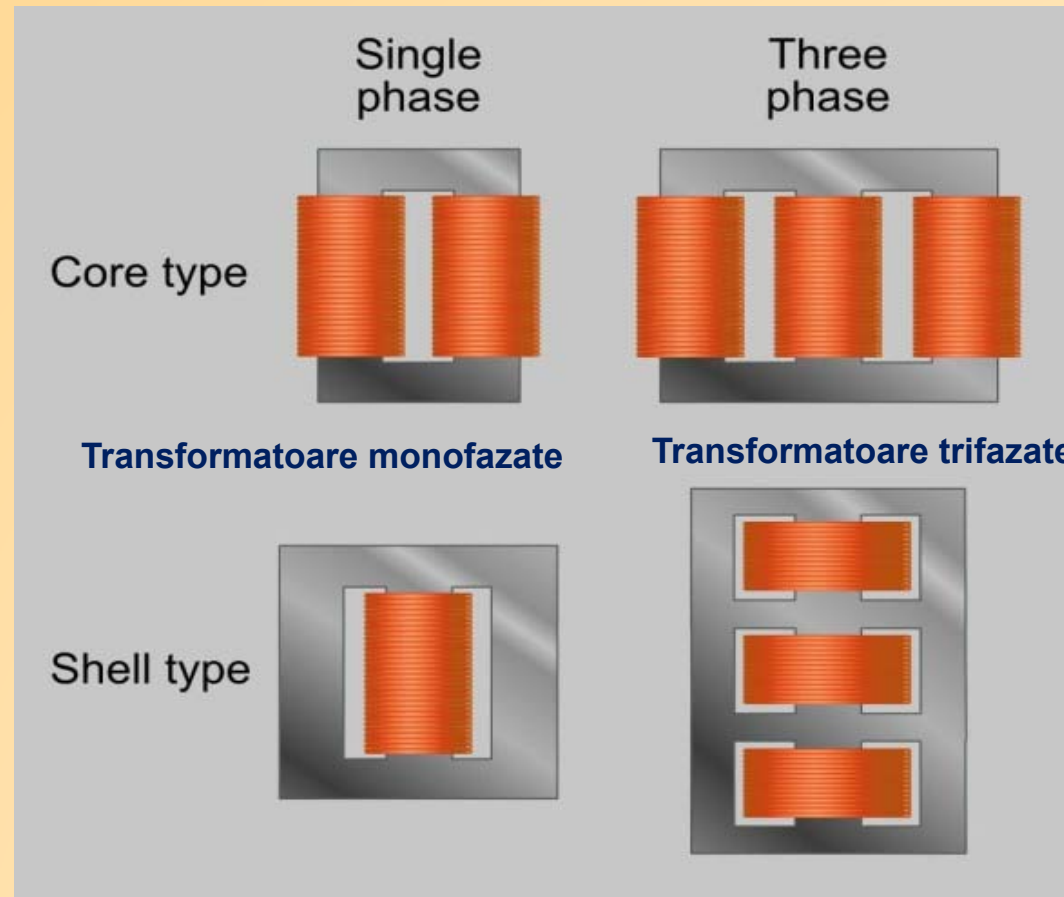
Transformatoarele de putere sunt utilizate la rețelele de transmisie a energiei electrice de înaltă tensiune ca unități ridicătoare și coborâtoare de tensiune (400 kV, 200 kV, 110 kV, 66 kV, 33kV) și sunt în general de puteri de peste 200 MVA.

Transformatoarele de distribuție sunt utilizate în rețelele de distribuție de joasă tensiune ca element final de furnizare a energiei electrice (11kV, 6.6 kV, 3.3 kV, 440V, 230V) și sunt în general de puteri sub 200 MVA.

1B. Transformatoare de distribuție



II. După numărul de faze



Clasificarea se face după numărul de faze din circuitul primar respectiv secundar, numărul de faze fiind identic.

Cele mai folosite tipuri de transformatoare sunt cele monofazate respectiv trifazate.

III. După modul de răcire

Transformatoare uscate

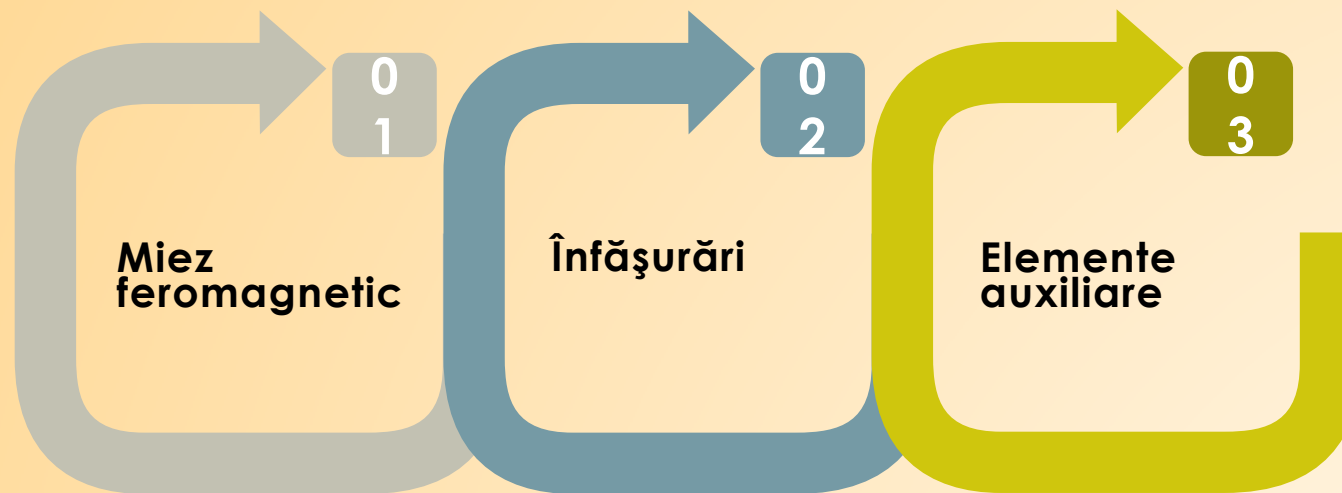


Transformatoare cu ulei



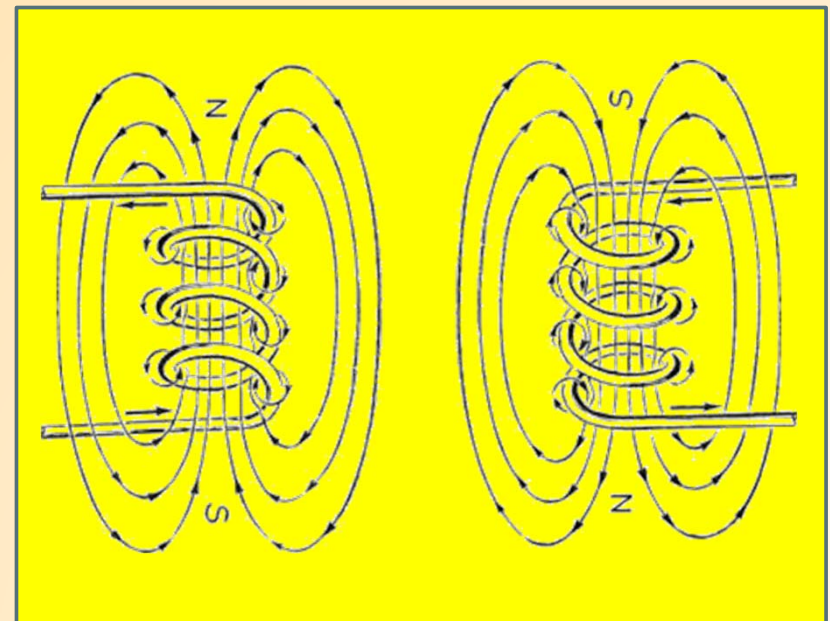
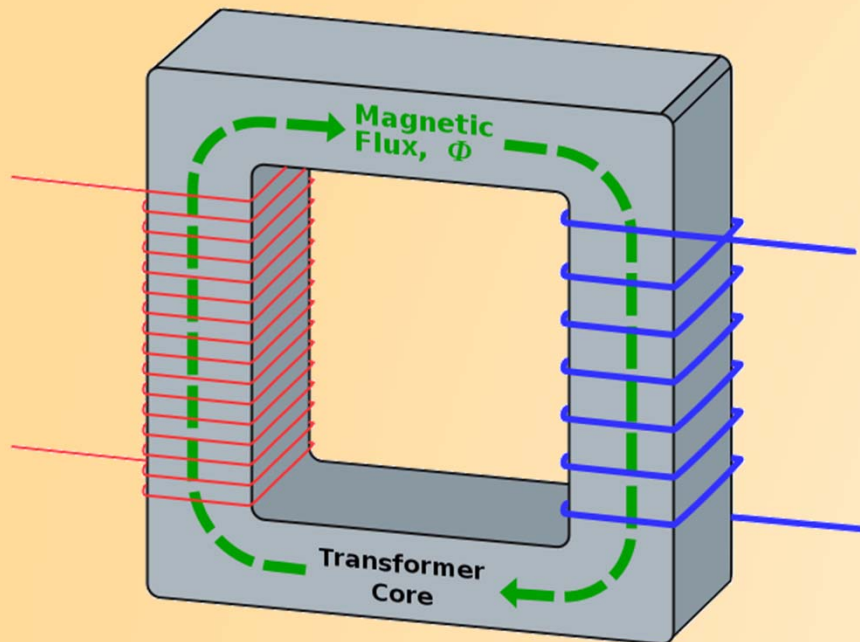
În cazul transformatoarelor uscate, răcirea se face cu aer în timp ce, la transformatoarele cu ulei, agentul de răcire este uleiul de transformator, ce este un ulei mineral, electroizolant, cu caracteristici specifice.

ELEMENTE CONSTRUCTIVE



I. Miezul feromagnetic

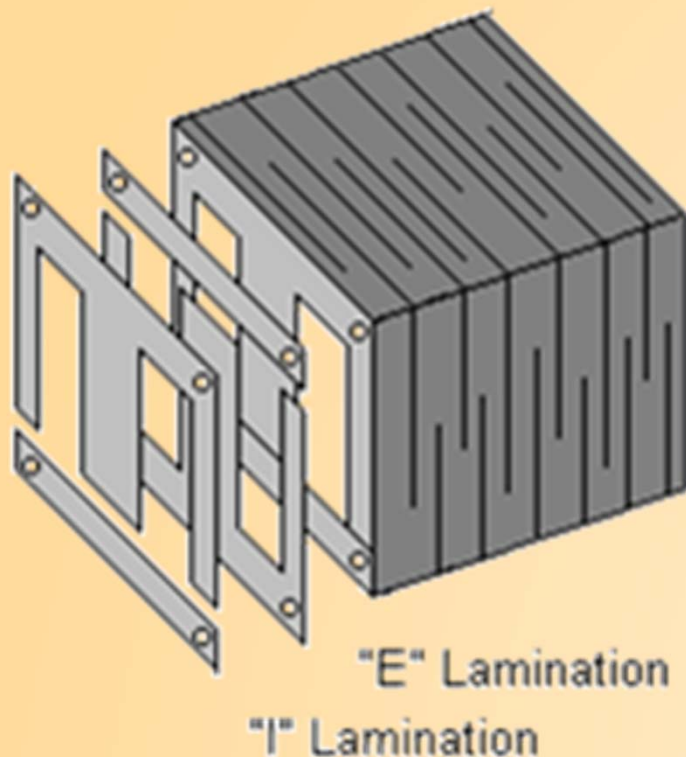
Reprezintă suportul pe care sunt plasate înfășurările transformatorului având însă ca rol principal crearea traseului de închidere a liniilor de câmp. Practic, câmpul creat de înfășurarea primară este „condus” pe trasee de reluctanță minimă către înfășurarea secundară asigurându-se, în acest mod, condiții optime pentru aplicarea legii inducției electromagnetice.



Întrucât câmpurile create de înfășurările transformatorului sunt alternative, miezul magnetic al transformatoarelor este ÎNTOTDEAUNA realizat din tole.

Tolele sunt izolate între ele (au la suprafața lor o izolație ceramică) astfel încât valoarea curenților turbionari scade semnificativ, scăzând, drept urmare, și pierderile în fier prin curenți turbionari.

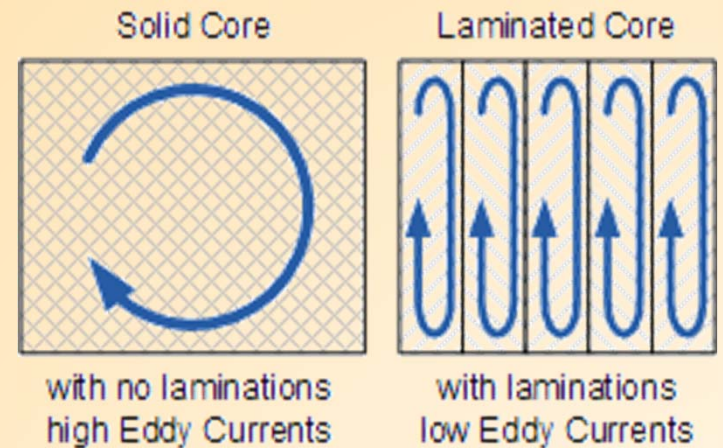
Grosimea tolelor este cuprinsă între 0,2-0,5 mm.



a. Miez magnetic realizat din tole E+I

Miez magnetic masiv

Miez magnetic din tole

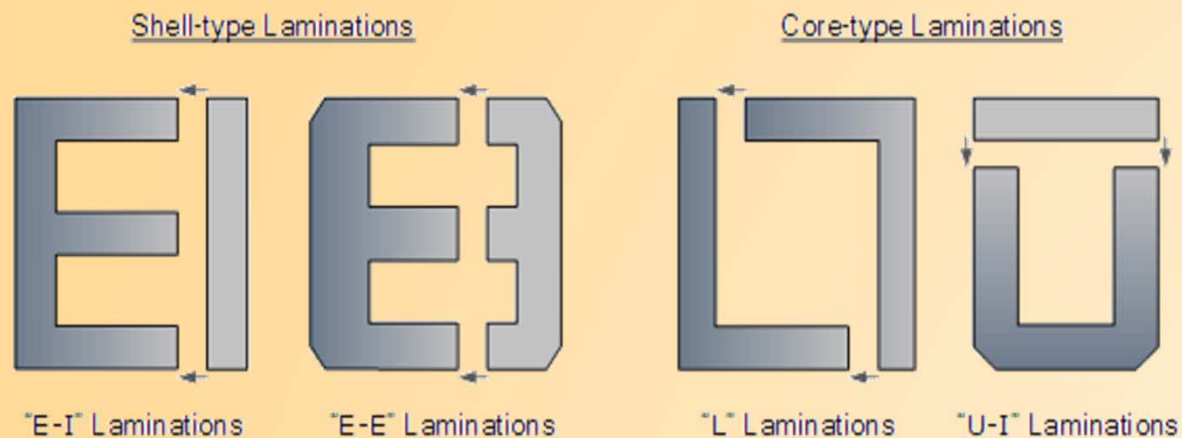


b. Explicativă la prezența curenților turbionari în miezurile magnetice

Circuitul magnetic al transformatoarelor, denumit și miez magnetic, este format din două elemente constructive:

- coloane – sunt porțiunile din miez pe care sunt plasate înfășurările;
- juguri – sunt porțiunile rămase din miez care închid circuitul magnetic.

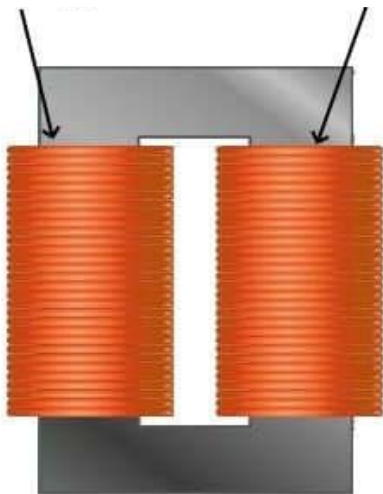
Transformatoarele monofazate de mică putere au circuitul magnetic realizat din tole având forma literelor E, I, L și U. Figurile de mai jos pun în evidență modul de asamblare a circuitului magnetic închis.



Transformatoarele monofazate pot fi construite în trei variante:

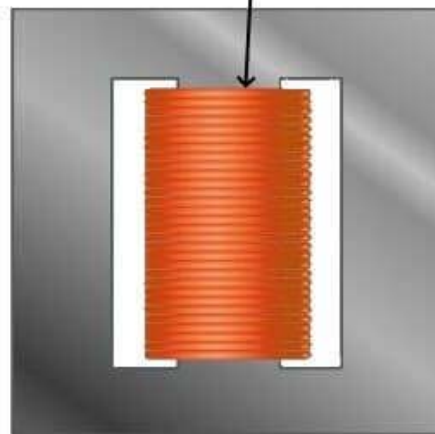
- Transformatoare în manta: înfășurările sunt plasate pe o singură coloană, restul miezului magnetic reprezentând juguri;
- Transformatoare cu coloane: înfășurările primare și secundare sunt plasate pe coloane diferite.
- Transformatoare toroidale: miezul este un inel continuu pe care sunt plasate (pe zone distincte sau suprapuse) cele două înfășurări.

Înfășurare primara Înfășurare secundara

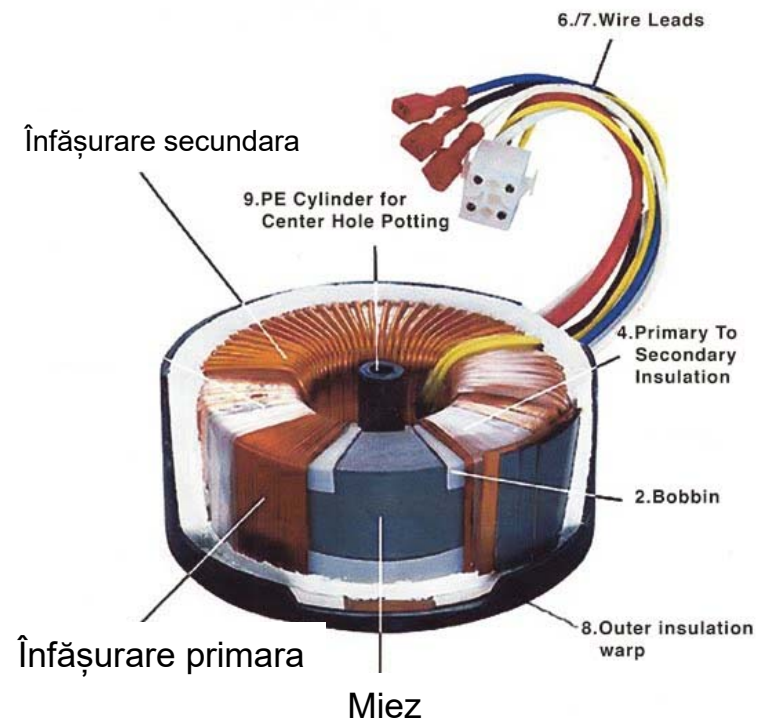


Transformator cu coloane

Înfășurări primara si secundara

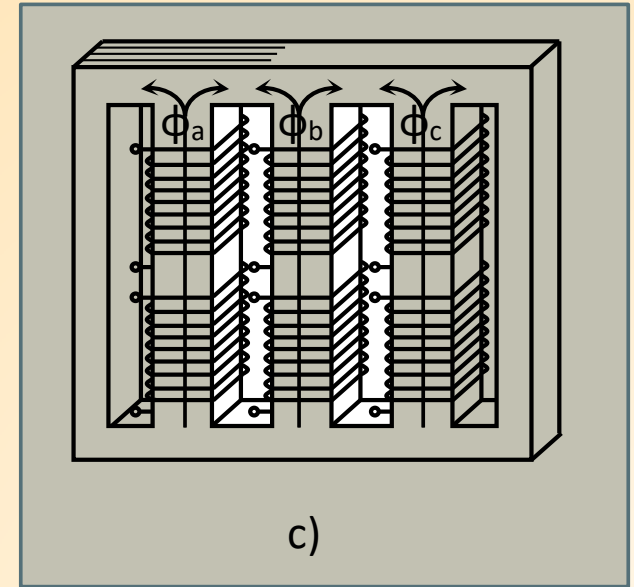
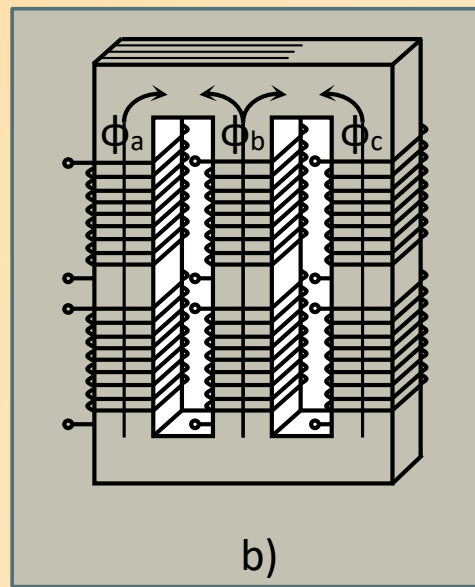
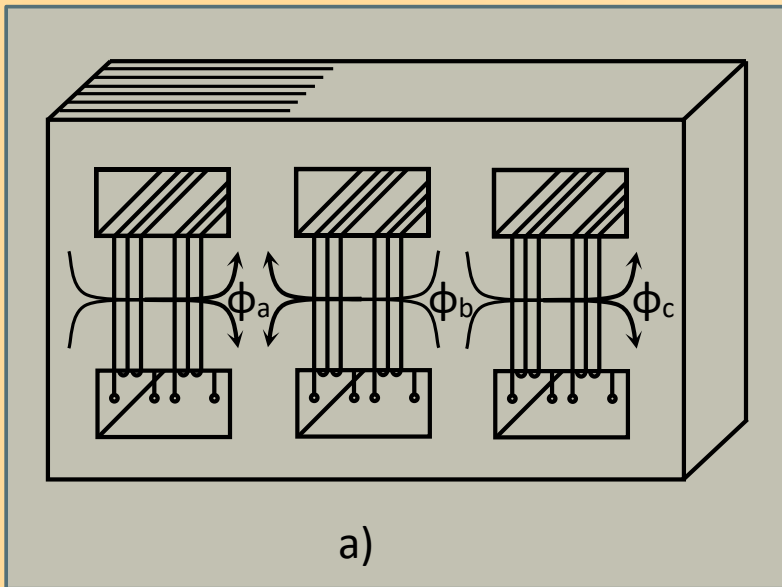


Transformator in manta



Și în cazul transformatoarelor trifazate există variantele constructive în manta (a) și cu coloane (b, c).

La variantele în manta (a) și cu cinci coloane (c), fluxurile se închid simetric prin circuitul magnetic. La varianta cu trei coloane (b), fluxurile se închid „forțat” prin cele trei coloane, existând o încărcare neuniformă a circuitului magnetic.



Variante de miezuri pentru transformatoare trifazate

a) în manta, b) cu trei coloane (compact, asimetric), c) cu cinci coloane

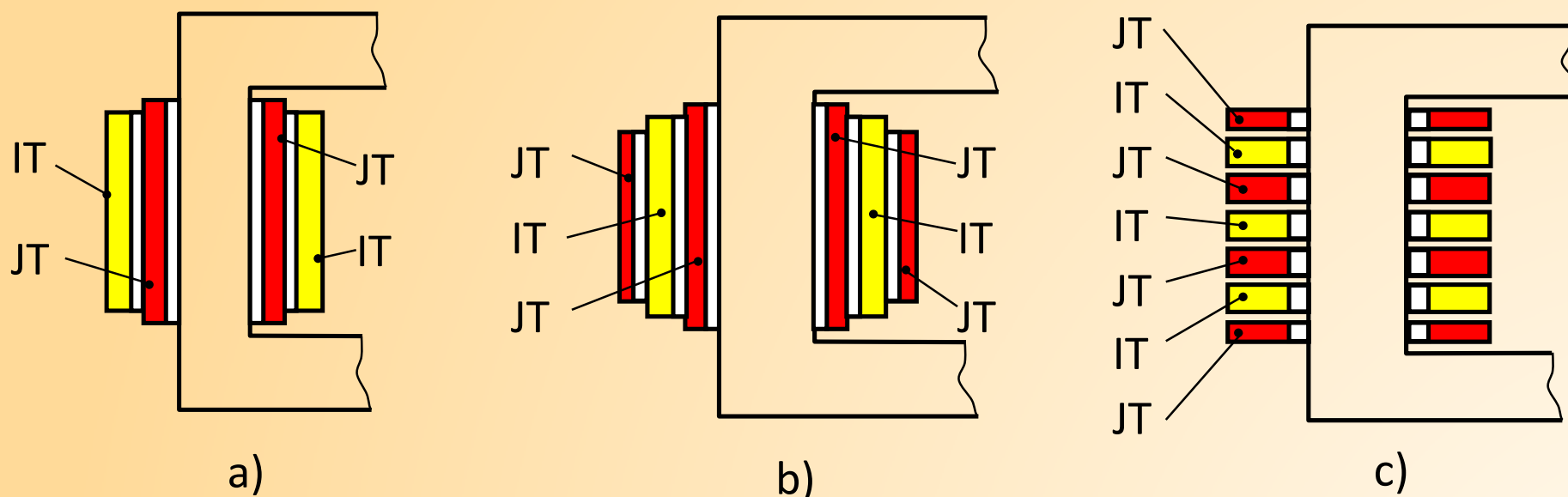
II. Înfășurări

Reprezintă circuitul electric al transformatorului, respectiv sistemul care primește energie în curent alternativ cu anumiți parametri de la o sursă și o cedează cu parametri schimbați (tensiune și curent) către un receptor.

Înfășurarea conectată la sursă se numește *înfășurare primară* iar cea conectată la receptor, *înfășurare secundară*.

În funcție de valoarea tensiunii la bornele fiecărei înfășurări, acestea se clasifică în înfășurări de înaltă tensiune (IT) și înfășurări de joasă tensiune (JT).

Atenție: nu întotdeauna primarul este înfășurarea de înaltă tensiune.



Variante de înfășurări la transformatoare

- a) înfășurări cilindrice concentrice, b) înfășurări cilindrice biconcentrice,
c) înfășurări alternate (cu galeți alternați)

Înfășurările sunt realizate pe un șablon sub forma unor bobine (rotunde sau dreptunghiulare) – sunt așa numitele înfășurări de tip concentrat – și se montează ulterior pe coloanele miezului magnetic. Ele se realizează din conductoare de cupru (cel mai adesea) sau aluminiu (adică materiale cu rezistivitate electrică mică). Conductoarele au la suprafața lor un strat izolator (cel mai adesea email dar poate fi strat izolator pe bază de sticlă sau rășini rezistente la temperatură).

Bobinele se obțin prin depănarea conductoarelor pe unul sau mai multe straturi suprapuse dar izolate între ele cu carton special.

Conductoarele au profil rotund (a) sau dreptunghiular (b) – pe măsura creșterii curentului din înfășurare se trece de la profilul rotund la cel dreptunghiular.



a)



b)

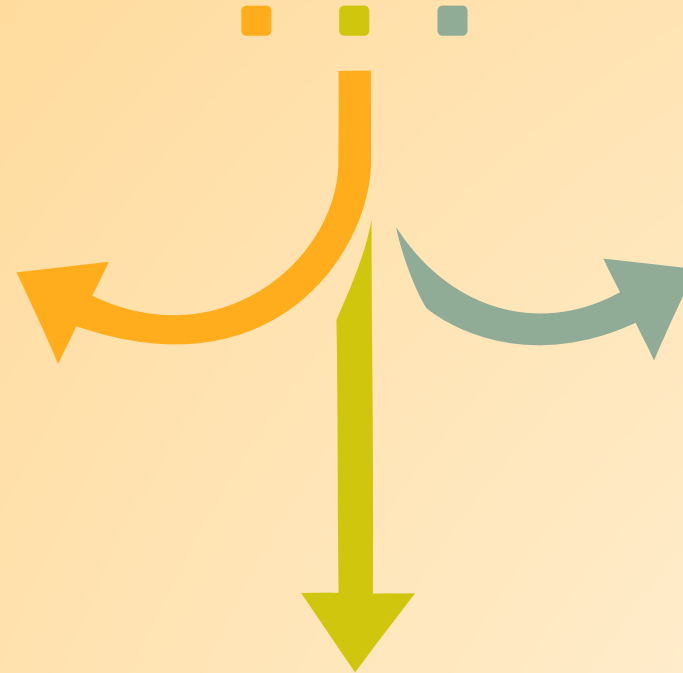
Exista situații în care, în locul conductoarelor este folosită o bandă (folie) conductoare din cupru sau aluminiu. Lățimea benzii corespunde cu înălțimea bobinei. Între straturi se pune carton izolant.



ELEMENTE AUXILIARE

Schela

Accesorii



Constructia metalica

a) Schela

Reprezintă ansamblul construcției ce realizează strângerea jugurilor miezului magnetic, consolidarea înfășurărilor sau ridicarea părții decuvabile. Este formată din profiluri din oțel, tiranți, inele de presare, etc.



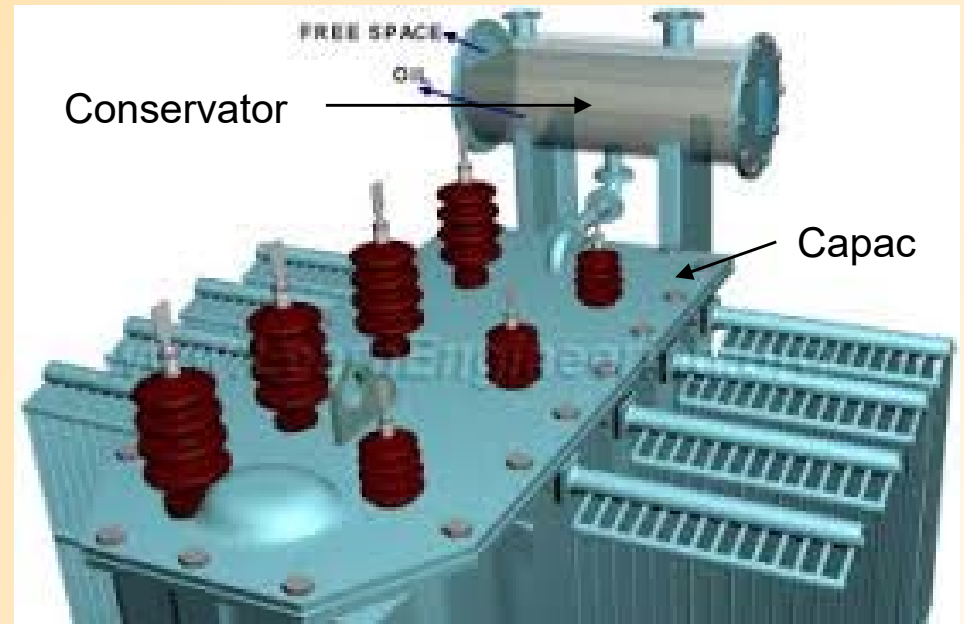
b) Construcția metalică

Apare numai la transformatoarele în ulei și conține trei elemente: cuvă, capac și conservator.

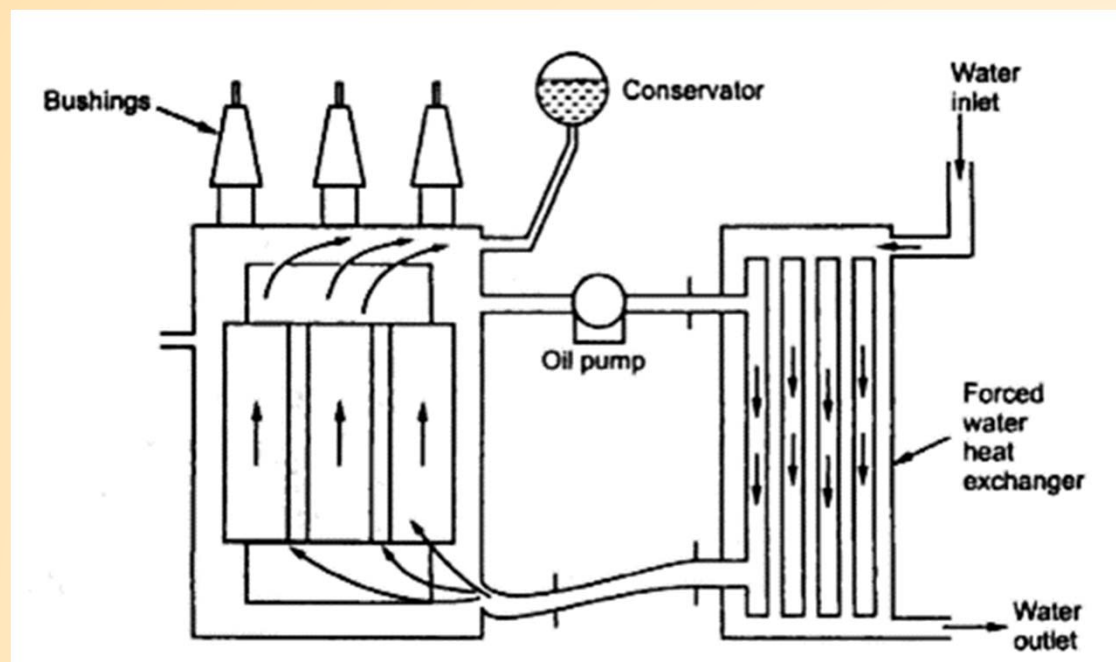
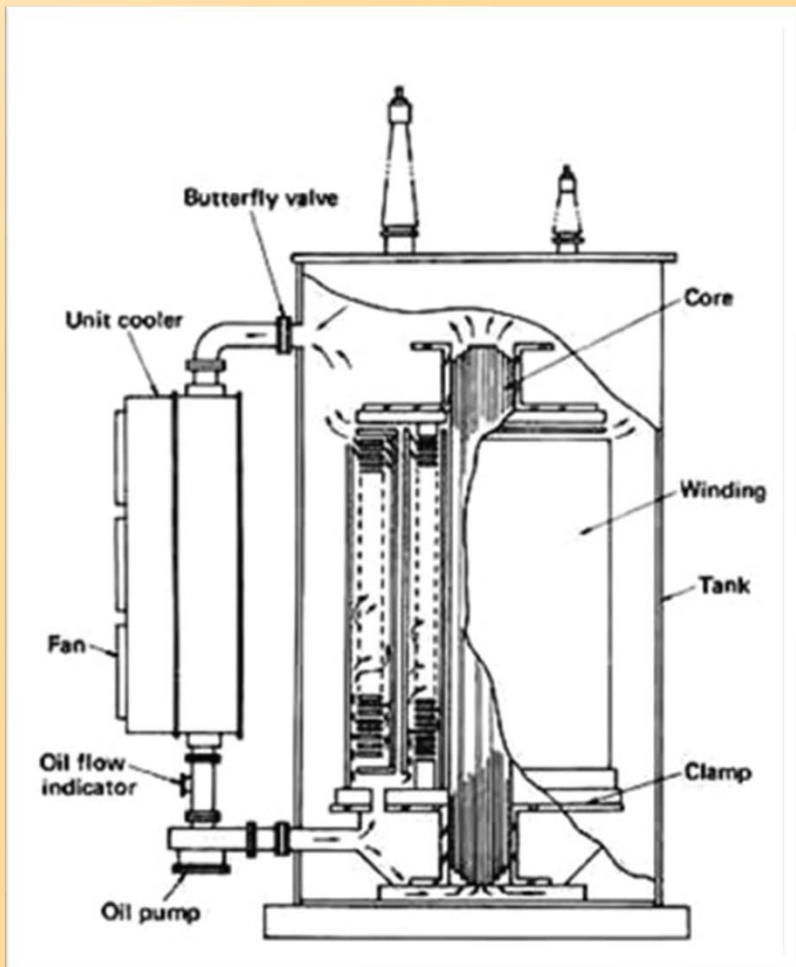
Cuva este un recipient din oțel care se umple cu ulei de transformator și în care este scufundat miezul și înfășurările. Acest recipient este închis ermetic cu ajutorul *capacului*.

În funcție de puterea transformatorului, cuva poate avea pe exterior radiatoare sau țevi sudate prin care să circule un agent de răcire (apa, aer).

Conservatorul - este un vas de expansiune a uleiului din cuvă, atunci când acesta se încălzește. Asigură, de asemenea, o suprafață de contact diminuată a uleiului cu aerul.



Răcire cu aer a uleiului din cuvă



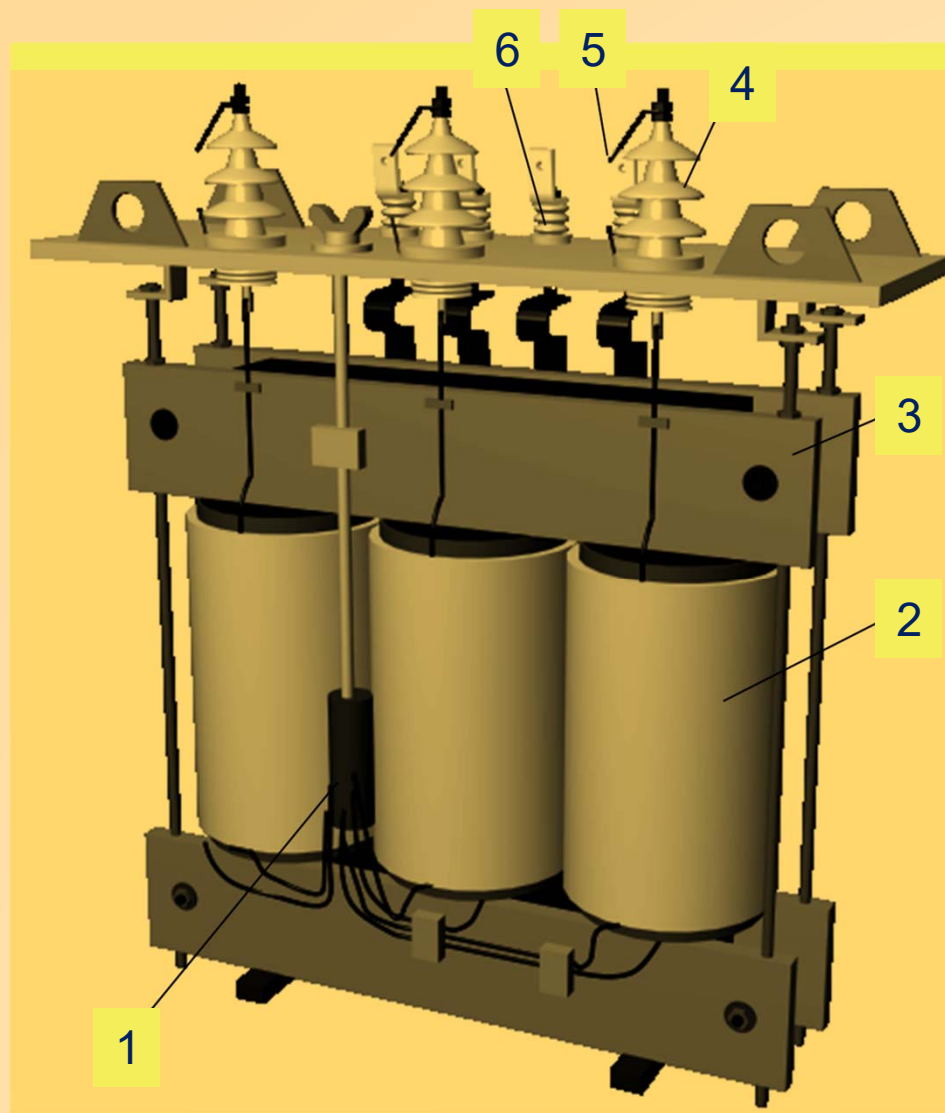
Răcire cu apă a uleiului din cuvă



Transformatoare de putere (1000 kVA) cu ulei si răcire naturala prin țevi

c) Accesorii

- Izolatoare de trecere: servesc la trecerea conductoarelor prin capacul cuvei. Sunt realizate dintr-o parte izolanta (de obicei porțelan) și o parte conductoare;
- Releul de gaze (Bucholtz): este un element de protecție ce sesizează apariția gazelor produse prin descompunerea uleiului din cuva în urma apariției unor defecte. În cazul unei cantități crescânde de gaze, releul poate comanda deconectarea transformatorului atât pe partea de IT cât și pe JT;
- Supapa de siguranță: Asigură evacuarea în cazul unei degajări bruște de gaze sau când crește presiunea în cuva transformatorului;
- Filtrul de aer: izolează uleiul de influența atmosferei exterioare (umiditate, impurități). Se montează pe conducta dintre conservator și mediu și conține o substanță higroscopică;
- Comutator de reglare a tensiunii: este opțional și este utilizat când există ploturi de modificare a tensiunii;
- Indicator de temperatură: pentru măsurarea și afișarea temperaturii uleiului.



Elementele constructive ale părții decuvabile la un transf. de 1000 [kVA], 10[kV]/0,4[kV]
1- Comutator de ploturi, 2- Înfășurare de IT, 3- Schelăria jugului, 4- Izolator de trecere de IT, 5- Eclator (descărcător de supratensiuni), 6- Izolator de trecere de JT

Notarea bornelor

Înfășurări de înaltă tensiune:

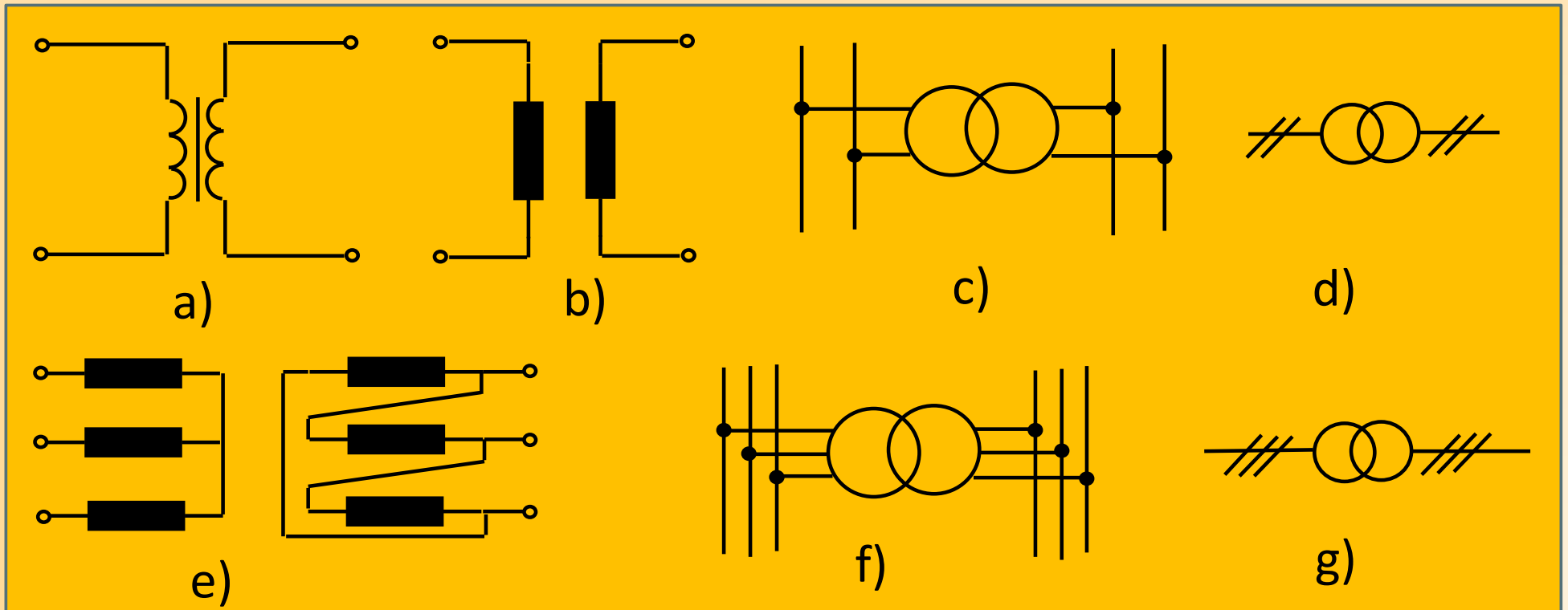
Începuturile: A, B, C

Sfârșiturile: X, Y, Z

Înfășurări de joasă tensiune:

Începuturile: a, b, c

Sfârșiturile: x, y, z

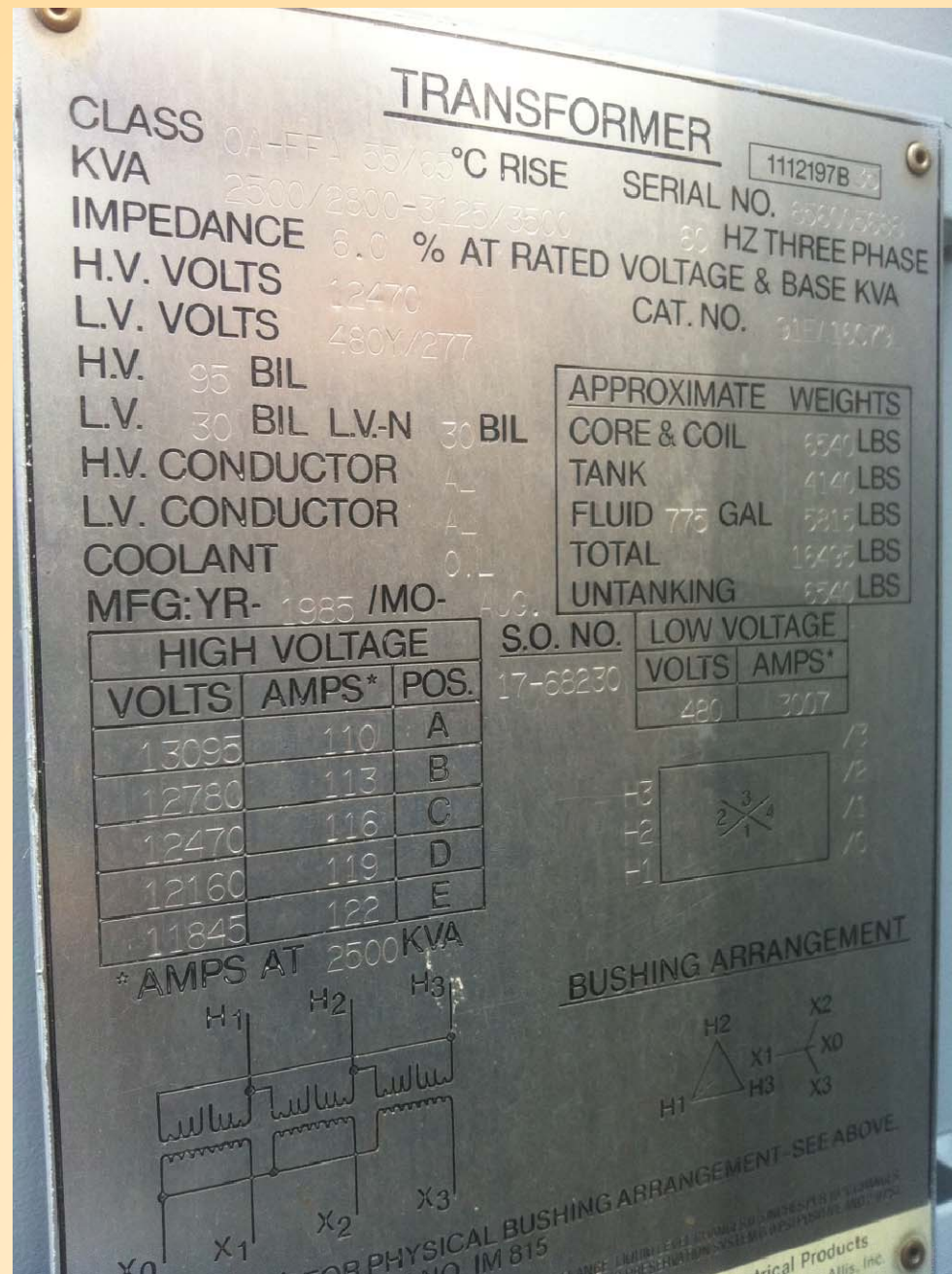
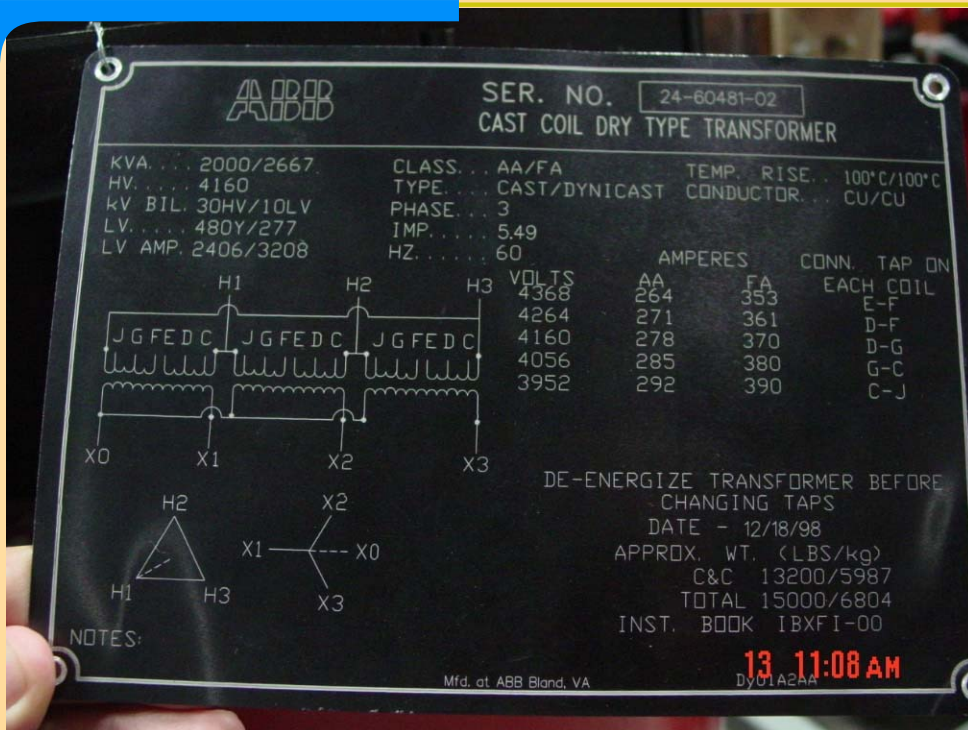


a...d) – transformator monofazat; e...g) transformator trifazat

Mărimi nominale

Caracterizează regimul de funcționare cu sarcina maximă care nu duce la depășirea temperaturii admisibile pentru perioada de funcționare stabilită.

1. **Puterea nominală, S_N [VA; kVA]** – puterea aparentă la bornele circuitului secundar
2. **Tensiunile nominale, U_{1N} , U_{2N} [V; kV]** – tensiunile de linie din circuitele primar și secundar
3. **Curenții nominali, I_{1N} , I_{2N} [A; kA]** – curenții de linie din circuitele primar și secundar
4. **Raportul de transformare**
5. **Frecvența nominală**
6. **Tensiunea nominală de scurtcircuit, u_{sc} [V; %]** – tensiunea aplicată circuitului primar pentru a fi parcurs de curentul nominal atunci când secundarul este în scurtcircuit
7. **Schema sau grupa de conexiuni**



<http://www.electricaltechnology.org/>
 S.No. Description of Data to be given Ra-marks for example

[1]	[2]	[3]
1.	Manufacturer's Name:	ABB/206788
2.	Manufacturer's Serial Number	224106
3.	Kind of Transformer	Power Transformer
4.	236839 Relevent Standard Year	I.S/P.S/B.S/IEC /DIS/JIS NEMA
5.	Year of Manufacture	2013
6.	Number of Phase	3
7.	Rated Power	1000kVA = 1MVA
8.	Rated Frequency:	50Hz
9.	Rated Voltages:	HV 33 kV, LV 11 kV,
10.	Rated Currents	HV _____, LV _____.
11.	Vector Group Symbol	_____
12.	% Impedance Voltage (At Raed Current)	_____
13.	% Reactance Voltage in %:	_____
14.	Types of Cooling	ONAM
15.	.Total Weight	_____ Kg
	..Mass or insulating Oil	_____ Kg
	..Transportation Weight	_____ Kg
	..Untanking Weight	_____ Kg
16.	Insulating liquid (If Not Oil) Types:	_____
17.	Quantity of Oil (Liters):	_____
18.	Details about Tap-Changer	_____
19.	Rated insulation Level:	_____
	..Power-Frequency withstand Voltage	_____ kV(rms)
20.	Other	_____

Transformatoare speciale

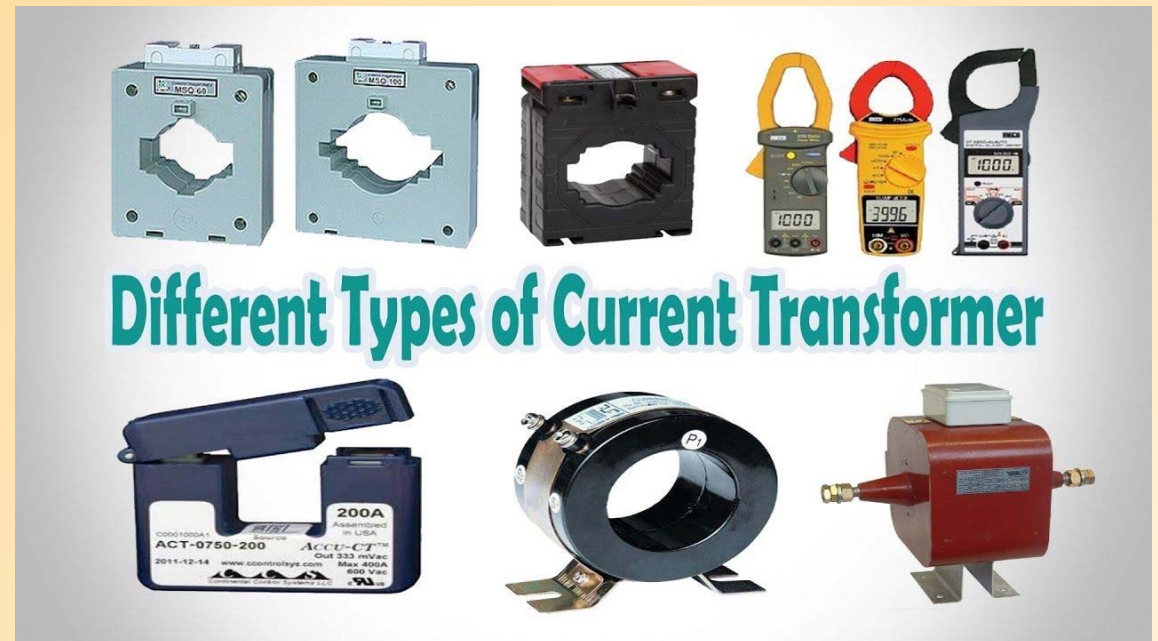
Clasificare

a. Transformatoare de măsură

Transformatoare
de curent

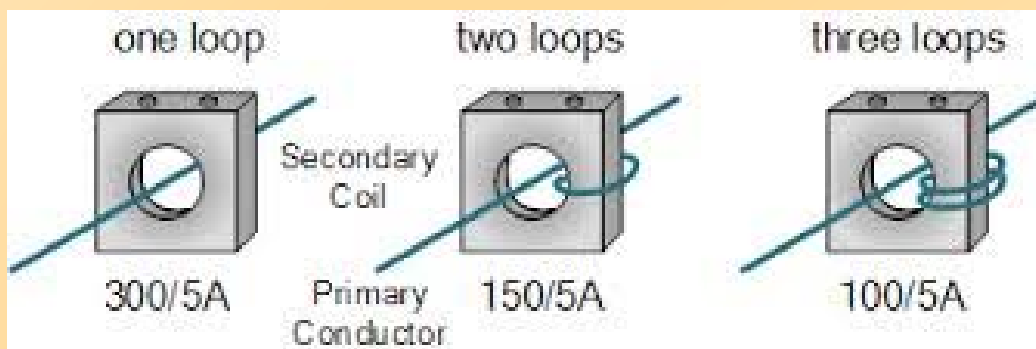
Transformatoare
de tensiune

Transformatoare de curent



Sunt transformatoare folosite la măsurarea curenților electrici de valoare mare cu aparate obișnuite de măsură (aparate la care scara de măsură este pentru 5A).

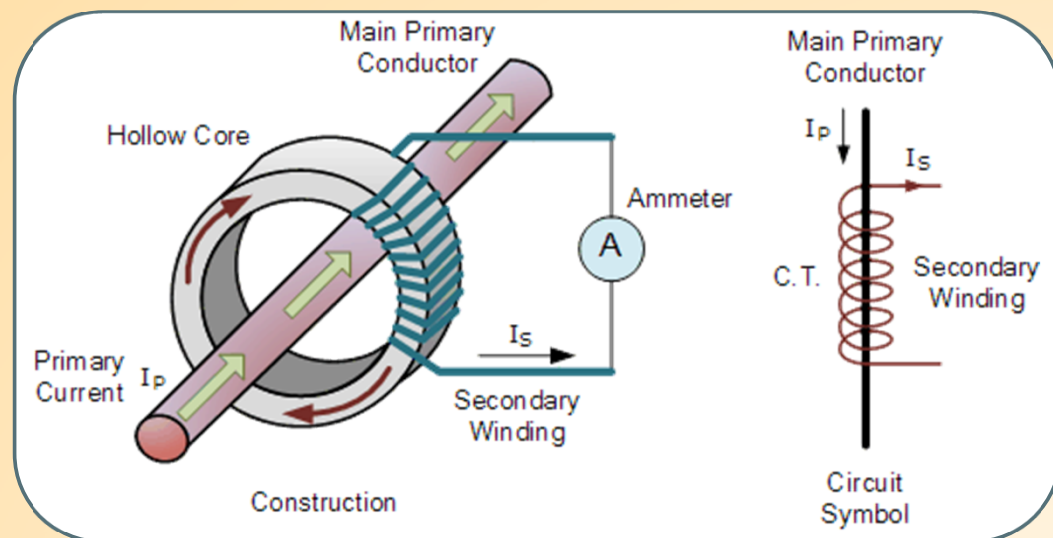
Transformatoare de curent



Regimul normal de funcționare a transformatorului de curent este cel de scurtcircuit.



NU este permisă funcționarea la gol a transformatorului de curent.

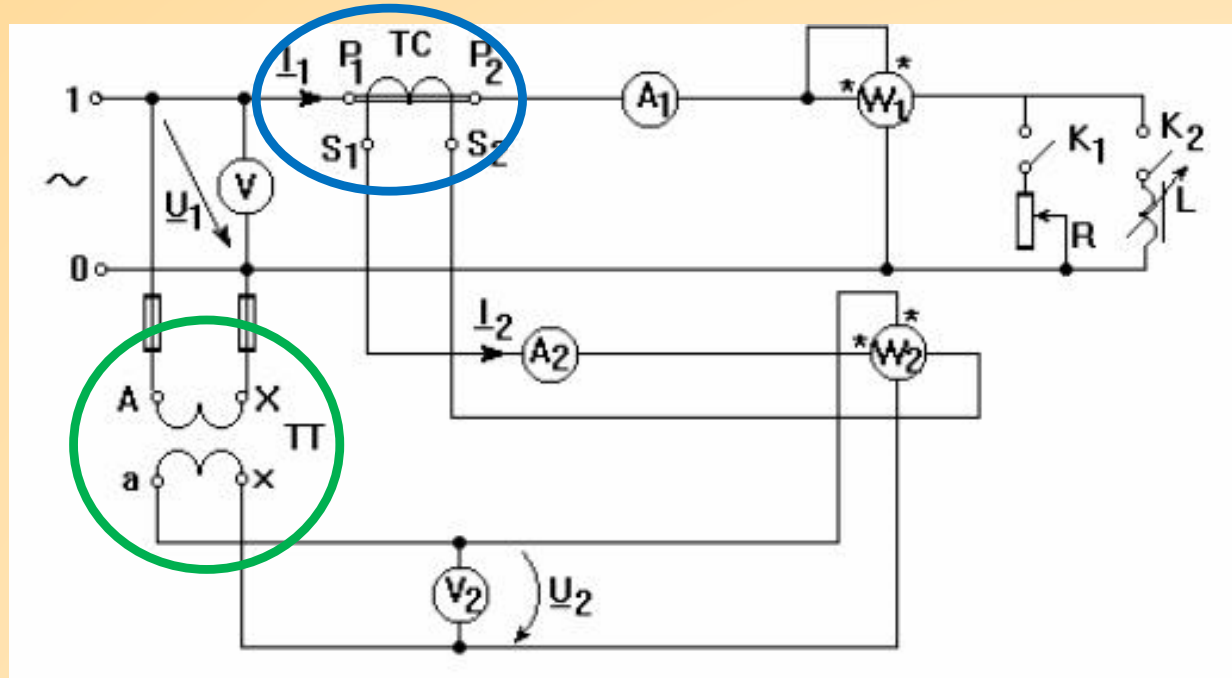


De regulă, conductorul prin care trece curentul ce urmează a fi măsurat reprezintă înfășurarea primară și este trecut prin interiorul miezului magnetic.

Înfășurarea secundară, care este bobinată pe miezul magnetic al transformatorului, furnizează un curent de maxim 5 A (valoare standardizată) ce este măsurat de ampermetru.

Se utilizează, de asemenea, la bobinele de curent ale wattmetrelor.

Transformatoare de tensiune



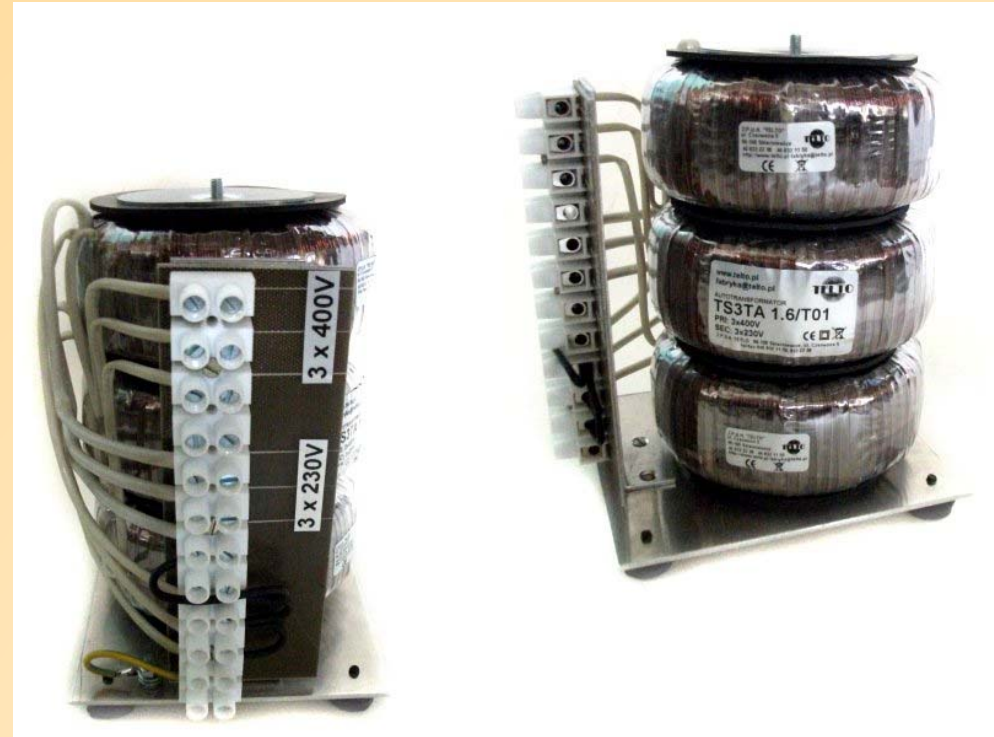
Sunt transformatoare folosite la măsurarea tensiunilor electrice de valoare mare cu aparate obișnuite de măsură, sau adaptarea tensiunii la bobinele de tensiune ale wattmetrelor.

Sunt transformatoare de mică putere folosite doar în circuitele de măsură. Tensiunea în secundar este standardizată la 100 V.



Regimul normal de funcționare a transformatorului de curent este cel de funcționare in gol.

b. Autotransformatoare



Sunt transformatoare la care secundarul reprezintă o parte din circuitul primar.

Autotransformatoarele de mică putere pot furniza o tensiune variabilă și sunt utilizate cu precădere în laboratoarele de încercări. Cel mai adesea sunt monofazate. Variația tensiunii secundare se obține prin deplasarea unui contact mobil ce determină modificarea numărului de conductoare active din înfășurarea secundară.



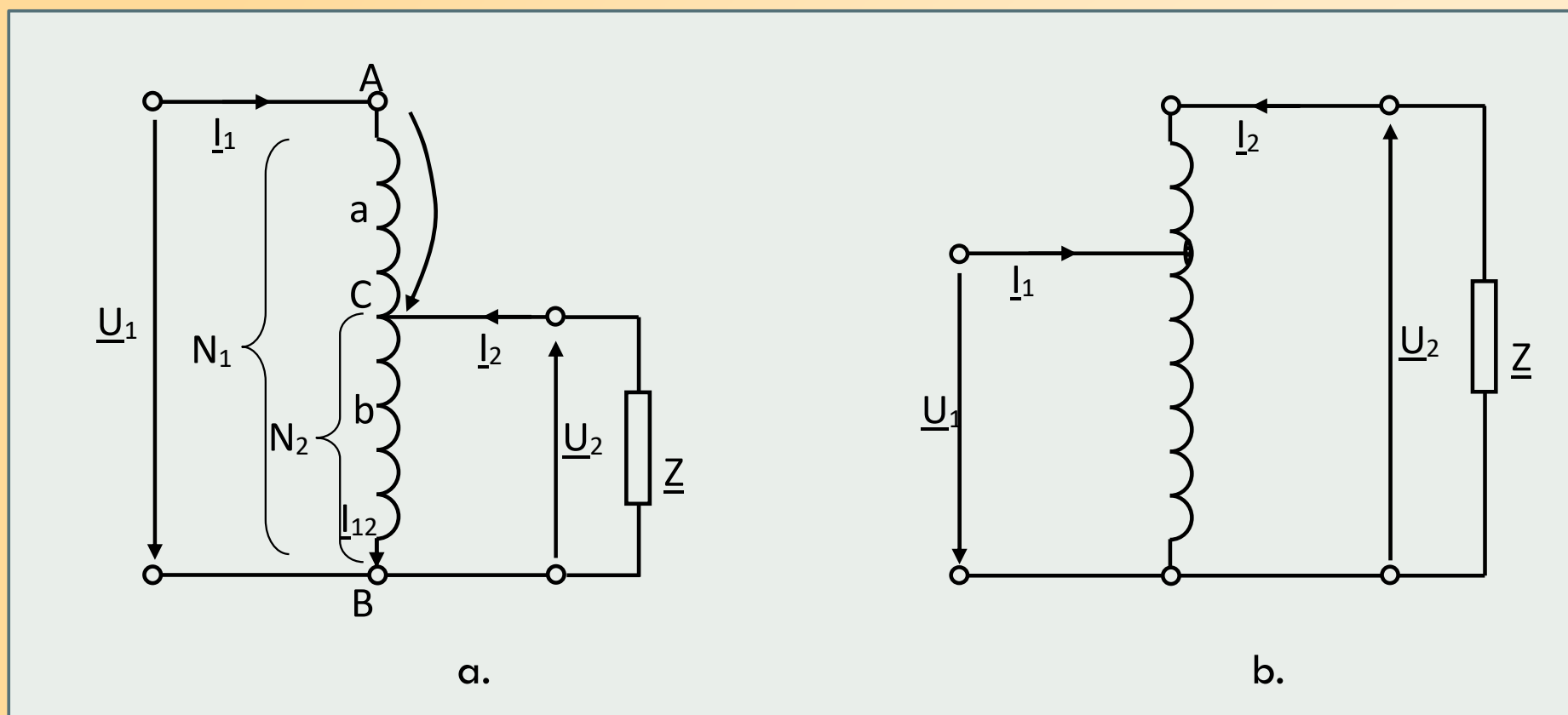
Autotransformatoarele de mare putere sunt utilizate pentru interconectarea unor rețele de transport al energiei electrice având tensiuni diferite.

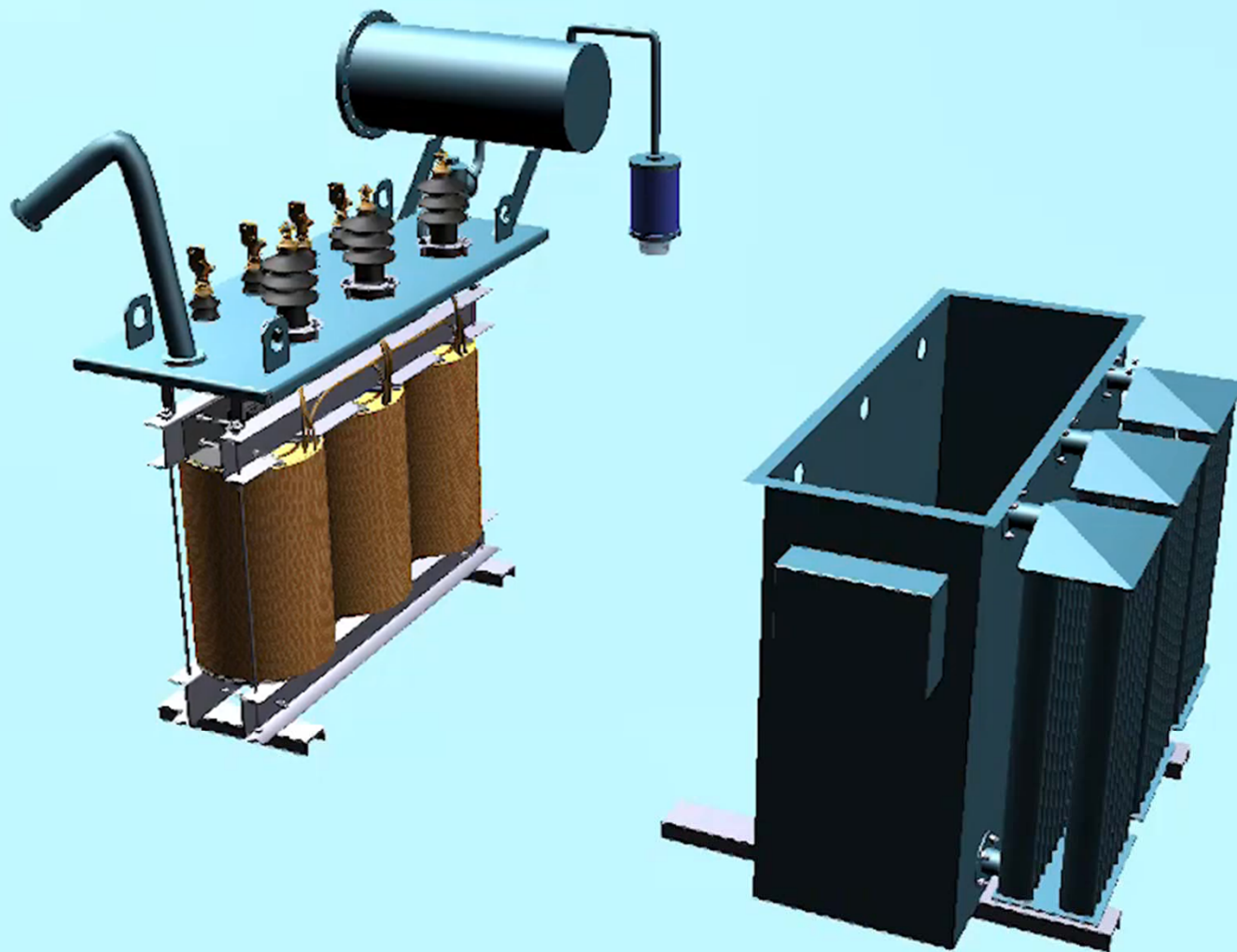
La aceste autotransformatoare nu se face reglajul tensiunii secundare.

Autotransformatorul este un transformator electric a cărui înfășurare de JT reprezintă o parte a înfășurării de ÎT. Prin urmare, autotransformatorul are o singură înfășurare plasată pe un miez magnetic identic cu cel al unui transformator.

În funcție de valoarea tensiunilor din primar și secundar, ATR poate fi coborâtor de tensiune (fig. a) sau ridicător de tensiune (fig. b).

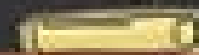
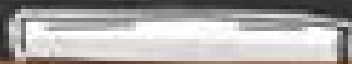
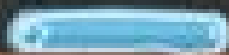
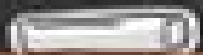
Raportul de transformare poate fi constant (este cazul ATR de mare putere utilizate pentru interconectarea unor rețele diferite de transport al energiei electrice) sau variabil (la ATR de putere mică folosite cu precădere în laboratoare de încercarea mașinilor electrice).



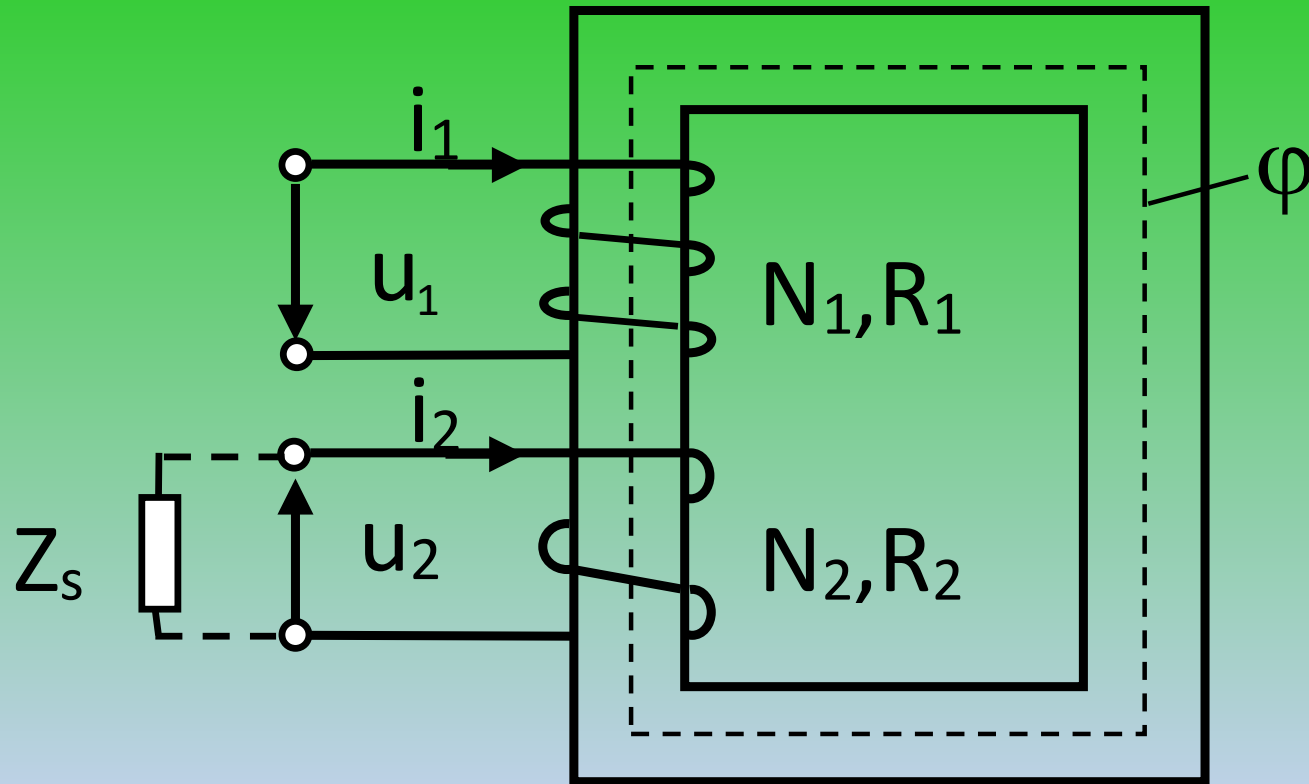


Film demonstrativ – construcția transformatorului electric

Principiul și ecuațiile de funcționare ale transformatorului electric



Principiul de funcționare a transformatorului ideal



Se consideră un miez feromagnetic pe care sunt plasate două înfășurări corespunzătoare unui transformator monofazat:

- o înfășurare primară, caracterizată de numărul de spire N_1 și rezistența R_1 , care este conectată la o sursă de alimentare alternativă de tensiune u_1 . Înfășurarea primară este parcursă de curentul i_1 .

- o înfășurare secundară, caracterizată de numărul de spire N_2 și rezistența R_2 . La bornele înfășurării secundare poate fi conectată o sarcină reprezentată de impedanța Z_s .

1. Prin alimentarea înfășurării primare de la sursa de tensiune ALTERNATIVĂ, se va stabili un curent alternativ i_1 care creează un câmp magnetic variabil. Liniile de câmp, în marea lor majoritate, se vor închide prin circuitul miezului magnetic alcătuind *fluxul util* al transformatorului. Prin traseul de închidere, acest flux înlănțuie atât înfășurarea secundară cât și înfășurarea primară.

Se definește fluxul fascicular φ ca fiind fluxul magnetic ce înlănțuie o singură spirală. Expresia lui este:

$$\varphi = \Phi_m \sin \omega t \quad \text{unde} \quad \Phi_m = B_c \cdot S_c \quad \text{iar: } B_c - \text{inducția în miez,} \\ S_c - \text{secțiunea miezului}$$

2. Conform legii inducției electromagnetice (flux variabil în proximitatea unei înfășurări imobile), în ambele înfășurări se vor induce tensiuni a căror expresie este:

$$e_1 = -N_1 \frac{d\varphi}{dt} = -N_1 \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} = -N_1 \cdot \omega \cdot \Phi_m \cos \omega t = N_1 \cdot \omega \cdot \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\varphi}{dt} = N_2 \cdot \omega \cdot \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

Valorile maxime sunt:

$$E_{1max} = N_1 \cdot \omega \cdot \Phi_m$$

$$E_{2max} = N_2 \cdot \omega \cdot \Phi_m$$

iar valorile efective:

$$E_1 = \frac{E_{1max}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_m = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_m$$

$$E_2 = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_m$$

3. Dacă, în aceste condiții, se conectează o sarcină la bornele înfășurării secundare, atunci se stabilește un curent i_2 , respectiv apare un al doilea flux („flux de reacție”). Cele două fluxuri create de curenții i_1 și i_2 se compun și dau naștere fluxului rezultat.

Acest lucru poate fi exprimat prin intermediul solenațiilor:

$$\theta_m = \theta_1 + \theta_2 = N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2 = N_1 \cdot i_0$$

Egalitatea solenațiilor pune în evidență faptul că fluxul magnetic rămâne constant indiferent dacă transformatorul funcționează în sarcină (adică există fluxurile create de ambele înfășurări) sau la gol (când există doar fluxul creat de înfășurarea primară). Acest lucru este posibil întrucât, la funcționarea în sarcină, fluxurile create de cele două înfășurări au un caracter *antagonist*.

Ecuatiile celor două circuite, primar și secundar, folosind teorema a II-a a lui Kirchhoff), sunt:

$$\begin{cases} R_1 i_1 - u_1 = e_1 \\ R_2 i_2 + u_2 = e_2 \end{cases}$$

La funcționarea în gol ($i_2=0$), curentul i_1 are o valoare mică astfel încât putem neglija termenul $R_1 \cdot i_1$ și rezultă:

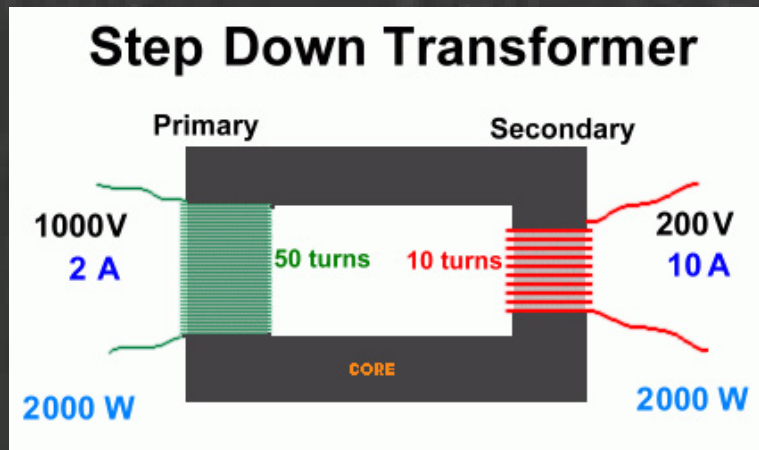
$$\begin{cases} u_1 = -e_1 \\ u_{20} = e_2 \end{cases}$$

Se definește *raportul de transformare* al transformatorului cu expresiile:

$$K = \frac{U_{1N}}{U_{20}} \cong \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

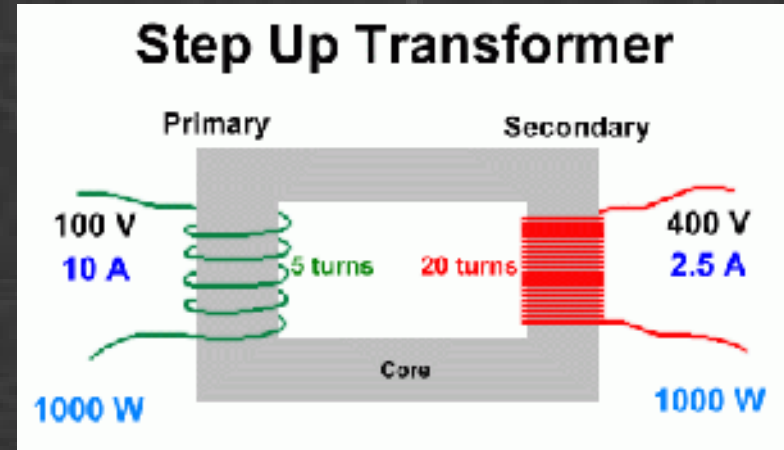
$$K > 1$$

Transformator coborâtor de tensiune



$$K < 1$$

Transformator ridicător de tensiune

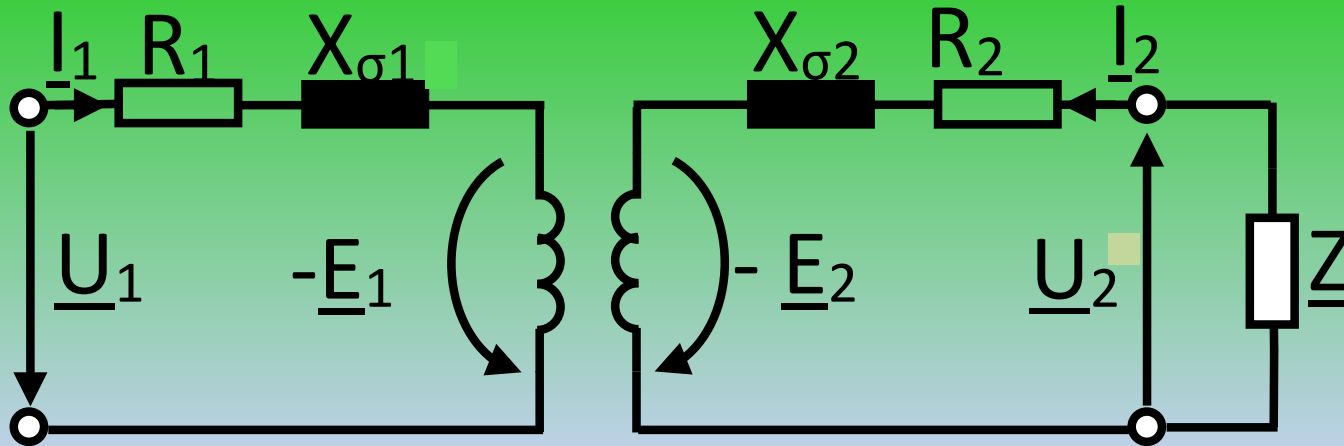


La funcționarea în sarcină se adaugă și ecuația circuitului de sarcină astfel încât, scris în complex simplificat, sistemul de ecuații ce caracterizează funcționarea transformatorului *ideal* este:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ -\underline{U}_2 = R_2 \underline{I}_2 + jX_{\sigma 2} \cdot \underline{I}_2 - \underline{E}_2 \\ \underline{U}_2 = R \underline{I}_2 + jX \cdot \underline{I}_2 \\ N_1 \cdot \underline{I}_1 + N_2 \cdot \underline{I}_2 = N_1 \cdot \underline{I}_0 \end{cases}$$

Cea de-a patra ecuație reprezintă egalitatea solenațiilor:

Schema electrică echivalentă descrisă de sistemul de ecuații este:



Se remarcă existența a două circuite electrice separate (cu indicele 1 pentru circuitul primar și cu indicele 2 pentru circuitul secundar) dar cuplate mutual magnetic.

Ecuatiile transformatorului când sunt luate in considerare pierderile in fier (*transformatorul real*)

Studiul funcționării transformatorului *ideal* NU ia în considerație pierderile în miezul feromagnetic.

$$p_{Fe} = p_H + p_F$$

Acestea se manifestă printre altele, prin încălzirea transformatorului. Fenomenul este similar celui care se petrece atunci când un material conductor este parcurs de curent electric și când, datorită pierderilor Joule, are loc încălzirea conductorului.

Pentru a modela fenomenul de încălzire datorat pierderilor în miezul magnetic, se poate accepta existența unei „rezistențe” parcursă de o componentă activă a curentului de magnetizare (curentul ce parcurge înfășurarea de pe latura verticală din schema echivalentă a transformatorului raportat)

Prin urmare, în circuitul electric apar două elemente conectate în paralel:

- Inductanța L_m (sau reactanța X_m) care este parcursă de curentul I_{0r} ce reprezintă curentul ce magnetizează circuitul magnetic al transformatorului (este o componentă reactivă);
- Rezistența R_m ce este parcursă de curentul I_{0a} și este responsabilă de pierderile în miezul magnetic

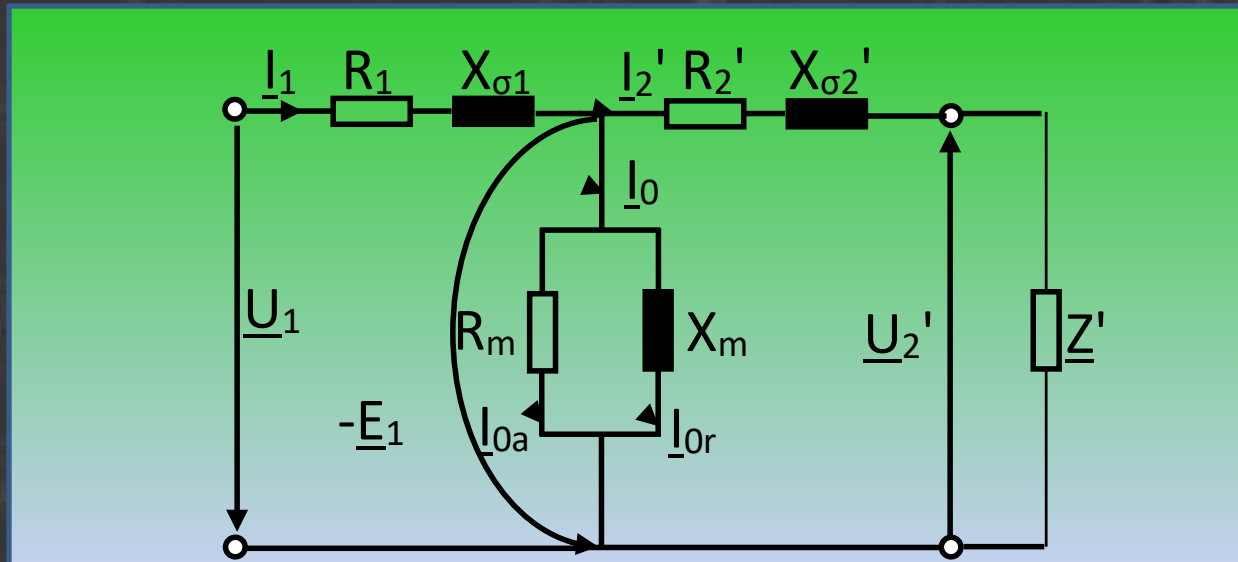
Expresia curentului I_0 , scrisă în marimi raportate și în complex simplificat, devine:

$$\underline{I_0} = \underline{I_{0r}} + \underline{I_{0a}} = \underline{I_1} + \underline{I'_2}$$

Sistemul de ecuații ce caracterizează funcționarea în sarcină a transformatorului *real* se poate scrie astfel:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ -\underline{U}'_2 = R'_2 \cdot \underline{I}'_2 + jX'_{\sigma 2} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{E}_1 \\ \underline{U}'_2 = R' \cdot \underline{I}'_2 + jX' \cdot \underline{I}'_2 \\ \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_0 = \underline{I}_{0a} + \underline{I}_{0r} \end{cases}$$

iar schema electrică echivalentă descrisă de sistemul de ecuații este:



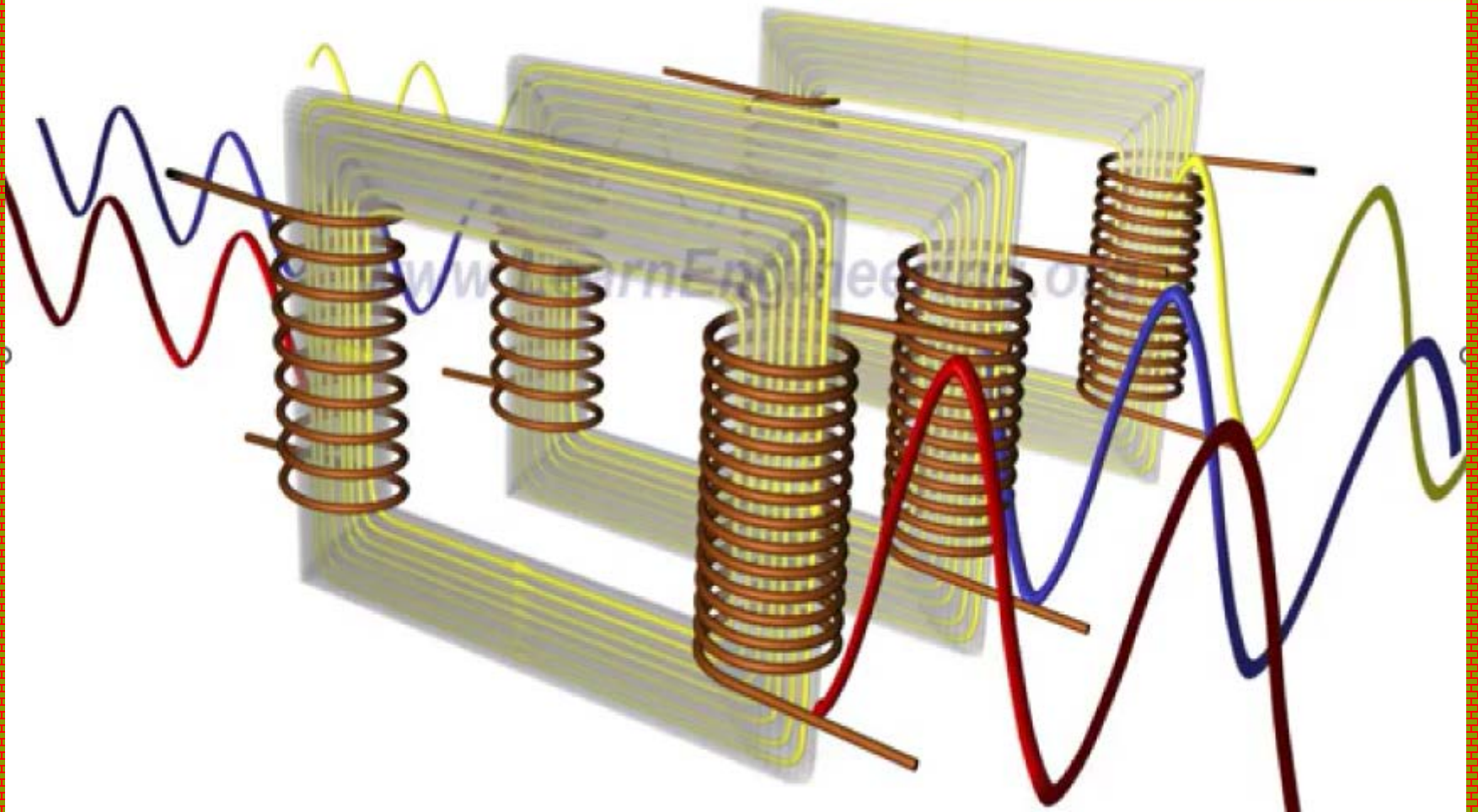
Pentru determinarea expresiei rezistenței R_m (denumită rezistență de magnetizare) se scrie expresia pierderile în fier:

$$p_{Fe} = R_m \cdot I_{0a}^2 = R_m \cdot \left(\frac{E_1}{R_m} \right)^2$$

de unde, rezistența de magnetizare este:

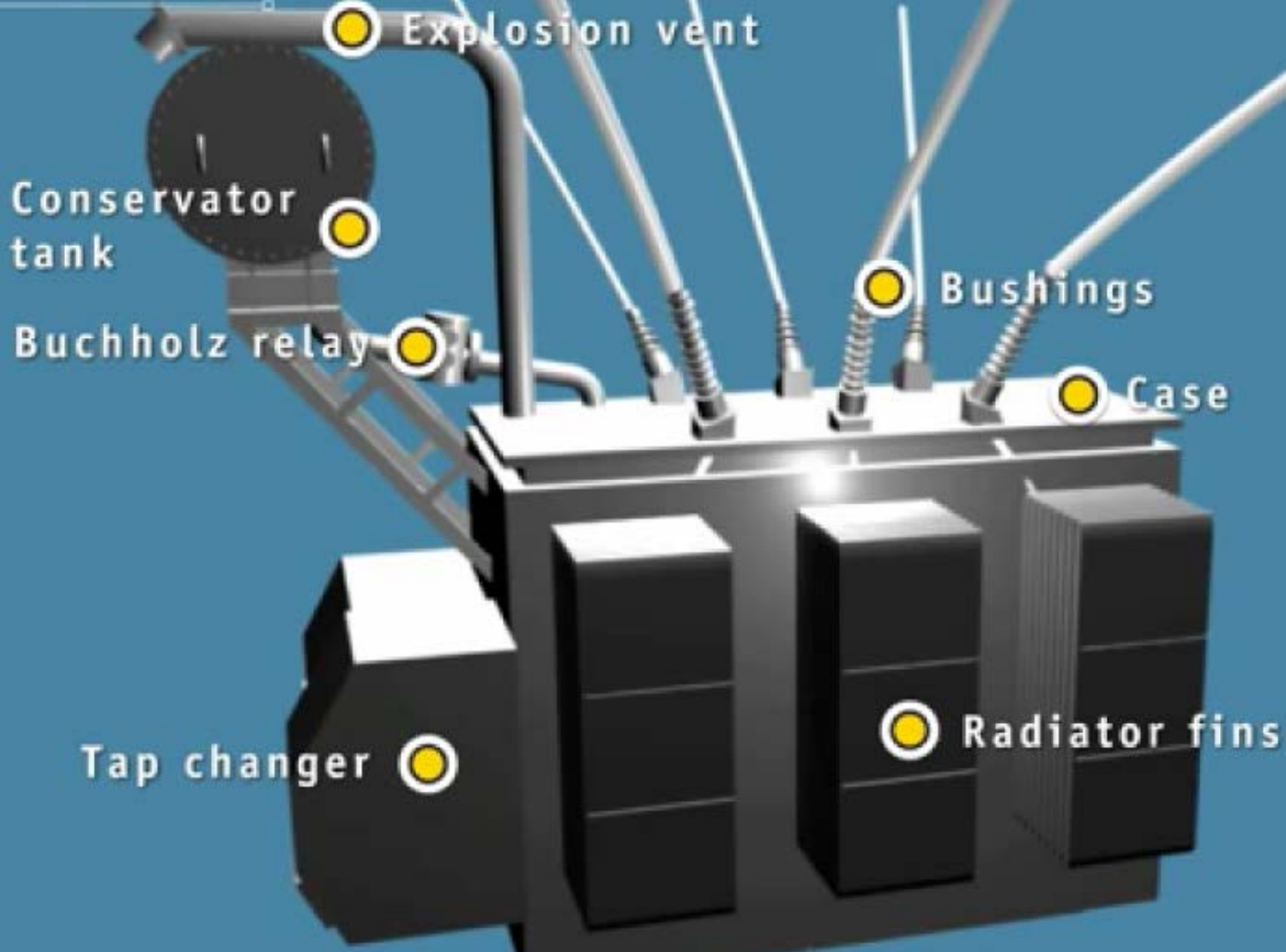
$$R_m = \frac{E_1^2}{p_{Fe}}$$

3 PHASE TRANSFORMER



EXTERNAL FEATURES

TRANSPOWER

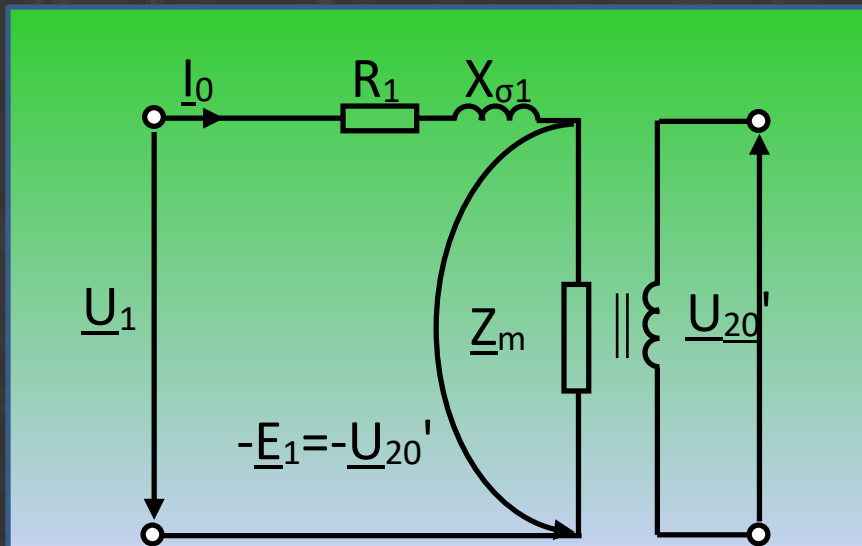


Funcționarea și încercarea la gol a transformatorului monofazat

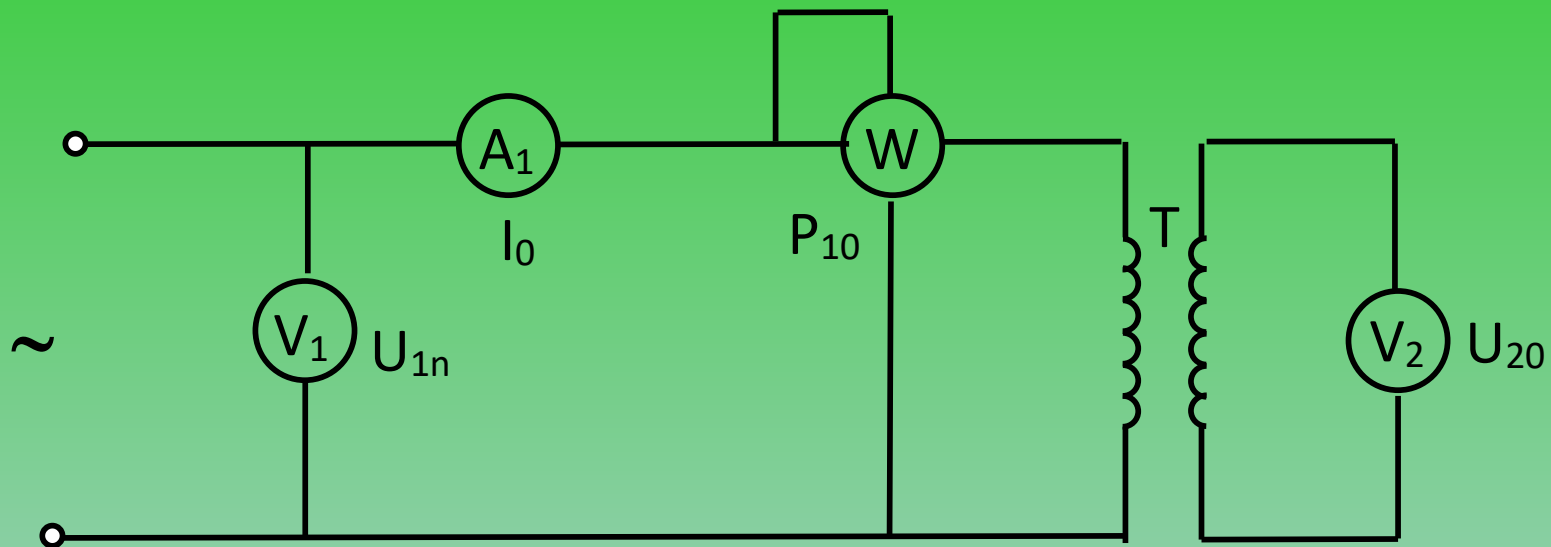
Regimul de funcționare la gol se realizează atunci când la bornele înfășurării secundare NU este conectată nici o sarcină. Altfel spus:

$$\underline{I}'_2 = 0 \quad \underline{I}_1 \text{ devine } \underline{I}_0 \quad \underline{U}'_2 \text{ devine } \underline{U}'_{20}$$

Schema echivalentă și sistemul de ecuații devin:



$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_0 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_0 - \underline{E}_1 \\ -\underline{U}'_{20} = -\underline{E}_1 \\ \underline{I}_1 = \underline{I}_0 = \underline{I}_{0a} + \underline{I}_{0r} \end{cases}$$



Montajul pentru încercarea la gol a transformatorului monofazat, ce conține aparatele de măsură indicate pe figură, se conectează la o sursă de tensiune având valoarea nominală corespunzătoare înfășurării primare.

Încercarea de mers la gol are drept scop determinarea următoarelor mărimi caracteristice transformatorului:

1. Determinarea raportului de transformare

$$K = \frac{U_{1N}}{U_{20}}$$

2. Determinarea pierderilor în fier

Puterea activă absorbită, ce este măsurată cu wattmetrul, este utilizată pentru acoperirea pierderilor pe rezistențele R_1 și R_m :

$$P_{10} = (R_1 + R_m) \cdot \underline{I_0^2}$$

întrucât: $R_1 \ll R_m$ rezultă că putere absorbită reprezintă pierderile pe rezistența R_m , adică pierderile în fier.

$$P_{10} = R_m \cdot I_0^2 = p_{Fe}$$



Încercarea la gol a transformatorului este modalitatea prin care pot fi determinate experimental *pierderile în fier*.

3. Determinarea impedanței, rezistenței și reactanței de magnetizare

$$Z_m = \frac{E_1}{I_0} = \frac{E'_2}{I_0} = \frac{U'_{20}}{I_0} = K \cdot \frac{U_{20}}{I_0}$$

$$R_m = \frac{P_{10}}{I_0^2} \quad X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}$$

4. Determinarea factorului de putere la mersul în gol

$$P_{10} = U_{10} \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0$$

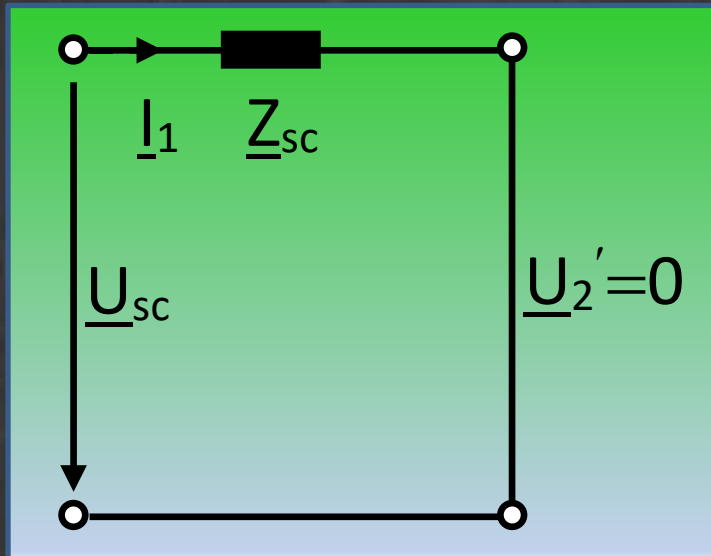
$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{10}}{U_{10} \cdot I_0}$$

Funcționarea și încercarea la scurtcircuit a transformatorului monofazat

Acest regim se realizează atunci când bornele înfășurării secundare sunt scurtcircuitate. Altfel spus, impedanța de sarcină și tensiune la borne sunt nule.

$$\underline{U}'_2 = 0 \quad \underline{Z}' = 0$$

Schema echivalentă și sistemul de ecuații devin:



$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ 0 = R'_2 \cdot \underline{I}'_2 + jX'_{\sigma 2} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{E}_1 \\ \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_0 \end{cases}$$

Întrucât curentul de mers în gol, I_0 , reprezintă până la 3% din curentul nominal, I_n , acesta se poate neglija iar ecuația a treia a sistemului devine:

$$\underline{I_1} = -\underline{I'_2}$$

Înlocuind în ecuația a doua și adunând apoi cu prima ecuație, se obține:

$$\underline{U_1} = (R_1 + R'_2)\underline{I_1} + j(X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2}) \cdot \underline{I_1}$$

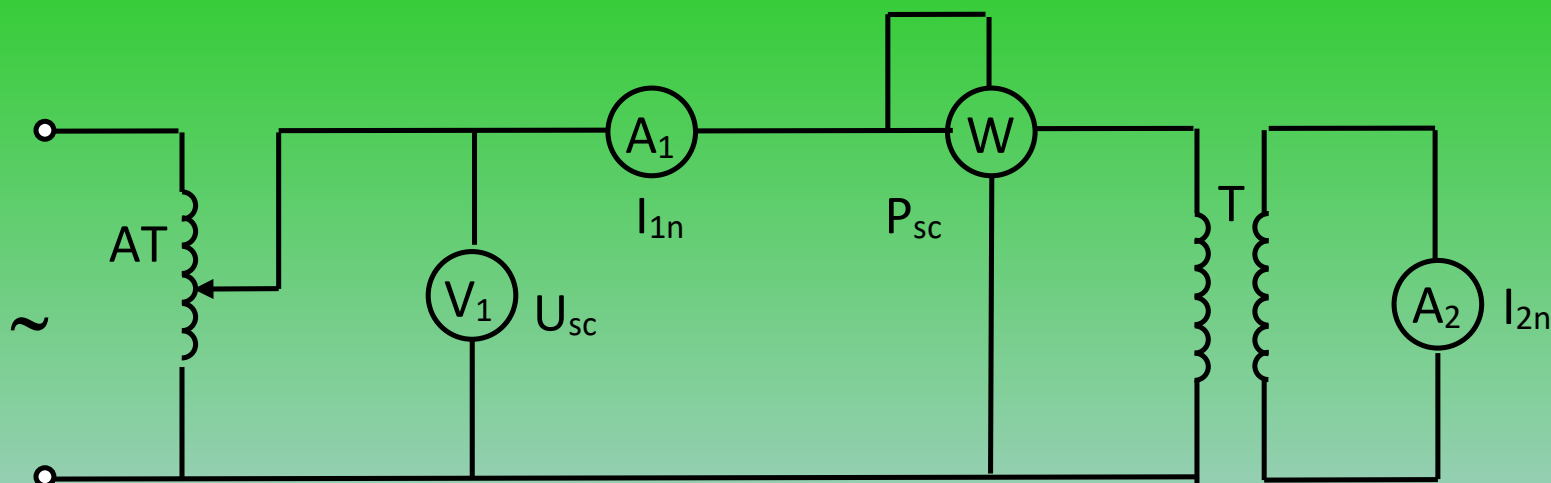
sau:

$$\underline{U_1} = R_{sc}\underline{I_1} + jX_{sc} \cdot \underline{I_1}$$

respectiv:

$$\underline{U_{sc}} = \underline{Z_{sc}} \cdot \underline{I_1}$$

Regimul de scurtcircuit este un regim de *avarie !!!*



Montaj pentru încercarea la scurtcircuit de proba a transformatorului monofazat

Se alimentează transformatorul cu *tensiune redusă* până se obțin curenții nominali prin cele două înfășurări.

Încercarea la scurtcircuit are drept scop determinarea următoarelor mărimi caracteristice transformatorului:

1. Determinarea pierderilor în înfășurări

$$P_{sc} = R_{sc} \cdot I_1^2 = R_1 \cdot I_1^2 + R'_2 \cdot I_1^2 = R_1 \cdot I_1^2 + R'_2 \cdot I_2'^2 = p_{j1} + p_{j2}$$

Puterea măsurată de wattmetru reprezintă *doar* puterea necesară acoperirii pierderilor în înfășurări (se consideră că pierderile în fier care sunt proporționale cu pătratul tensiunii de alimentare pot fi neglijate întrucât tensiunea este foarte redusă).

2. Determinarea factorului de putere la scurtcircuit

$$P_{sc} = U_{sc} \cdot I_{1N} \cdot \cos \varphi_{sc}$$

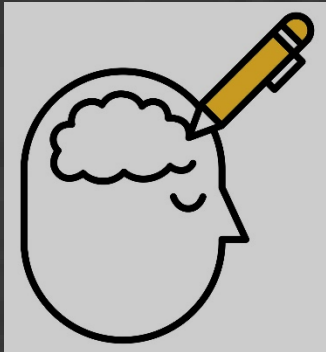
$$\cos \varphi_{sc} = \frac{P_{sc}}{U_{sc} \cdot I_{1n}}$$

3. Determinarea impedanței, reactanței și rezistenței de scurtcircuit

$$Z_{sc} = \frac{U_{1sc}}{I_{1n}}$$

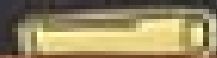
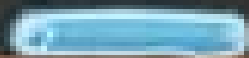
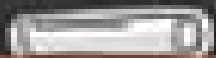
$$R_{sc} = Z_{sc} \cdot \cos \varphi_{sc}$$

$$X_{sc} = \sqrt{Z_{sc}^2 - R_{sc}^2} = Z_{sc} \cdot \sin \varphi_{sc}$$



Pierderile în transformatorul electric pot fi determinate prin două încercări simple: încercarea la gol și încercarea la scurtcircuit. Astfel, se poate calcula randamentul fără a fi necesară o încercare în sarcină (este vorba despre randamentul corespunzător punctului de funcționare nominală).

Bilanțul puterilor active la transformatorul monofazat



Bilanțul puterilor unui transformator monofazat (identic cu al celui trifazat) este reprezentat de următoarea egalitate:

$$P_1 = p_{j1} + p_{Fe} + p_{j2} + P_2$$

unde:

Puterea activă absorbită de la rețea: $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$

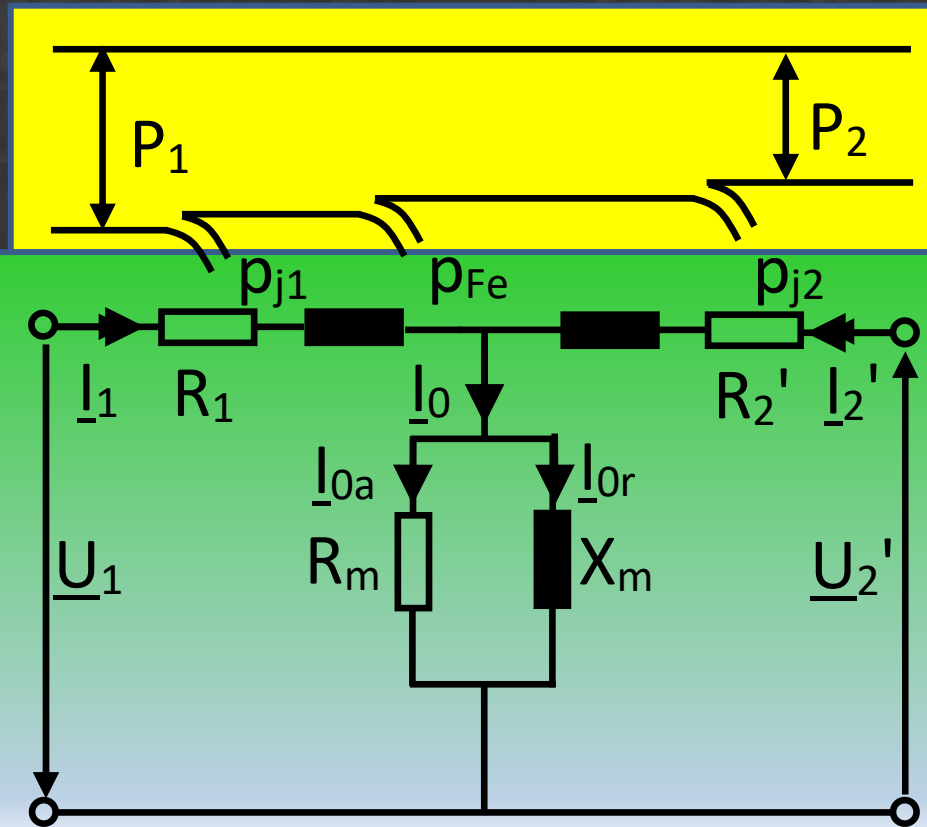
Pierderi de putere activă în înfășurarea primară și miezul feromagnetic:

$$p_{j1} = R_1 I_1^2$$
$$p_{Fe} = R_m I_{0a}^2$$

Pierderi în înfășurarea secundară : $p_{j2} = R'_2 \cdot I'_2{}^2$

Puterea activă transmisă circuitului receptor: $P_2 = U'_2 \cdot I'_2 \cdot \cos \varphi_2$

Diagrama bilanțului de puteri asociată cu schema electrică echivalentă



$$P_1 = p_{j1} + p_{Fe} + p_{j2} + P_2$$

Caracteristica randamentului transformatorului monofazat

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U'_2 \cdot I'_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}$$

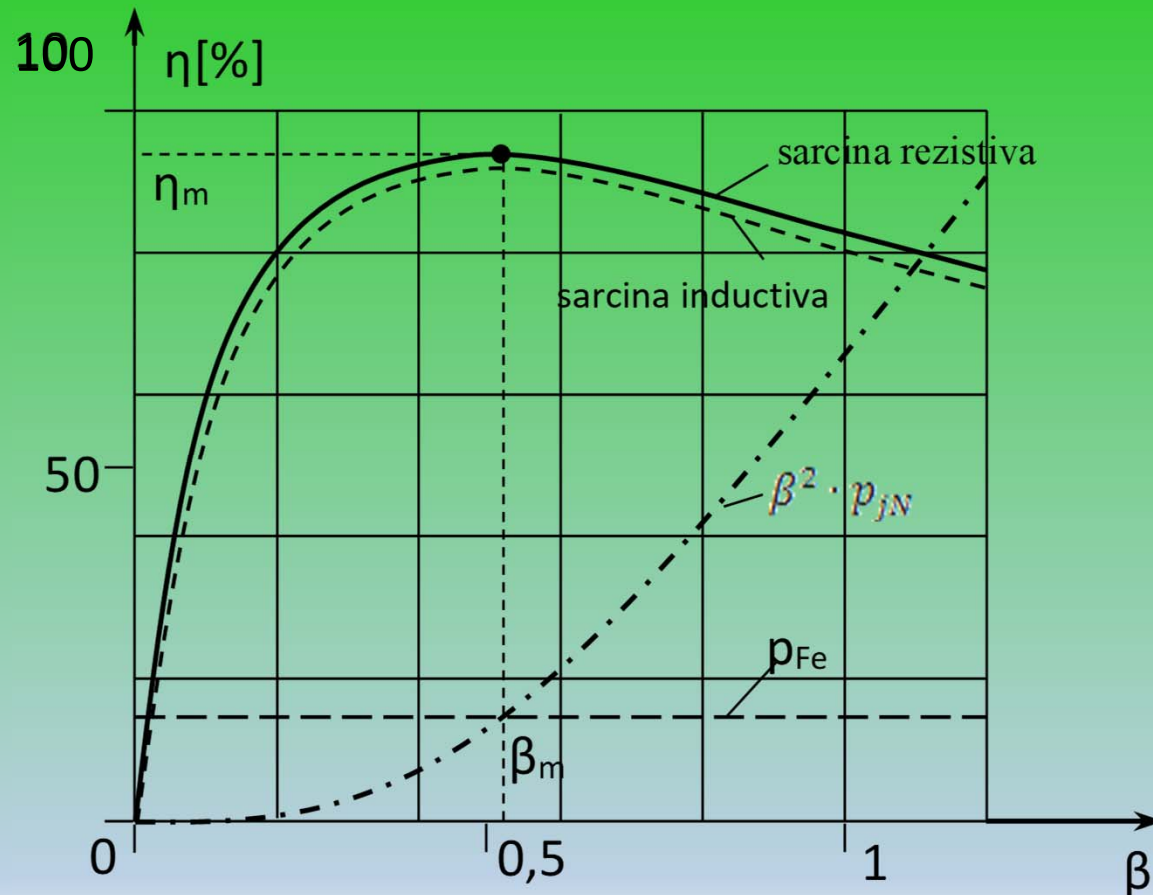
Sau, luând în considerare pierderile :

$$\eta = \frac{U'_2 \cdot I'_2 \cdot \cos \varphi_2}{U'_2 \cdot I'_2 \cdot \cos \varphi_2 + p_j + p_{Fe}}$$

Caracteristica randamentului reprezintă variația $\eta=f(P_2)$ pentru $U_1=\text{const.}$ și $\cos \varphi_2=\text{const.}$

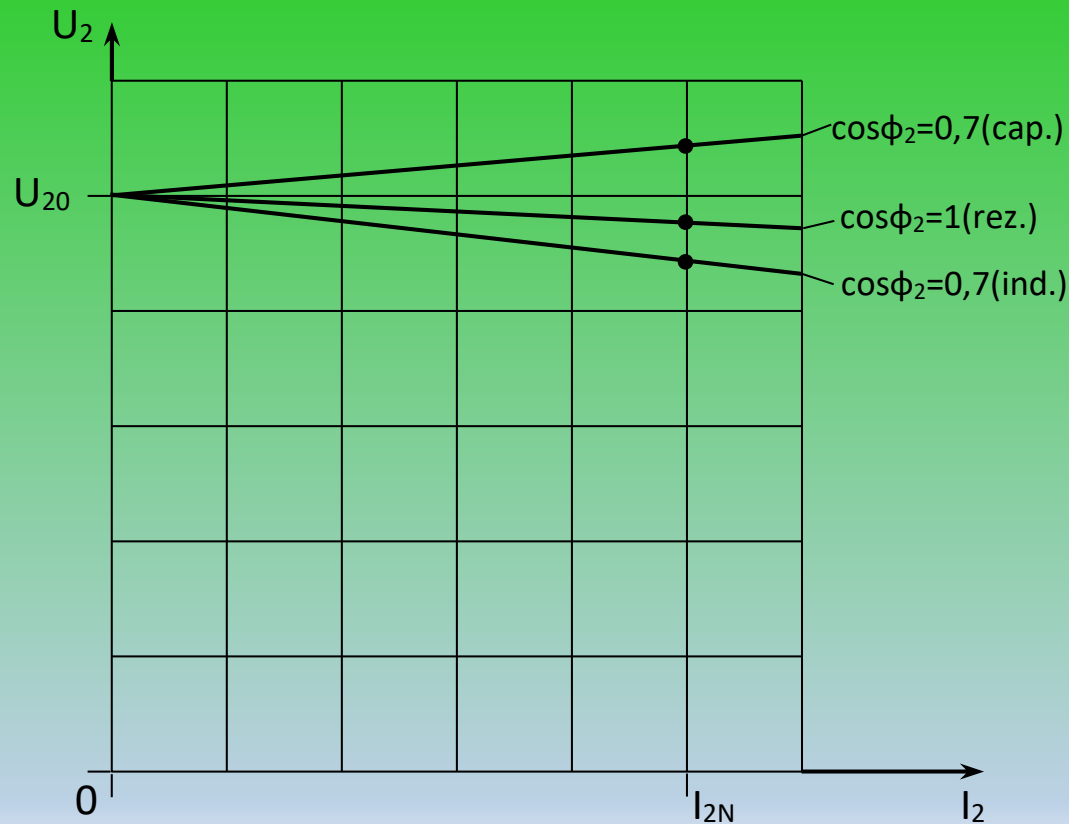
Frecvent, caracteristica randamentului se exprimă în funcție de gradul de încărcare a transformatorului, adică $\eta=f(\beta)$ unde $\beta = I_2/I_{2N}$

Caracteristica randamentului



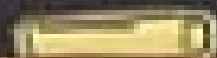
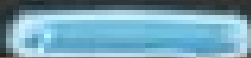
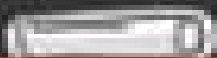
Caracteristica randamentului este maximă atunci când $\beta_m = 0,5$ adică raportul $p_{Fe}/p_{jN} = 0,25$. De regulă, însă, $\beta_m = (0,4 \div 0,7)$ unde Trebuie remarcat și faptul că tipul sarcinii (rezistivă sau inductivă) modifică valorile randamentului și deci curba de variație.

Caracteristica externă, $U_2=f(I_2)$

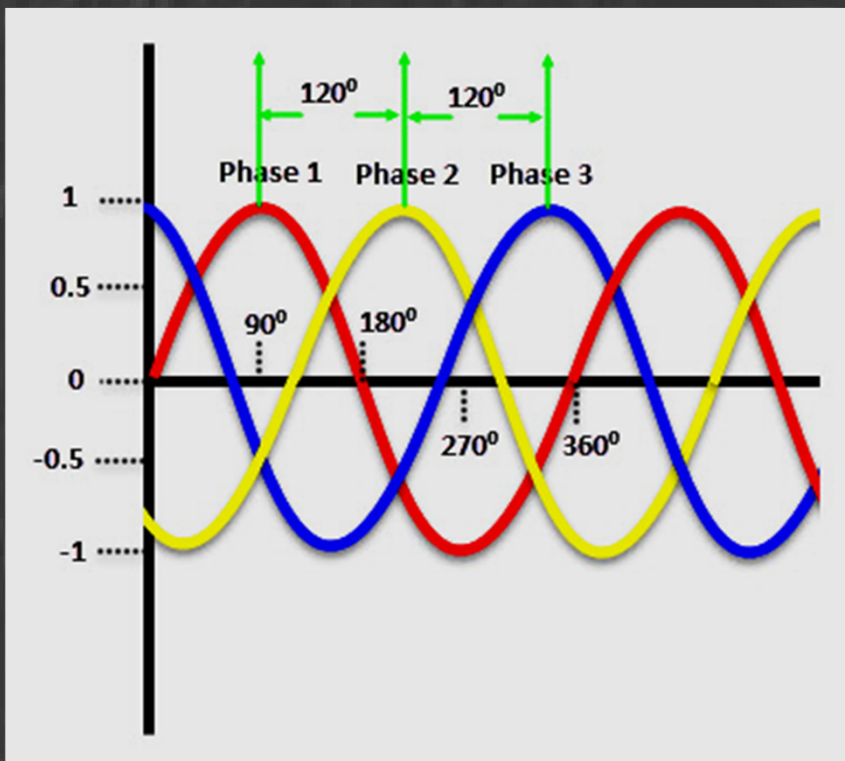


Caracteristica externă arată modul cum variază tensiunea la bornele secundare odată cu variația sarcinii. În cazul sarcinilor de tip rezistiv sau inductiv, tensiunea **SCADE**. Doar în cazul sarcinilor capacitive are loc o creștere a tensiunii odată cu creșterea sarcinii.

TRANSFORMATORUL ELECTRIC TRIFAZAT



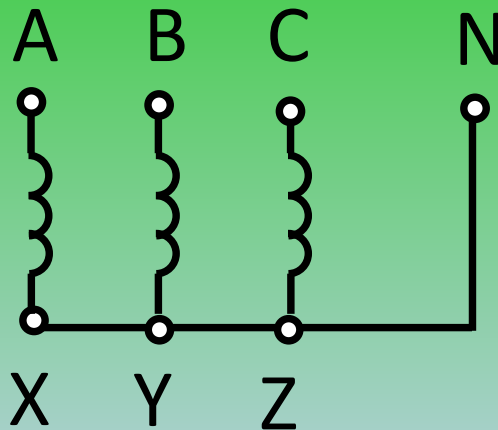
Transformatorul trifazat este varianta *polifazată* a transformatorului monofazat, care se asociază cu rețelele de energie electrică trifazată. El presupune un miez magnetic specific și câte cel puțin trei înfășurări monofazate primare respectiv secundare, legate între ele după anumite tipuri de conexiuni.



Sistemul de tensiuni, sinusoidal, presupune existența a trei tensiuni defazate temporal la 120° .

Conexiunile transformatorului trifazat

Conexiunea STEA



Conexiune

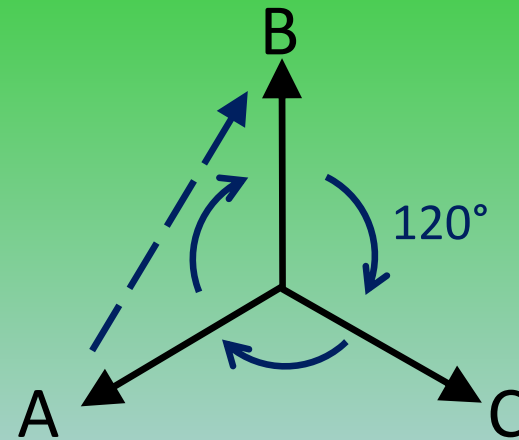
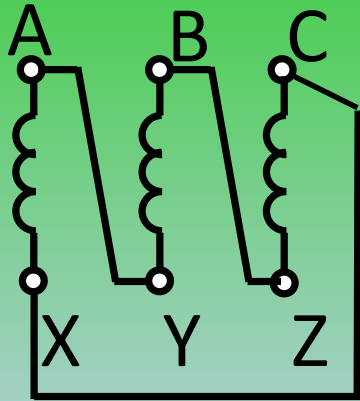


Diagrama fazorială

Se conectează împreună sfârșiturile SAU începuturile înfășurării trifazate. Capetele rămase libere se conectează la sursă sau la sarcină. Conexiunea se notează cu Y.

Conexiunile transformatorului trifazat

Conexiunea TRIUNGHI



Conexiune

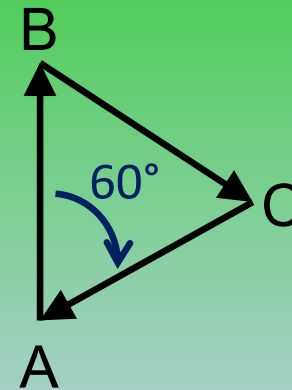
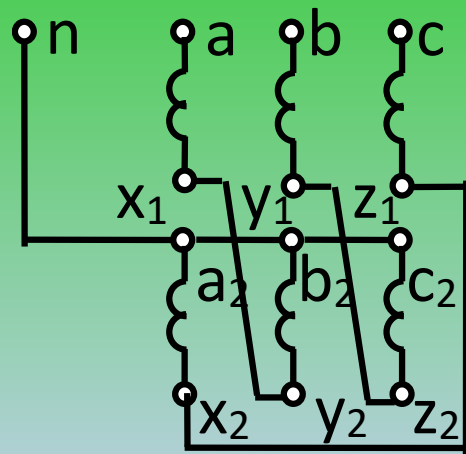


Diagrama fazorială

Se leagă începutul unei faze cu sfârșitul fazei de pe o altă coloană (practic se înseriază cele trei faze). Conectarea către sarcină sau alimentare se face fie la bornele de început fie la cele de sfârșit. Conexiunea se notează cu D.

Conexiunile transformatorului trifazat

Conexiunea ZIG-ZAG



Conexiune

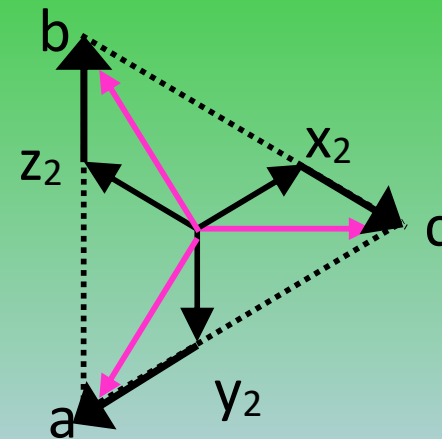


Diagrama fazorială

- Pe fiecare fază există 2 semibobine identice
- Este o conexiune stea la care se înscriază în opoziție câte două semibobine de pe coloane diferite
- Se realizează **NUMAI** pe înfășurarea secundară
- Conexiunea se notează cu „z”.

Grupe de conexiuni

- Desemnează tipul conexiunilor de pe IT respectiv JT și deplasarea unghiulară.

(deplasarea unghiulară, sau indicele orar, desemnează numeric defazajul tensiunilor induse în secundar față de cele induse în primar)

- Se notează astfel: Yy, Yd, Yz, Dy, Dd, Dz urmat de valoarea deplasării unghiulare exprimată în indice orar. Ex: Yy2, Dz4, Dy3, Yz5, Dd6, Yd11, etc.
- Conexiunile Yy, Dd și Dz pot avea numai indice orar par
- Conexiunile Yd, Dy și Yz pot avea numai indice orar impar

Raport de transformare

Conexiune	Yy	Yd	Yz	Dy	Dd	Dz
K	$\frac{N_1}{N_2}$	$\frac{\sqrt{3} \cdot N_1}{N_2}$	$\frac{2 \cdot N_1}{\sqrt{3} \cdot N_2}$	$\frac{N_1}{\sqrt{3} \cdot N_2}$	$\frac{N_1}{N_2}$	$\frac{2 \cdot N_1}{3 \cdot N_2}$



În cazul transformatoarelor trifazate, raportul de transformare, deci și tensiunea secundară, depind și de tipul conexiunilor din primar și secundar. Altfel spus, pe același transformator trifazat se pot obține diverse tensiuni în secundar numai prin modificarea tipurilor de conexiune.

Cuplarea în paralel a transformatoarelor trifazate



Conectarea în paralel apare necesară pentru următoarele situații:

- Cazul alimentării receptoarelor ce se dezvoltă pe parcursul mai multor ani;**
- Cazul variației periodice a sarcinii (sezoniere, de ex);**
- Asigurarea continuității în caz de avarie a unui transformator;**
- Asigurarea continuității pentru revizii periodice.**



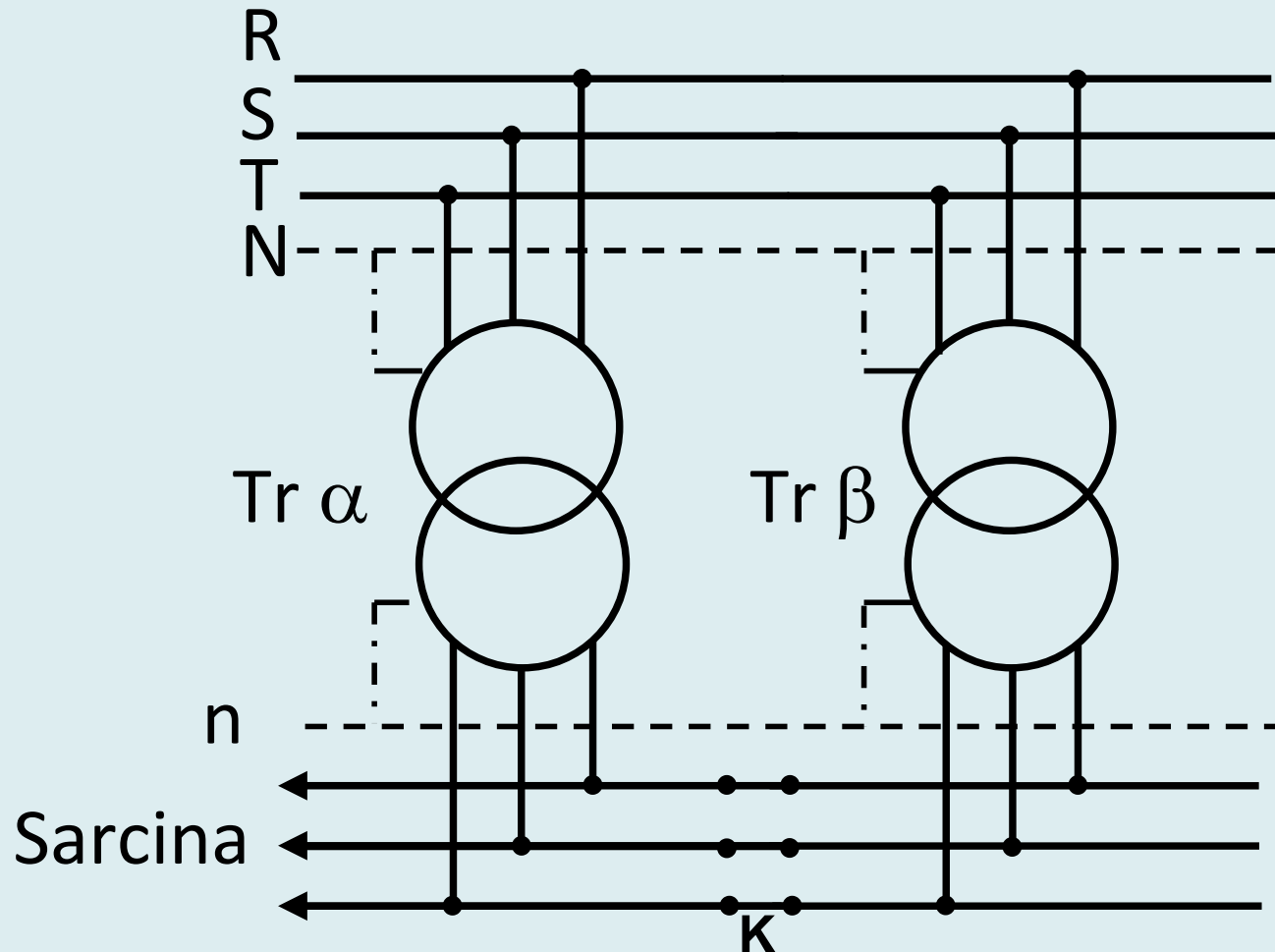
Conectare în paralel a transformatoarelor presupune:

- 1. Înfășurările primare sunt conectate la aceeași rețea de alimentare, cu tensiunea U_1**
- 2. Înfășurările secundare sunt conectate la aceeași rețea receptoare, cu tensiunea U_2**



Conectarea în paralel a două sau mai multe transformatoare, fie pe o rețea proprie, fie pe o rețea de putere foarte mare (considerată o rețea de putere „infinită” în comparație cu puterea transformatorului) NU se poate face decât dacă sunt îndeplinite anumite condiții de cuplare.

Conectare în paralel a doua transformatoare



Pentru determinarea condițiilor de cuplare în paralel, se consideră situația a două transformatoare notate cu $Tr\ \alpha$ respectiv $Tr\ \beta$. Înfășurările primare sunt conectate la aceeași sursă de tensiune iar cele secundare pe aceeași rețea de sarcină (având deci aceeași tensiune în secundar). Întrerupătorul K este închis ceea ce validează conectarea transformatorului $Tr\ \beta$ la rețeaua secundară comună.

Condițiile *generale* de cuplare în paralel pot fi formulate astfel:

- 1. La funcționarea în gol a transformatoarelor, să nu apară curenți de circulație prin înfășurările secundare.**
- 2. La funcționarea în sarcină, fiecare transformator trebuie să se încarce cu o putere proporțională cu puterea lui nominală iar curenții din secundar să fie pe cât posibil în fază.**

Explicate cu alte cuvinte, cele doua condiții impun ca:

- 1. Atunci când sarcina este deconectată sau nu există sarcină, să nu existe curenți prin înfășurările secundare ale transformatoarelor.**
- 2. Dacă transformatoarele au puteri diferite (ceea ce se întâmplă frecvent), distribuirea puterii între cele două transformatoare să se facă proporțional cu puterile lor, evitându-se supraîncărcarea unuia dintre ele în timp ce cel de-a doilea funcționează subîncărcat.**

Analizând funcționarea transformatoarelor pe baza circuitelor electrice, se poate afirma că, pentru a putea fi cuplate în paralel două sau mai multe transformatoare, este necesară îndeplinirea următoarelor cerințe:

Tensiunile nominale primare trebuie să fie egale

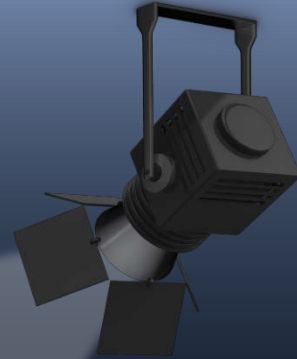
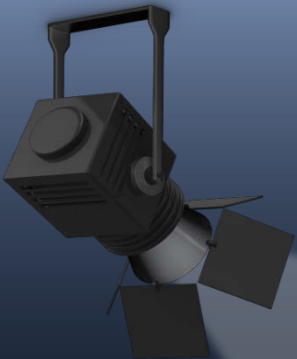
Raportul de transformare să fie același

Transformatoarele trebuie să aparțină aceleiași grupe de conexiuni

Tensiunile nominale de scurtcircuit să fie egale (în modul și fază)

+

Puterile nominale ale transformatoarelor să nu depășească raportul 4:1

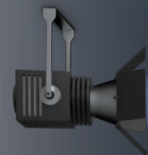


Motoare elettrice speciale

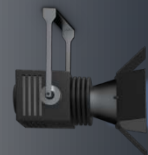
CUPRINS



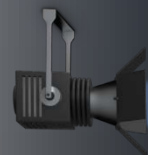
Motorul universal



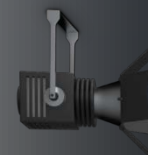
Alternatorul cu poli gheara



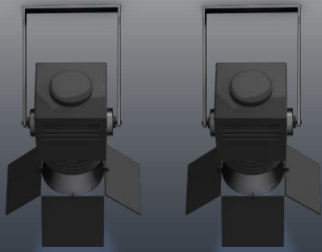
Motorul sincron cu magneți permanenți



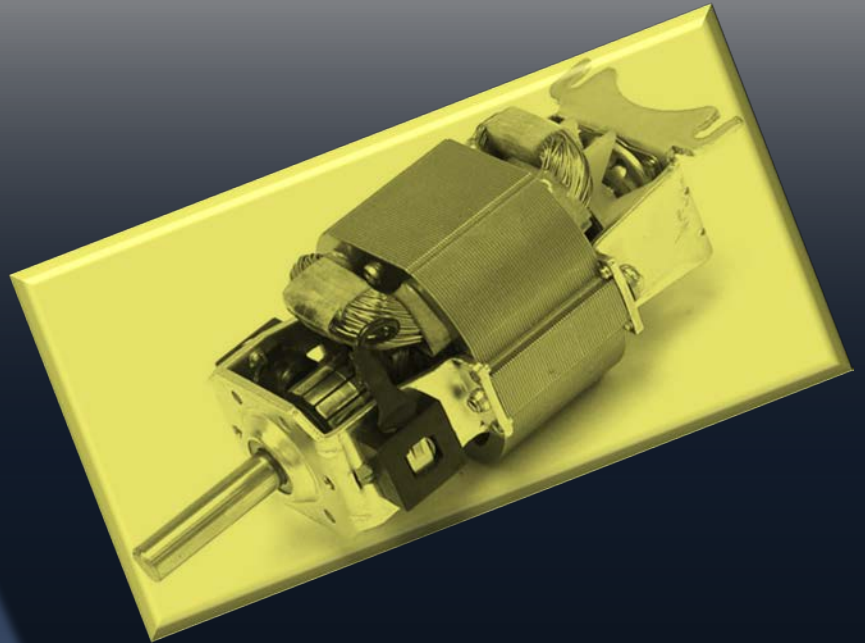
BLDC – Motorul cu comutație electronica tip DC



Motorul pas cu pas

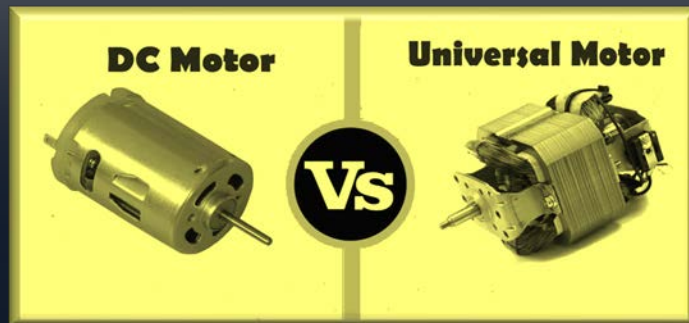


Motorul universal



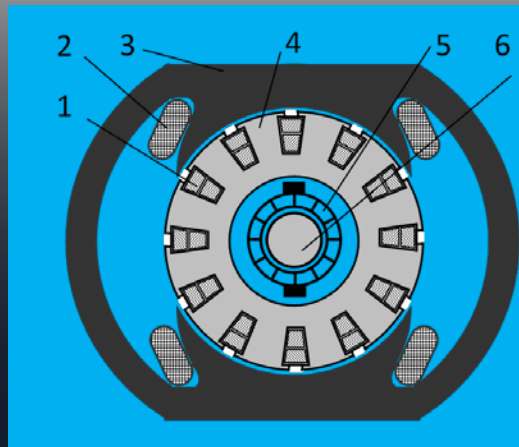
DEFINIȚIE

Motorul universal este o mașină de c.c. cu *excitație serie* ce poate funcționa alimentată atât de la rețeaua de c.c. cât și de la cea de c.a.



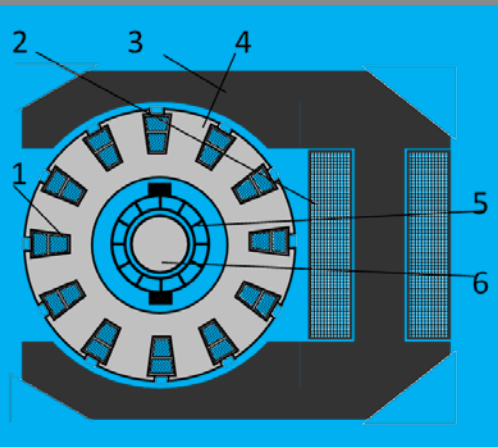
CARACTERISTICI GENERALE

- Funcționarea este doar în regim de motor.
- Viteza de rotație poate ajunge la turații de până la 25000 rot/min fără utilizarea unor dispozitive suplimentare (conectare directă la rețea).
- În general se folosesc pentru aplicații casnice având puteri de până la 1200 W.



a) Structură simetrică

Pentru puteri peste 200 W



b) Structură nesimetrică

Pentru puteri de până la 200 W

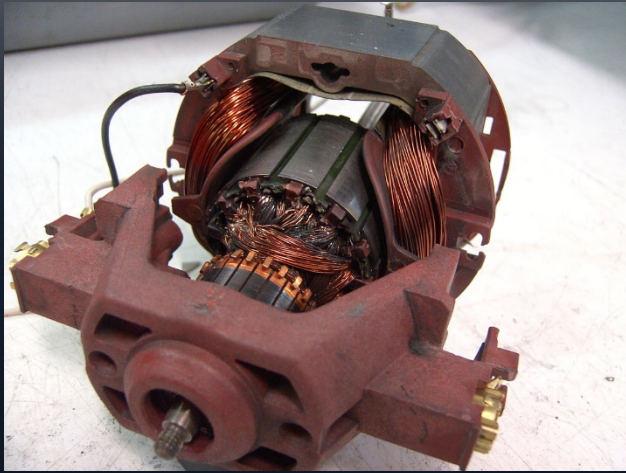
1- înfășurare rotorică; 2- înfășurare statorică; 3- pol statoric; 4- rotor;
5- colector; 6- arbore (ax)

Structura motorului universal provine din cea a mașinii de c.c. cu excitație serie, în varianta cea mai simplă: stator având doar poli principali, rotor în construcție neschimbată și sistem colector-perii. Lipsesc poli auxiliari.

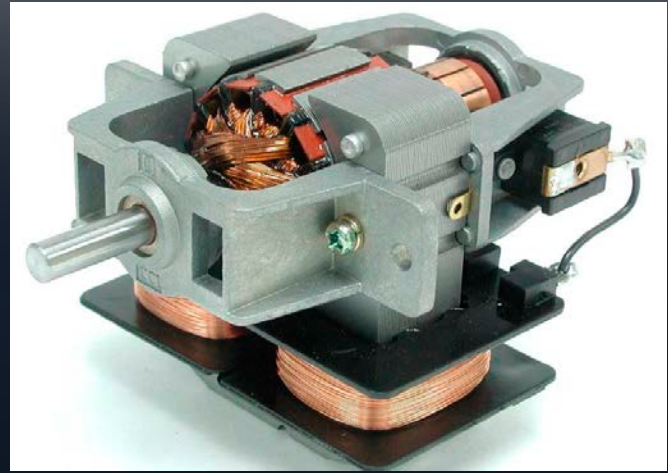
Deosebirea cea mai importantă constă însă în construcția circuitului magnetic statoric. Spre deosebire de mașina de c.c. unde statorul este realizat din oțel turnat, la motorul universal statorul se realizează din tole izolate. Astfel, prezența câmpului alternativ creat de înfășurările de excitație nu compromite, datorită pierderilor mari în fier, performanțele motorului universal.

Se întâlnesc, de regulă, două variante constructive:

- a) Motor universal cu circuit statoric simetric: fiecare pol inductor este prevăzut cu câte o bobină de excitație;
- b) Motor universal cu circuit statoric nesimetric: bobina de excitație este plasată pe jugul statoric (construcția seamănă cu unele variante de motor monofazat cu spira în scurt-circuit)

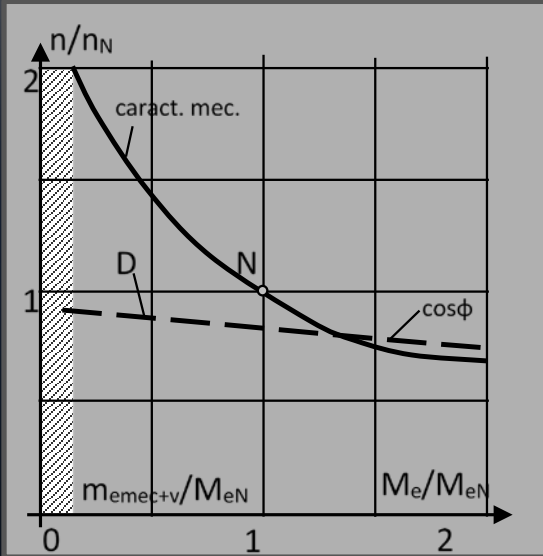


Structura simetrică



Structura nesimetrică

Caracteristicile de funcționare ale motorului universal alimentat în c.a.



1. Caracteristica mecanică, $n=f(M_e)$; este o caracteristică *moale*, sau *căzătoare*, similară cu a mașinii de c.c serie. La sarcini foarte mici, sau în gol, există tendința creșterii inadmisibile a turației (zona hașurată). La sarcini mari, când intervine saturația, scăderea turației devine liniară.
2. Caracteristica factorului de putere, $\cos\phi = f(M_e)$; factorul de putere este subunitar și scade odată cu creșterea sarcinii.



Cuplul electromagnetic dezvoltat în c.c. este mai mare de $\sqrt{2}$ ori decât în c.a.



Curentul absorbit în c.a. este mai mare decât în c.c. (apare o componentă reactivă de magnetizare).



La aceeași valoare a tensiunii de alimentare, turația rotorului este mai mică în c.a. decât în c.c.

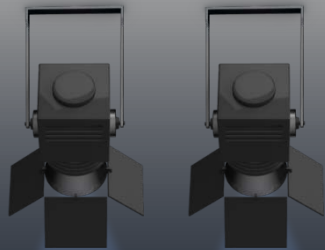


La funcționarea în c.a. caracteristica mecanică este mai căzătoare (viteza scade mai repede odată cu creșterea cuplului rezistent).

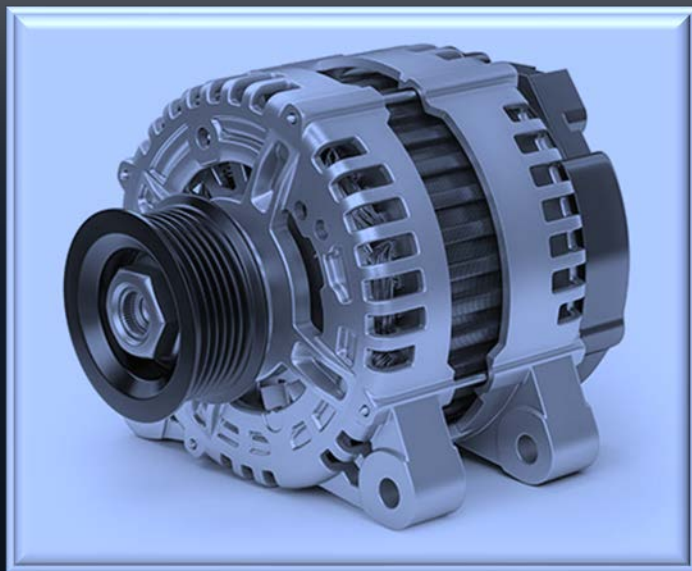


La funcționarea în c.a. randamentul este mai mic (apar pierderi în fierul statoric), iar comutația este mai proastă și apar paraziți radiofonici (datorită scânteierii la perii).





Alternatorul cu poli gheara



Definiție

Alternatorul cu poli gheară este o mașina sincronă de construcție specială ce funcționează pe autovehicule în regim de generator

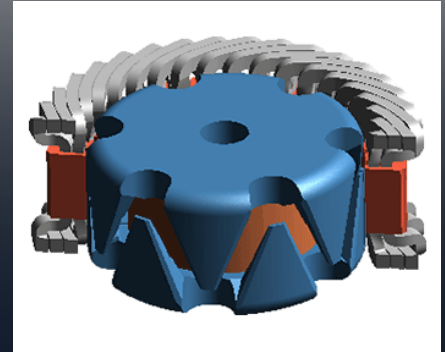
Rolul alternatorului montat pe autovehicule este de a produce energie electrică necesară alimentării diversilor consumatori și încărcării acumulatorului. Întrucât se produce o energie de c.a., pe alternator este plasată o punte redresoare (atât acumulatorul cât și consumatorii de pe autovehicule folosesc c.c.)



Piesa feromagnetică
cu poli gheara



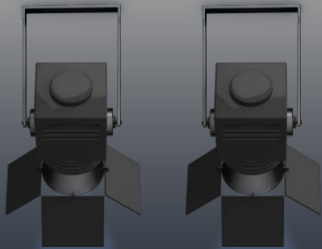
Rotor asamblat



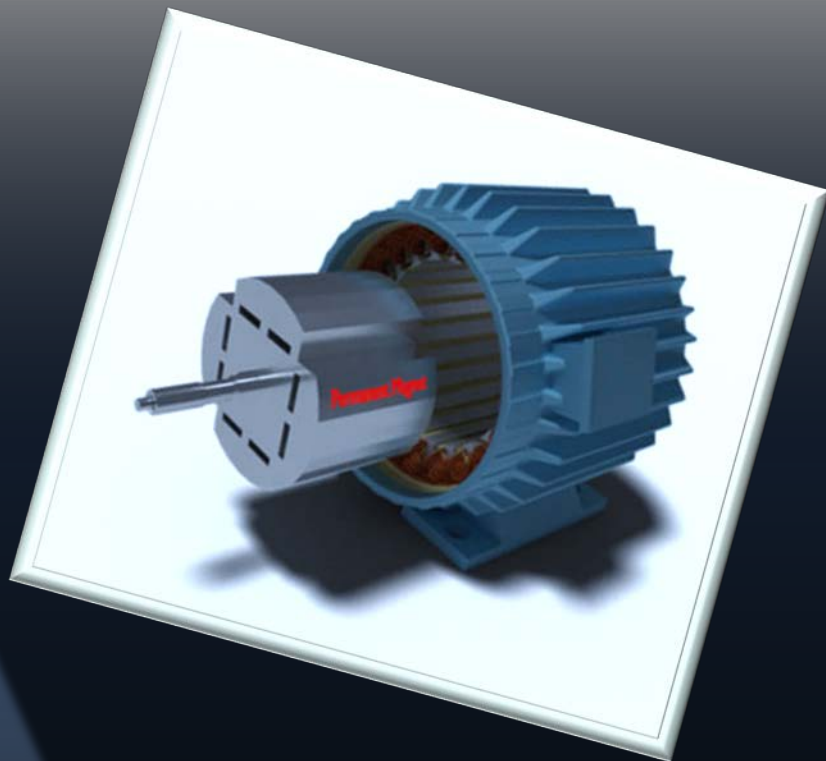
Stator + rotor

Rotorul este format din două piese polare din material feromagnetic cu „gheare” care, prin montare pe ax, se întrepătrund.

Pe ax, între aceste piese polare, este plasată o înfășurare de tip concentrat, care se alimentează, printr-un sistem de două inele și perii, de la o sursă de tensiune continuă. Curentul ce parcurge această înfășurare, de excitație, determină polarizarea celor două piese polare. În acest fel, „ghearele” polare se magnetizează alternativ și devin poli inductori ai generatorului.



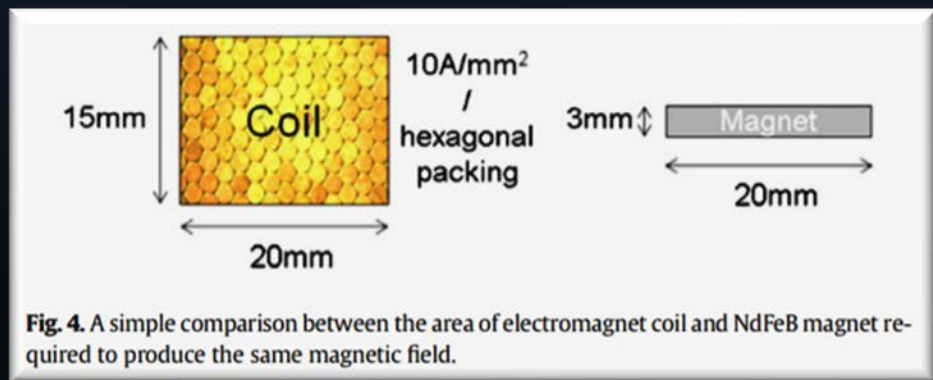
Motorul sincron cu magneți permanenți



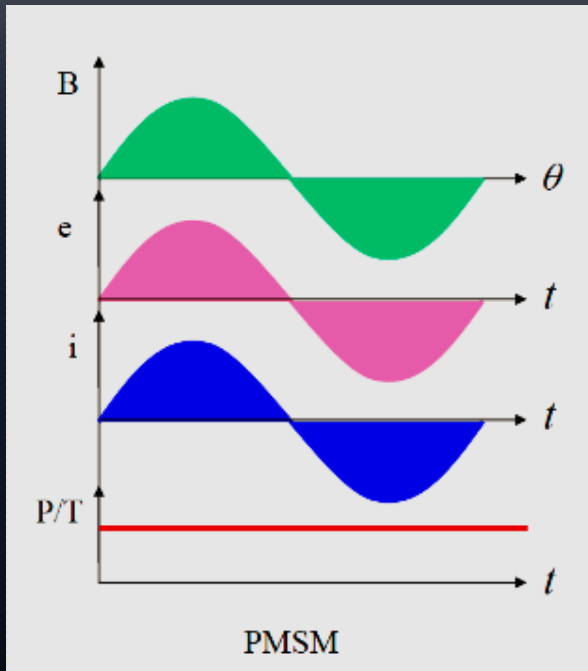
Mașinile sincrone cu magneți permanenți sunt mașini de c.a. la care fluxul inductor (fluxul de excitație) este creat de magneți permanenți plasați pe rotor.

Se mai numesc mașini sincrone fără perii (Brushless Permanent Magnet Machines).

Din construcția mașinii dispar inelele, periile, înfășurarea de excitație și sistemul de alimentare al acesteia. Drept urmare construcția se simplifică și volumul mașinii se diminuează.



Caracteristicile constructive si de funcționare determină următoarele particularități:

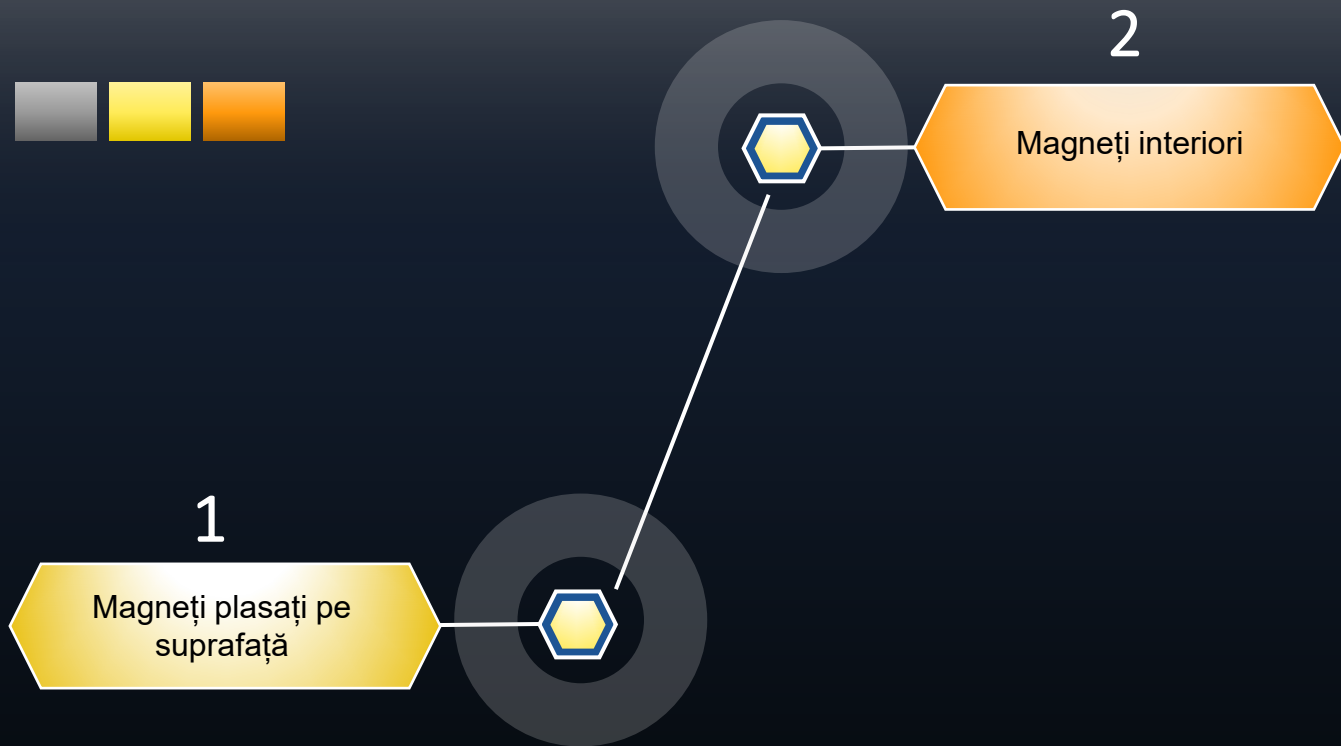


Câmp magnetic sinusoidal în întrefier

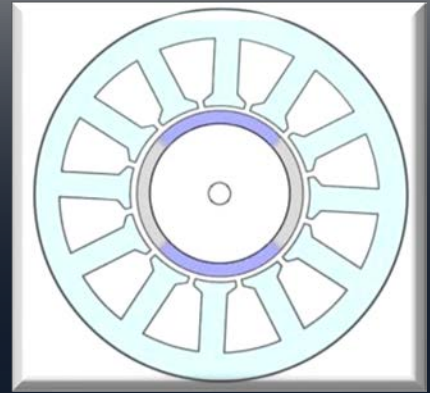
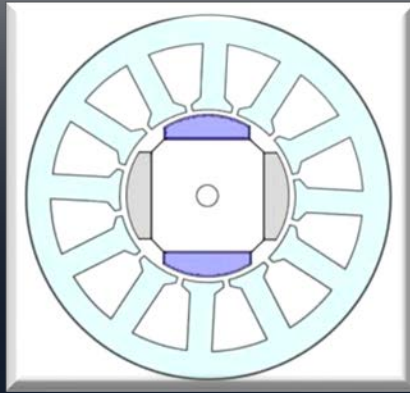
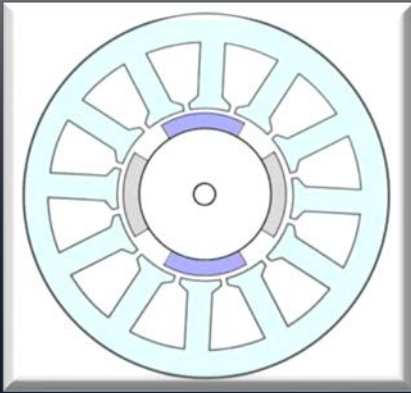
Tensiune indusă sinusoidală în înfășurarea statorică

Curent statoric sinusoidal

Structuri rotorice

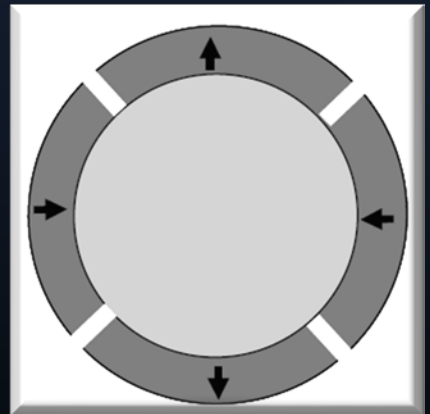


1 Magneți plasați pe suprafață



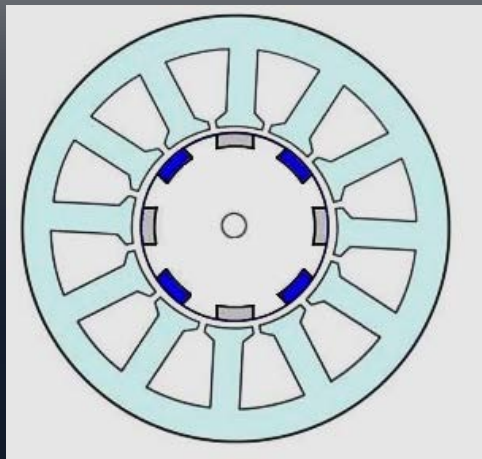
Majoritatea mașinilor cu magneți permanenți au magneții plasați pe suprafața rotorului („surface mounted PMs”).

De regulă, magneții sunt pe bază de pământuri rare (NdFeB) întrucât, datorită câmpului coercitiv de valoare mare, nu sunt atât de sensibili la demagnetizare datorită reacției indusului.

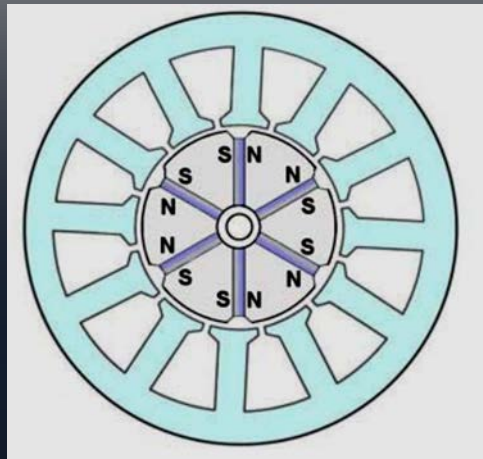


Modul de magnetizare a magneților permanenți plasați pe suprafața rotorului.

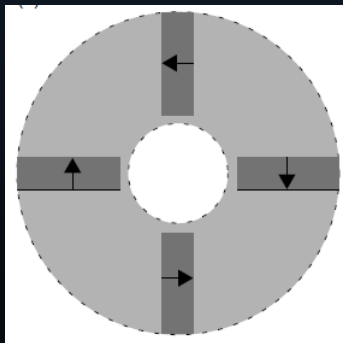
Magneți interiori



“inset” permanent magnets

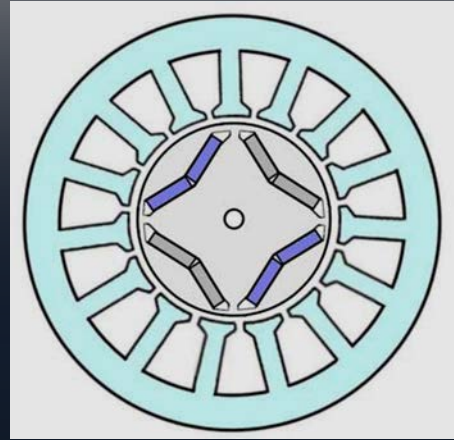
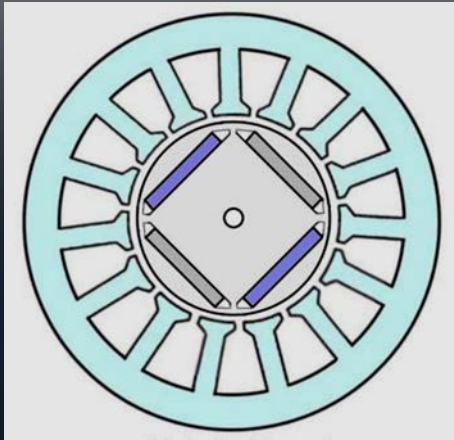


“spoke” permanent magnets

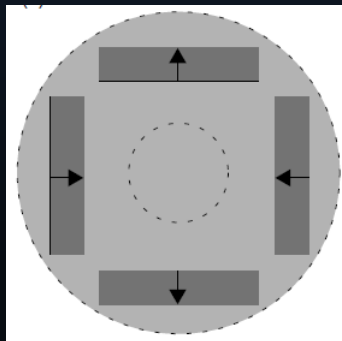


Modul de magnetizare a magneților permanenți plasați în interiorul rotorului.

Magneți interiori



“buried” permanent magnets

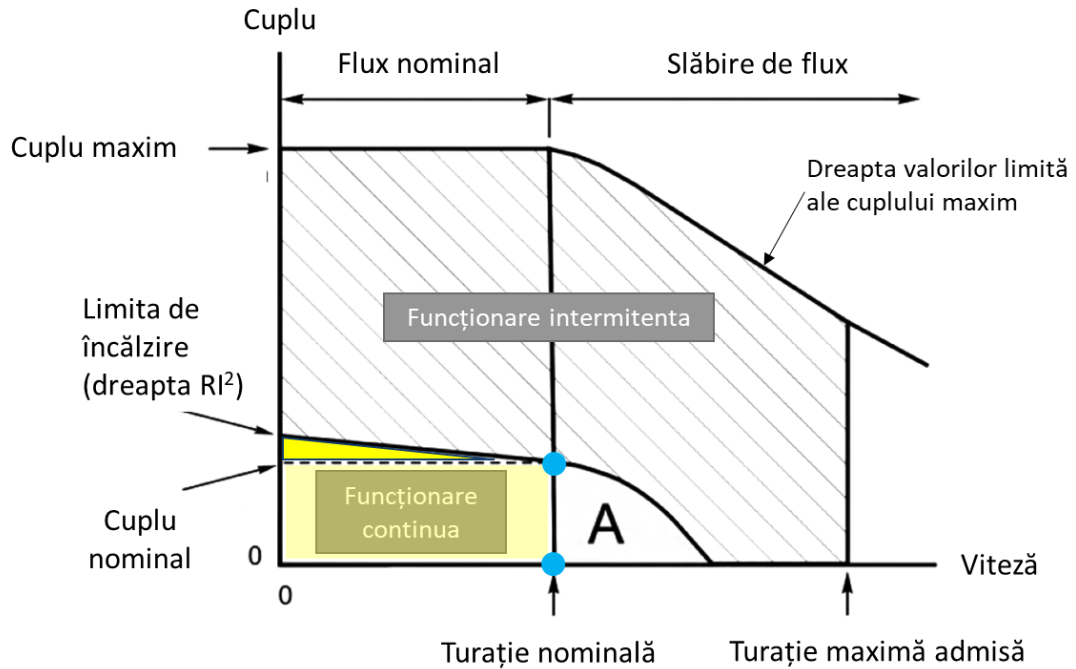


Modul de magnetizare a magneților permanenți plasați în interiorul rotorului.

Există variante de rotoare la care magneții permanenți sunt introduși în rotor („buried or inset PMs”). Sunt trei motive pentru acest tip de structură: a) Se realizează o concentrare a fluxului magnetic pe anumite trasee favorabile; b) Structura rotorică devine mai rigidă și mașinile pot fi folosite la turații mari; c) În controlul mașinii se poate aplica tehnica slăbirii de flux („flux weakening control”).

Sunt structuri ce folosesc magneți permanenți de tip „ferite”. Așezarea diversă a magneților în interiorul rotorului are drept scopuri: concentrarea fluxului și creșterea inducției în întrefier; minimizarea cuplului de pulsație (cogging torque).

Caracteristica mecanică



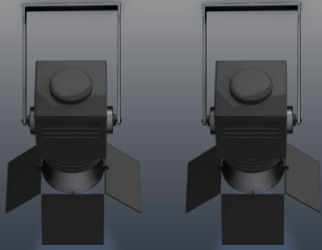
Caracteristica mecanică – zone de funcționare ca servomotor

Regimul de funcționare continuu, neîntrerupt, este cuprins între limitele de cuplu nominal și turație nominală (zona galben-pal). De exemplu, funcționarea la turație nominală și cuplu variabil are loc pe dreapta verticală cuprinsă între cele două puncte de culoare albastru deschis.

De fapt, funcționarea continuă este limitată de atingerea temperaturii limită, exprimată prin dreapta RI^2 (zona galben-intens). Menținerea puterii constante permite creșterea cuplului dezvoltat de mașină odată cu scăderea turației. De fapt are loc o ușoară extindere a zonei de funcționare continuă.

Pentru cupluri peste valoarea nominală este admisă o funcționare intermitentă (timpuri de funcționare mai lungi sau mai scurți limitați de încălzirea servomotorului). Limita superioară a cuplului („peak value”-valoarea de vârf) este dictată de valoarea curentului maxim admis în convertorul de alimentare.

Pentru funcționarea la viteze mai mari, se poate aplica tehnica slăbirii fluxului în mașină („field weakening”) care trebuie acompaniată de scăderea cuplului. Exceptând zona A, este un mod de funcționare de asemenea intermitent, întrucât tehnica slăbirii de câmp presupune existența unui curent mai mare în înfășurarea statorică.



BLDC



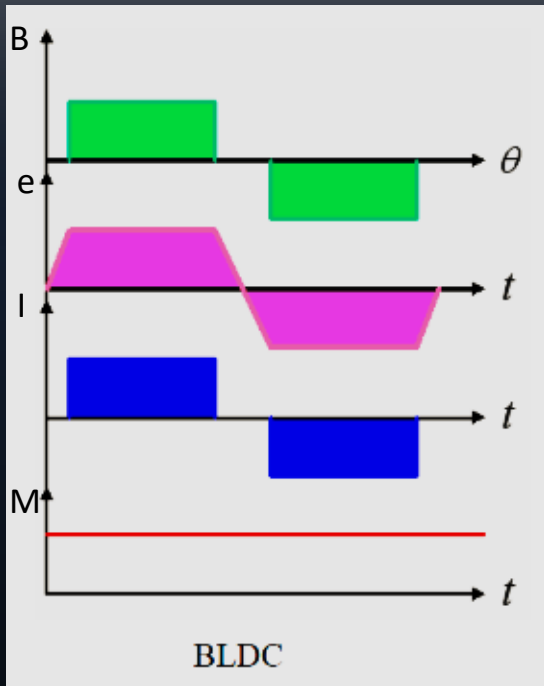


BLDC – BrushLess DC

Motorul BLDC este un motor electric cu magneți permanenți plasați pe rotor și la care înfășurările statorului sunt alimentate succesiv de la o sursă de alimentare cu elemente semiconductoare.

Întrucât stabilirea și întreruperea curenților rectangulari din înfășurări se face prin comandă electronică, motorul BLDC mai este denumit și motor cu comutație electronică tip DC.

Caracteristicile constructive si de funcționare determină următoarele particularități:



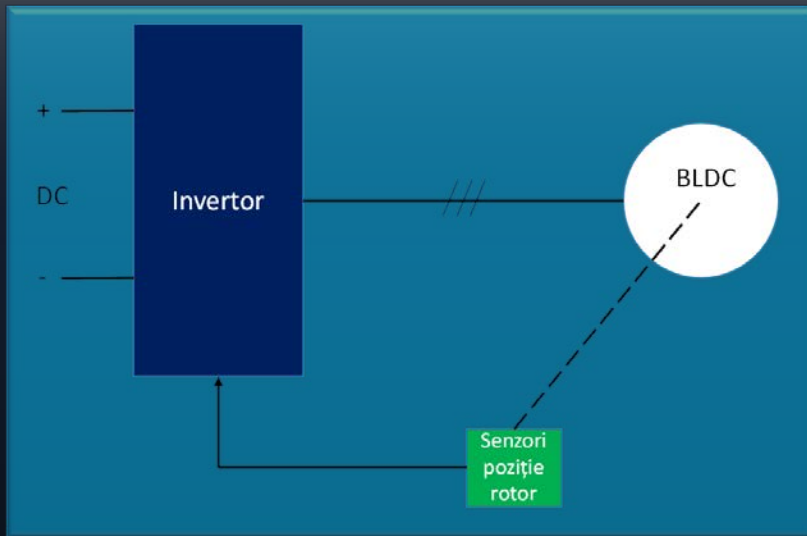
Câmp magnetic rectangular în întrefier

Tensiune indusă trapezoidală în înfășurarea statorică

Curent statoric rectangular

I.

Structura sistemului de alimentare



Motorul BLDC *nu* poate fi alimentat *decât* prin intermediul unui invertor, care distribuie impulsuri de comandă pe înfășurările statorice.

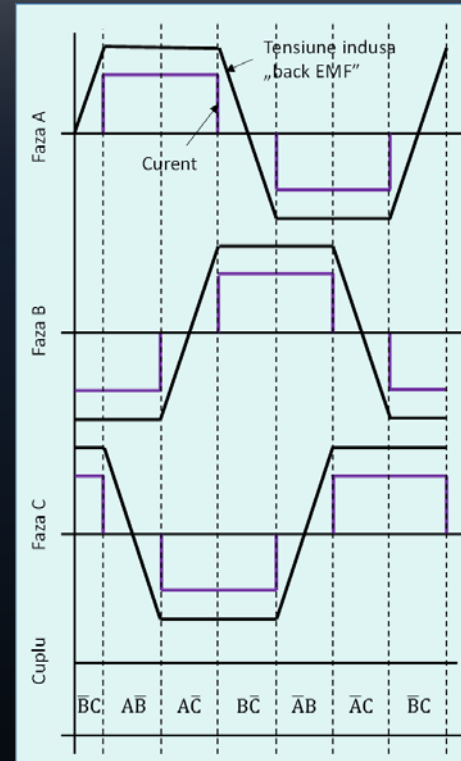
Pentru o comandă și funcționare eficiente, este necesară cunoașterea poziției rotorului în timpul funcționării. De regulă, în acest scop se folosesc senzori de poziție care pot fi, de exemplu, senzori Hall.

II.

Formele de undă ale mărimilor electrice

Atât tensiunea indusă în înfășurarea statorică cât și curentul de comandă aplicat înfășurărilor statorice au forme rectangulare (în opoziție cu formele de undă sinusoidale întâlnite la motoarele sincrone cu magneți permanenți tip AC): tensiunea indusă este trapezoidală iar curentul de comandă este dreptunghiular.

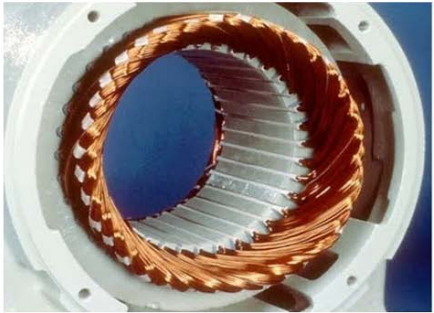
De asemenea, curba inducției în întrefier are o formă trapezoidală.



III.

Tipul de înfășurare statorică

Distributed Winding



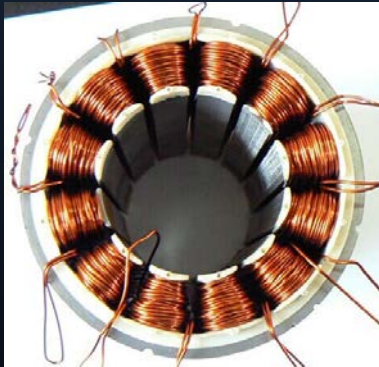
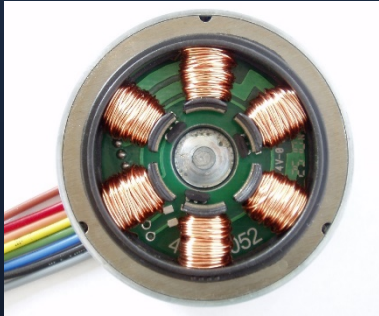
PMSM

Concentrated Winding



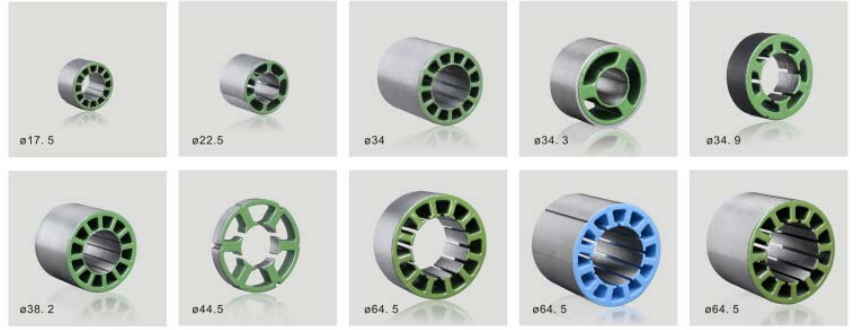
BLDC

Spre deosebire de motorul cu magneți permanenți tip AC (PMSM), motorul BLDC are înfășurări de tip concentrat pe dinte.



■ 内转子 / Inner Rotor

■ 60系列 / 60 Series



I. Statorul BLDC :

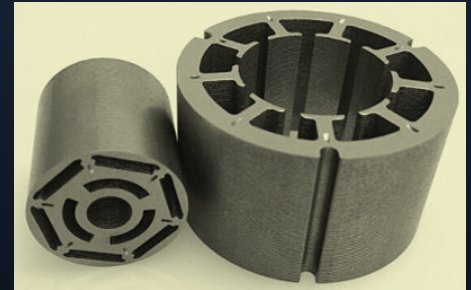
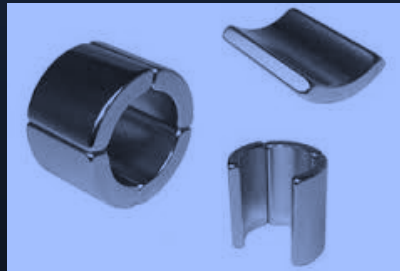
- Circuitul magnetic statoric este realizat din material feromagnetic și prezintă dinți uniform distribuiți.
- Înfășurarea statorică este formată din bobine (de tip concentrat) plasate individual pe dinții statorului. Cel mai adesea este o înfășurare trifazată dar există și variante bifazate sau multifazate.
- Bobinele statorului sunt alimentate secvențial întotdeauna de la o sursă electronică și niciodată de la sistemul trifazat sinusoidal (industrial).

II. Rotorul BLDC :

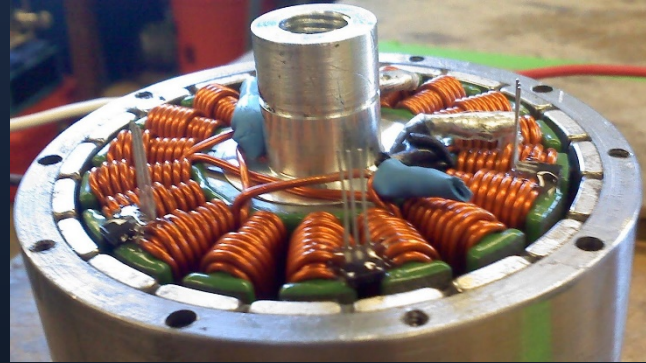
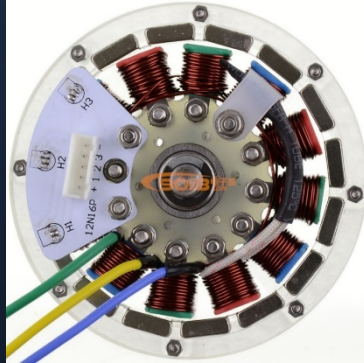
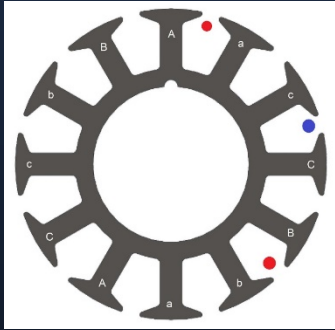
- Este, de asemenea, realizat din material feromagnetic.
- Polii mașinii sunt magneți permanenți plasați pe suprafață sau în interior. Numărul de poli este par.



Rotor cu magneți permanenți plasați pe suprafață



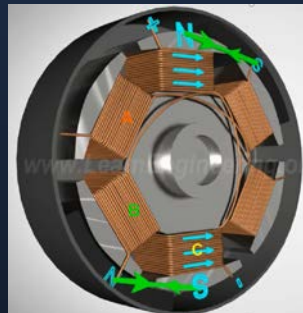
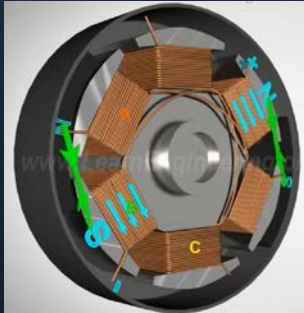
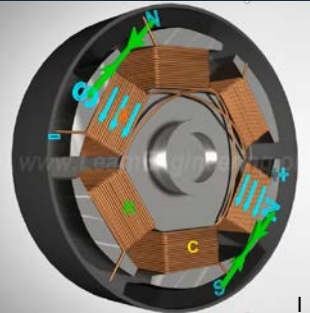
Rotor cu magneți permanenți plasați în interior



III. Senzori de poziție (senzori Hall):

- Au rolul de a sesiza poziția polilor magnetici rotorici față de înfășurările statorului.
- Se folosesc 3 senzori, corespunzător fiecărei faze (pentru variantele trifazate), indiferent de numărul de dinți statorici.
- Dau comanda de alimentare a înfășurărilor statorice astfel încât, tensiunea „back EMF” și curentul de comandă să fie în fază.

Principiu de funcționare

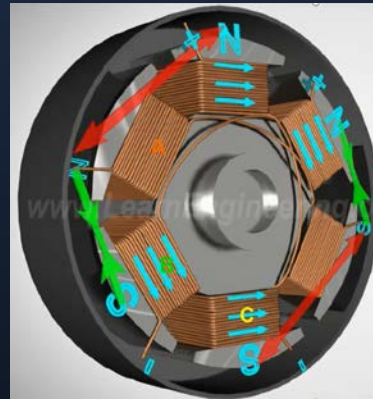
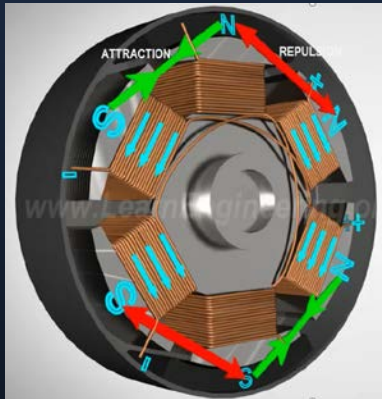


BLDC trifazat cu rotor exterior având doi poli magneti permanenți

Principiul de funcționare constă în alimentarea *succesivă* a înfășurărilor statorice care formează poli electromagnetici de polaritate opusă polilor rotorici aflați în vecinătate. Drept urmare, apare un cuplu de atracție mutuală ce rotește rotorul pentru obținerea alinierii polului statoric cu polul rotoric de polaritate opusă.

În fig.I este alimentată faza A ce este plasată pe doi dinți statorici opuși. Sensul curenților determină polaritățile S și N. Se exercită un cuplu de atracție mutuală care rotește rotorul în sens anti-orar. Polul rotoric N tinde să se alinieze cu polul statoric S. În momentul alinierii acestor poli, cuplul de atracție mutuală are doar o componentă radială astfel încât mișcarea de rotație ar înceta. Pentru continuarea rotirii rotorului, trebuie întreruptă alimentarea fazei A și alimentată faza B (fig.II). Polul rotoric tinde din nou să se alinieze cu polul statoric de polaritate opusă ce tocmai s-a format. În mod analog urmează alimentarea fazei C (Fig.III).

Principiu de funcționare

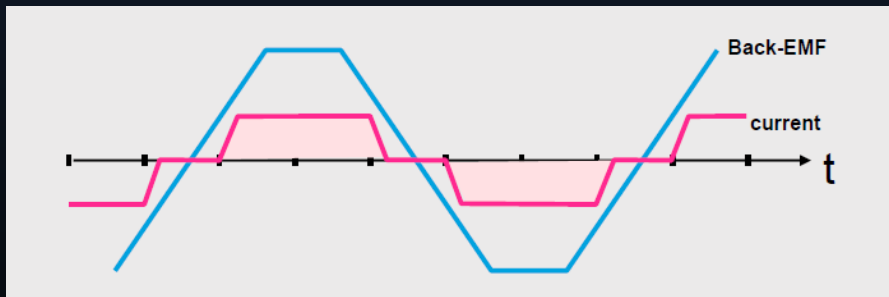


Alimentarea unei singure faze din cele trei a motorului BLDC ar face ca eficiența mașinii să fie destul de redusă. Drept urmare, se alimentează și o a doua fază, dar în așa fel încât să creeze poli statorici de o asemenea polaritate încât să determine un cuplu de respingere pentru polii rotorului. În felul acesta, cuplul dezvoltat de BLDC se dublează.

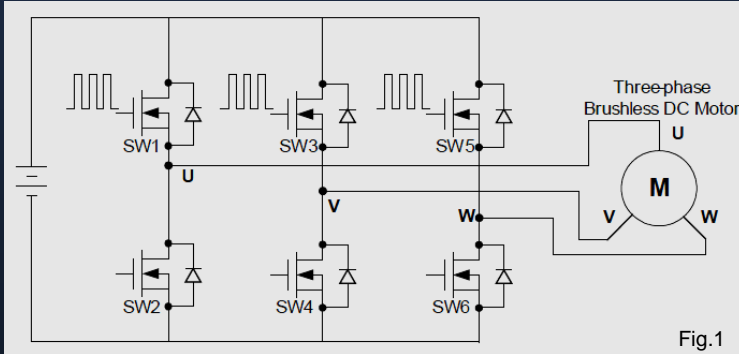
Pentru a funcționa cu eficiență maximă, curentul prin înfășurările statorului trebuie să fie în fază cu tensiunea indusă de către magneții permanenți rotorici, în fiecare dintre fazele comandate.

Pentru a menține curentul în fază cu tensiunea indusă, indiferent de variația sarcinii, curentul trebuie aplicat la "momentul potrivit". Acest lucru presupune cunoașterea cu precizie a poziției rotorului (cel care determină inducerea tensiunii).

**Particularități
generale de
funcționare**



Comanda motoarelor trifazate

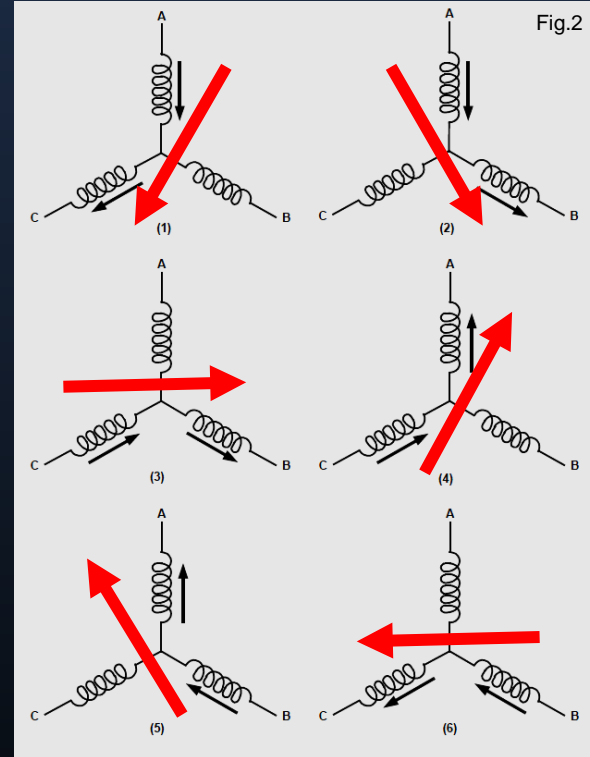


Se folosește o punte trifazată cu 6 elemente semiconductoare (în figură se folosesc 6 tranzistoare MOSFET)

Un ciclu complet de comandă (o rotire completă a rotorului) presupune 6 pași.

În orice moment sunt alimentate doar două din cele trei faze: una cu un curent pozitiv iar cealaltă cu un curent negativ.

Succesiunea alimentării fazelor determină un câmp „învârtitor”.



Pasul (1): Sunt comandate SW1 și SW6 (Fig.1). Curenții stabiliți prin înfășurările A și C (Fig.2), pozitiv respectiv negativ, determină câmpurile magnetice indicate prin săgețile negre. Câmpul rezultat, obținut prin compunerea geometrică a celor două câmpuri, este reprezentat de săgeata roșie.

Pasul (2): Se întrerupe curentul prin faza C și se comandă faza B (conduc SW1 și SW4). Câmpurile magnetice create de fiecare fază (reprezentate prin săgețile negre) determină un câmp rezultat (săgeata roșie) care s-a rotit cu 60° , în sens antiorar, față de pasul (1).

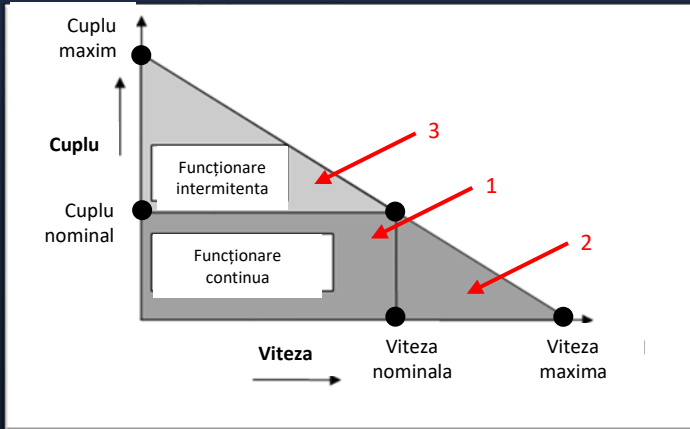
Pasul (3): Se întrerupe curentul prin faza A și se comandă faza C (conduc SW5 și SW4). Câmpul magnetic rezultat (săgeata roșie) se rotește cu încă 60° , în sens antiorar, față de pasul (2).

În următorii 3 pași are loc comutarea curentului prin fazele motorului iar câmpul rezultat se „rotește” la fiecare comutare cu 60° . Se obține un câmp asemănător cu cel învârtitor creat de o înfășurare polifazată distribuită ce determină rotirea sincronă a rotorului.

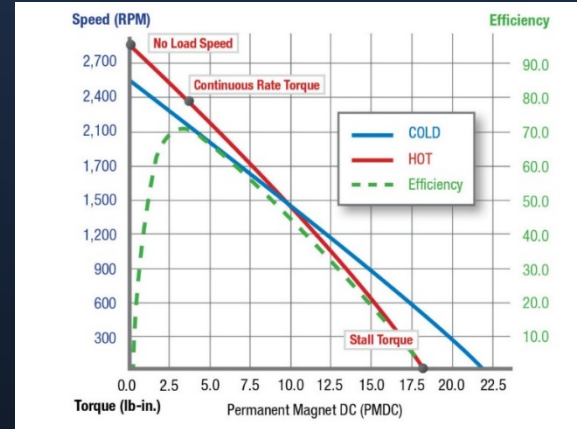
Procesul de comutare a curenților prin fazele statorice seamănă cu procesul comutației de la mașina de c.c.



La fiecare pas de comandă se stabilește o anumită polaritate magnetică a dinților pe care sunt plasate înfășurările comandate. Drept urmare, magneții permanenți de pe rotor sunt atrași (sau respinși) de cupluri de atracție mutuală, ceea ce determină rotirea rotorului sincronă cu câmpul magnetic creat de înfășurările statorului.



„Zone” de funcționare

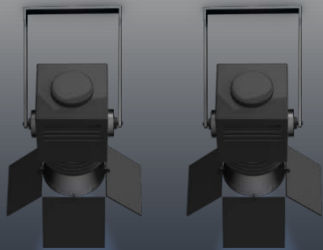


Caracteristica mecanică

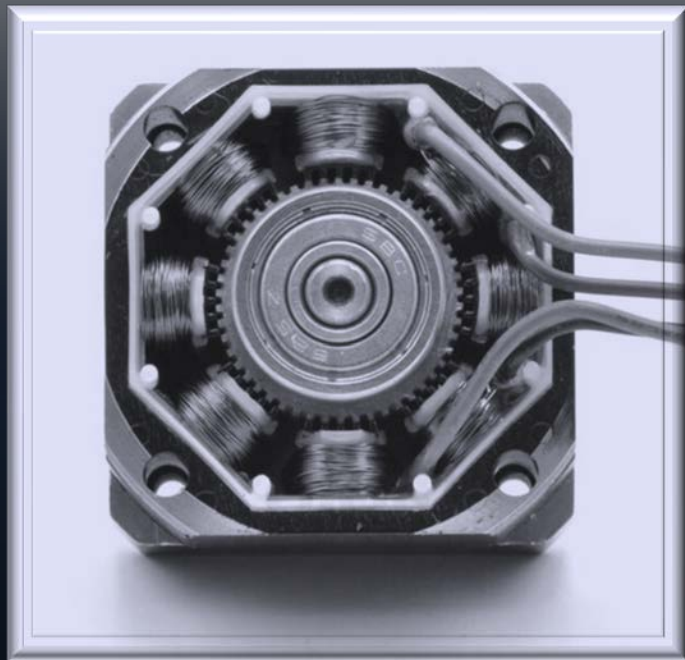
Funcționarea BLDC permite menținerea constantă a cuplului dezvoltat pentru întreaga plajă de variație a vitezei în limitele $0-n_{nom}$ (zona 1). Funcționarea este de tip nelimitat.

Peste limita de turație nominală este necesară o diminuare a cuplului (proporțional cu creșterea vitezei) pentru funcționarea de tip nelimitat (zona 2).

La valori mai mari ale cuplului (peste valoarea nominală), funcționarea este de tip intermitent și presupune scăderea turației sub valoarea sa nominală (zona 3).



Motorul pas cu pas

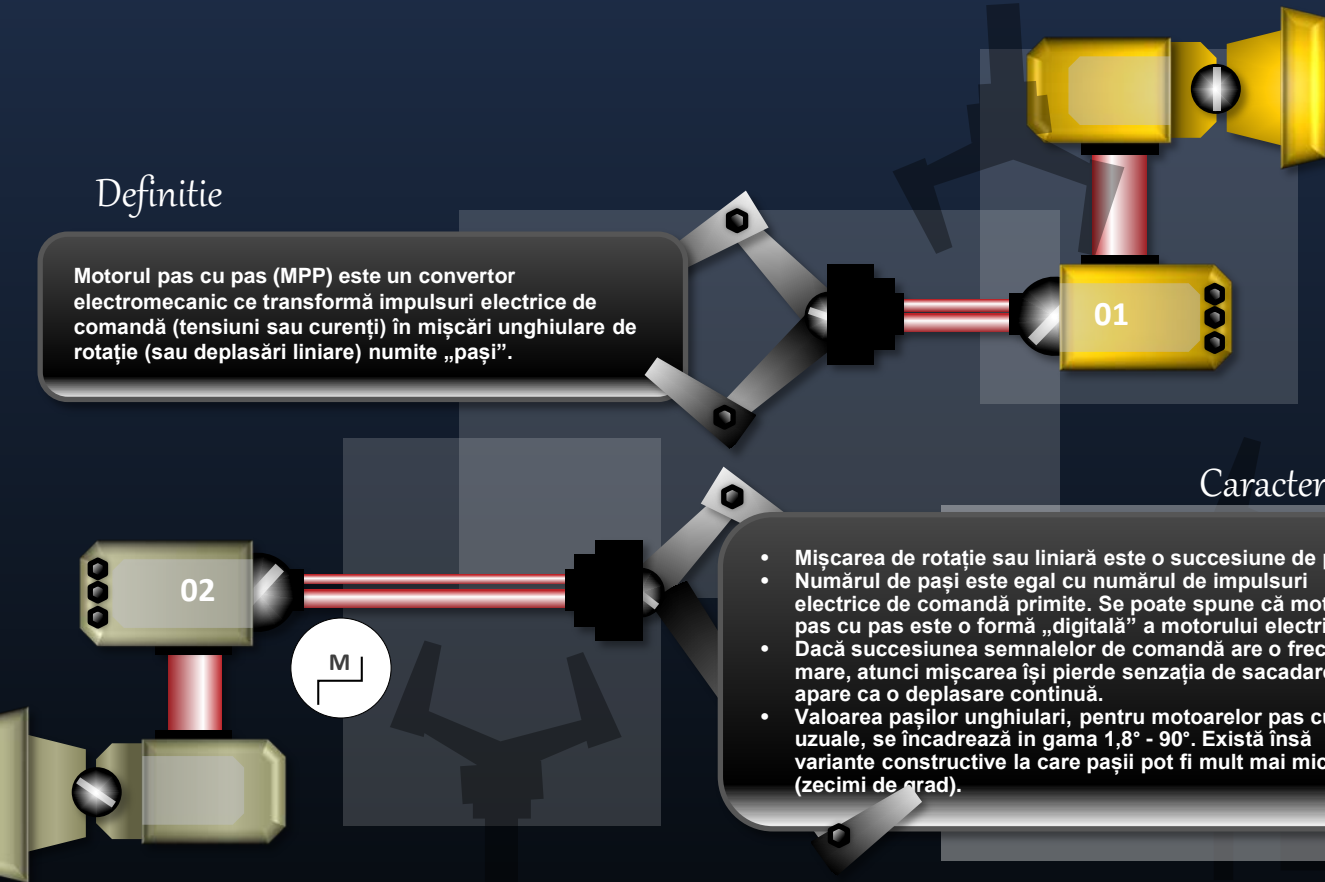


Definitie

Motorul pas cu pas (MPP) este un convertor electromecanic ce transformă impulsuri electrice de comandă (tensiuni sau curenți) în mișcări unghiulare de rotație (sau deplasări liniare) numite „pași”.

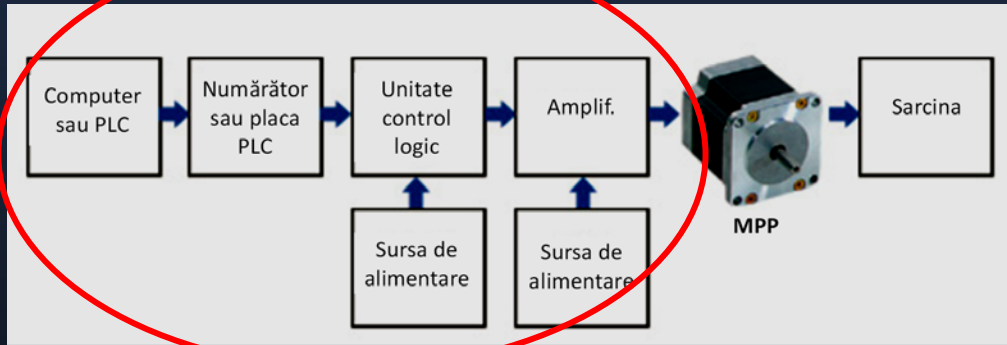
Caracteristici

- Mișcarea de rotație sau liniară este o succesiune de pași.
- Numărul de pași este egal cu numărul de impulsuri electrice de comandă primite. Se poate spune că motorul pas cu pas este o formă „digitală” a motorului electric.
- Dacă succesiunea semnalelor de comandă are o frecvență mare, atunci mișcarea își pierde senzația de sacadare și apare ca o deplasare continuă.
- Valoarea pașilor unghiulari, pentru motoarele pas cu pas uzuale, se încadrează în gama $1,8^\circ - 90^\circ$. Există însă variante constructive la care pașii pot fi mult mai mici (zecimi de grad).



Schema bloc a unei acționări electrice cu MPP

Structura unui sistem cu MPP



1. **Computerul sau PLC-ul:** este „creierul” sistemului de acționare. El poate comanda atât MPP cât și restul acționării (de ex. toate comenzile necesare unui lift acționat de MPP).

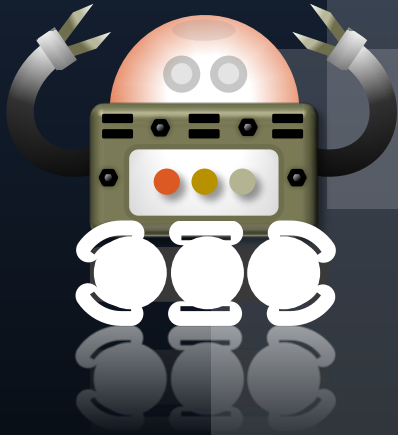
2. **Numărătorul sau placa PLC:** este cel care comandă numărul de pași și modifică frecvența de comandă pentru accelerare sau frânare.

3. **Următoarele patru unități reprezintă schema de comandă a motorului.** Unitatea de control logic decide fazele ce trebuie alimentate și succesiunea alimentării, în timp ce amplificatorul conține setul de tranzistoare ce alimentează efectiv fazele. Fiecare dintre cele două unități este alimentată de la o sursă de tensiune.

Tipuri constructive

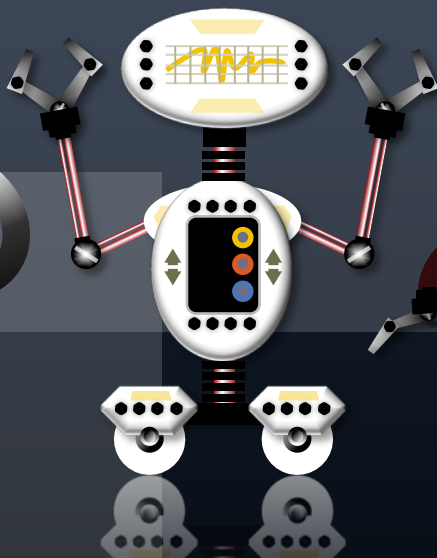
001

Motoare pas cu pas cu reluctanță variabilă



002

Motoare pas cu pas cu magneți permanenți

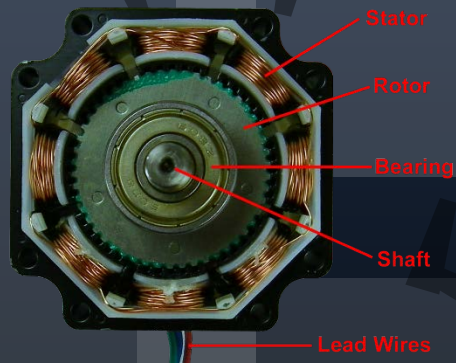
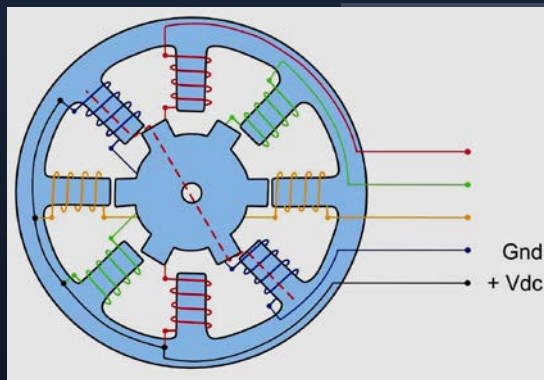


003

Motoare pas cu pas hibride

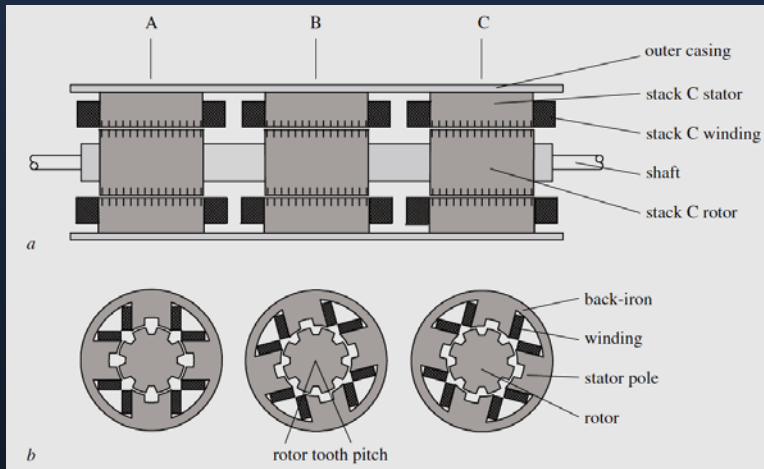


Motorul pas cu pas cu reluctanță variabilă



Satorul are poli aparenti pe care sunt prevazute infasurari de tip concentrat. Eventual, catre intrefier, pe poli pot exista dinti.

Rotorul este din material feromagnetic cu anizotropie de forma. Pe rotor NU exista nici infasurare nici magneti permanenti.



MPP cu reluctanță variabilă și trei pachete stator/rotor

a. secțiune longitudinală; b. secțiuni transversale

Cele trei rotoare au același număr de dinți și ocupă aceeași poziție axială (dinții sunt aliniați).

Cele trei statoare, care sunt identice, sunt decalate unghiular. Alimentarea unuia dintre cele trei statoare duce la alinierea cu dinții rotorului corespunzător. Pentru un sens de rotație se alimentează înfășurările în succesiunea A,B,C iar pentru sens invers A,C,B.

Unghiul de pas este: $360/3 \times 8 = 15^\circ$

Această soluție permite obținerea unui cuplu mai mare întrucât cuplul de reluctanță acționează asupra tuturor celor 8 dinți ai unui rotor



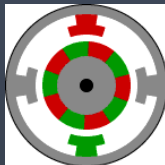
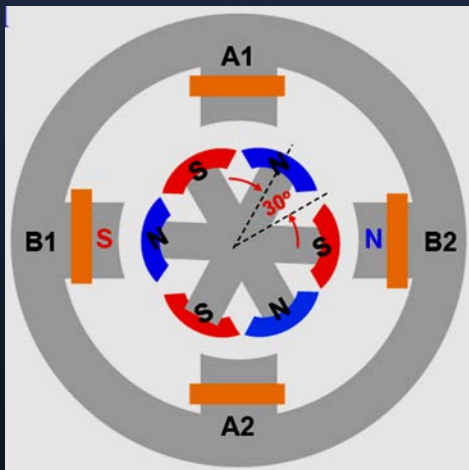
Calculul unghiului de pas

$$\text{Unghiul de pas} = \frac{360^\circ}{(\text{Numarul de dinti rotorici}) \times (\text{Numarul de faze statorice})}$$

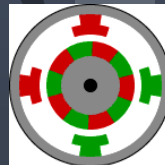
Calculul vitezei rotorului la MPP

$$\text{Turatia} = \frac{(\text{Frecventa impulsurilor de comanda}) \times 60}{(\text{Numarul de pasi pe rotatie})}$$

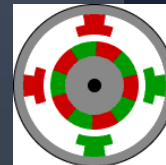
Motorul pas cu pas cu magneți permanenți



Motor bifazat
Comanda pe o
faza (Pas întreg)

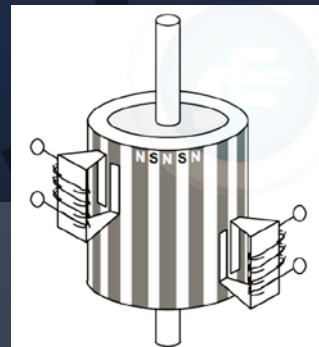
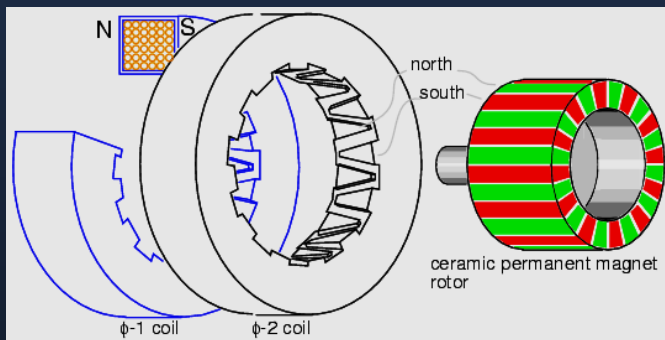


Motor bifazat
Comanda pe
ambele faze
(Pas întreg)



Motor bifazat
Comanda
combinata
(Pas pe jumătate)

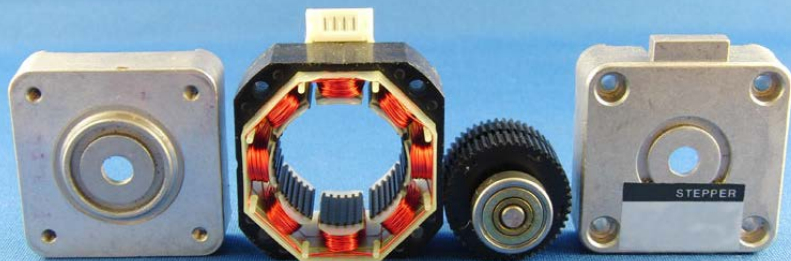
- Polii aparenti rotorici sunt echipați cu magneți permanenți pentru întărirea cuplului dezvoltat de motor (cuplul de reluctanță este înlocuit de cuplul de atracție mutuală).
- Unghiul de rotație este mai mare decât la motoarele de reluctanță sau hibride (precizie mai mică și viteză mai mare).
- În mod uzual, motoarele cu magneți permanenți au pasul de 30°, 15° și 7,5°.



Varianta de MPP cu MP cu magnetizare radială și număr mare de poli rotorici și două miezuri magnetice statorice

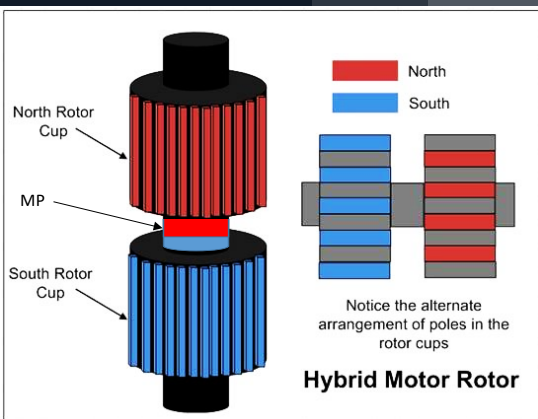


Motorul pas cu pas hibrid



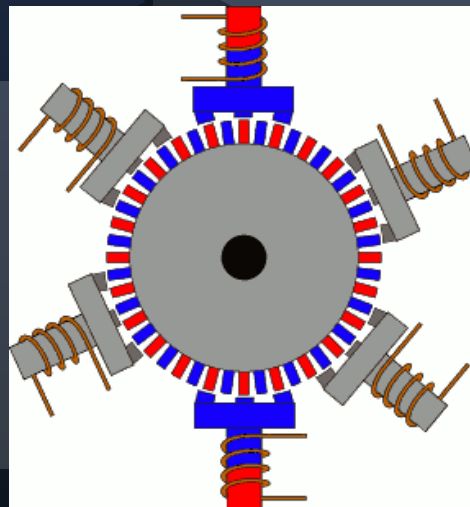
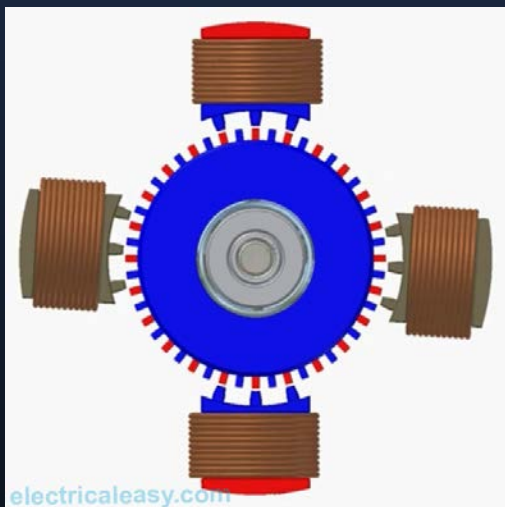
Mașina hibridă folosește atât principiul construcției cu reluctanță variabilă cât și prezența magneților permanenți.

Pe același ax sunt plasate două rotoare având același număr de dinți, dar decalate între ele.



Pe axul mașinii, între cele două rotoare este poziționat un magnet permanent astfel încât, unul dintre rotoare se magnetizează cu polaritate N iar celălalt cu polaritate S. Practic, dinții fiecărui rotor devin magneți permanenți.

Motorul hibrid beneficiază de avantajul prezenței magnetului permanent care determină un cuplu mai mare și de avantajul construcției anizotrope ce permite un pas unghiular mai mic.

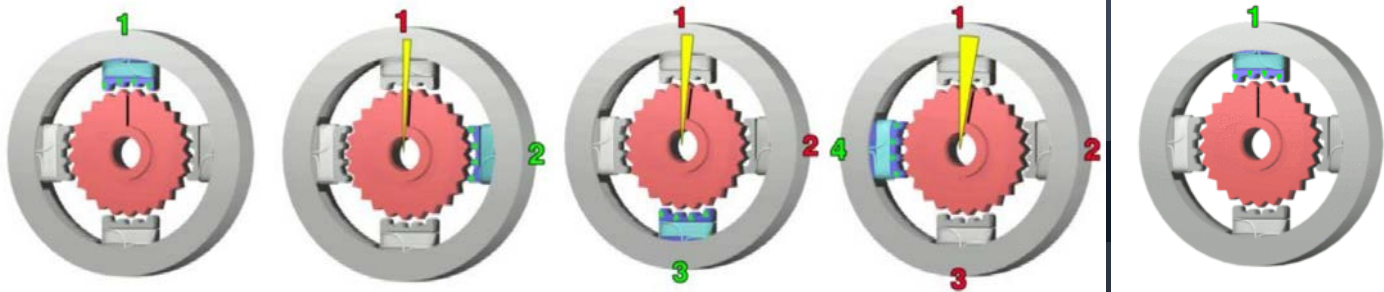


MPP cu excitație hibrida și rotor dublu

Principiul de funcționare al MPP

Statorul este prevăzut cu poli pe care sunt plasate înfășurări de comandă de tip concentrat.

La alimentarea unei înfășurări, rotorul execută o mișcare de rotație (numită „pas”) pentru a se plasa în poziția de reluctanță minima (**PRINCIPIUL RELUCTANTEI VARIABLE**). De exemplu, la alimentarea înfășurării de pe polul 1, rotorul se poziționează astfel încât dinții rotorici sunt față în față cu dinții statorici de pe polul 1. Pentru ceilalți 3 poli, care sunt nealimentați, dinții statorici și rotorici NU stau perfect aliniați.



Următorul impuls de comandă, ce se aplică unei alte înfășurări, va roti rotorul cu un nou pas, s.a.m.d. În cazul exemplului figurat, se alimentează înfășurarea de pe polul 2 iar înfășurarea de pe polul 1 este deconectată. Dinții rotorici se vor alinia acum cu cei ai polului 2.

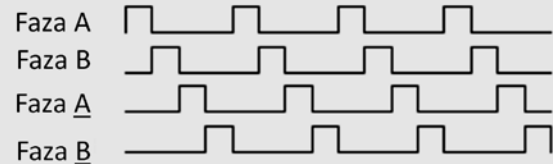
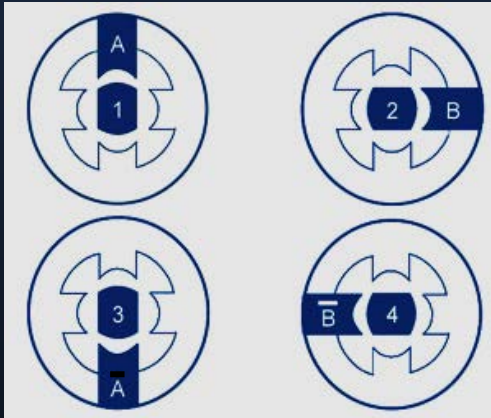
În funcție de frecvența aplicării impulsurilor de comandă se stabilește viteza motorului.

Unghiul de pas, pentru structura prezentată, este: $360^\circ/25 \times 4 = 3,6^\circ$.

Pentru exemplul figurat, cuplul dezvoltat de motor are doar **COMPONENTA DE RELUCTANȚĂ**.

Tehnici de comanda a MPP

I. Comanda pe o singură bobină („Wave drive”)

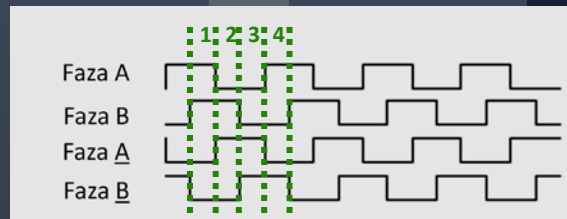
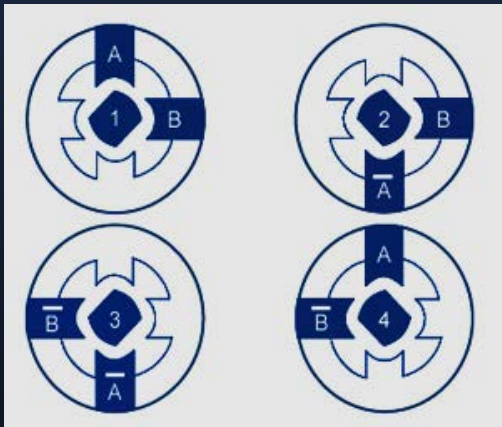


Succesiunea semnalelor de comanda pe fiecare faza în parte

Fiecare bobină este alimentată individual, succesiv. Succesiunea alimentării este dictată de sensul de rotație dorit.

Cuplul dezvoltat de motor este relativ redus (în comparație cu celelalte metode de comandă).

II. Comanda pe două bobine („Full step” drive)

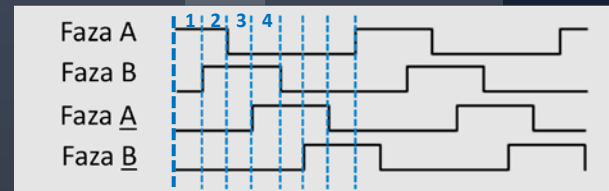
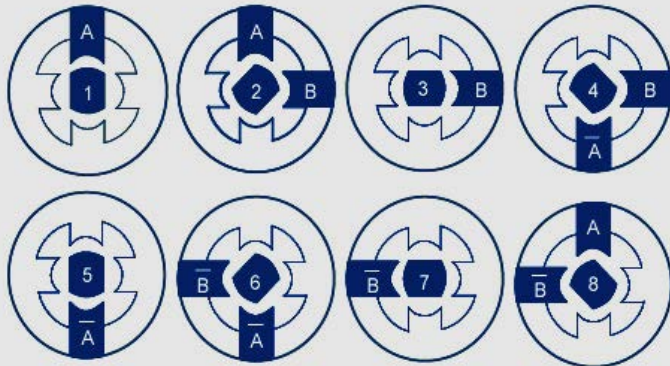


Successiunea semnalelor de comanda pe fiecare faza in parte

Simultan sunt alimentate câte doua bobine. In cazul din figură, câmpul rezultat maxim are axa între polii aparenti statorici, determinând orientarea rotorului după aceasta direcție. O rotire completă a rotorului necesită 4 pași a câte 90° fiecare.

Dacă bobinele alimentate sunt în poziție opusă atunci rotorul se va alinia cu polii statorici la fiecare pas efectuat. Mișcarea rotorului este însă identică.

III. Comanda combinata („Half step” drive)

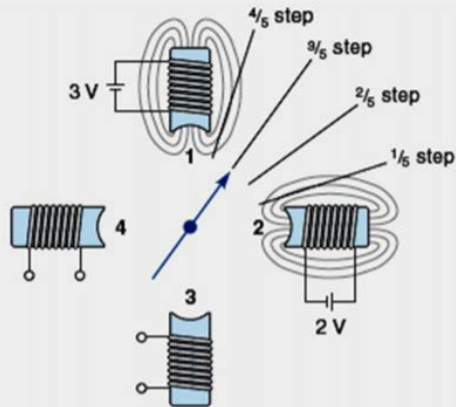


Sunt combinate comanda pe o bobină cu comanda pe două bobine.

Pentru o rotație completă este necesar un număr dublu de pași.

Se obține o turație mai mică FĂRĂ a se modifica frecvența impulsurilor de comandă.

IV. Comanda pentru micropășire („Microstepping” drive)



(a)

Pole 1	Pole 2	Position
5 V	0 V	Pole 1 (full step)
4 V	1 V	$4/5$ step
3 V	2 V	$3/5$ step
2 V	3 V	$2/5$ step
1 V	4 V	$1/5$ step
0 V	5 V	Pole 2 (full step)

(b)

În primul pas se alimentează bobina 1 la tensiunea maximă de alimentare (în ex – 5V). Rotorul se aliniază cu bobina 1.

În pasul doi se diminuează valoarea tensiunii pe bobina 1 (de ex la 4 V) și se alimentează și bobina 2 cu o tensiune mică (de ex 1 V). Axa câmpului rezultat se rotește în sens orar ceea ce determină și rotirea rotorului cu același unghi.

Pasul trei presupune scăderea tensiunii pe bobina 1 și creșterea tensiunii pe bobina 2 conform tabelului din fig. b. Are loc o nouă rotire a rotorului.

Procedura continuă după aceeași logică până la pasul la care tensiunea de alimentare a bobinei 1 devine zero iar pe bobina 2 se aplică tensiunea maximă.

Se obține o divizare a pasului cu 5.

Presupune alimentarea cu impulsuri de tensiune diferită a bobinelor de comandă.

Fluxul rezultat creat își modifică direcția, în funcție de ponderea celor doi curenți de comandă, cu unghiuri mici, ce determină rotirea rotorului, în același fel.

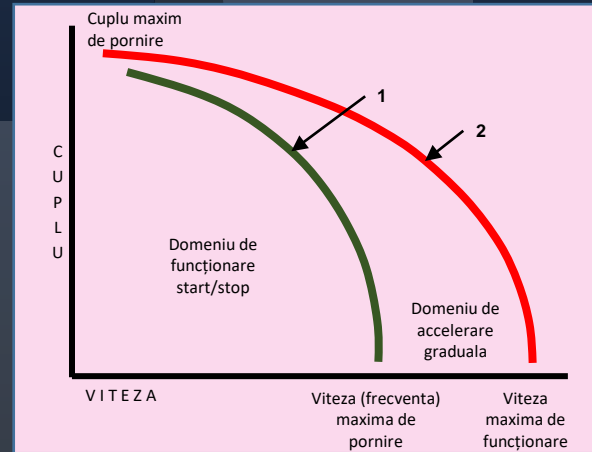
Caracteristica mecanică - domenii de funcționare -

1 - Caracteristica limita de pornire („Pull-in torque curve”) – este caracteristica de cuplu maxim pentru care motorul poate porni, opri sau schimba de sens, funcționând fără pierdere de pași. Peste limita fixată de această curbă, motorul nu poate porni și nu își poate schimba instantaneu sensul de rotație.

2 - Caracteristica limita de mers („Pull-out torque curve”) – este caracteristica de cuplu maxim, pentru o anumită viteză, pe care motorul îl poate dezvolta în timpul funcționării la sincronism. Peste această curbă, motorul se oprește.

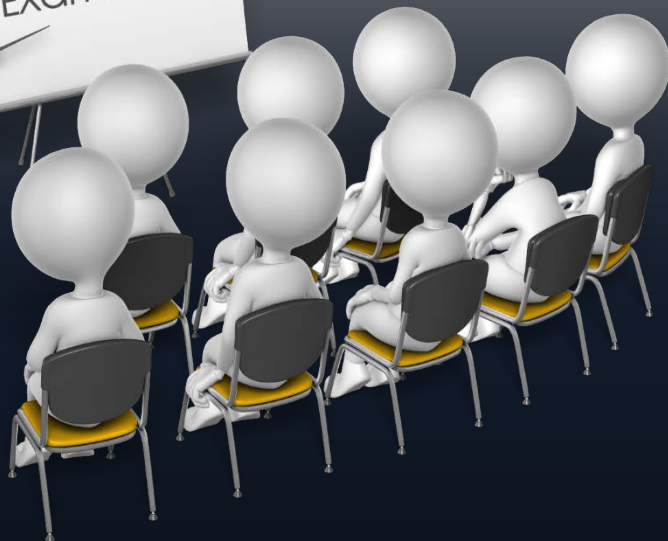
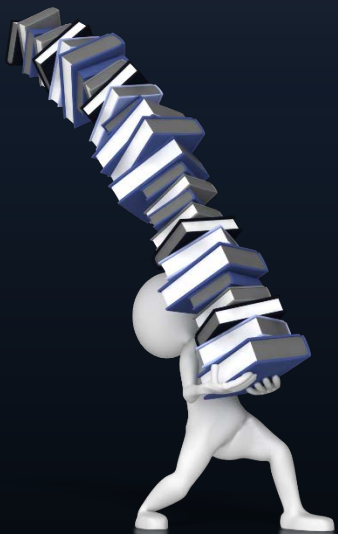
Domeniul de funcționare start/stop – este domeniul de sub curba 1 unde, pentru orice cuplu de sarcină din această regiune, motorul poate porni, opri sau inversa instantaneu sensul de rotație, fără pierdere de pași.

Domeniul de accelerare graduală („slew range”) – este regiunea dintre curbele 1 și 2 unde, pentru a se menține sincronismul, modificarea vitezei trebuie făcută gradual.



MASINI ELETTRICHE

Examen



PRODUCER and PERFORMER

