

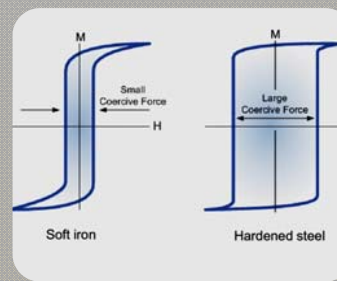
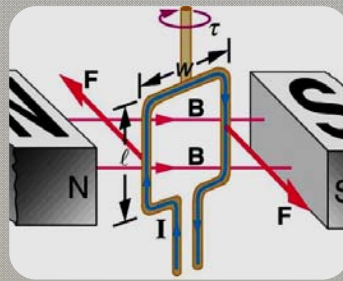
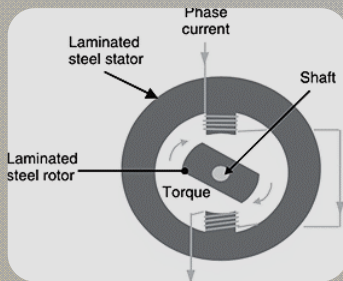


ELEMENTE INTRODUCTIVE

CURS 1



Cuprins:



Principii de
funcționare

Producerea
cuplului
electro-
magnetic in
mașinile cu
flux radial

Materiale
moderne
utilizate in
construcția
mașinilor
electrice

Magneți
permanenți



Mașinile electrice speciale:

Sunt mașini electrice destinate, de regulă, utilizării în sisteme complexe de acționare, sisteme automate sau aplicații neconvenționale. 1

În mare măsură se diferențiază, din punct de vedere constructiv, de structura mașinilor electrice „clasice”. 2

Caracteristicile de funcționare sunt întotdeauna adaptate și modificate scopului acționării electrice în care sunt integrate. 3

Adeseori trebuie să îndeplinească particularități de funcționare care, de regulă, nu sunt formulate în legătura cu mașinile electrice „clasice”. 4

Beneficiază, din punct de vedere constructiv, de dezvoltarea tehnologiilor moderne și de apariția unor noi materiale cu caracteristici superioare. 5



PRINCIPIUL INDUCȚIEI ELECTROMAGNETICE



PRINCIPIUL RELUCTANȚEI VARIABLE
(principiul anizotropiei de forma)



PRINCIPIUL HISTEREZISULUI

PRINCIPIUL INDUCȚIEI ELECTROMAGNETICE

FARADAY

LENZ

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

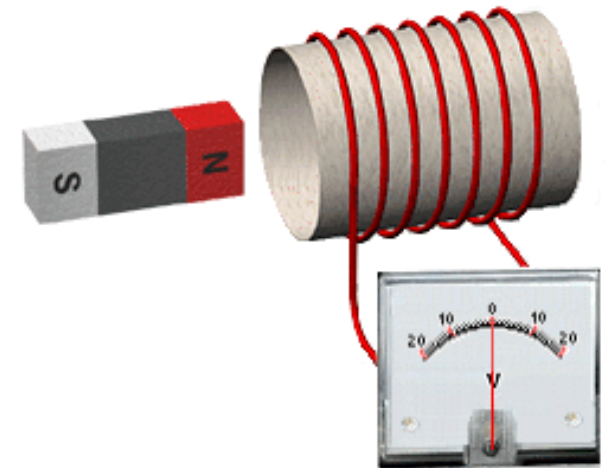
$$k = -1$$

$$e = - \frac{d\phi}{dt}$$

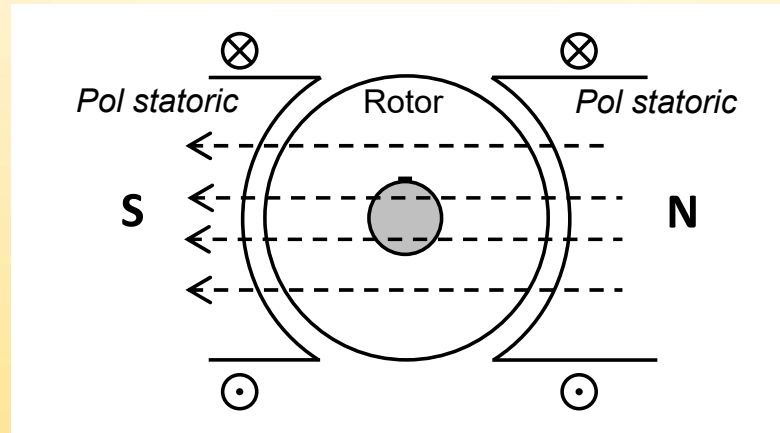
Forma globala (integrala)

$$e = \frac{d\phi_{S_\Gamma}}{dt} = - \int_{S_\Gamma} \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \cdot \partial \bar{A} + \oint_\Gamma (\bar{v} \times \bar{B}) d\bar{r} = e_t + e_d$$

Faradays Law of Induction

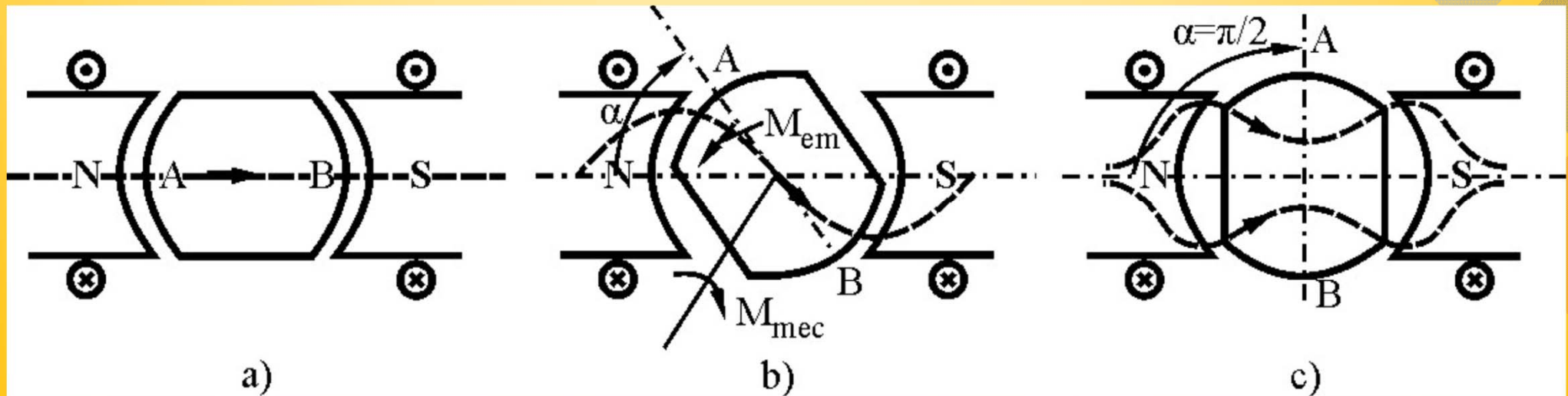


PRINCIPIUL RELUCTANȚEI VARIABILE (principiul anizotropiei de forma)



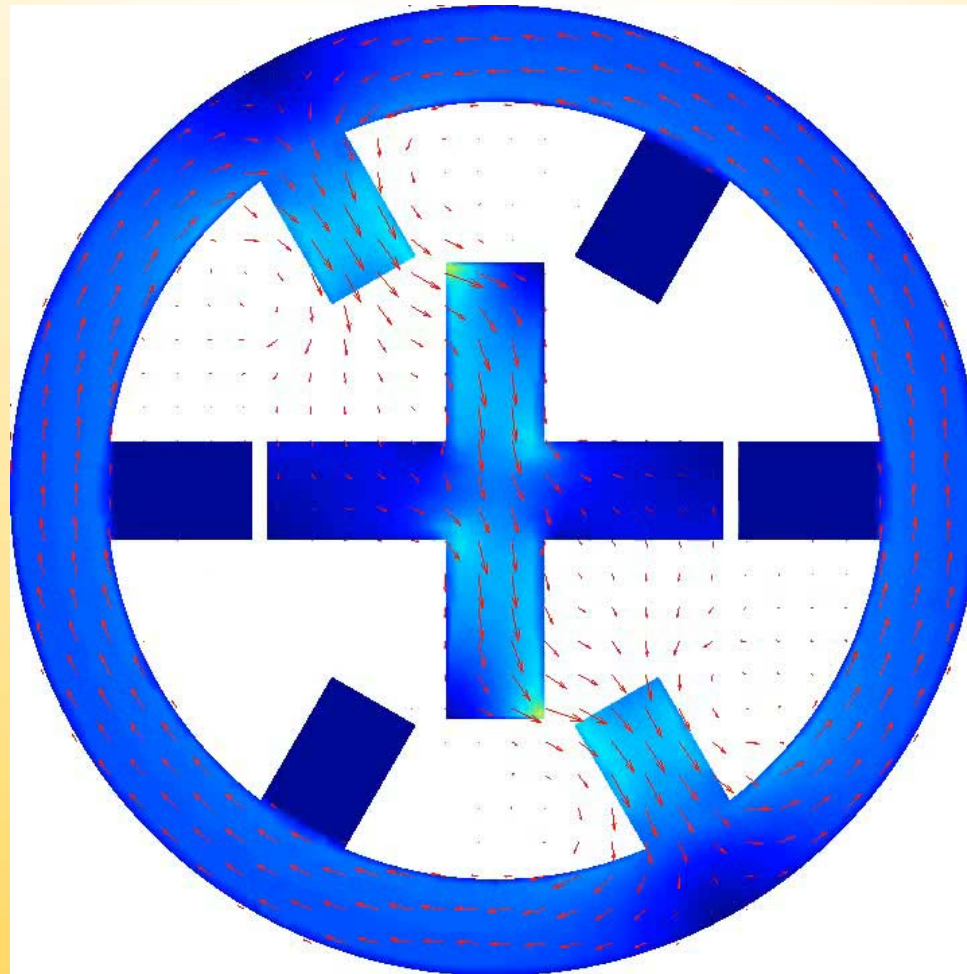
$$\mathcal{R} = \frac{U_m}{\Delta\Phi}$$

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu \cdot A}$$



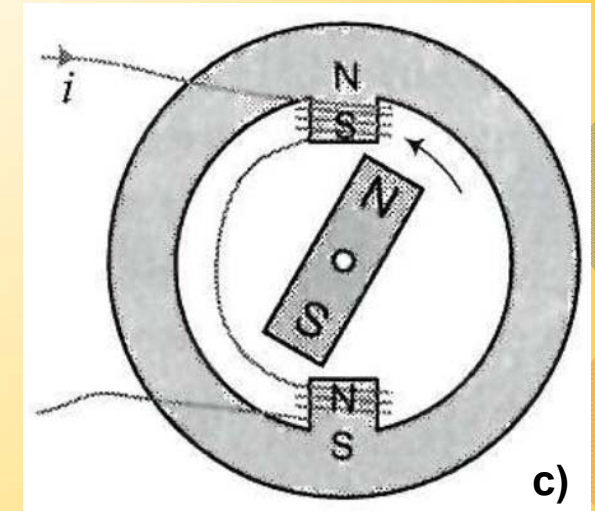
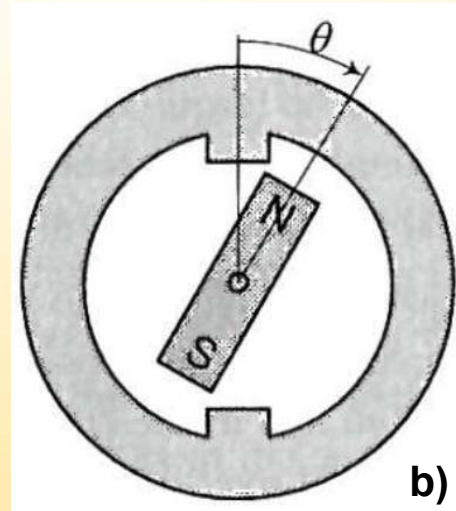
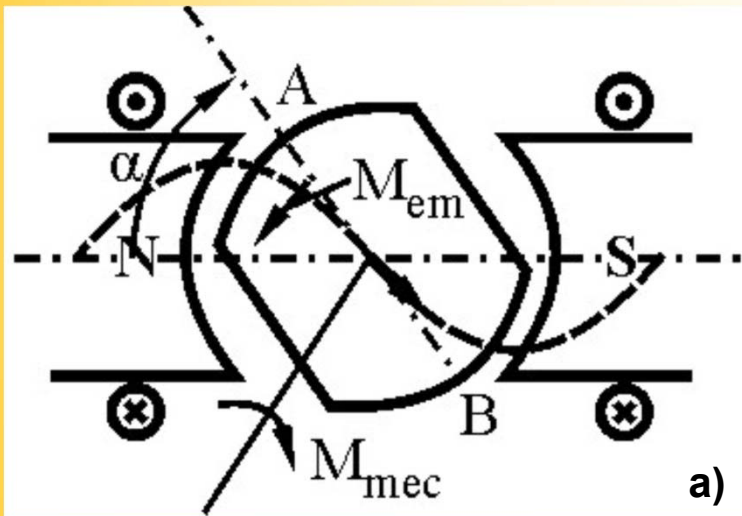
Principiul reluctanței variabile:

- a. Rotorul trebuie să aibă două axe de simetrie distincte.**
- b. În mod natural, rotorul tinde să ocupe poziția de reluctanță minimă (poziția în care liniile de câmp se închid „cel mai ușor”).**
- c. Când polii statorici și rotorici sunt aliniați, rotorul se află în poziție de echilibru stabil și tinde să rămână în această poziție.**
- d. Dacă există un unghi între cele două armături (fig. b) atunci apare un cuplu electromagnetic ce rotește rotorul către poziția de echilibru stabil.**
- e. Când unghiul între axele longitudinale ale celor două armături este de 90° (fig. c), atunci rotorul rămâne într-o poziție de echilibru instabil. Orice perturbație exterioară îl scoate din această poziție și îl trimite în poziția de echilibru stabil.**



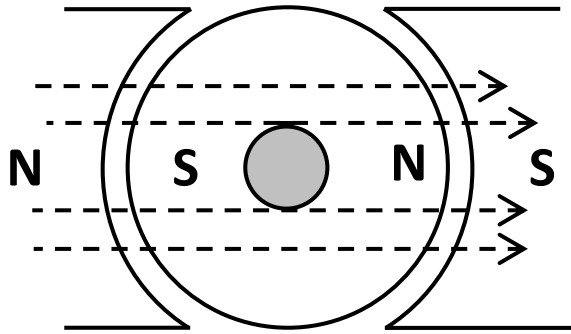
Principiul reluctanței variabile - animație



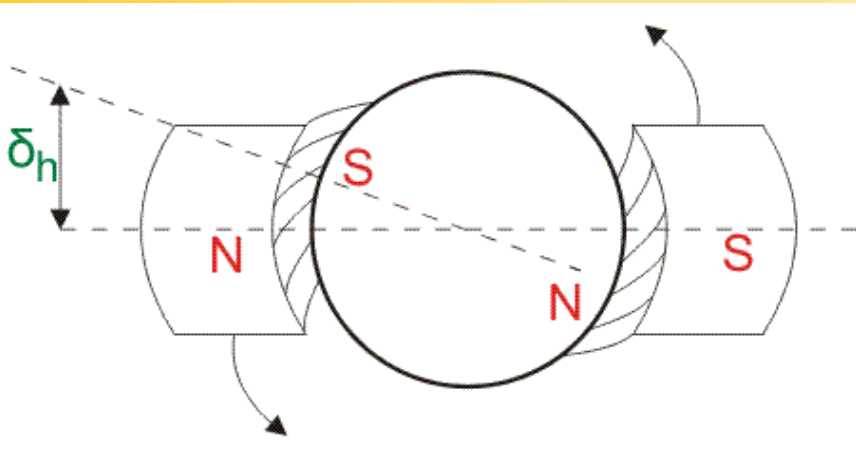


a)	b)	c)
Poli statorici - electromagneți	Poli statorici – miez feromagnetic	Poli statorici - electromagneți
Rotor anizotrop	Rotor anizotrop	Rotor anizotrop
Poli rotorici – miez feromagnetic simplu	Poli rotorici – magnet permanent	Poli rotorici – magnet permanent
Cuplu de reluctanță (reluctance torque)	Cuplu de reluctanță (reluctance torque)	Cuplu de atracție mutuală (alignement torque)

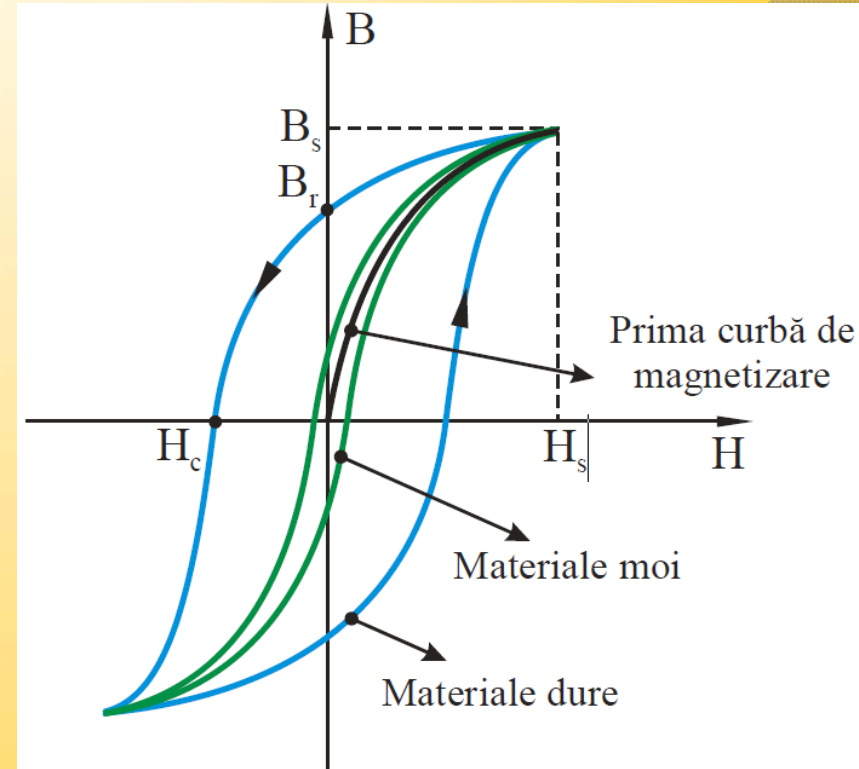
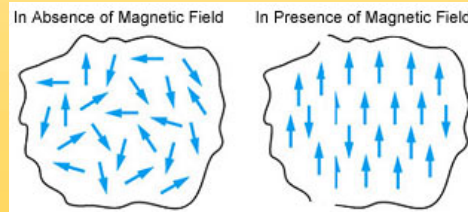
PRINCIPIUL HISTEREZISULUI



Poli satorici ficși

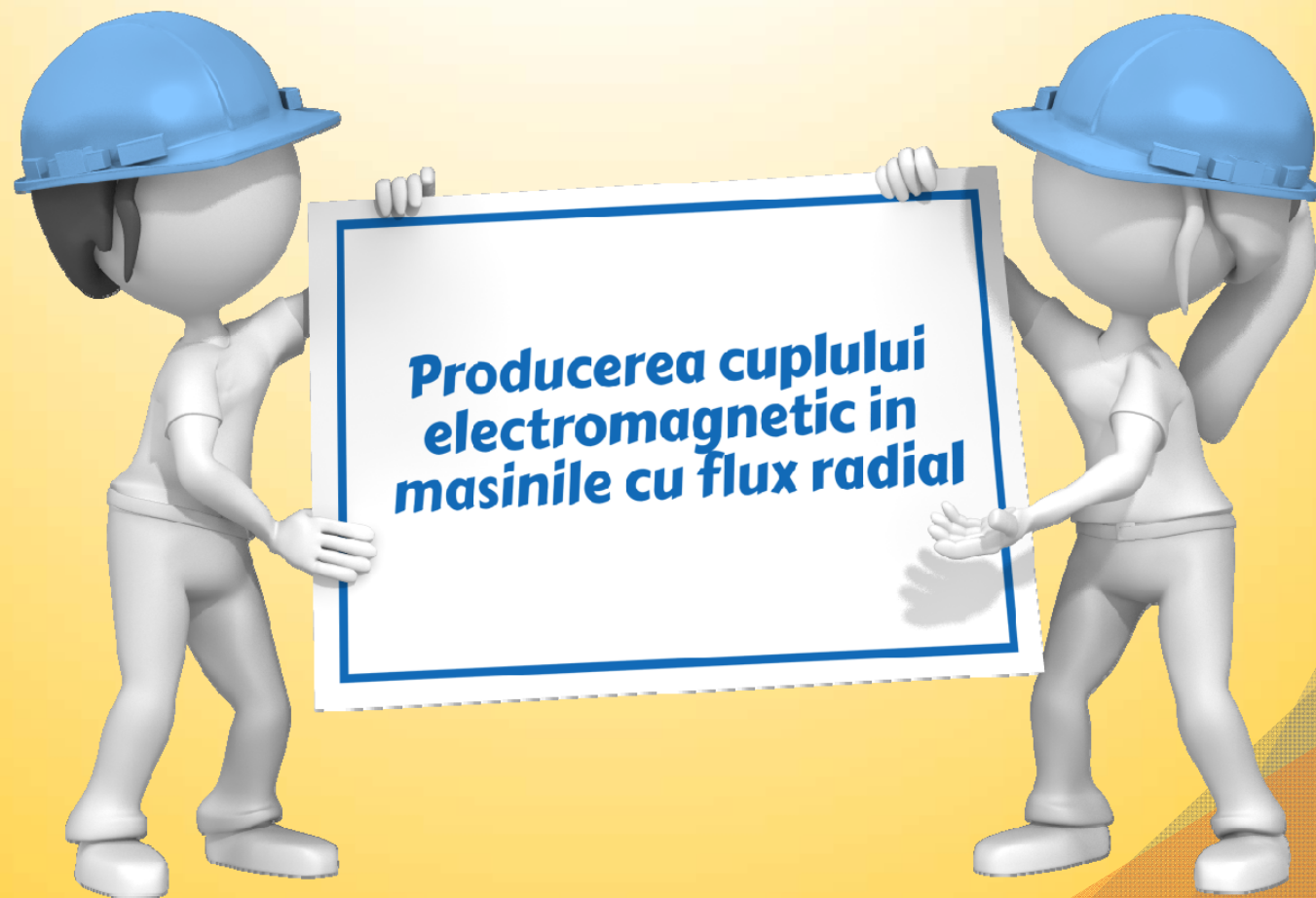


Poli satorici rotitori

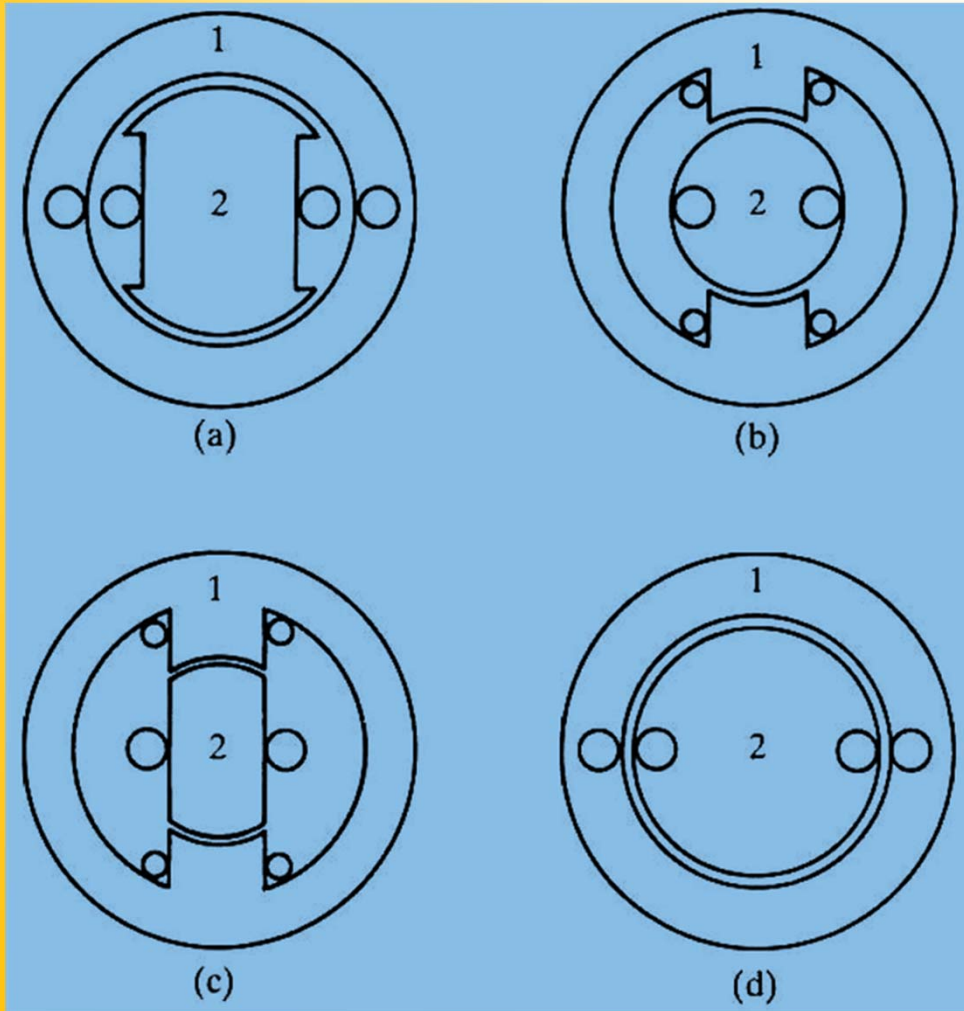


Principiul HISTEREZISULUI:

- a. Rotorul se realizează total sau parțial din material feromagnetic cu ciclu de histerezis lat.**
- b. Dacă statorul creează un câmp magnetic alternativ, rotorul se magnetizează cu o anumită „întârziere”.**
- c. Dacă polii statorici se rotesc, apare un unghi de decalaj (δ_h) între axa polilor statorici și axa polilor rotorici.**
- d. Polii rotorici tind să urmărească polii statorici de polaritate opusă.**



**Producerea cuplului
electromagnetic in
masinile cu flux radial**

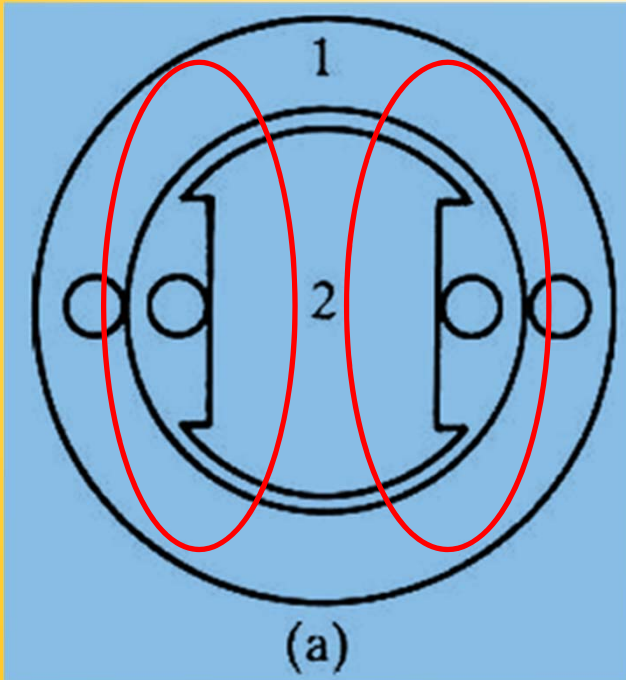


Se consideră cazul general al unei mașini având înfășurare atât pe stator (1) cât și pe rotor (2). Cuplul electromagnetic total este dat de relația:

$$M_e = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1}{d\theta} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_2}{d\theta} + i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{d\theta}$$

unde: i_1 , i_2 sunt curenții prin cele două înfășurări; L_1 , L_2 , inductanțele proprii ale celor două înfășurări; L_{12} – inductanța mutuală, θ - coordonata unghiulară.

Primele două componente reprezintă cupluri de reluctanță iar ultima componentă este cuplu de atracție mutuală.



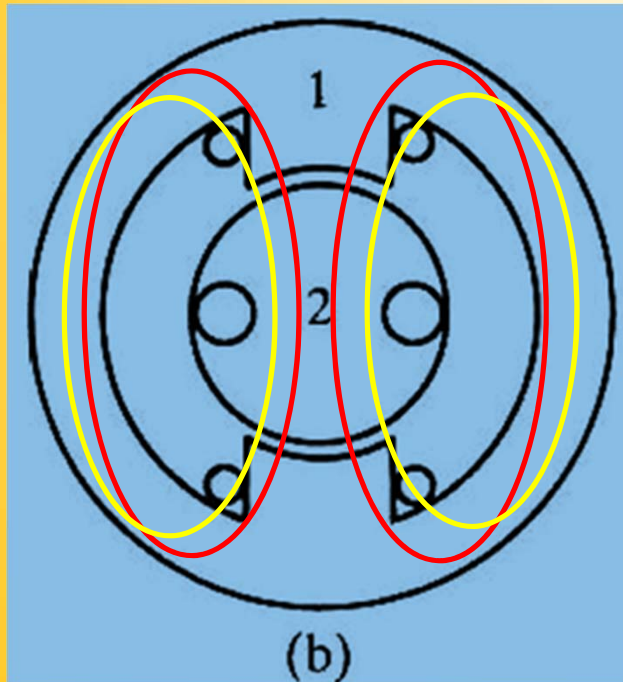
Mașină cu stator neted și rotor cu anizotropie de formă.

Dacă se alimentează înfășurarea *statorică* atunci câmpul format determină poziționarea rotorului pe poziția de reluctanță minimă (axa longitudinală a rotorului se suprapune peste axa polilor statorici). Se manifestă un cuplu de reluctanță.

Dacă se alimentează numai înfășurarea *rotorică* atunci rotorul se polarizează N-S însă nu se manifestă un cuplu electromagnetic.

Pentru a se manifesta ca mașină electrică rotativă (adică producere continuă de cuplu), trebuie ca înfășurarea statorică să producă un câmp magnetic învârtitor (înfășurare polifazăată). În acest caz, rotorul tinde să urmărească polii câmpului inductor și se rotește cu viteza de sincronism. Este cazul motorului sincron cu reluctanță variabilă.

Dacă se alimentează și înfășurarea rotorică, aceasta se poate face numai în c.c. sau se pot folosi magneți permanenți. Polii rotorici tind să urmărească polii câmpului învârtitor statoric. Se manifestă atât o componentă de reluctanță cât și o componentă de cuplu de atracție mutuală. Este cazul motorului sincron cu poli aparenti.



Situația b) este inversul cazului a).

Dacă se alimentează numai înfășurarea *statorică* nu se manifestă nici un cuplu asupra rotorului.

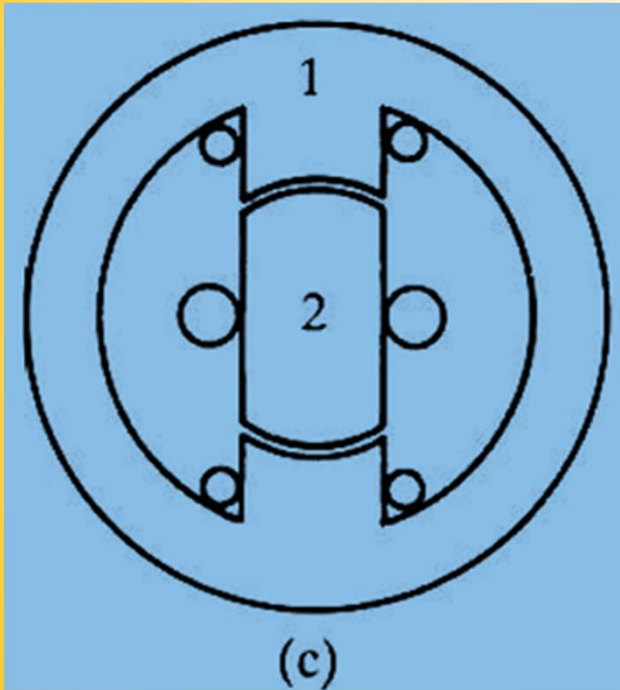
Pentru a se manifesta ca mașină electrică rotativă (adică producere continuă de cuplu), trebuie ca înfășurarea *rotorică* să producă un câmp magnetic învârtitor (înfășurare polifazată), iar statorul să fie alimentat în c.c. În acest caz, rotorul trebuie să se rotească în sens invers câmpului magnetic învârtitor cu viteza de sincronism astfel încât, față de câmpul statoric, acesta este fix. Este cazul motorului sincron în construcție inversată.

Modelul b) poate fi asimilat și mașinii de c.c. dacă înfășurarea statorică este alimentată în c.c. iar înfășurarea rotorică, conectată la colector+perii este parcursă de curenți ce își păstrează sensul în dreptul polilor statorici.

Dacă înfășurarea rotorică este înlocuită cu MP, iar înfășurarea statorică este alimentată secvențial cu pulsuri de c.c. atunci structura b) reprezintă simplificat „motorul de c.c. fără perii” - BLDC.

Mașină cu stator cu poli aparenti (cu anizotropie de formă) și rotor neted

- Câmp statoric
- Câmp rotoric



Mașină cu stator cu poli aparenti (cu anizotropie de formă) și rotor cu anizotropie de formă

Situația c) reprezintă mașina cu *poli aparenti* („double saliency”) pe ambele armături.

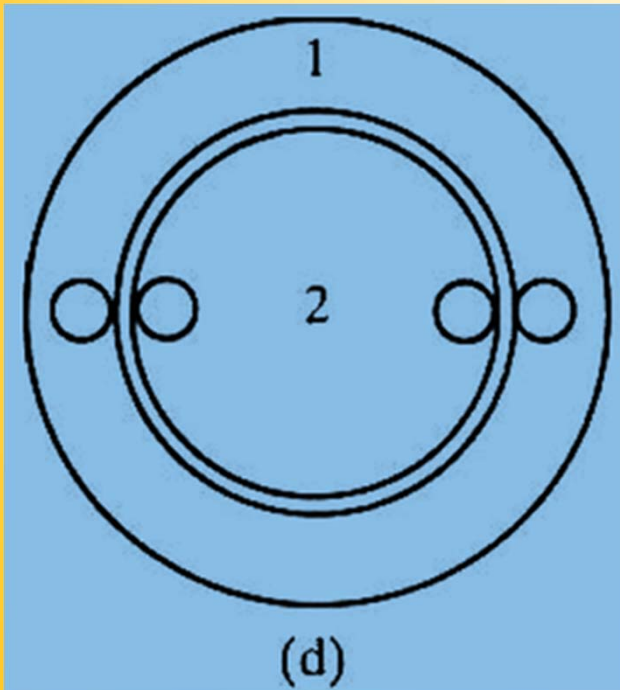
Dacă se alimentează oricare dintre înfășurări apare un cuplu de reluctanță.

Când ambele înfășurări sunt alimentate simultan apare cuplul de atracție mutuală.

Variantele constructive cele mai simple exclud înfășurarea rotorică. Este cazul motoarelor pas cu pas sau motoarelor cu reluctanță comutată - SRM.

Înfășurarea rotorica poate fi substituită de rotor cu magneți permanenți. În acest fel se elimină sistemul inele-perii necesar alimentării înfășurării rotorice. Este cazul motoarelor pas cu pas hibride.

Pentru acest tip de structură este necesar un sistem electronic de comandă a înfășurării statorice .



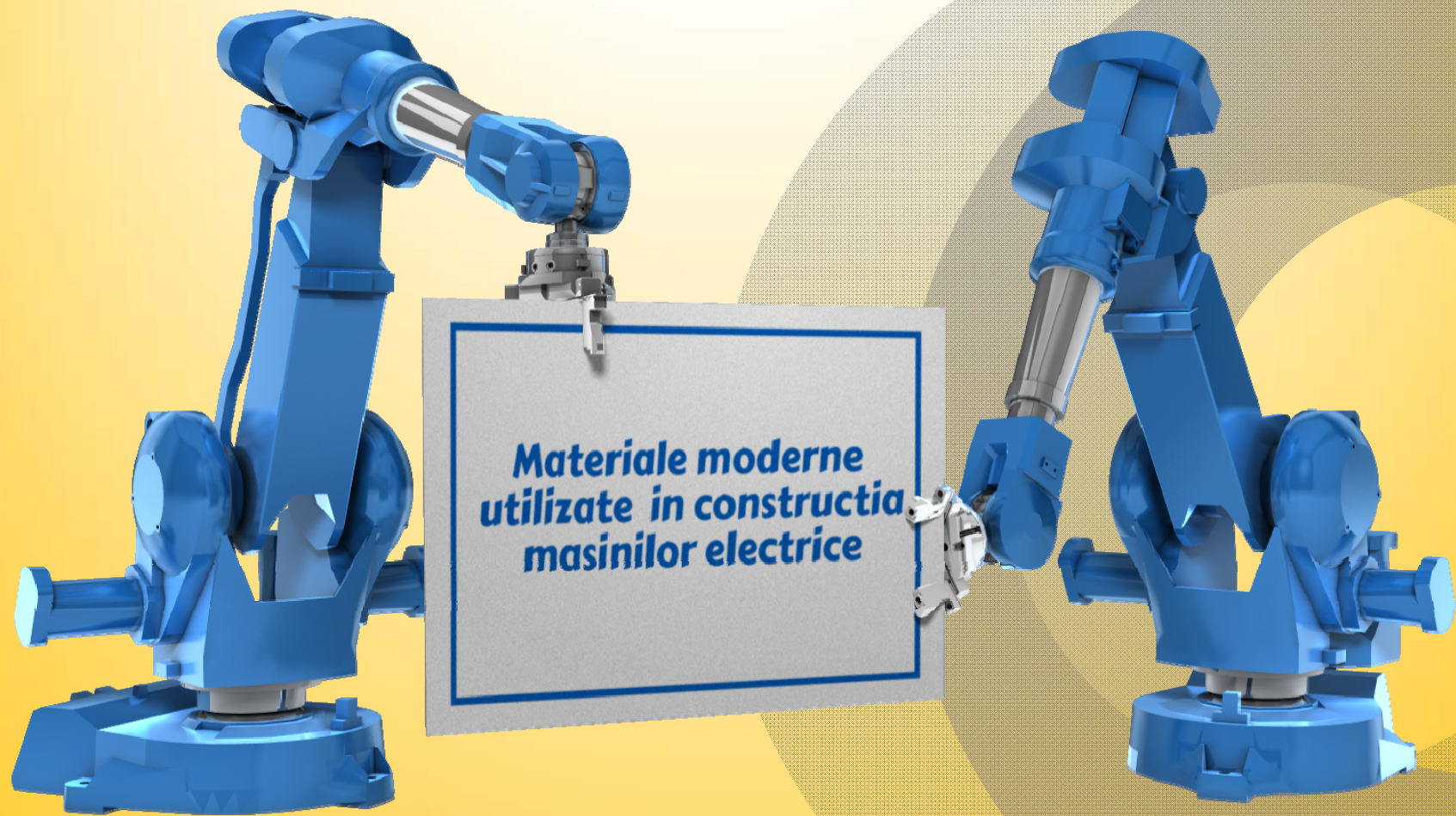
Cazul d) reprezintă mașina cu *întrefier neted*. Aceasta poate dezvolta **numai** cuplu de atracție mutuală.

Dacă ambele înfășurări sunt polifazate, avem cazul mașinii asincrone.

În cazul în care una din înfășurări este polifazată și cealaltă este de c.c., avem cazul mașinii sincrone cu poli înecați. De regulă, înfășurarea statorică este polifazată și înfășurarea rotorică este alimentată în c.c.

Înfășurarea de c.c. poate fi înlocuită cu magneți permanenți. Este cazul mașinii sincrone fără perii, cu magneți permanenți (brushless PM motor).

Mașină cu stator neted și rotor neted



**Materiale moderne
utilizate in constructia
masinilor electrice**

CLASIFICARE

$$\overline{B} = \mu \cdot \overline{H} \quad \mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

$$\mu_r < 1$$



DIAMAGNETICE

$$\mu_r > 1$$

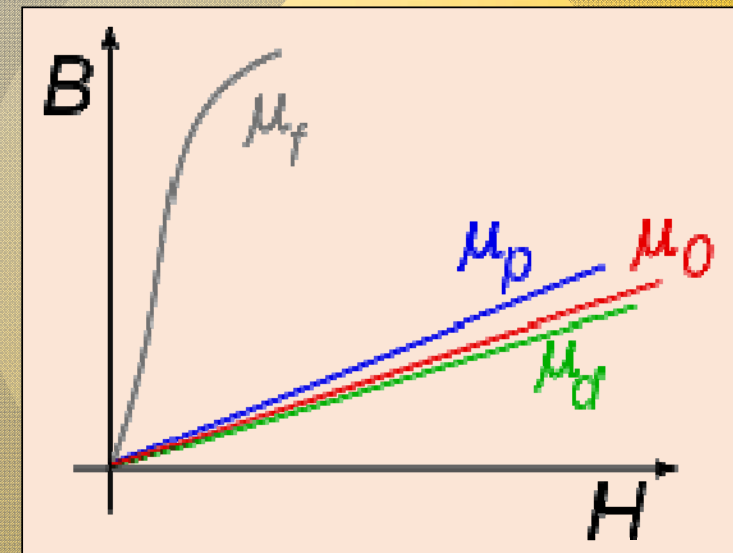


PARAMAGNETICE

$$\mu_r \gg 1$$



FEROMAGNETICE



$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$



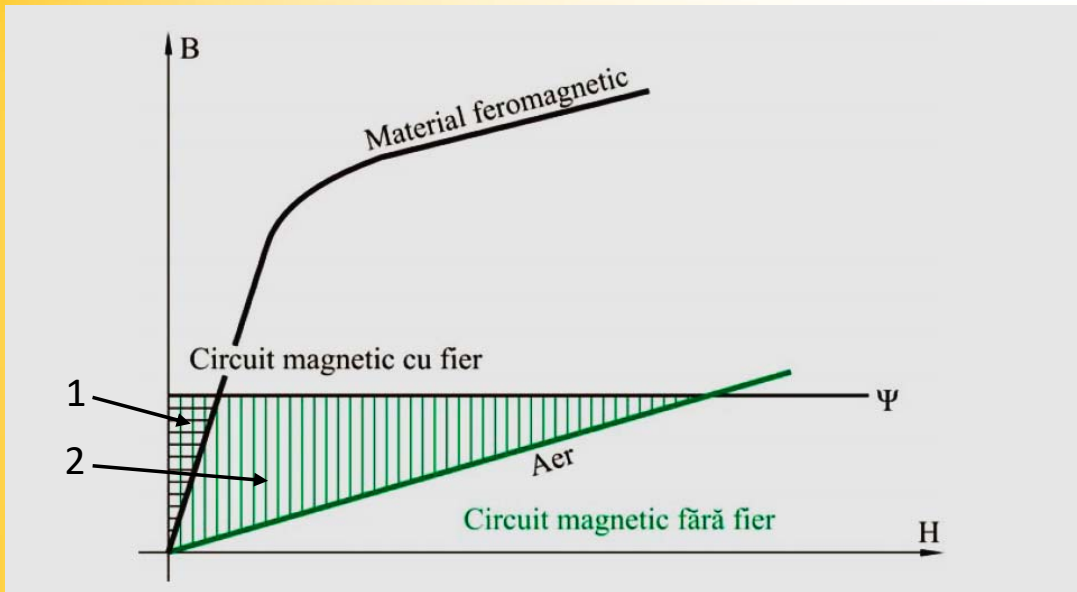
- Permeabilitate magnetică mai mică decât a vidului dar apropiată de aceasta
- Când sunt introduse în câmp magnetic sunt ușor respinse
- argint, cupru, zinc, sulf, fosfor, siliciu



- Permeabilitate magnetică ceva mai mare decât a vidului dar apropiată de aceasta
- Când sunt introduse în câmp magnetic sunt ușor atrase
- oxigen, seleniu, titan, crom, vanadiu, pământuri rare



- Permeabilitate magnetică mult mai mare decât a vidului
- Magnetizarea are loc după un *ciclu de histerezis*
- aliaje de Fe, oțeluri, fonte



Energia magnetică specifică unității de volum pentru materiale feromagnetice și neferomagnetice

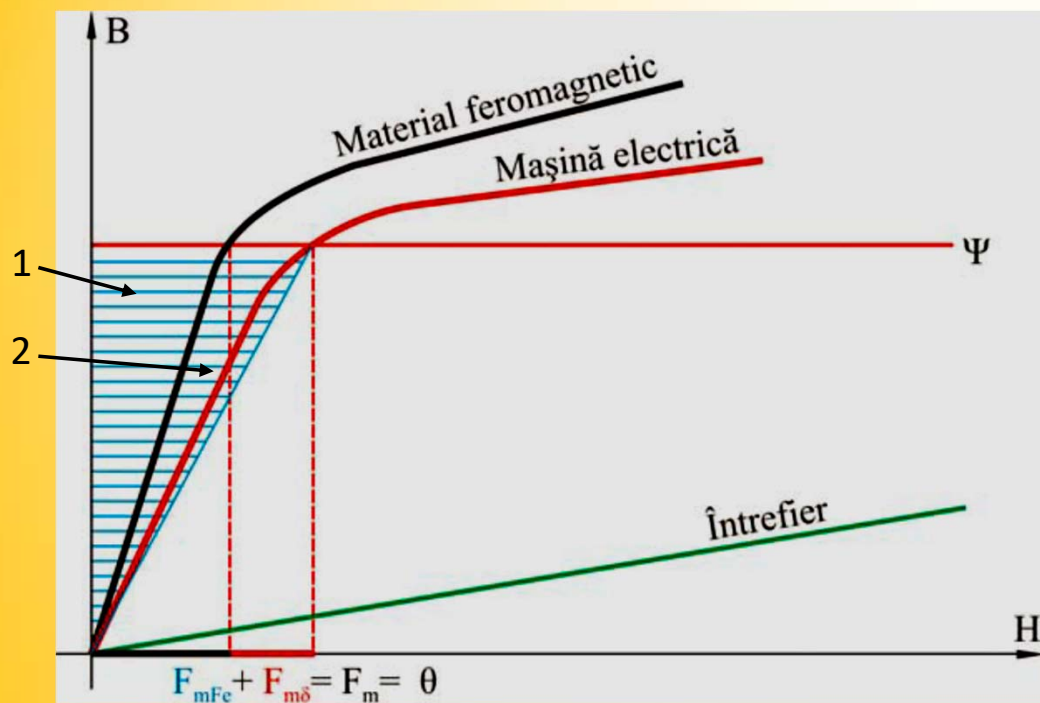
Expresia energiei magnetice înmagazinată de o bobină parcursă de curent poate fi scrisă simplificat sub forma:

$$W = \frac{1}{2} L \cdot i^2$$

Mai departe, folosind legea circuitului magnetic, se poate determina expresia energiei magnetice înmagazinată într-un volum V:

$$W = \frac{1}{2} B \cdot H \cdot V$$

Triunghiurile hașurate (1 și 2) pun în evidență forța magnetomotoare necesară (sau energia magnetică ce trebuie realizată) pentru obținerea unui anumit flux, adică a unei anumite inducții. Se remarcă faptul că, atunci când există un circuit magnetic cu fier, forța magnetomotoare sau, în alte cuvinte, curentul necesar, sunt mult mai mici decât în cazul unui circuit magnetic fără fier.



Energia magnetică necesară unei mașini electrice în comparație cu un circuit magnetic fără întrefier

În figură se arată că, o mașină electrică, ce în mod necesar prezintă un întrefier, necesită o forță magnetomotoare mai mare decât în cazul în care întrefierul lipsește. Este vorba de componenta suplimentară, $F_{m\delta}$, necesară magnetizării întrefierului *neferomagnetic*.

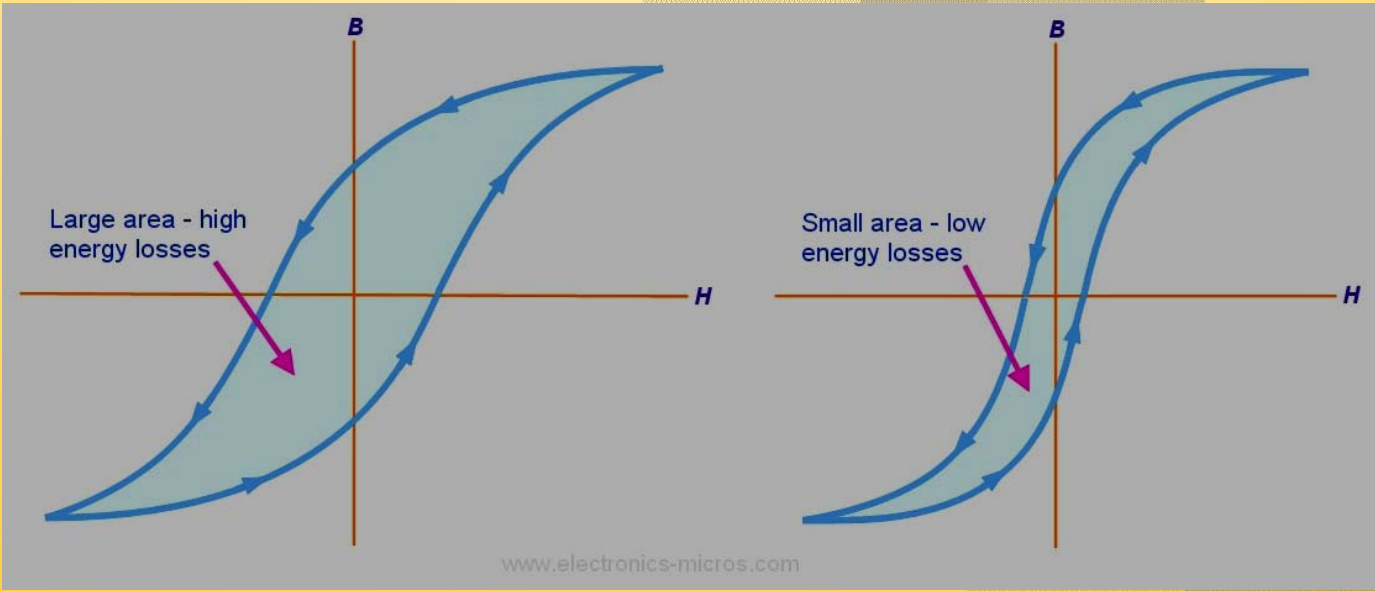
Suma celor două componente ($F_{mFe} + F_{m\delta}$) reprezintă în fapt solenația $\theta = N \cdot i$. Practic, cu cât ponderea întrefierului este mai mare cu atât solenația necesară obținerii unui anumit flux (respectiv unei anumite inducții) este mai mare, adică este necesară prezența unui curent electric mai mare. Prin urmare, este de dorit ca întrefierul într-o mașină electrică să fie cât mai mic.

MATERIALE FEROMAGNETICE

Si 1-4%

TARI
(CICLU DE HISTEREZIS LAT)

MOI
(CICLU DE HISTEREZIS ÎNGUST)



Aliaje feromagnetice cu saturație ridicată

High saturation ferromagnetic alloys

- ✓ Aliaje Fe-Co cu 15-50% conținut de Co.
- ✓ Saturație – 2.4T
- ✓ Aplicații aerospațiale: motoare, generatoare, transformatoare, lagăre magnetice

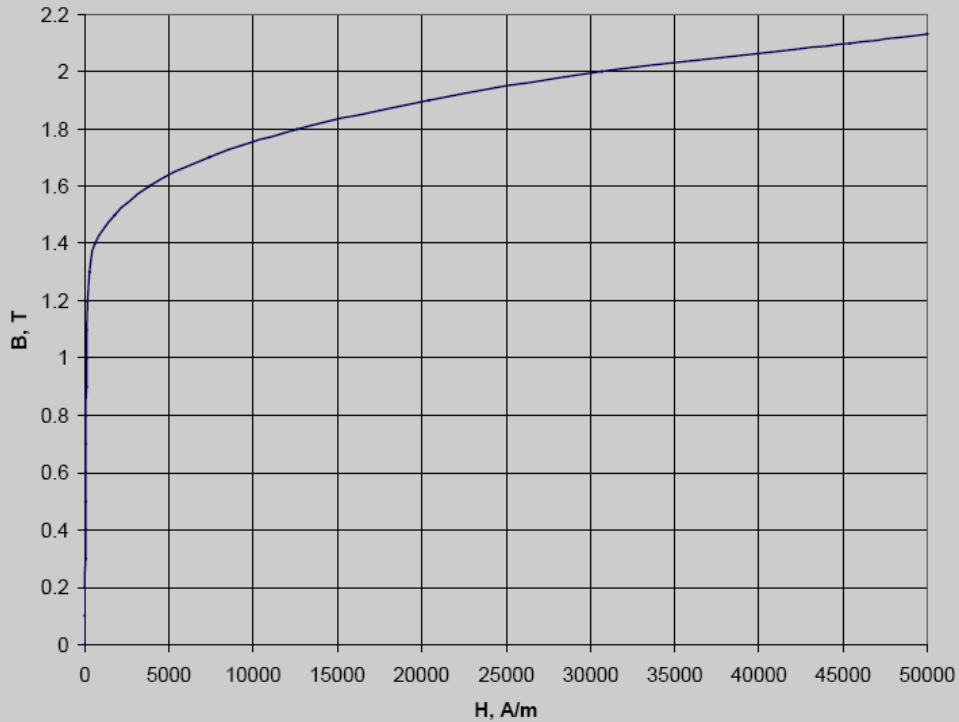


Fig. 2.1. Magnetization curve of fully processed *Armco* DI-MAX nonoriented electrical steel M-19.

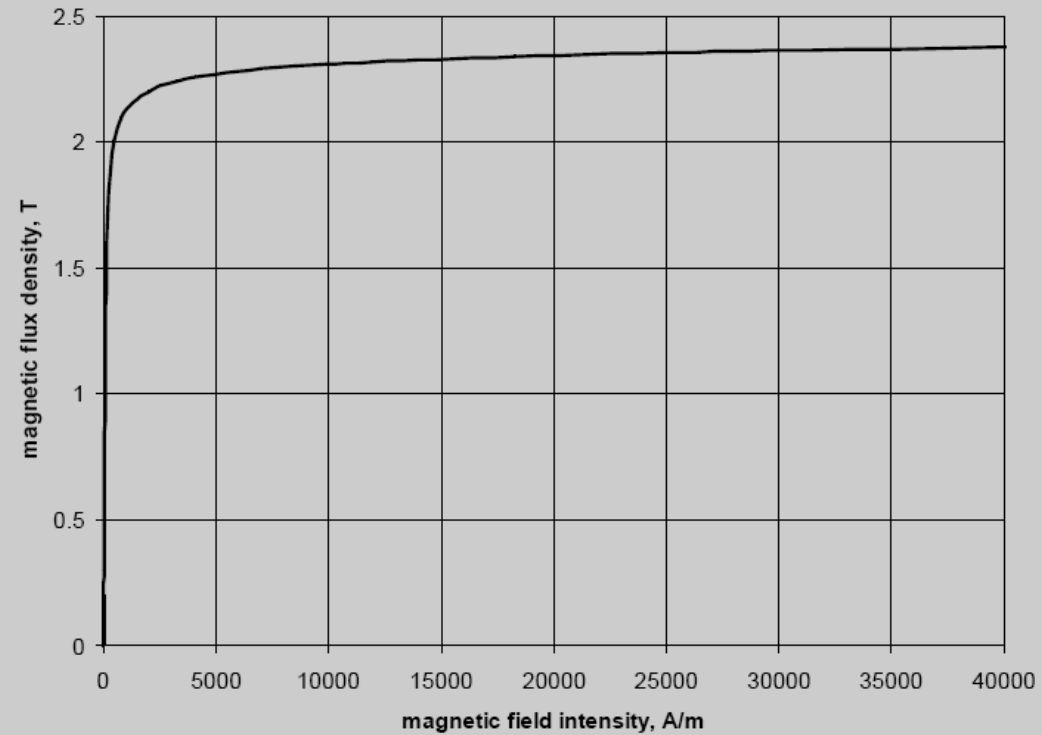


Fig. 2.5. Magnetization curve of Hiperco50.

Materiale feromagnetice amorfe

Amorphous ferromagnetic materials

- ✓ Aliaje Fe-Ni-Co
- ✓ Solidificare rapida a metalului topit prin răcire cu viteza de 10^6 °C/s
- ✓ Structura asemănătoare sticlei (lichid înghețat necristalizat)
- ✓ Materialul este extrem de dur si necesita tehnologii speciale de tăiere si prelucrare (de ex. tăiere cu jet lichid); laserul sau tăierea electrică nu pot fi folosite datorită topirii si cristalizării materialului)
- ✓ Pierderi specifice la 1T si 50 Hz: 0.125 – 0.28 W/kg
- ✓ Pentru un motor standard de 550W înlocuirea tolelor clasice cu material amorf duce la creșterea randamentului de la 74% la 84%.



Materialle magnetice compozite

Soft magnetic powder composites

- ✓ Compoziție: pudră de Fe + material dielectric (rășini epoxidice) + umplutura (sticla sau fibre de carbon pentru creșterea durității)
- ✓ dielectromagnetice (pană la 2% dielectric); magnetodielectrice (peste 2% dielectric);
- ✓ Utilizate pentru realizarea de circuite magnetice complicate (mașini cu poli gheară sau mașini cu flux transversal)

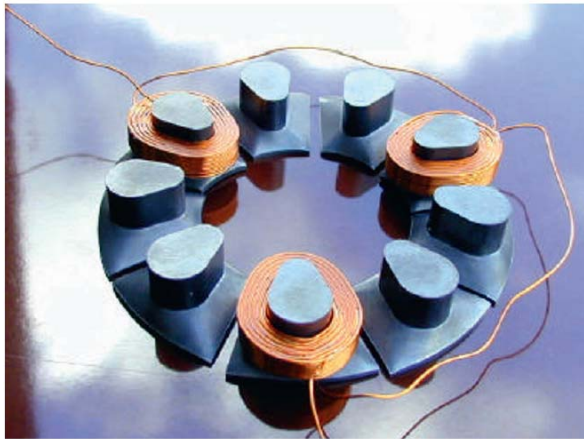


Fig. 2.11. SMC powder salient pole stator for disc type (axial flux) PM motors. Courtesy of Höganäs, Höganäs, Sweden.



Fig. 2.12. Powder salient pole stators for small single-sided disc type axial flux PM motors. Courtesy of Mii Technologies, LLC, Lebanon, NH, U.S.A.

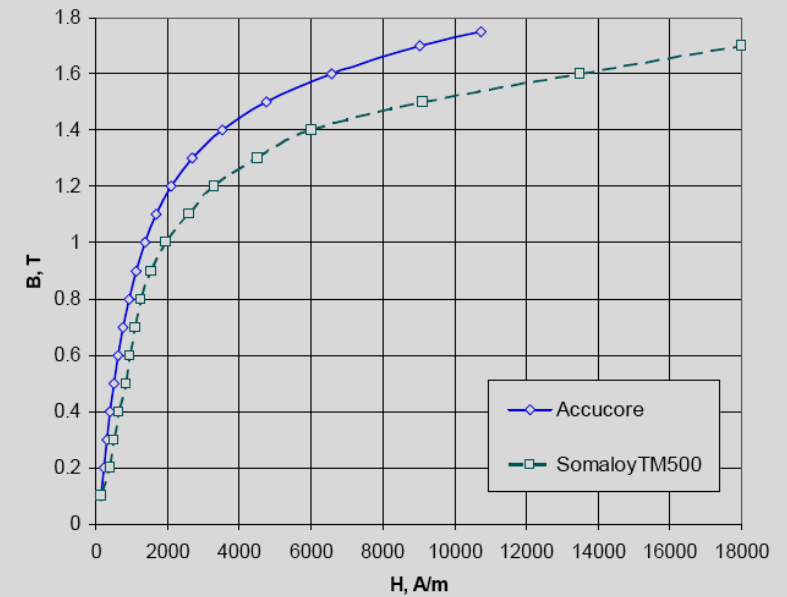
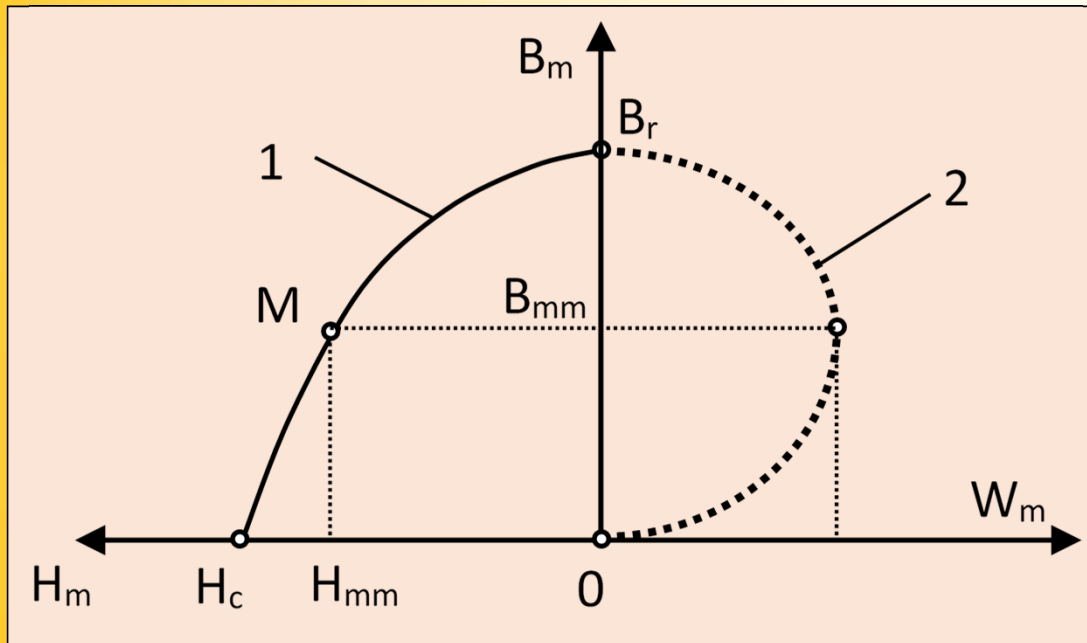


Fig. 2.8. Comparison of magnetization curves of Accucore and SomaloyTM 500.

Material	Permeabilitate magnetică relativă $\mu_r = \mu / \mu_0$
Metglas	1.000.000
Fier (99,95% Fe călit)	200.000
Mu-metal (aliaj Ni-Fe)	80.000
Aliaje Co-Fe	18.000
Fe (99,8%)	5.000
Oțel electrotehnic	4.000
Oțel carbon	100
Magnet permanent cu Ne	1,05
Aluminiu	1,000022
Lemn	1,00000043
Vacuum	1
Cupru	0,999994



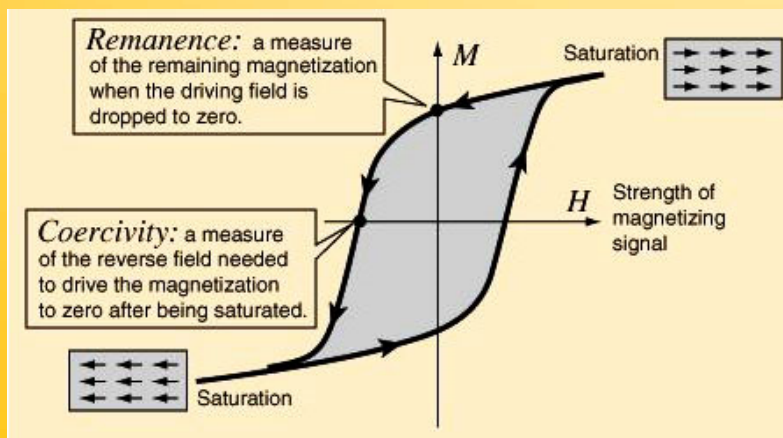
Caracteristicile magneților permanenți



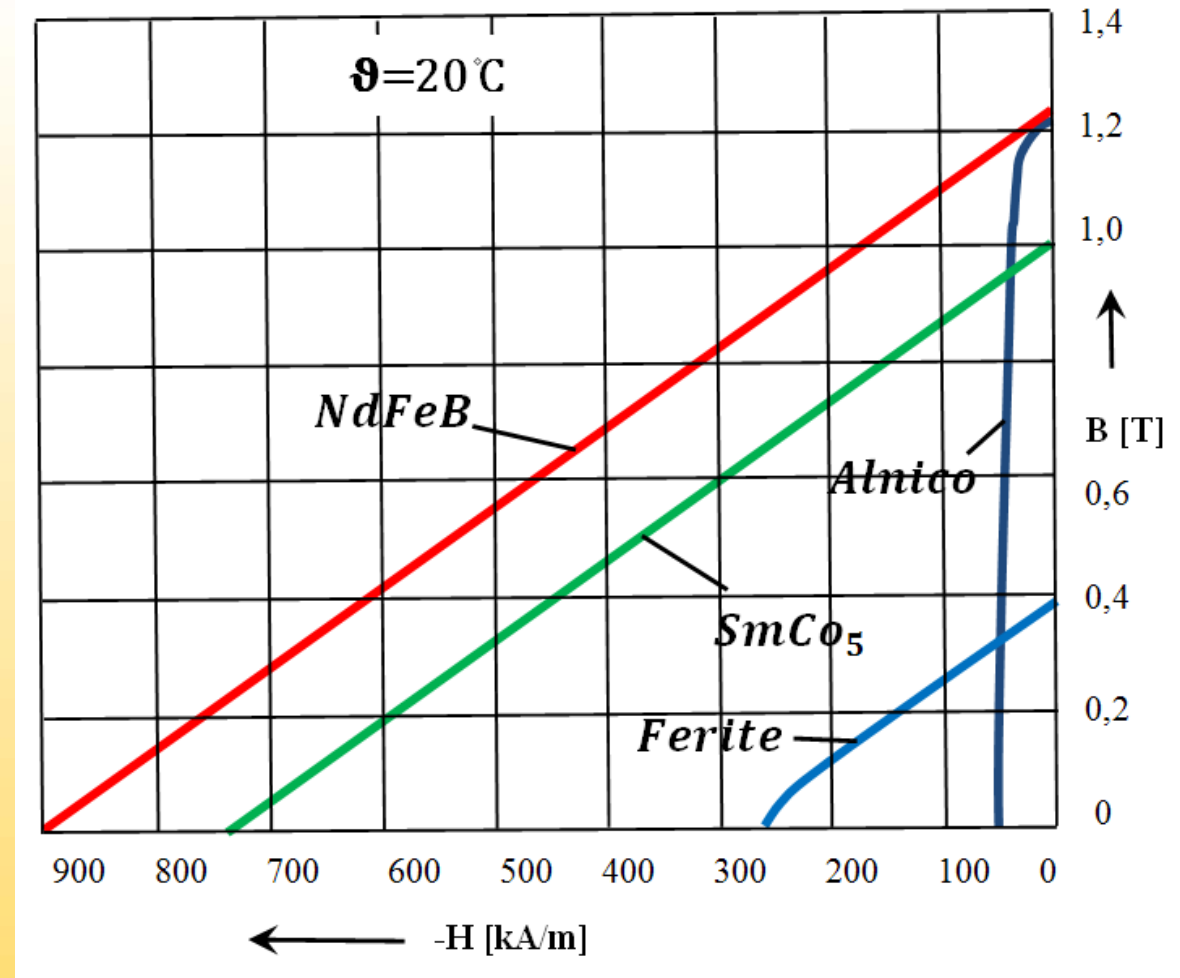
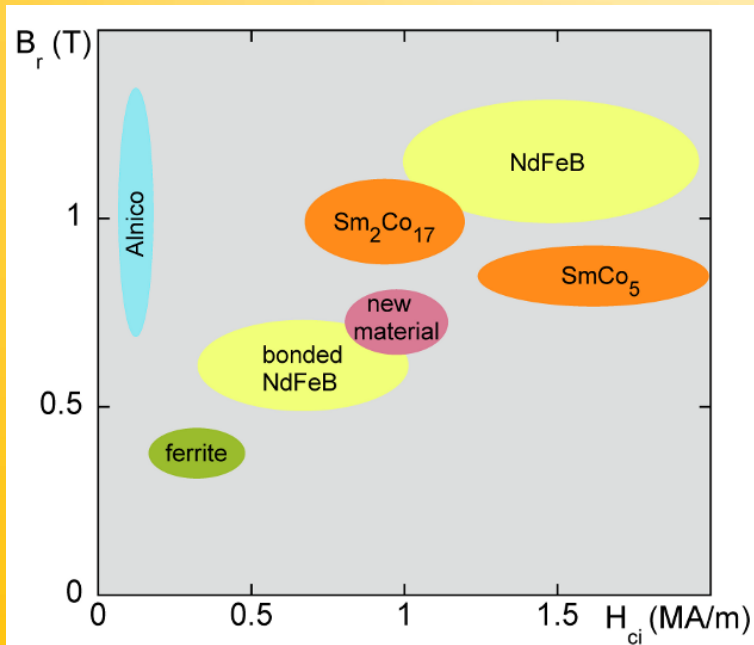
Curba 1 reprezintă *caracteristica de demagnetizare* și indică mărimile caracteristice și modul de comportare a materialului magnetic.

Valorile caracteristice sunt: inducția remanentă (B_r) și câmpul coercitiv (H_c).

Curba 2 reprezintă variația în funcție de inducție a „densității maxime” de energie înmagazinată în volumul magnetului permanent. Punctul de funcționare corespunzător este M și este punctul de funcționare optim.

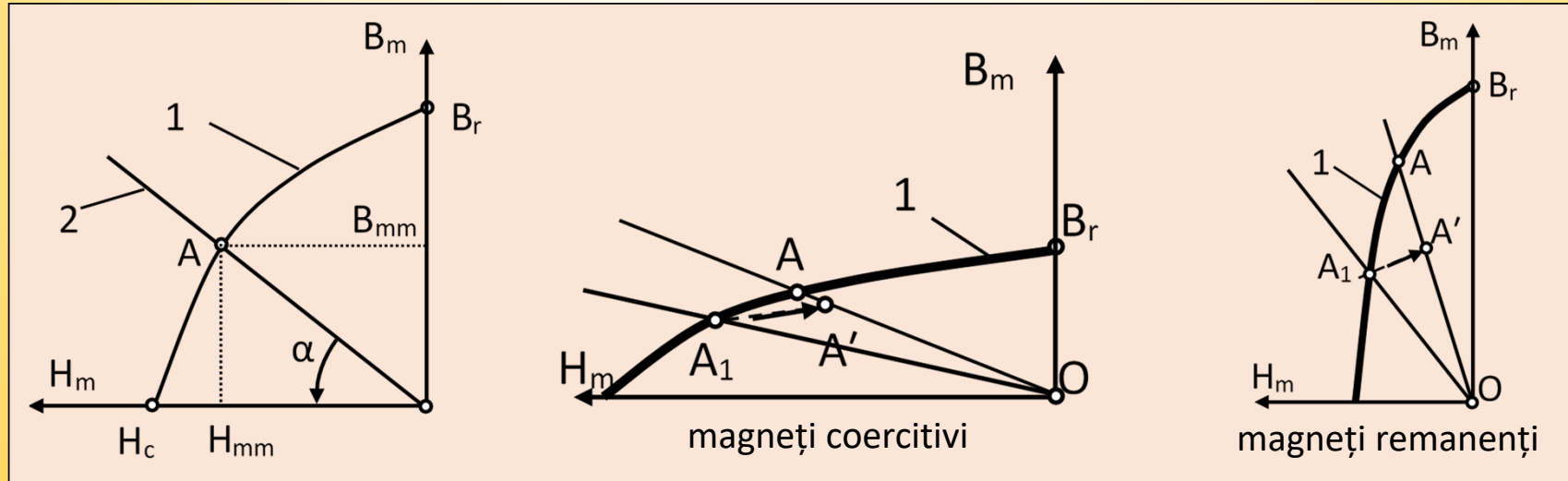


1. Ferite (magneți ceramici)
2. Magneți metalici (Alnico)
3. Magneți pe baza de pământuri rare



Clasa magnetului	Proprietăți magnetice			
	Energie maximă produsă (BH) _{max} (kJ/ m ³)	Inducție remanentă maximă B _{rmax} (T)	Câmp coercitiv maxim H _{cmax} (kA/m)	Temperatura Curie T _c (° C)
Nd ₂ Fe ₁₄ B (sinterizat)	200-440	1-1,4	750-2000	310-400
Nd ₂ Fe ₁₄ B (compozit)	60-100	0,6-0,7	600-1200	310-400
SmCo ₅	120-200	0,8-1,1	600-2000	720
Sm(Co,Fe,Cu,Zr) ₇	150-240	0,9-1,15	450-1300	800
AlNiCo	10-88	0,6-1,4	275	700-860
Ferite	10-40	0,2-0,4	100-300	450

Demagnetizarea - remagnetizarea magnetilor permanenți



Punctul de funcționare (A) se stabilește la intersecția caracteristicii de demagnetizare (1) cu dreapta caracteristica (2).

$$\tan \alpha = -\frac{k_{\sigma}}{k_s} \cdot \frac{l_m A_0}{l_0 A_m} \mu_0$$

unde: l_m , A_m – lungimea și secțiunea (aria transversală) a magnetului permanent; l_0 , A_0 – lungimea și secțiunea întrefierului; k_{σ} - coeficient de dispersii (1,1-3); $k_s = 1,1-1,4$

Scoaterea magnetului din circuitul magnetic al unei mașini electrice (de exemplu scoaterea rotorului) duce întotdeauna la demagnetizarea acestuia. Demagnetizarea este mai pronunțată la magnetii de tip remanent decât la magnetii de tip coercitiv.

Relații de calcul pentru determinarea dimensiunilor unui magnet permanent:

$$l_m = -\frac{k_s \cdot l_0 \cdot B_0}{\mu_0 \cdot H_m}, \quad A_m = \frac{k_\sigma \cdot A_0 \cdot B_0}{B_m}$$

unde: l_m , A_m – lungimea și secțiunea (aria transversală) a magnetului permanent; l_0 , A_0 – lungimea și secțiunea întrefierului; B_0 – inducția în întrefier; H_m , B_m – coordonatele punctului de funcționare (pe caracteristica de demagnetizare); k_σ - coeficient de dispersii (1,1-3); $k_s = 1,1-1,4$

Magneții permanenți de tip *coercitiv* (feritele) care au valori mari pentru H_m și valori mici pentru B_m , au de regula lungimi mici și secțiuni mari.

Magneții permanenți de tip *remanent* (magneți metalici Alnico) care au valori mici pentru H_m și valori mari pentru B_m , au de regula lungimi mari și secțiuni mici.

Magneții permanenți pe baza de *pământuri rare* (cu Ne sau Sm) care au valori mari atât pentru H_m cât și pentru B_m , au lungimi și secțiuni mici, deci volum de magnet mai mic decât în cazurile anterioare.



Cuvinte cheie:

Principiul
reluctanței
variabile

Cuplu de
reluctanță

Cuplu de atracție
mutuală

Energie
magnetică

Magneți
permanenți cu
pământuri rare
(neodimiu *Nd* și
samariu *Sm*)



Motorul
universal

CURS 2

Alternatorul
cu poli ghera

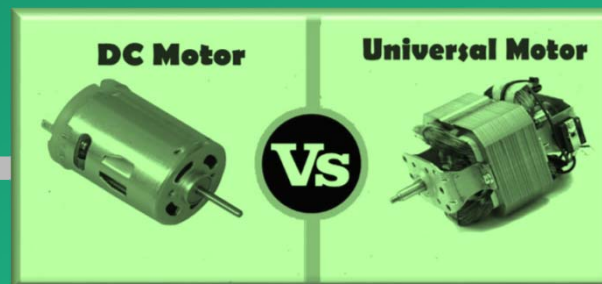




Motorul universal

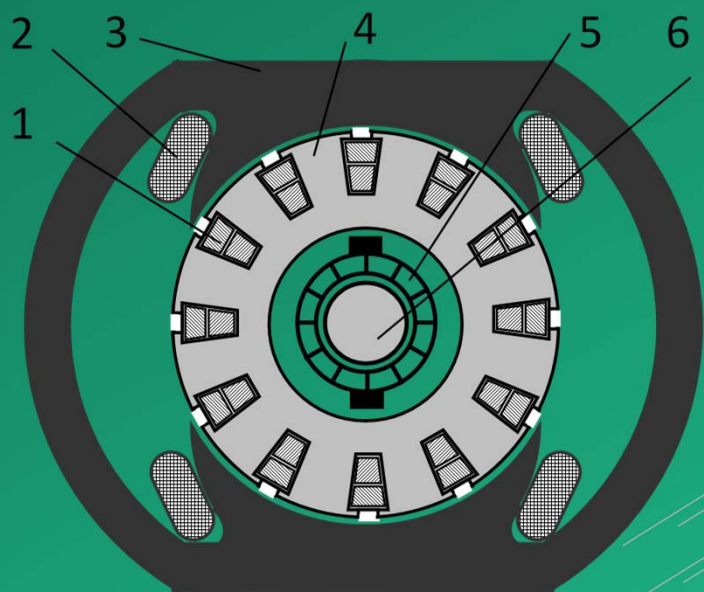
DEFINIȚIE

Motorul universal este o mașina 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.



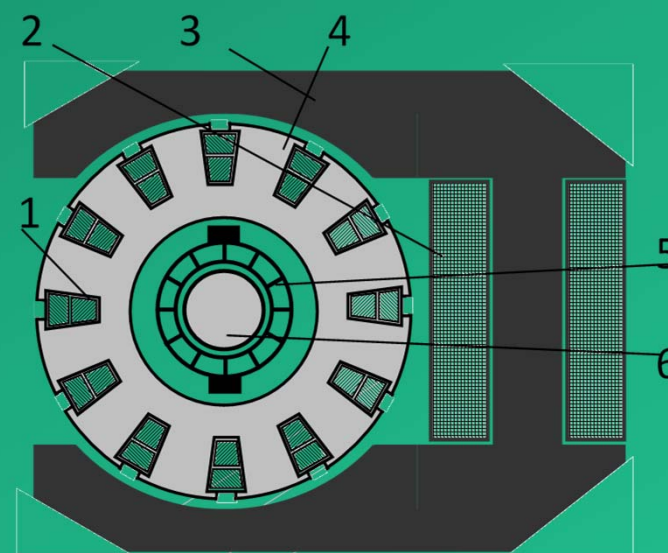
CARACTERISTICI GENERALE

- 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) Structura simetrica

Pentru puteri peste 200 W



b) Structura nesimetrica

Pentru puteri de până la 200 W

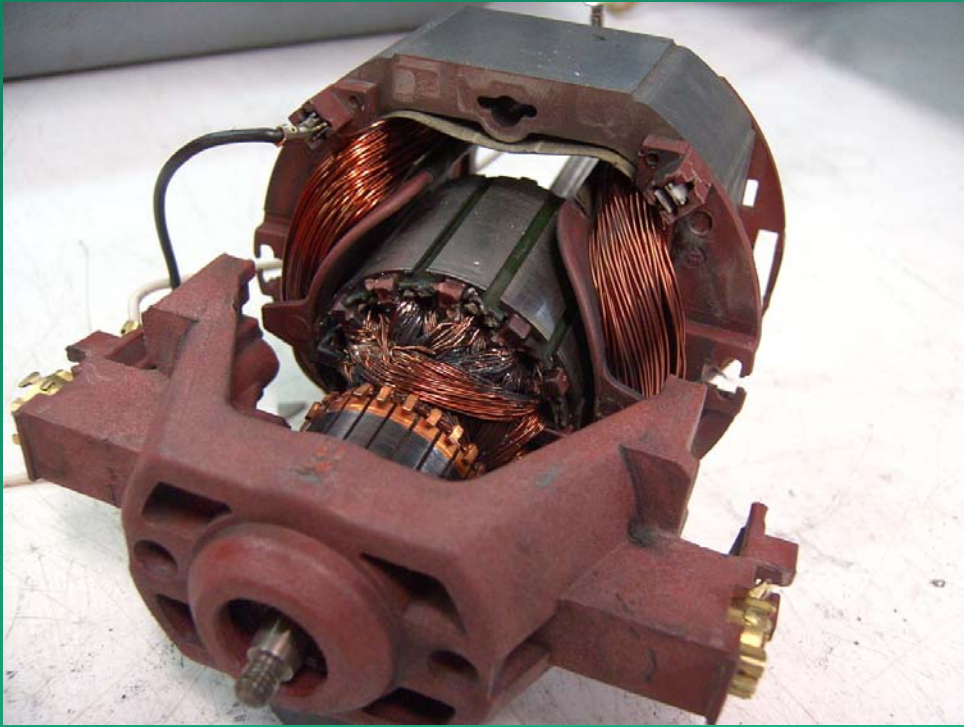
1- înfășurare rotorică; 2- înfășurare statorică; 3- pol statoric; 4- rotor; 5- colector; 6- arbore (ax)

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 polii auxiliari.

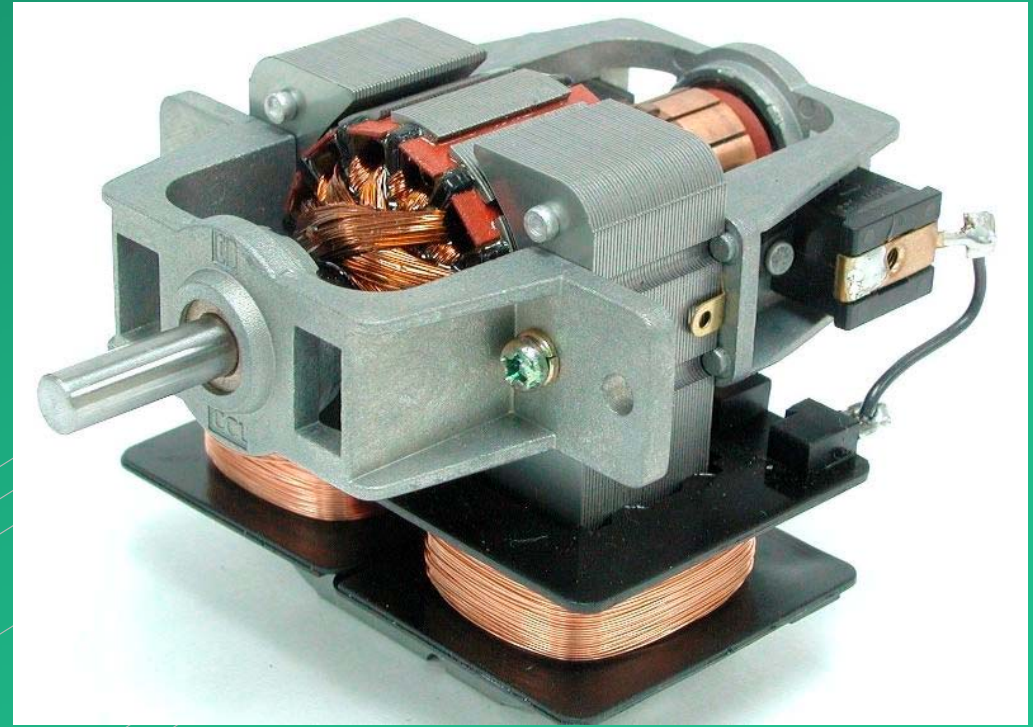
Deosebirea cea mai importantă constă însă în construcția circuitului magnetic statoric. Spre deosebire de mașina de c.c. unde statorul este realizat din oțel turnat, la motorul universal statorul se realizează din tole izolate. Astfel, prezența câmpului alternativ creat de înfășurările de excitație nu 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)

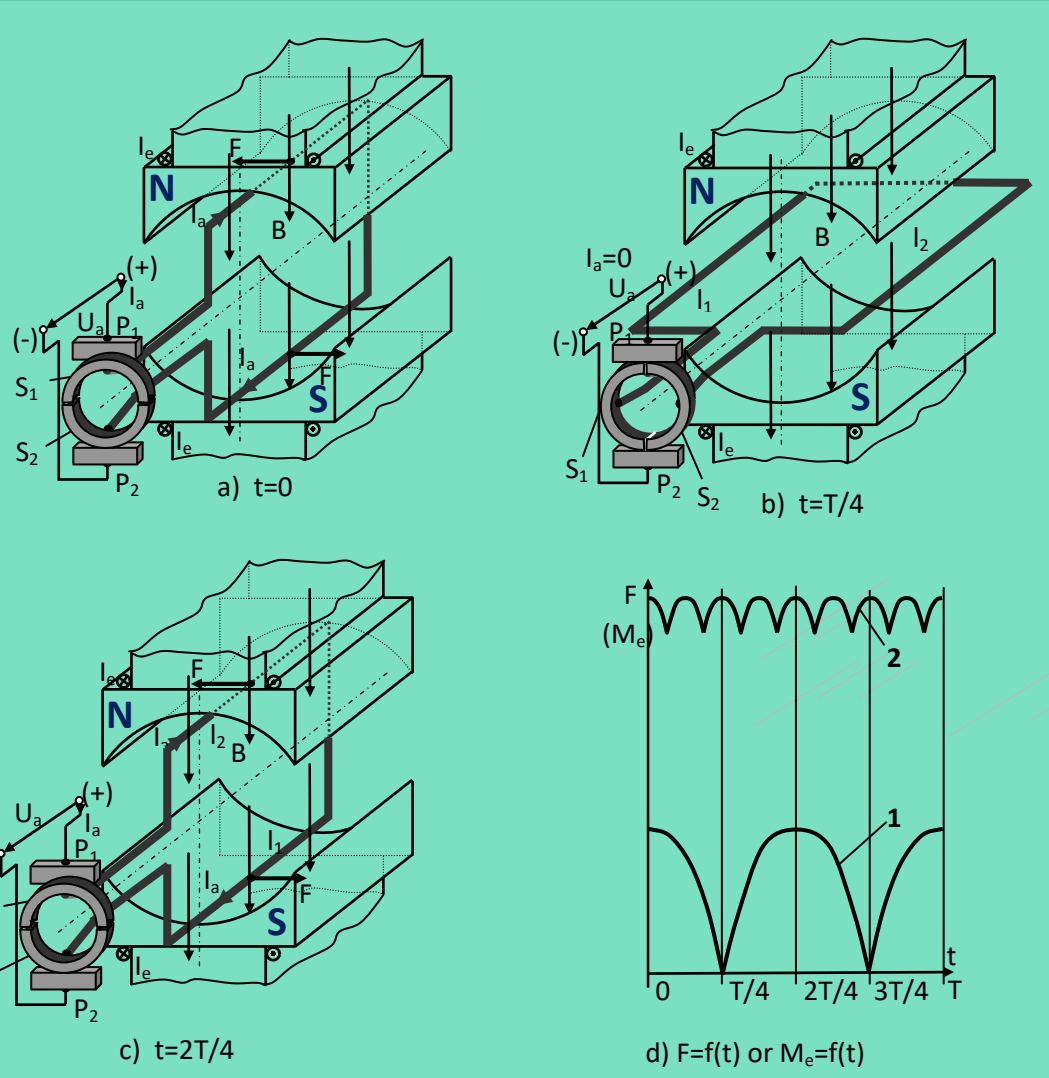


Structura simetrica

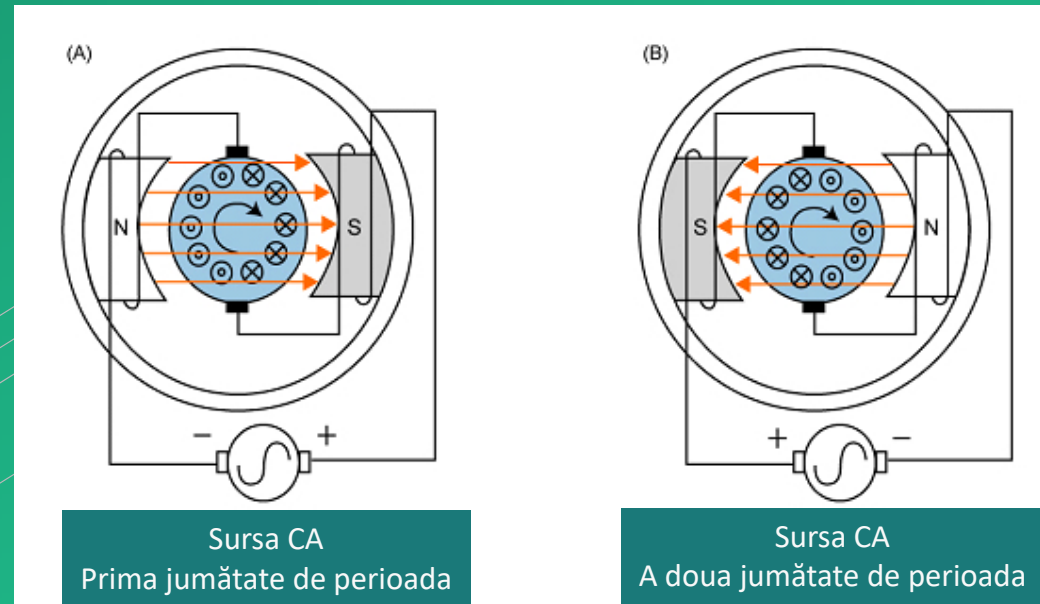


Structura nesimetrica

Principiu de funcționare



Cuplul mașinii de C.C.



Cuplul motorului universal alimentat in c.a.

Funcționarea în regim de motor este legată de *producerea cuplului electromagnetic*.

În cazul mașinii de c.c. de construcție clasică, producerea cuplului electromagnetic care să mențină același sens de rotație se datorează faptului că, sensul curentului prin spirele aflate sub un anumit pol inductor se păstrează ca urmare a trecerii lamelelor de colector de pe o perie pe alta (în cazul figurii de pe slide-ul anterior, sensul curentului conductoarelor de sub polul N este permanent către interiorul figurii indiferent care latură a spirei se află în dreptul acestui pol). Drept urmare, forța Laplace (F) și cuplul electromagnetic determină rotirea în același sens a rotorului.

În cazul motorului universal, la alimentarea în c.a. se schimbă sensul curentului prin polii de excitație și, drept urmare, se schimbă și polaritatea acestora.

Întrucât înfășurarea rotorică este înseriată cu înfășurarea de excitație, schimbarea alternanței curentului de alimentare schimbă totodată și sensul curentului prin înfășurarea rotorică. În consecință, sensul curentului prin conductoarele aflate în fața unui pol de o anumită polaritate **SE PĂSTREAZĂ** (chiar dacă fizic polii sunt diferiți). Aceasta face ca forța și cuplul electromagnetic să-și păstreze permanent același sens, iar motorul să se rotească într-un sens bine definit.

Întrucât la alimentarea în c.a. atât fluxul inductor cât și curentul prin indus sunt mărimi alternative, rezultă că valoarea instantanee a cuplului electromagnetic este:

$$m_e = k_m \cdot \varphi \cdot i = k_m \cdot \Phi \cdot \sin \omega t \cdot \sqrt{2} I_A \cdot \sin(\omega t - \alpha)$$

unde: - k_m este constanta ce ține cont de structura constructivă: $k_m = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi}$

- α este unghiul de defazaj dintre curentul prin circuitul de excitație și curentul prin înfășurarea indusului

iar valoarea medie este:

$$M_e = \frac{1}{T} \int_0^T m dt = \frac{1}{\sqrt{2}} k_m \cdot \Phi \cdot I_A \cdot \cos \alpha$$

Unghiul de defazaj, α , între curentul prin excitație și cel prin indus determină mărimea cuplului electromagnetic produs de motorul universal alimentat în c.a.





Influența tipurilor de excitație asupra cuplului electromagnetic dezvoltat de motorul universal

Cuplul electromagnetic dezvoltat de motorul universal la alimentarea în c.a. este MAXIM atunci când unghiul α este 0, deci defazajul între cei doi curenți, de excitație și din indus. Acest lucru are loc dacă mașina are EXCITAȚIE SERIE.

Dacă mașina are excitație derivație, în c.a. aceasta înfășurare are o inductanță proprie mare în comparație cu cea a indusului, ceea ce face ca unghiul de defazaj α să fie apropiat de 90° . Drept urmare, cuplul electromagnetic dezvoltat este nesemnificativ.

Dacă mașina are excitație formată din magneti permanenți, evident cuplul dezvoltat este nul.

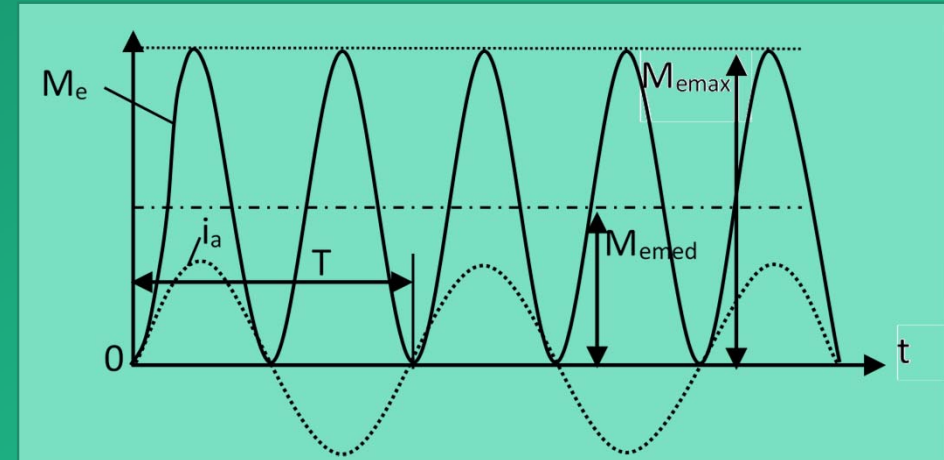
$$M_e = \frac{1}{\sqrt{2}} k_m \cdot \Phi \cdot I_A \cdot \cos \alpha$$

Considerând $\alpha = 0$, cuplul instantaneu al motorului universal este:

$$m_e = \sqrt{2} \cdot k_m \cdot \phi \cdot I_A \cdot \sin^2(\omega t)$$

Cuplul mediu are expresia:

$$M_e = \frac{1}{\sqrt{2}} k_m \cdot \phi \cdot I_A$$

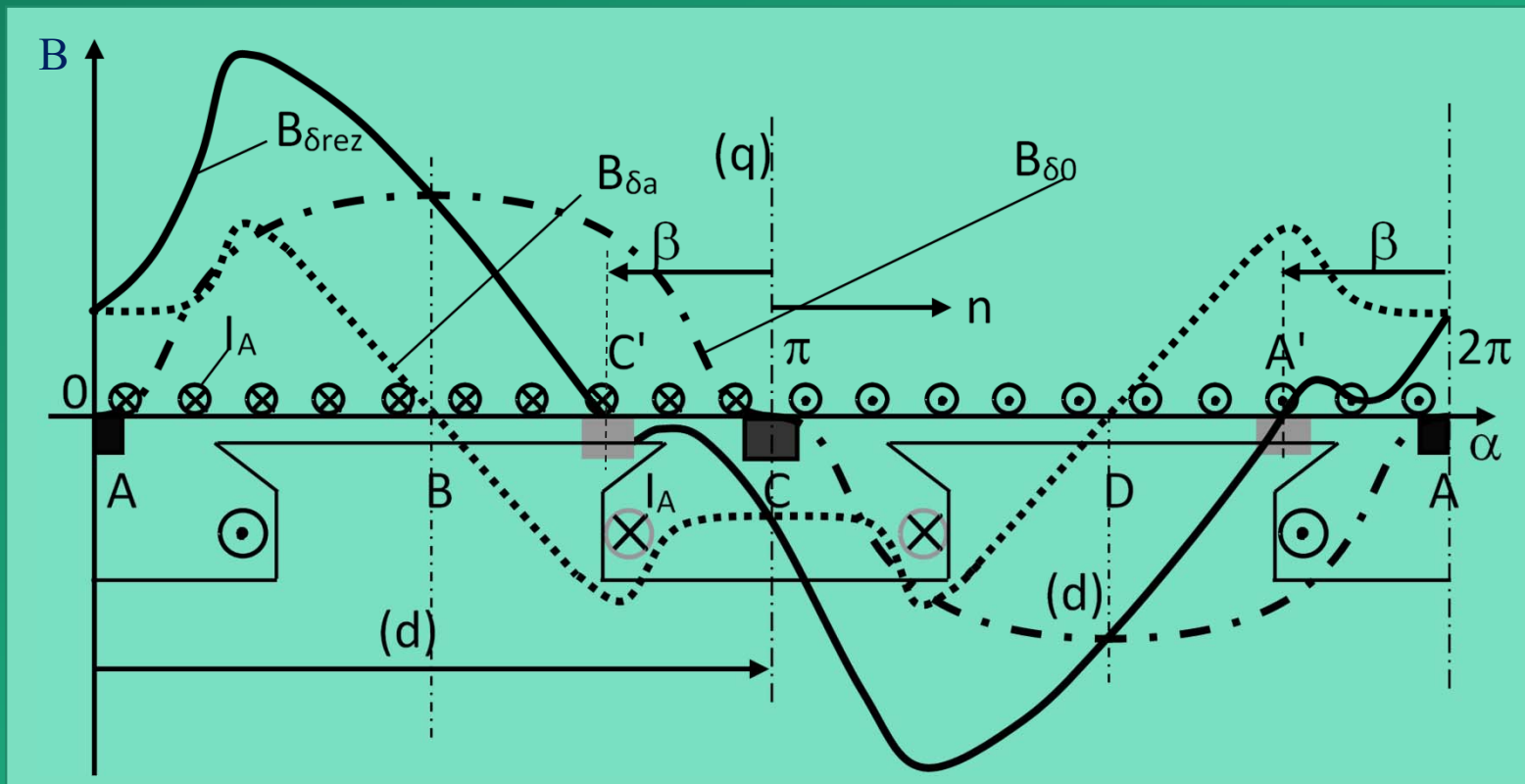


Cuplul motorului universal alimentat de la o sursa alternativa

Dacă motorul nu lucrează saturat, atunci fluxul inductor ϕ este proporțional cu curentul de excitație (adică curentul prin indus I_A) și relația cuplului devine:

$$M_e = k \cdot I_A^2$$

Reacția indusului și deplasarea axei neutre la motorul universal



$B_{\delta 0}$ - curba inducției câmpului de excitație

$B_{\delta a}$ - curba inducției câmpului de reacție

$B_{\delta rez}$ - curba inducției câmpului rezultat

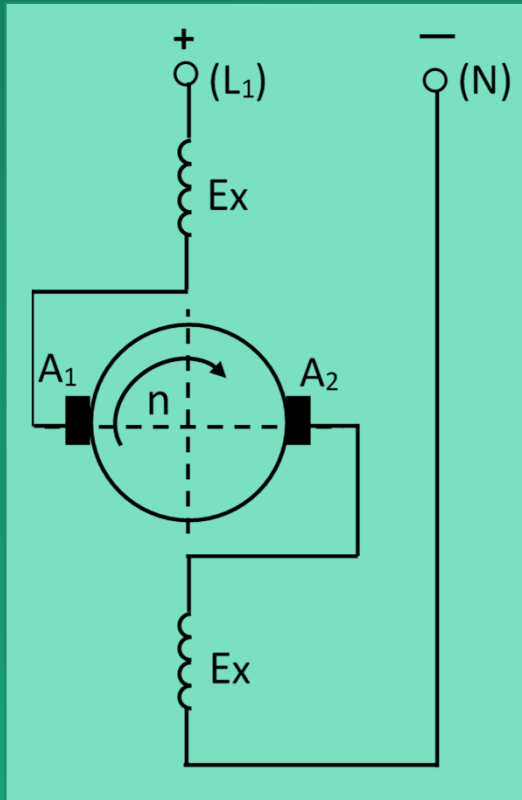
Câmpul inductor (creat de înfășurarea de excitație) creează în întrefier o inducție B_0 , a cărei variație este dată de curba „linie-punct B_{δ_0} ” – variația este apropiată de cea trapezoidală similar mașinii de c.c. clasică. Întrucât întrefierul sub polii inductori este variabil (întrefierul crește către extremități), rezultă o formă rotunjită a inducției care tinde către o formă de variație sinusoidală.

Reacția indusului, determinată de curenții ce parcurg înfășurarea rotorică, creează în întrefier o inducție B_{δ_a} , a cărei formă de variație este reprezentată de curba „punctată B_{δ_a} ”. Valoarea mică a acesteia în axa q se datorează existenței întrefierului mare dintre polii statorici.

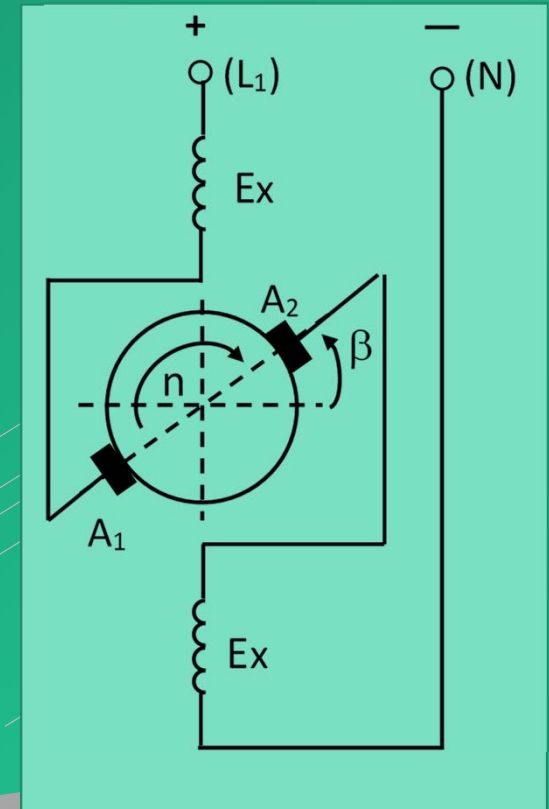
Câmpul rezultat în întrefier $B_{\delta_{rez}}$ se obține prin însumarea celor două curbe. Se obține curba „linie continuă $B_{\delta_{rez}}$ ”. Aceasta este o curbă „distorsionată” care mută maximul câmpului din centru spre una din laturile polilor inductori.

Mult mai important este faptul că are loc o deplasare a zonei neutre (zona în care câmpul din întrefier devine zero) cu un unghi β în sens invers sensului de rotație (din C în C' respectiv din A în A'). Rezultă o decalare a zonei neutre cu unghiul β .

Îmbunătățirea comutației la motorul universal

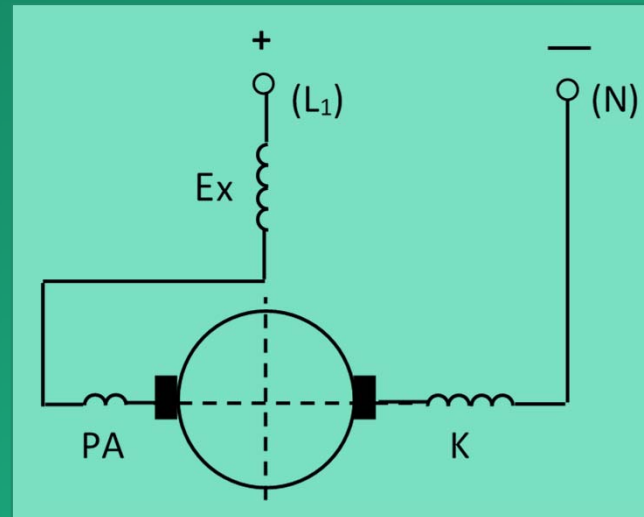


Decalarea periilor din axa
interpolară cu un unghi de $15^\circ - 25^\circ$

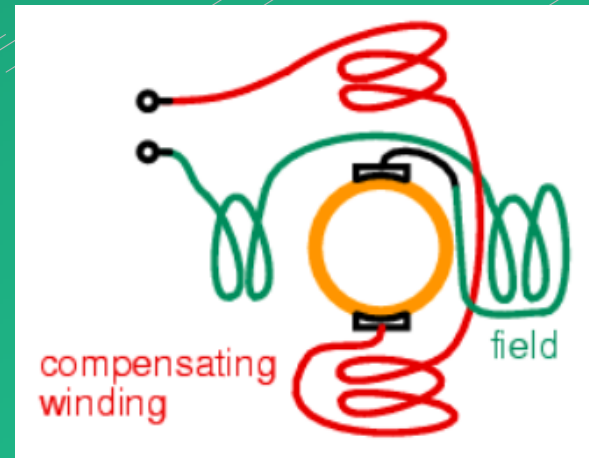
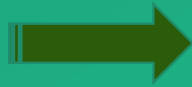
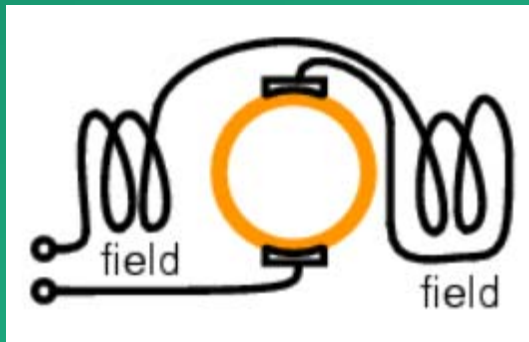


Datorită deplasării axei neutre cu unghiul notat cu β , pentru îmbunătățirea comutației și diminuarea scânteilor la perii este necesară o decalare a periilor cu același unghi. Practic, această procedură se poate realiza deplasând crucea port-perii până când, la funcționarea în sarcină, se obține scânteierea cea mai redusă.

Structura motorului universal de putere mare (folosit in tracțiunea feroviara)



Ex – înfășurare de excitație serie
PA – poli auxiliari plasați pe stator intre polii principali
K – înfășurare de compensație plasata in piesele polare ale polilor principali

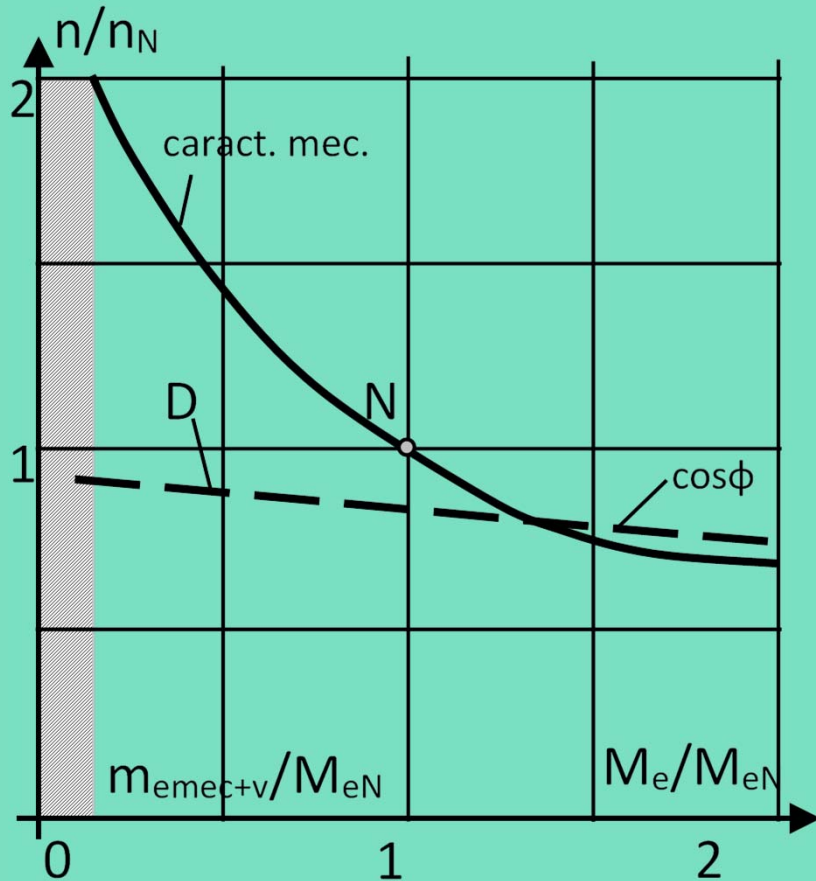


In cazul motorului universal de putere mare, folosit in tracțiunea electrica (locomotive), construcția include poli auxiliari si înfășurare de compensație pentru îmbunătățirea comutației si creșterea siguranței in funcționare.

Motor universal de mica putere, fără poli auxiliari sau înfășurare de compensare

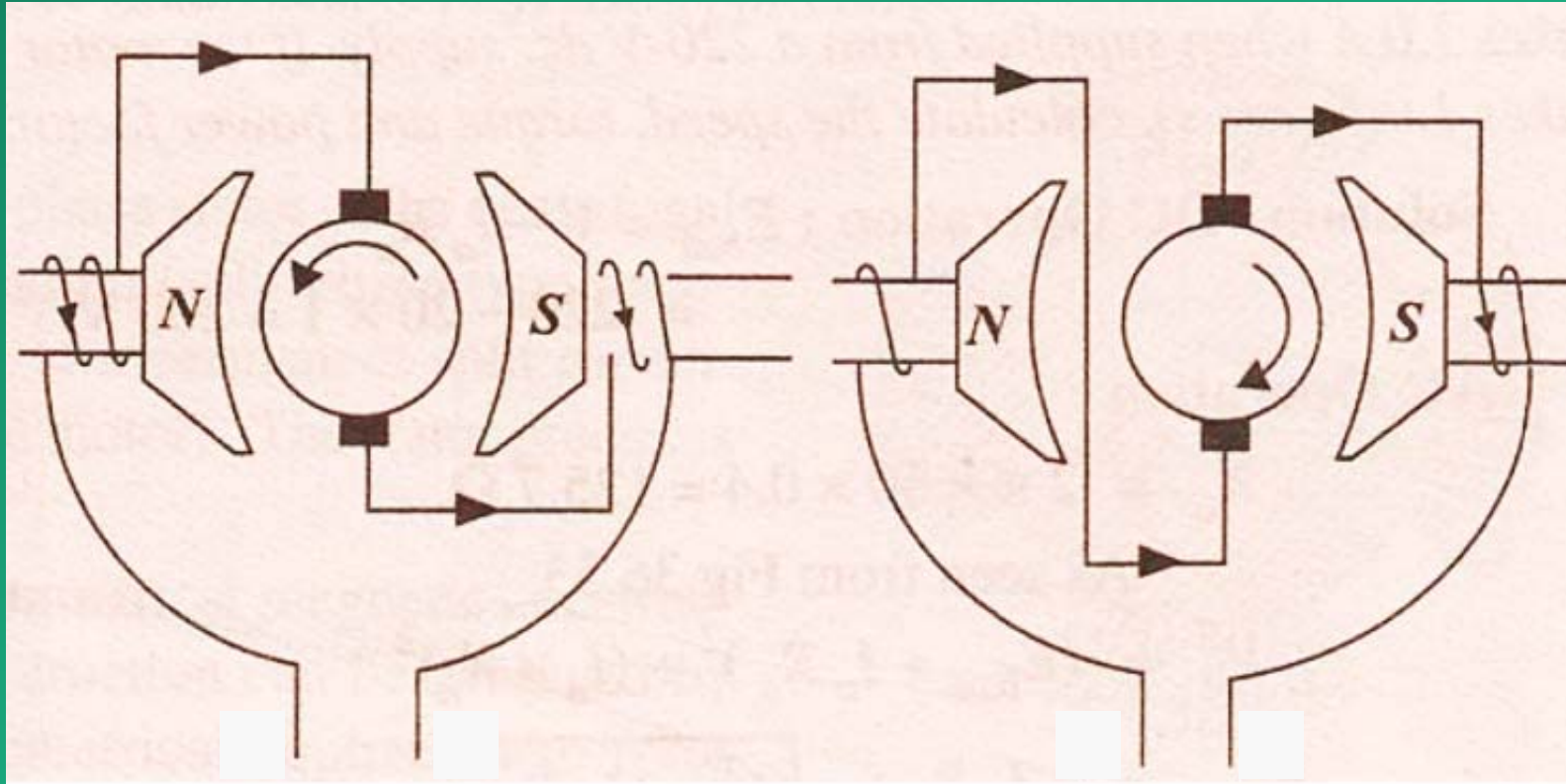
Motor universal prevăzut cu poli auxiliari si înfășurare de compensare

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, $\cos \varphi = f(M_e)$; factorul de putere este subunitar și scade odată cu creșterea sarcinii.

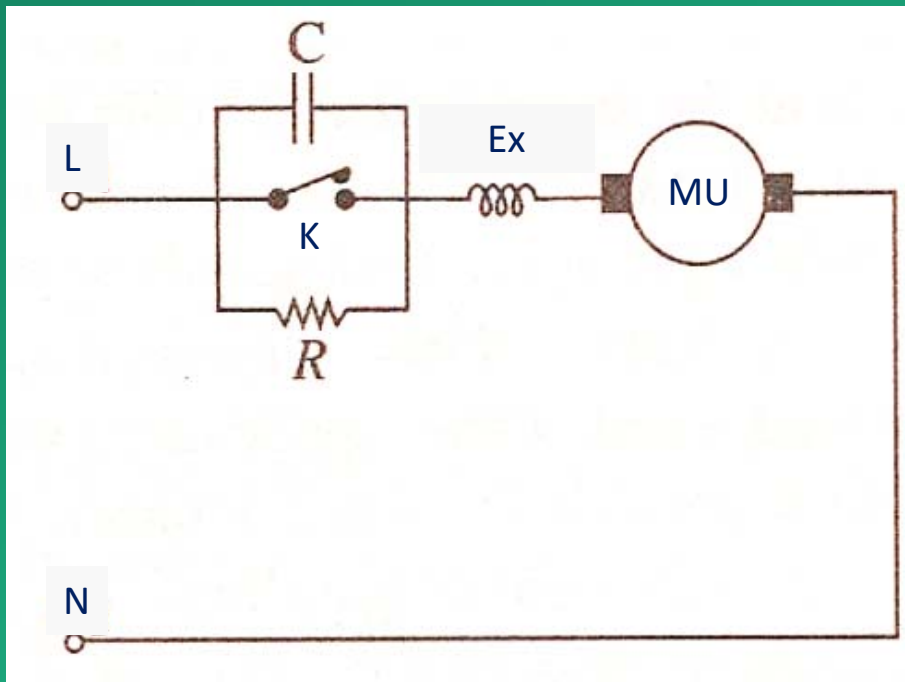
Schimbarea sensului de rotație



Se inversează sensul curentului (se inversează legăturile) la indus SAU la înfășurarea de excitație. Inversarea legăturilor la fază și nul (L cu N) NU are nici un efect. În figura este exemplificată schimbarea conexiunilor la înfășurarea rotorica.

Protecția împotriva „ambalării” (supratației)

Întrucât motorul universal este „fundamental” un motor de c.c. cu excitație serie, fenomenul de ambalare (creștere inacceptabilă a turației la funcționarea în gol) este de asemenea prezent. Pentru limitarea acestuia se aplică, de regulă, una dintre metodele următoare:



- La motoarele de mică putere, frecările în lagăre limitează creșterea nelimitată a turației (fenomenul de ambalare).
- Se poate folosi un întrerupător centrifugal (K), care întrerupe alimentarea directă a motorului și introduce o rezistență în serie, ce duce la descreșterea turației. Când se revine la limitele admisibile ale vitezei, întrerupătorul se închide din nou.

Reglarea vitezei la motorul universal

1.

Modificarea
tensiunii de
alimentare

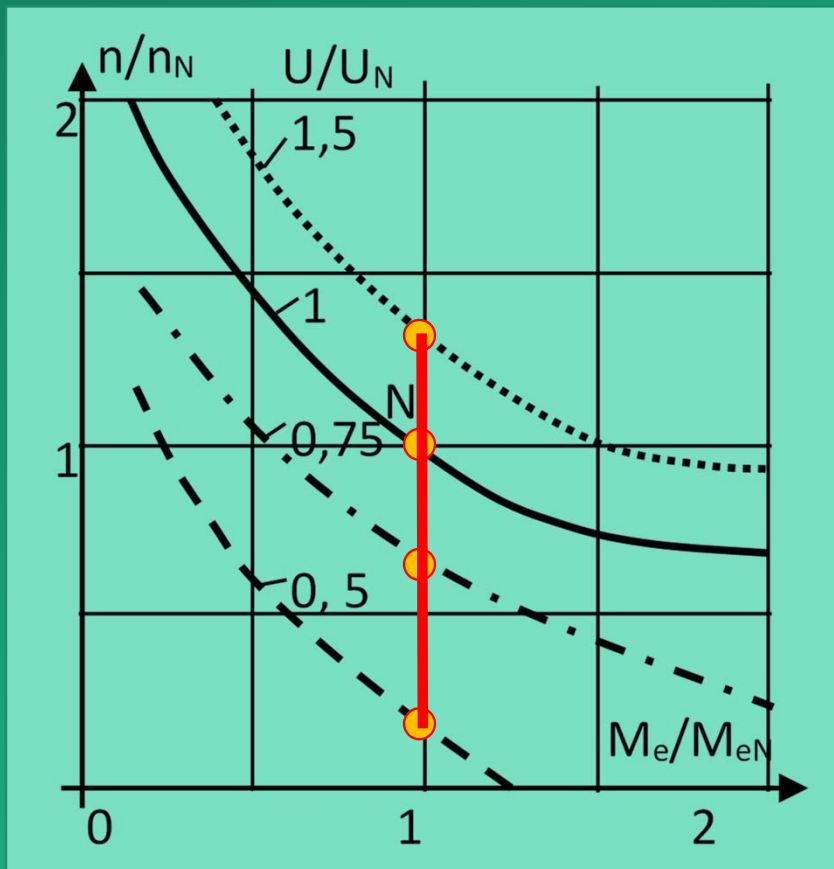
2.

Modificarea
frecvenței
tensiunii de
alimentare

3.

Modificarea
fluxului
inductor

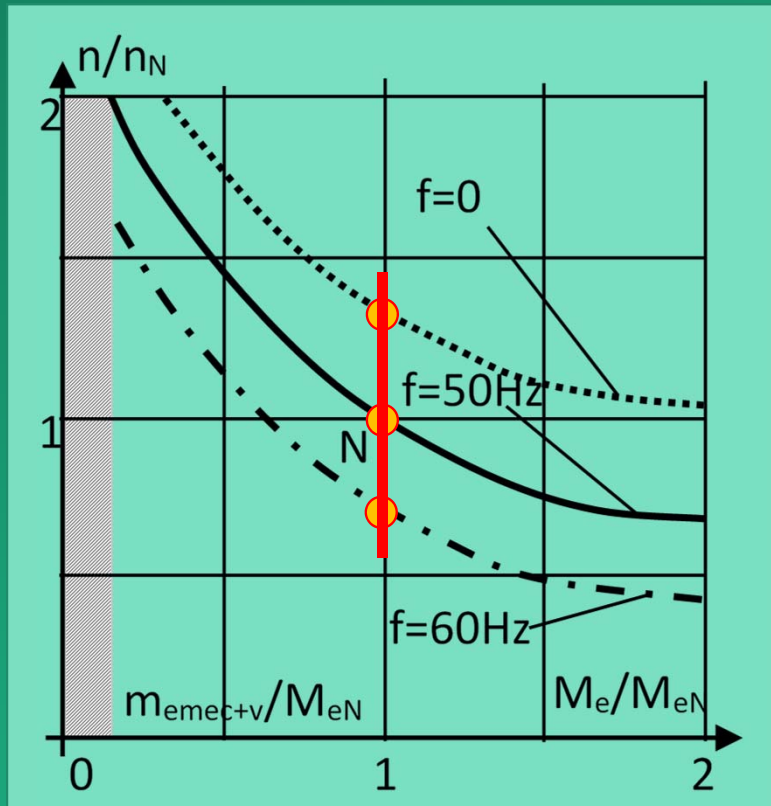
1. Modificarea tensiunii de alimentare



- Modificarea tensiunii de alimentare determină o modificare semnificativă a vitezei.
- Cu cât tensiunea este mai mică, cu atât caracteristica mecanică devine mai moale (viteza scade mai pronunțat odată cu creșterea sarcinii).
- Pentru reglarea tensiunii se poate inseria o rezistență variabilă (soluție utilizată la mașinile de cusut electrice) sau se pot folosi elemente electronice comandate.



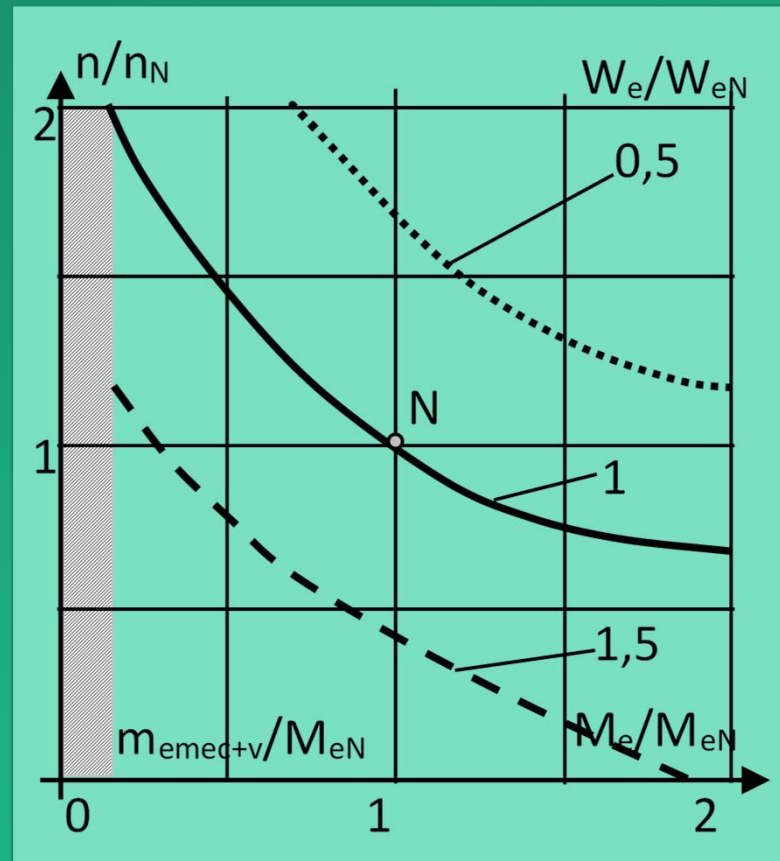
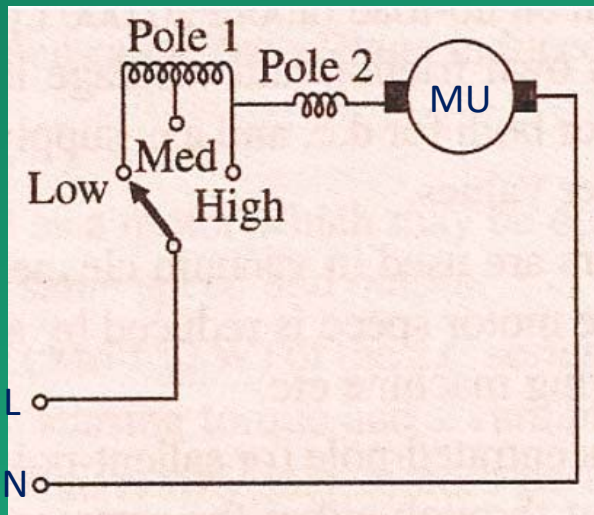
2. Modificarea frecvenței tensiunii de alimentare



- Odată cu creșterea frecvenței SCADĂ turația motorului universal.
- Caracteristica corespunzătoare lui $f=0$ este caracteristica funcționării în c.c.

3. Modificarea fluxului inductor

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



- Se obține prin modificarea numărului de spire parcurse de curent la un moment dat.
- Creșterea numărului de spire duce la SCĂDEREA turăției (deoarece crește fluxul inductor).
- Reglajul vitezei, prin această metoda, se face în trepte.

Analiza comparativa



Cuplul electromagnetic dezvoltat in c.c. este mai mare de $\sqrt{2}$ ori decât in c.a.



Curentul absorbit in c.a. este mai mare decât in c.c. (apare o componentă reactivă de magnetizare).



La aceeași valoare a tensiunii de alimentare, turația rotorului este mai mică in c.a. decât in c.c.



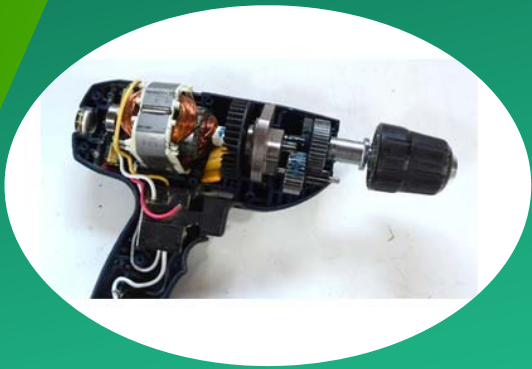
La funcționarea in c.a. caracteristica mecanică este mai căzătoare (viteza scade mai repede odată cu creșterea cuplului rezistent).



La funcționarea in c.a. randamentul este mai mic (apar pierderi in fierul statoric), iar comutația este mai proastă si apar parazii radiofonici (datorită scânteierii la perii).



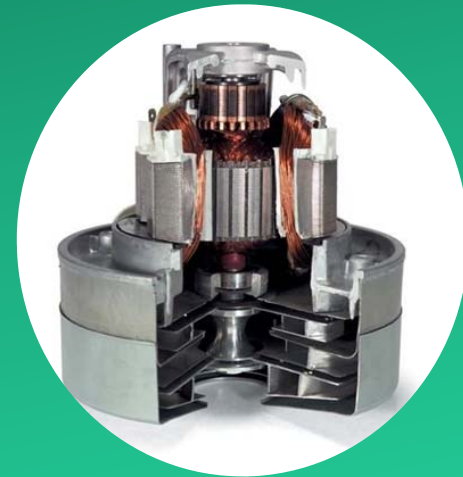
Aplicații



Unelte portabile



Mașini de cusut
electrice



Aspiratoare

UC95-30 Universal Motor



- Typical Application—
- Ice machine
- and so on.

Technical Data

Model	Voltage (V)	Frequency (Hz)	No-Load			On-Load		
			Speed (RPM)	Current (A)	Power (W)	Speed (RPM)	Current (A)	Power (W)
UC95-30	220	50/60	24000	1.6	350	9200	4.6	1200

Remark: We can produce according to customers requirement.

UC94-30 Universal Motor



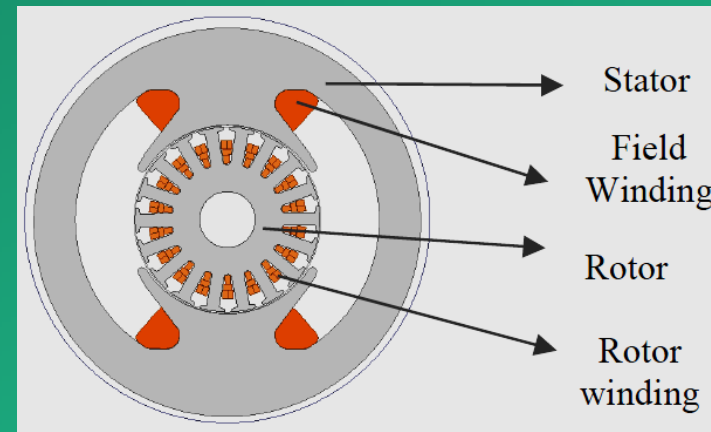
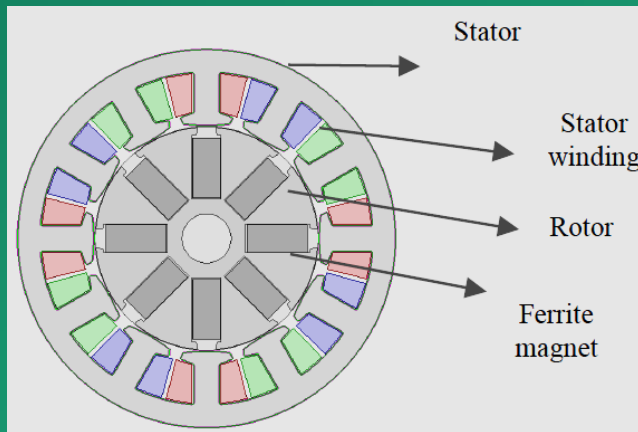
- Application—
- Air pump
- Sander
- Door operator
- Harvester
- Alarm apparatus
- Water pump and so on.

Technical Data

Model	Voltage (V)	Frequency (Hz)	No-Load			On-Load			Input power (W)	Output power (W)	Eff (%)
			Speed (RPM)	Current (A)	Power (W)	Speed (RPM)	Torque (N.m)	Current (A)			
UC94-30	220	50/60	17000	0.560	122	5800	0.315	1.75	356	187	52.5
UC94-30	127	60	17500	1.112	139	6661	0.366	4.46	501	255.3	50.9

Remark: We can produce according to customers requirement.

Studiu comparativ al unui motor pentru mașina de spălat: motor universal versus motor sincron cu MP



Motor	Speed [rpm]	Torque [Nm]	Current [A]	Conductor Loss [W]	Core Loss [W]	Efficiency [%]
UM	563	1.2	4.1	115.98	1.75	37.53
PMSM	563	1.2	1.62	25,58	1,55	71.6

	<i>Power/Volume</i>	<i>Power/weight</i>
Universal Motor	0.106 W / cm ³	17.33 W / kg
PMSM	0.167 W / cm ³	30.02 W/kg

Aplicații speciale



11 kV, 16.7 Hz



Motoare de curent alternativ cu colector utilizate pentru propulsia locomotivelor electrice (Germania, Austria, Suedia, Norvegia). In comparație cu motorul universal, acestea sunt prevăzute cu poli auxiliari și înfășurare de compensare.

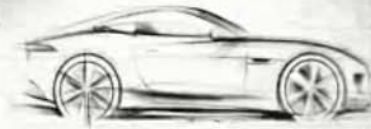
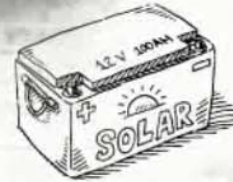
Film demonstrativ – principiul de funcționare a motorului universal

UNIVERSAL MOTOR



00:08,05





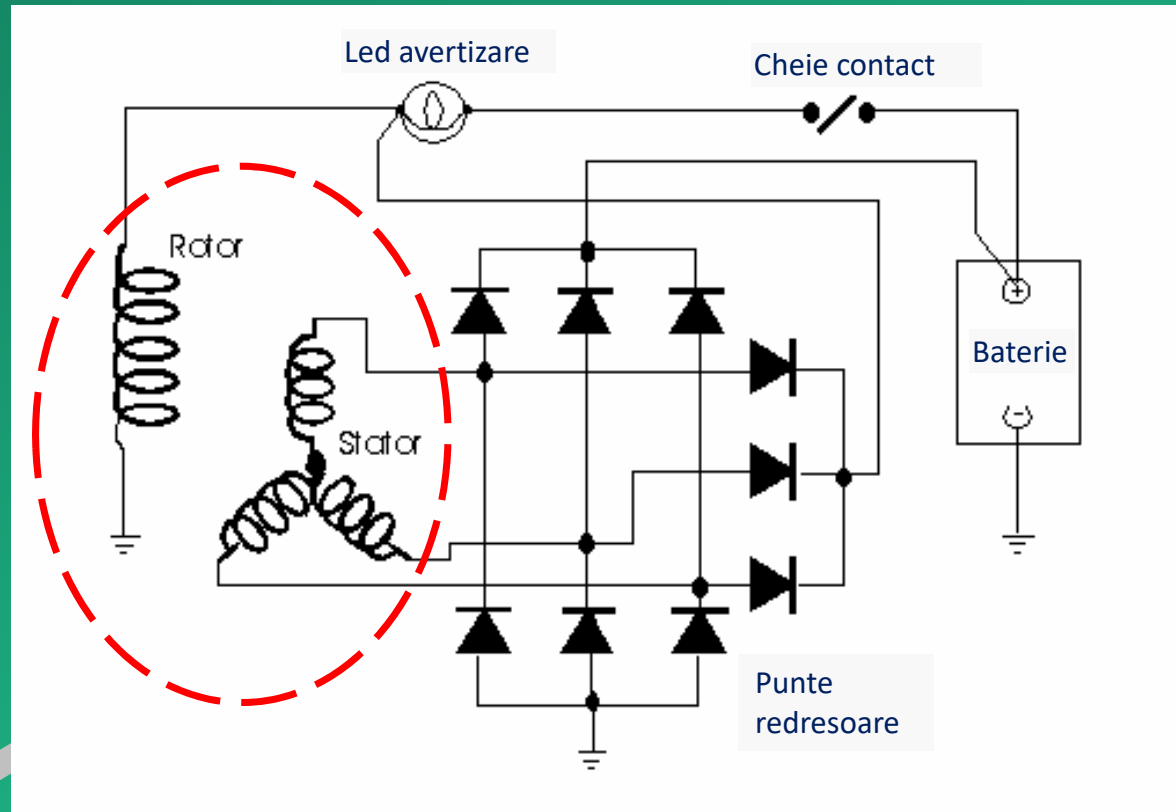
**Alternatorul
cu poli gheara**

Definiție

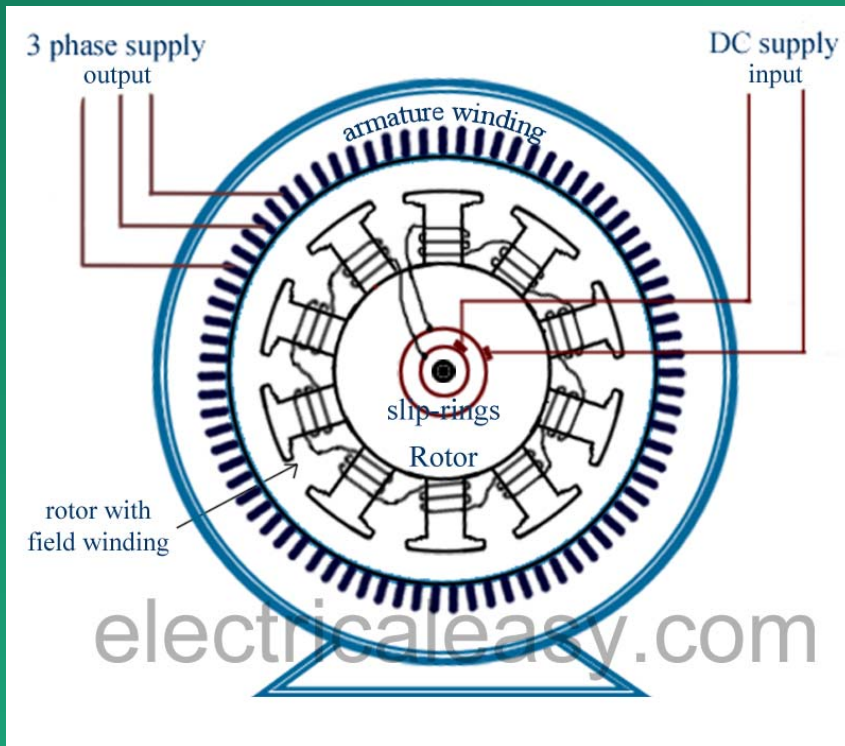
Alternatorul este o mașina sincronă de construcție specială ce funcționează pe autovehicule în regim de generator



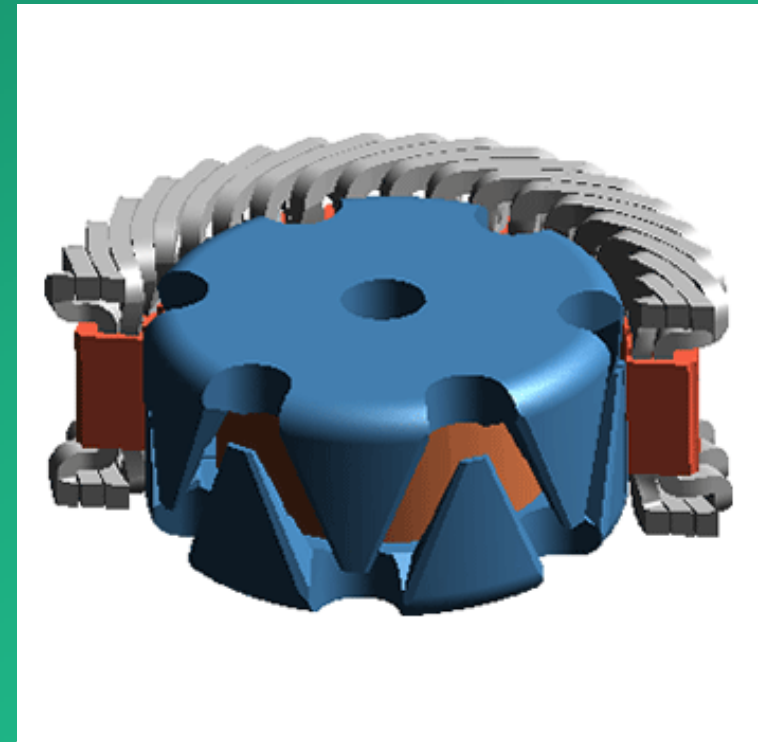
Structura circuitului electric al alternatorului pe automobil



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.)



Generator sincron in structura clasica

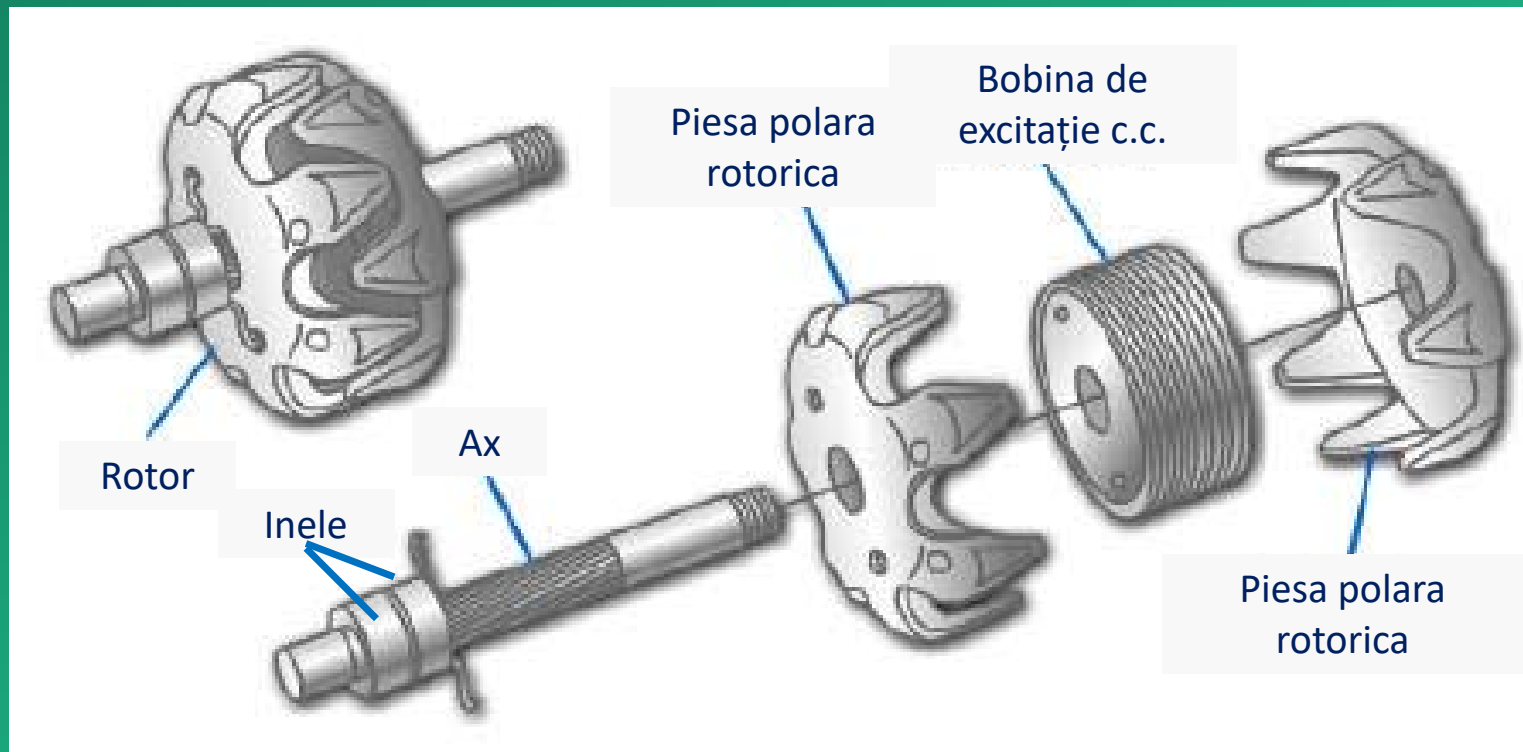


Alternator cu poli gheara
Claw-pole (Lundell) alternator

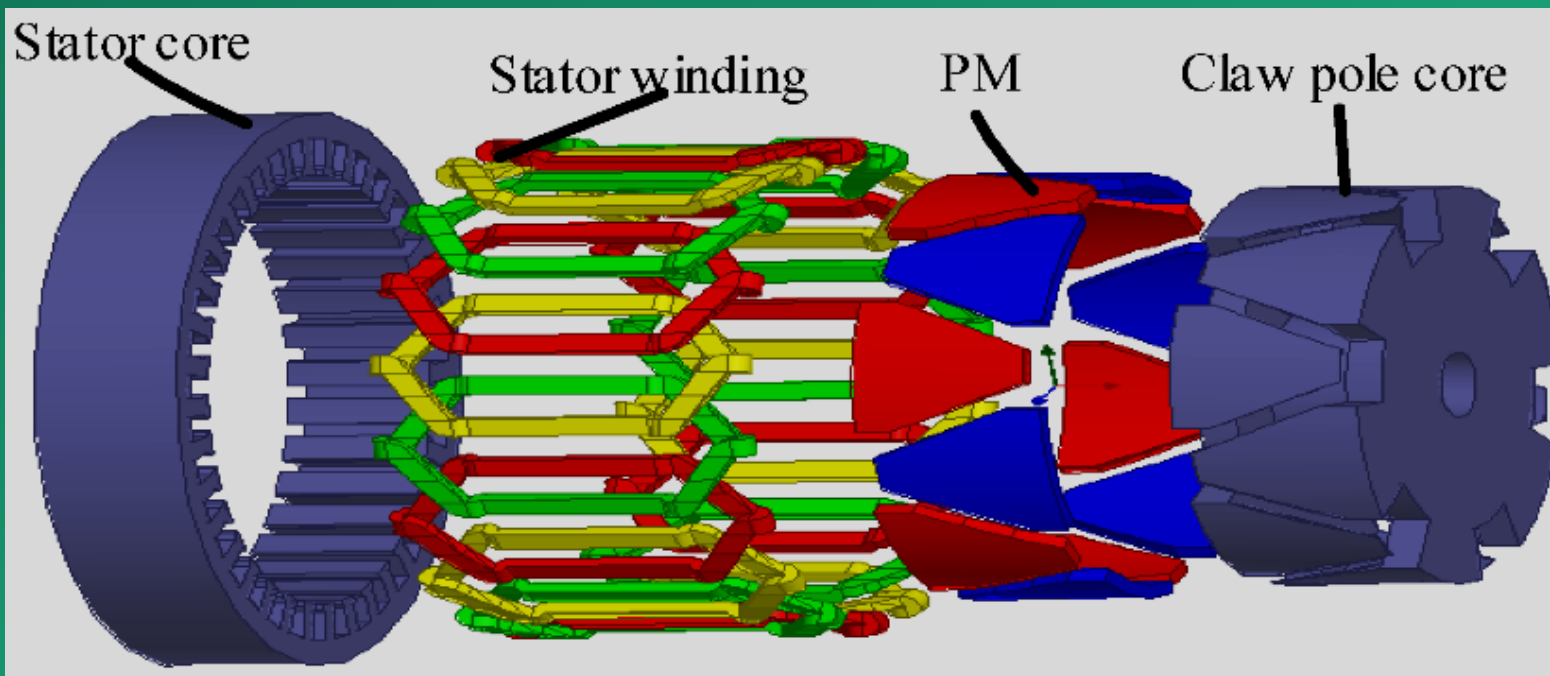
Rotorul este format din două piese polare din material feromagnetic cu „gheare” care, prin montare pe ax, se întrepătrund.



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 inductivi ai generatorului.

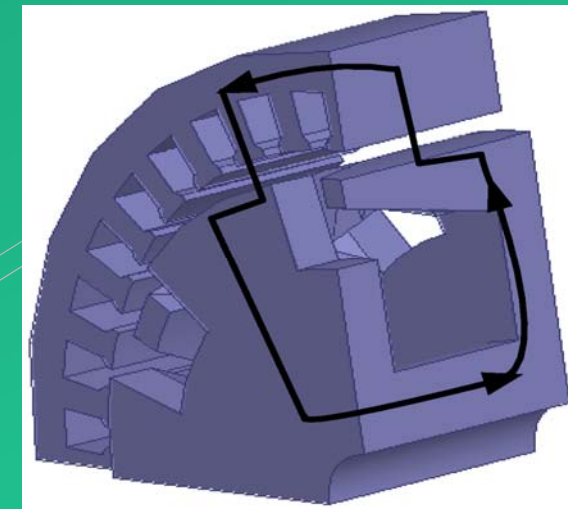


Structura rotorului alternatorului cu poli gheara

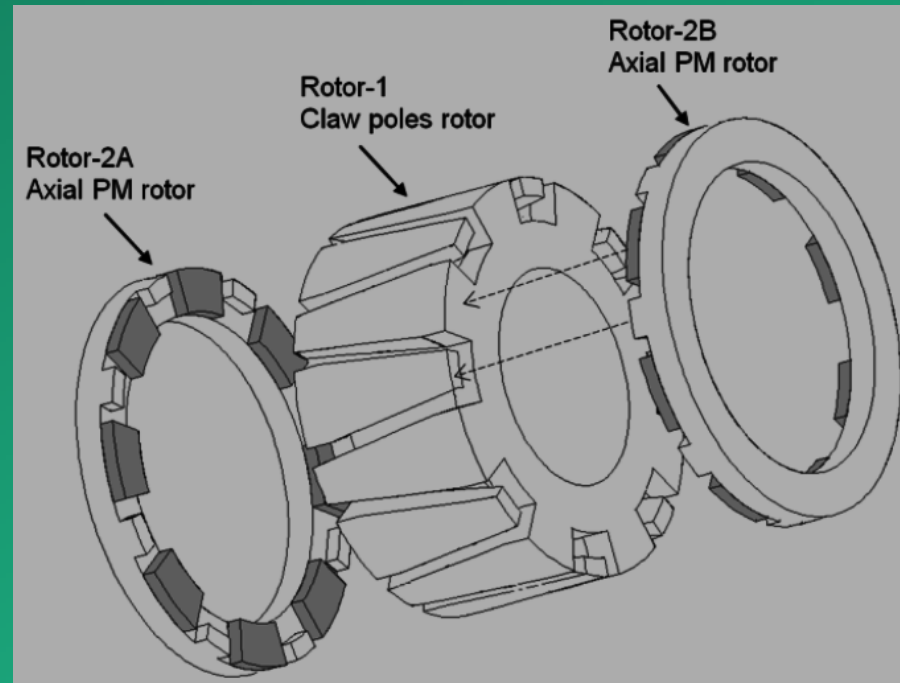


Magneți permanenți plasați pe ghearele polare

Pentru eliminarea sistemului inele-perii se poate elimina înfășurarea de excitație de pe rotor . Ea se înlocuiește cu magneți permanenți plasați pe ghearele pieselor polare rotorice. Aceasta soluție NU mai permite modificarea câmpului inductor astfel încât tensiunea generată de alternator va depinde în permanență de turația rotorului.



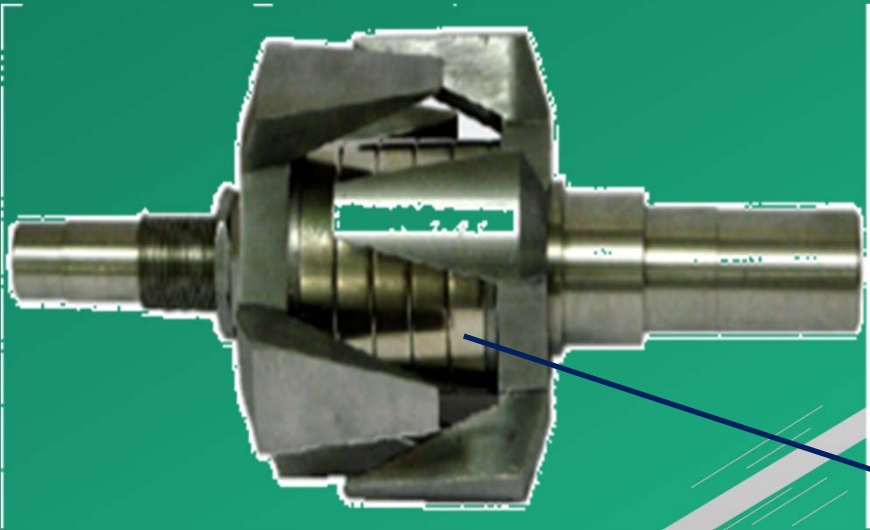
Traseul liniilor de câmp



Alternator hibrid

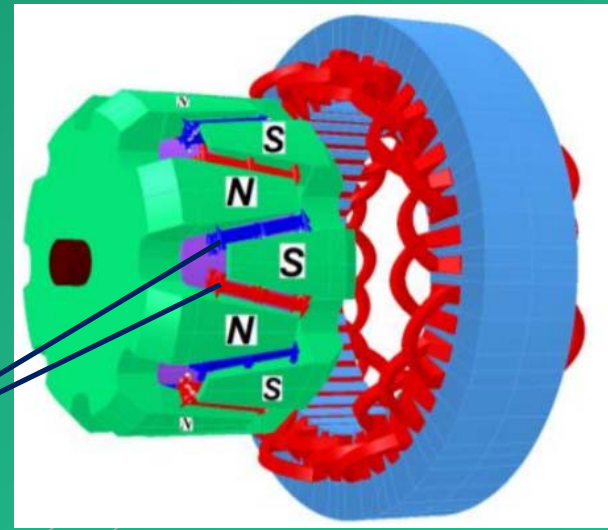
Există variante de alternatoare, numite hibride, la care se adaugă magneți permanenți FĂRĂ a se elimina înfășurarea de c.c. Câmpul inductor se obține prin însumarea câmpului dat de magneții permanenți (și care este constant) cu cel dat de înfășurarea de excitație (care poate fi variat prin modificarea curentului de excitație).

Variantele hibride oferă posibilitatea utilizării alternatorului și în cazul defectării înfășurării de excitație sau a sursei sale de alimentare (mașină cu toleranță la defect).

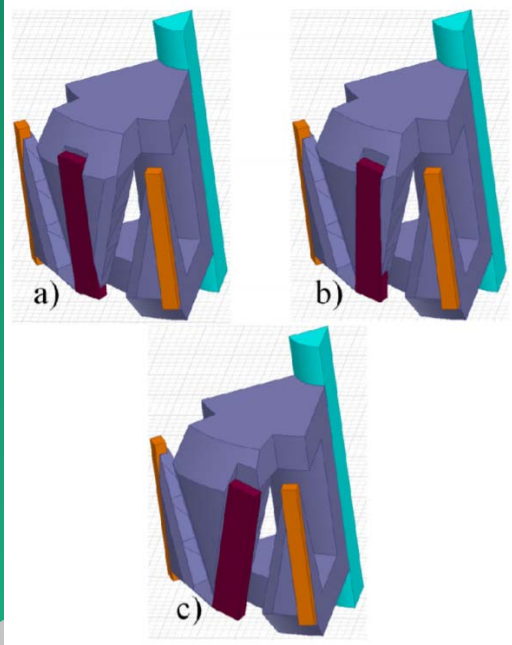


Magneți permanenți plasați pe ax
(varianta numai cu MP)

Magneți
permanenți



Magneți permanenți plasați între
ghearele polare
(varianta hibrida)



Magneți permanenți plasați pe gheare
- varianta hibrida -

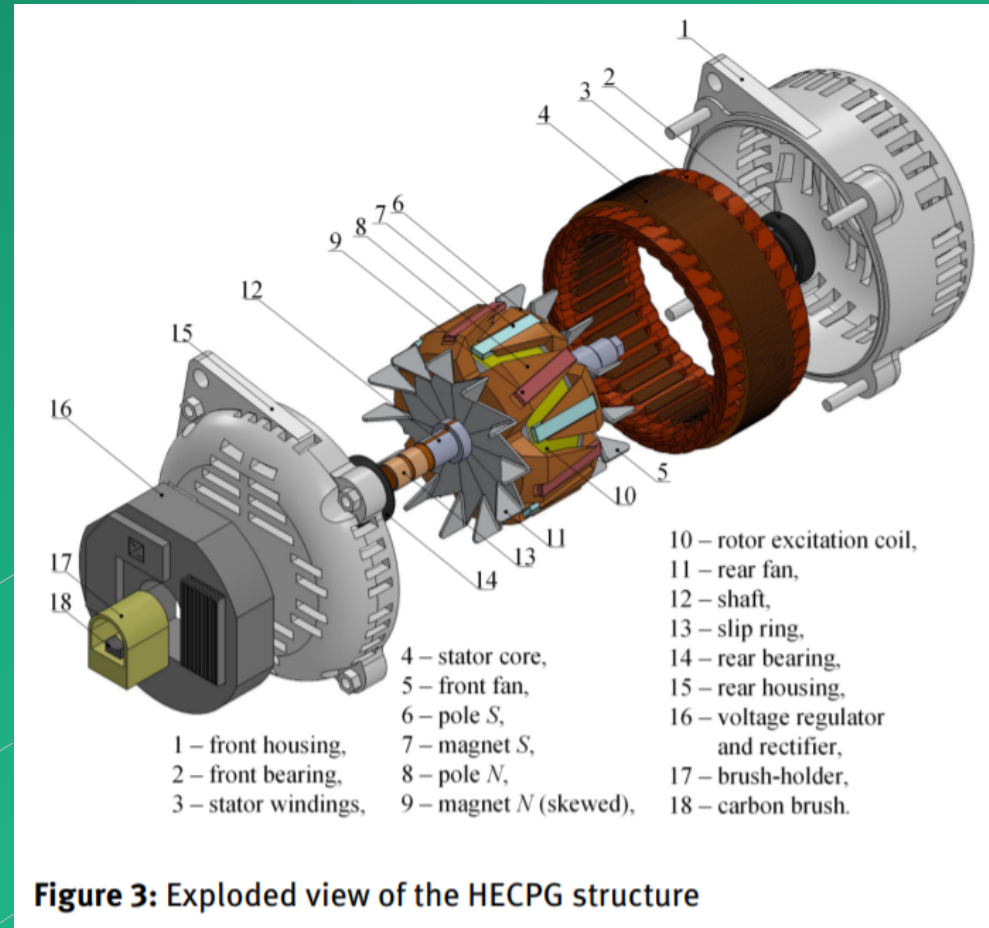


Figure 3: Exploded view of the HECPG structure

Structuri de alternator cu doua tensiuni de ieșire

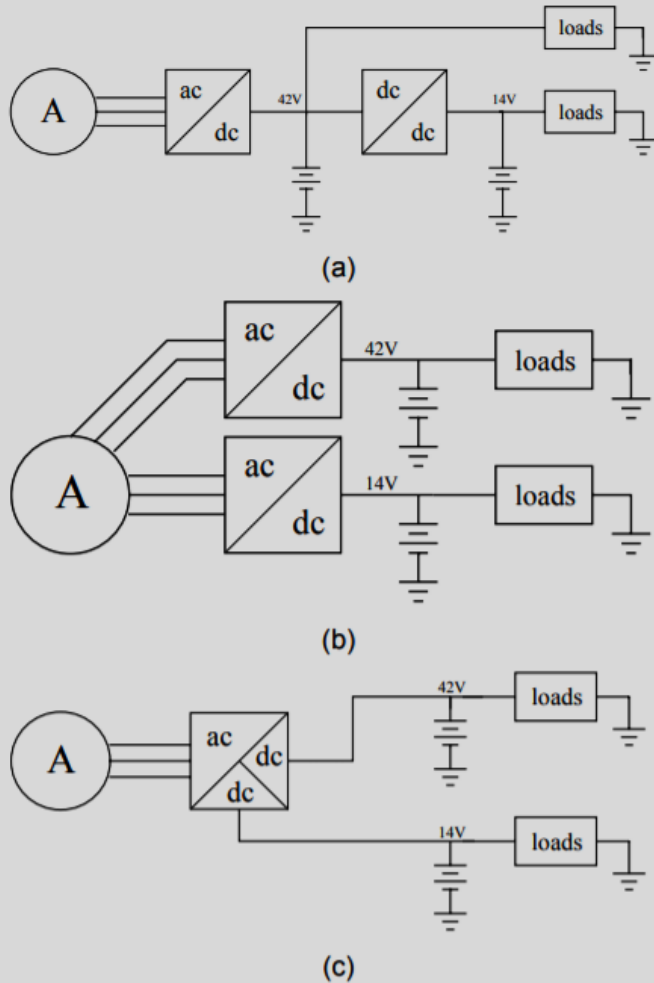


Figure 17: Candidate dual-voltage architectures: (a) dc/dc converter architecture, (b) dual-stator alternator architecture and (c) dual-rectified alternator architecture.

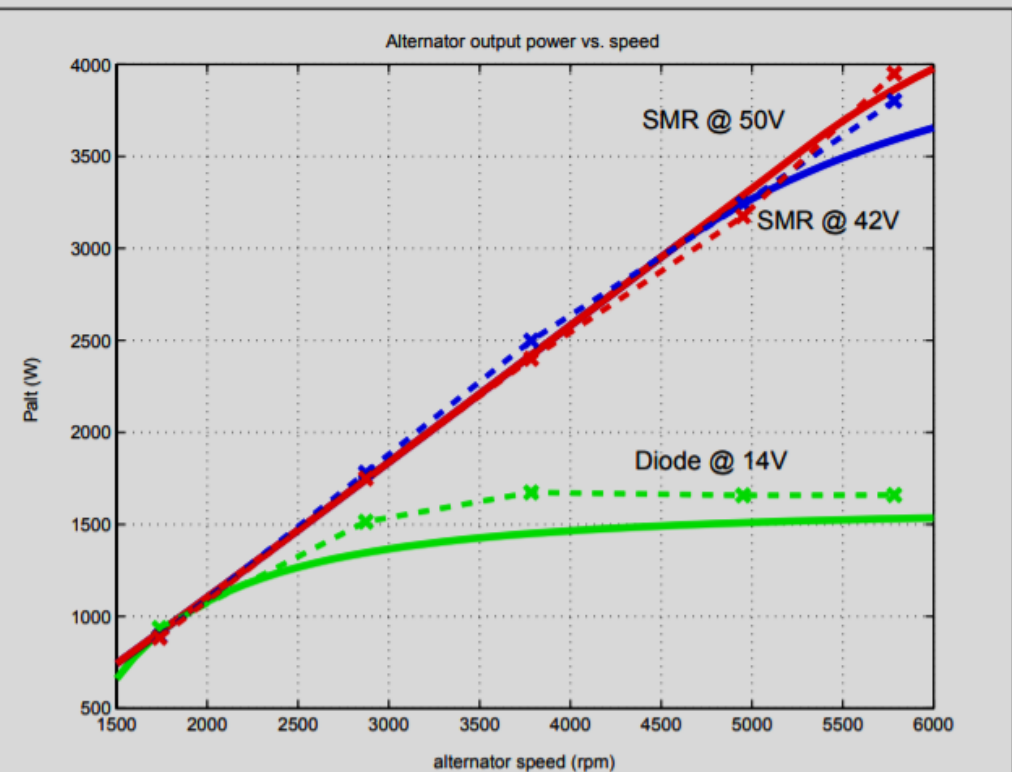


Figure 10: Alternator output power vs. speed for different operating conditions: comparison of analytical and experimental results.



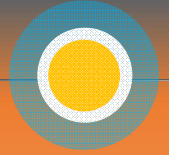
Tahogeneratoare

SELSINE



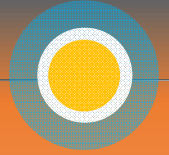
TAHO GENERATOARE





Tahogeneratoarele sunt mașini electrice destinate măsurării vitezei de rotație a unui ax (arbore) pe care sunt montate.





Tahogeneratoarele funcționează în regim de generator.

Mărimea electrică de ieșire este o tensiune proporțională cu viteza de rotație.

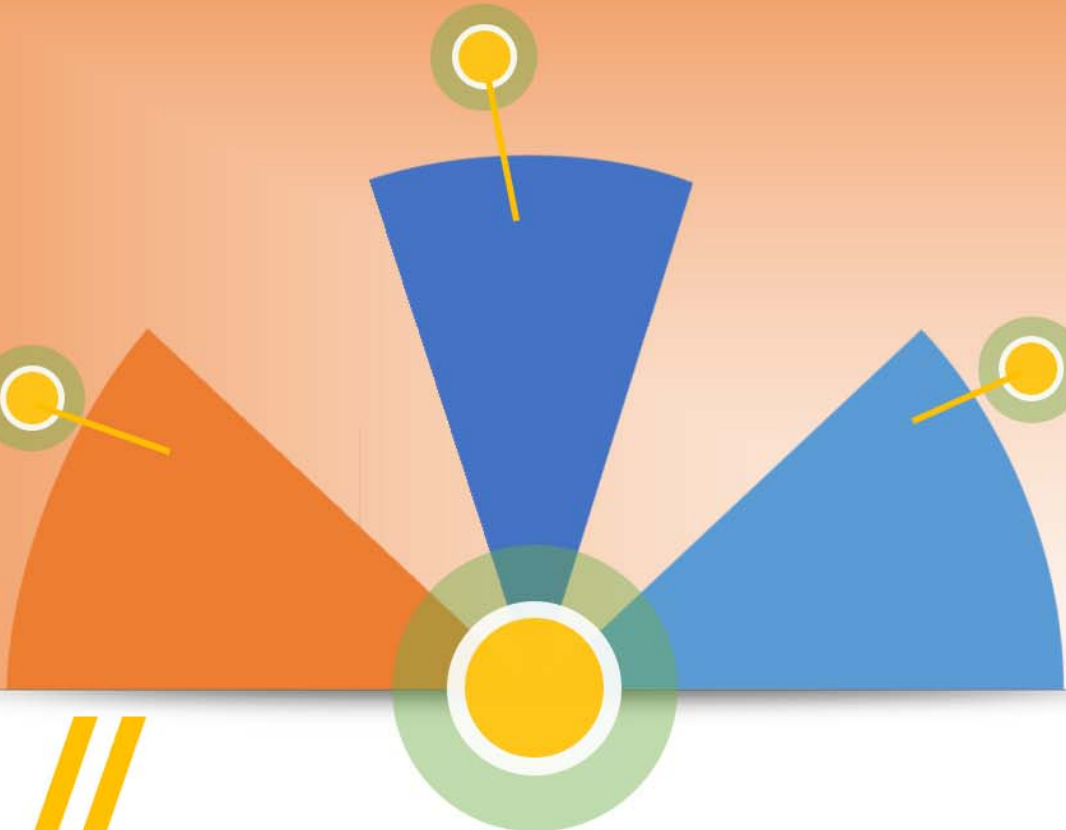
Variația tensiunii funcție de viteză trebuie să fie cât mai liniară și într-o gamă de viteze cât mai largă.



TAHOGENERATOARE
ASINCRONE

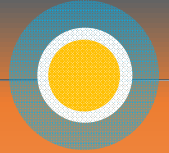
TAHOGENERATOARE
DE C.C.

TAHOGENERATOARE
SINCRONE



CLASIFICARE

TAHOGENERATORUL DE C.C.

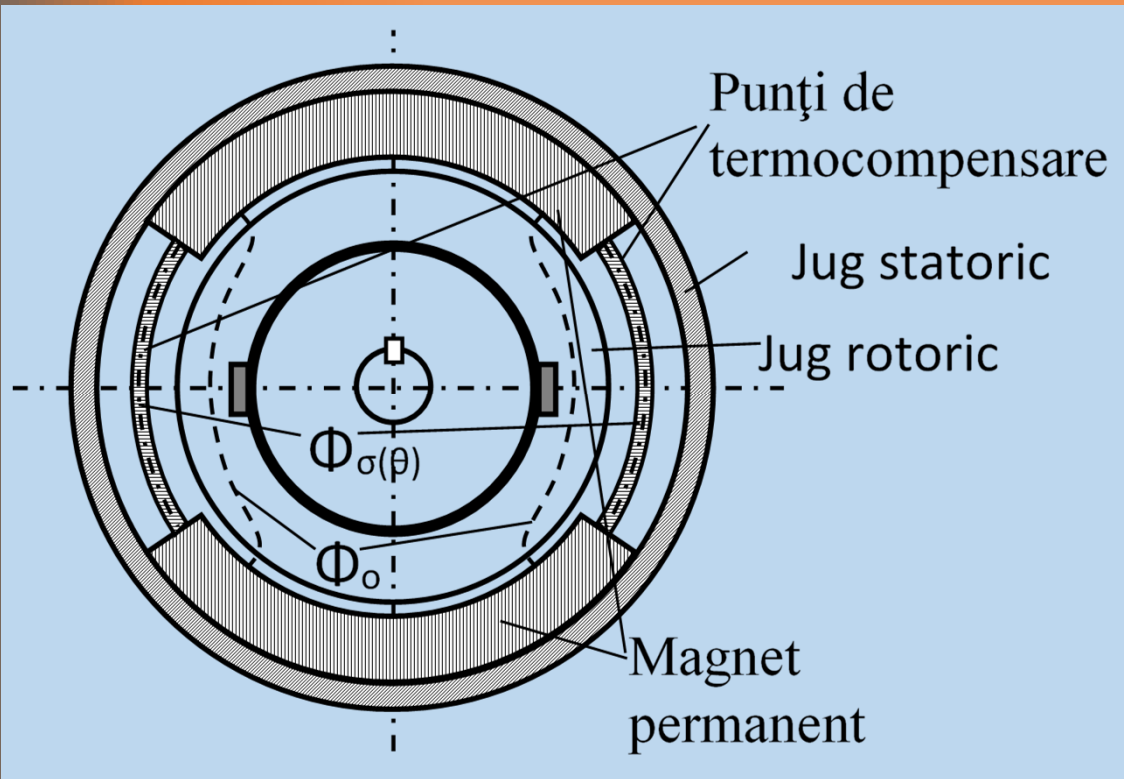
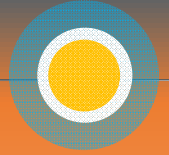


Din punct de vedere constructiv, tahogeneratorul are elementele unei mașini de c.c. în construcție minimală: lipsesc polii auxiliari precum și înfășurarea de compensare.

De regulă, sistemul inductor este realizat cu magneți permanenți și nu cu poli inductori electromagnetici. Aceștia trebuie să aibă stabilitate mare în timp și la temperatură.

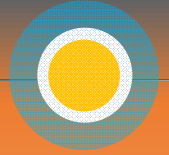
Construcția este mult mai compactă și miniaturizată întrucât tahogeneratorul este o mașină de mică putere (cel mai adesea sarcina este reprezentată de un aparat de măsură, un voltmetru etalonat în unități de viteză).

Contactul perie-colector trebuie să asigure o cădere de tensiune ΔU_p cât mai mică și constantă în timp. Drept urmare, perile și lamelele se construiesc din oțel inoxidabil iar partea de contact a periei se argintează.



Pentru eliminarea erorilor de temperatură se prevăd punți de termocompensare realizate din calmalloy sau termalloy.

La funcționarea la temperaturi joase, fluxul inductor se împarte prin punți (ϕ_{σ}) respectiv rotor (ϕ_o). Când crește temperatura (și se micșorează fluxul inductor al magneților permanenți) punțile de termocompensare își micșorează permeabilitatea magnetică forțând închiderea fluxului inductor în majoritate prin rotor, astfel încât fluxul ce determină tensiunea la borne să rămână constant.



// Ecuatii si caracteristici de funcționare

La funcționarea in gol, tensiunea la bornele tahogeneratorului este:

$$E_0 = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{60} \cdot n \cdot \Phi_0 = k_e \cdot n \cdot \Phi_0 \quad (1)$$

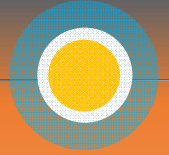
unde: p-nr. perechi poli; a-nr. perechi căi de curent; n-turație.

Dacă fluxul inductor ϕ_0 este constant, atunci dependența *tensiune - turație* este perfect liniară.

La funcționarea in sarcină, ecuația de tensiuni devine:

$$U_a = E - R_a \cdot I_a - \Delta U_p \quad (2)$$

unde: U_a -tensiunea la borne; E-tensiunea indusă in înfășurarea rotorice; R_a -rezistența înfășurării rotorice; I_a -curentul prin indus și sarcină; ΔU_p - căderea de tensiune la perii.



Eroarea relativă la funcționarea în sarcină față de mersul în gol este:

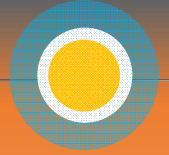
$$\varepsilon_r = \frac{E_0 - U_a}{E_0} \quad (3)$$

Dacă exprimăm tensiunea indusă în sarcină $E = E_0 - k' \cdot I_a \cdot n$ (4)

unde căderea de tensiune $k' \cdot I_a \cdot n$ se datorează reacției indusului și este proporțională cu curentul de sarcină și turația rotorului.

Folosind relațiile (2) și (4) și înlocuind în (3) se obține expresia erorii relative a tahogeneratorului :

$$\varepsilon_r = \frac{k' \cdot n \cdot I_a + R_a \cdot I_a + \Delta U_p}{U_a + k' \cdot n \cdot I_a + R_a \cdot I_a + \Delta U_p}$$

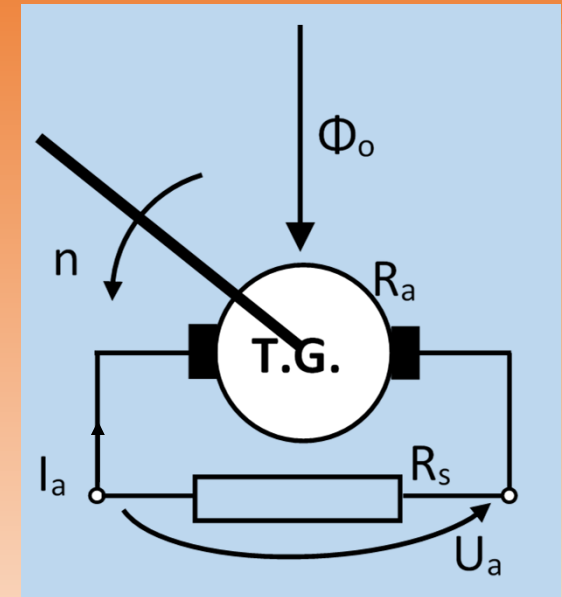


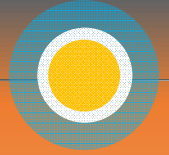
dar : $U_a = R_s I_a$ unde: unde R_s este rezistența sarcinii de la bornele tahogeneratorului. Înlocuind și împărțind cu I_a , eroarea relativă are expresia:

$$\varepsilon_r = \frac{k' \cdot n + R_a + \Delta U_p / I_a}{R_s + R_a + k' \cdot n + \Delta U_p / I_a}$$

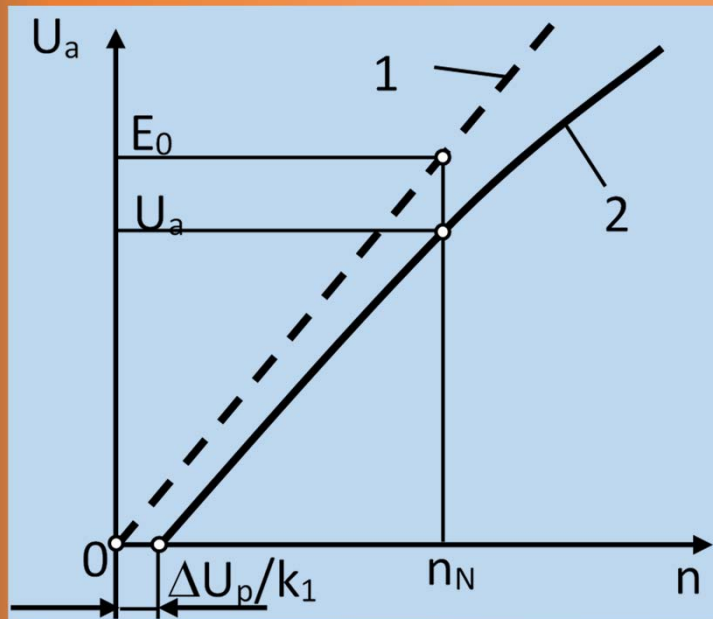
Din expresia de mai sus și ecuația de tensiuni, rezultă că eroarea relativă este cu atât mai mică cu cât:

1. Rezistența de sarcină, R_s , este mai mare;
2. Căderea de tensiune la perii este mai mică;
3. Viteza măsurată este mai mică decât viteza maximă indicată pe plăcuța indicatoare;
4. Rezistența înfășurării rotorice, R_a , este mai mică.





Caracteristica *tensiune - turație*
a tahogeneratorului de C.C.

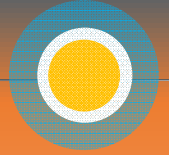


1 – caracteristica de mers in gol (ideală)

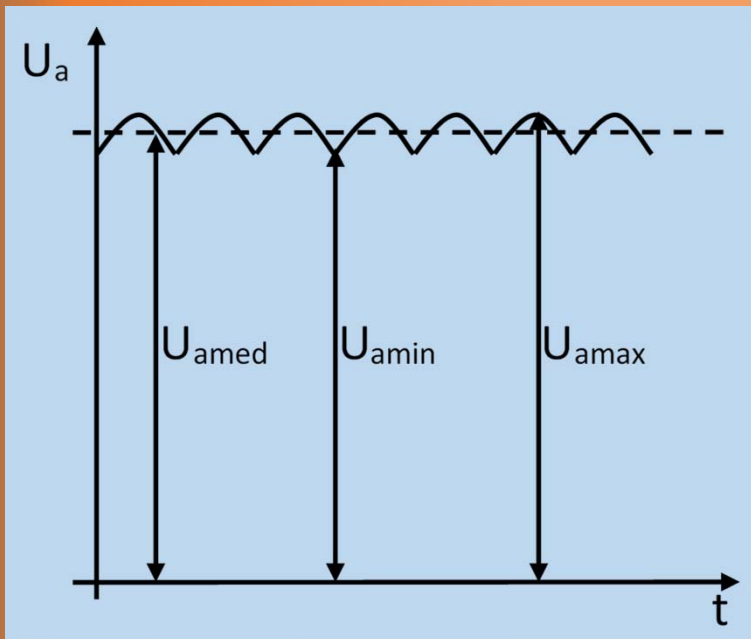
2 – caracteristica de funcționare in sarcină (reală)

Există o zonă de insensibilitate (numită „zona moartă”) in care tensiunea la borne este nulă chiar dacă rotorul se rotește. Aceasta corespunde căderii de tensiune la perii și are valoare, de regulă, sub 1,5 V).

La viteze mari, caracteristica se „încalină”; se alterează liniaritatea și crește eroarea tahogeneratorului.



Variația tensiunii la bornele tahogeneratorului de C.C.

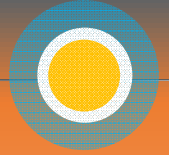


O altă categorie de erori a tahogeneratorului de c.c. se datorează variației în timp a tensiunii de ieșire. Această tensiune se poate descompune într-o componentă continuă, U_{amed} , și una alternativă. Curentul de sarcină va avea, de asemenea, o componentă continuă și una alternativă. Componenta alternativă a curentului poate fi defazată față de cea a tensiunii; dacă sarcina nu este pur activă, poate apărea deci o eroare de fază, similară cu cea de la tahogeneratoarele de curent alternativ. Reducerea acestor erori se face prin mărirea numărului de lamele de colector și implicit micșorarea lățimii lor.

Coeficientul de ondulație a tensiunii de ieșire se definește prin:

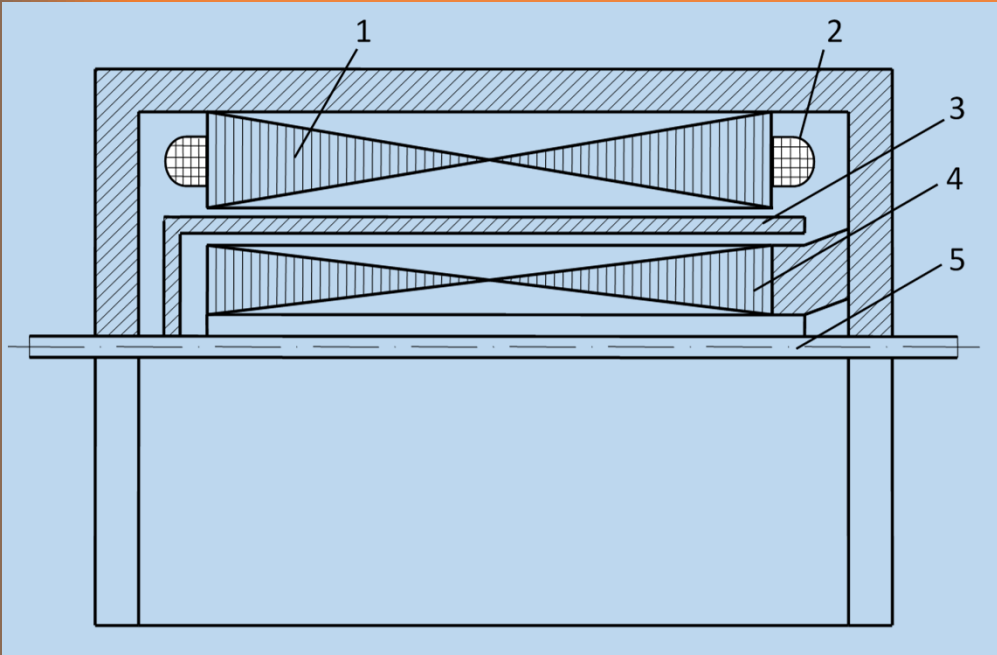
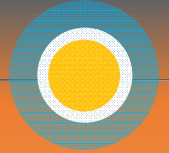
$$k_o = \frac{U_{amax} - U_{amin}}{U_{amax} + U_{amin}} \cdot 100$$

și atinge valori de 4,89 % pentru 5 lamele de colector, scăzând la 0,73 % când numărul de lamele este 15. Pentru reducerea acestui coeficient se mai utilizează filtre RC montate în paralel cu sarcina, dar care influențează negativ răspunsul sistemului, în regim dinamic.

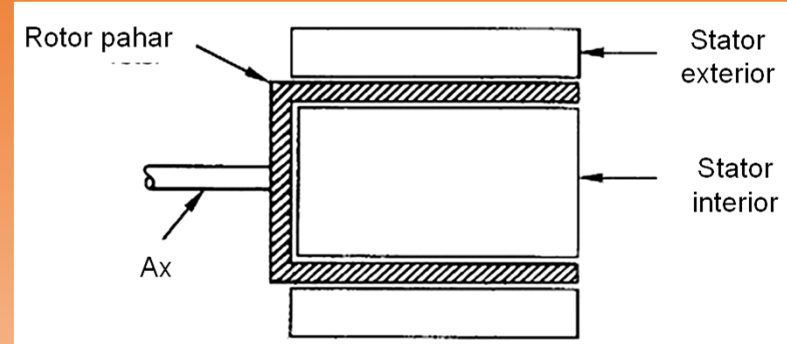


Pe plăcuța indicatoare a tahogeneratorului trebuie să se regăsească fie valoarea tensiunii corespunzătoare unei turații de referință (caz în care se acceptă o variație liniară și se poate folosi o regulă de proporționalitate), fie *constanta tahogeneratorului* care permite calculul vitezei printr-o operație aritmetică simplă.

TAHOGENERATORUL ASINCRON BIFAZAT

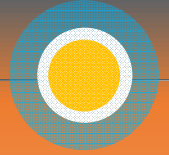


1 - miez stator exterior; 2 - înfășurări statorice; 3 – rotor neferomagnetic tip pahar; 4 - miez stator interior; 5 – arbore

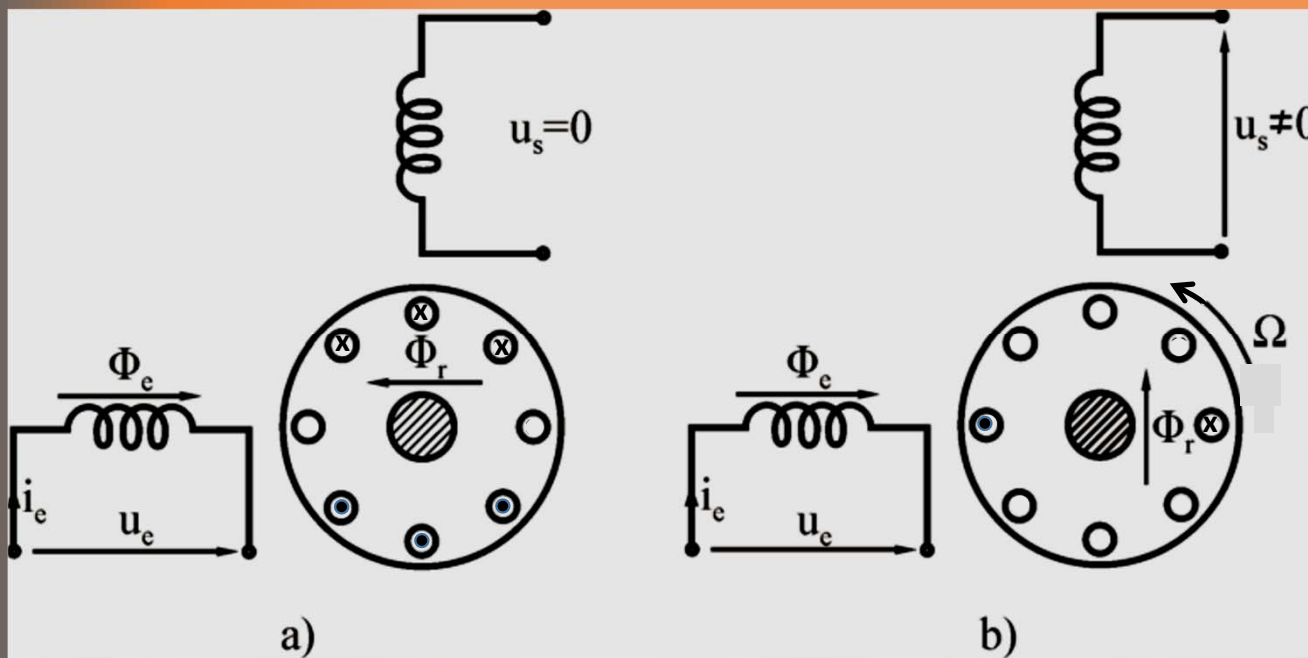


Varianta cea mai utilizată, din punct de vedere constructiv, este cea cu rotor neferomagnetic sub formă de pahar. Pentru închiderea liniilor de câmp magnetic, mașina este prevăzută cu două statoare: unul exterior și cel de-al doilea interior.

Mașina are două înfășurări, una denumită de excitație și cealaltă de sarcină, și sunt plasate fie ambele pe statorul exterior, fie ambele pe statorul interior, fie una pe statorul interior și cea de-a doua pe statorul exterior. Indiferent de plasamentul lor, înfășurările sunt decalate cu rigurozitate la 90° el. Între cele două statoare este plasat rotorul, sub formă de pahar, realizat din aluminiu sau aliaje ale acestuia, bronz fosforos, etc.



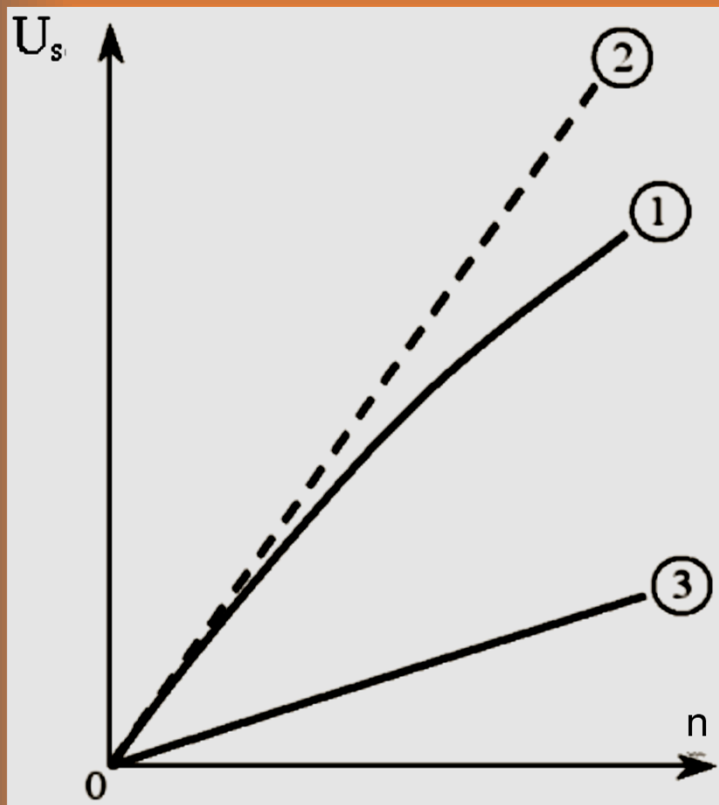
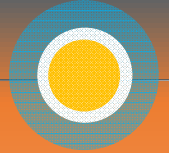
Principiul de funcționare și caracteristicile tahogeneratorului asincron bifazat



Înfășurarea de excitație este alimentată permanent de la o sursă de tensiune alternativă, în timp ce la bornele înfășurării de sarcină se culege tensiunea proporțională cu turația arborelui.

Dacă rotorul este imobil (fig. a), câmpul alternativ produs de înfășurarea de excitație determină apariția unor curenți în rotor, analog situației transformatorului cu secundarul în scurt circuit, care creează un flux rotor de reacție, ce tinde să anuleze fluxul ϕ_e . Deoarece fluxul rotor, ϕ_r , este perpendicular pe axa înfășurării de sarcină, tensiunea indusă în aceasta este nulă.

Când rotorul este antrenat cu viteza Ω (fig. b), fluxul de excitație induce în rotor, pe lângă tensiunea statică din cazul precedent și o tensiune de rotație. Curenții rotorici, corespunzători acestei tensiuni, creează un flux ϕ_r , orientat pe direcția axei înfășurării de sarcină, respectiv la bornele acesteia apare o tensiune proporțională cu turația n . Frecvența tensiunii induse este egală cu f_1 . De obicei, frecvența tensiunii de alimentare este de 50 sau 400 Hz.



Caracteristica tensiune - turație a tahogeneratorului asincron

1 – caracteristica de mers in gol

2 – caracteristica de mers ideală

3 – caracteristica de funcționare liniarizată prin creșterea rezistenței echivalente a rotorului

$$\underline{U}_s = \frac{\underline{U}_e \cdot \gamma}{\underline{a} + \underline{b} \cdot \gamma^2} \quad \text{unde } \gamma = \frac{n}{n_1}$$

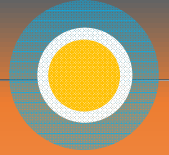
iar \underline{a} și \underline{b} sunt termeni ce țin cont de rezistențele și reactanțele tahogeneratorului.

Chiar și la funcționarea in gol, caracteristica se „înclină” cu atât mai mult cu cât viteza rotorului devine mai apropiată de sincronism.

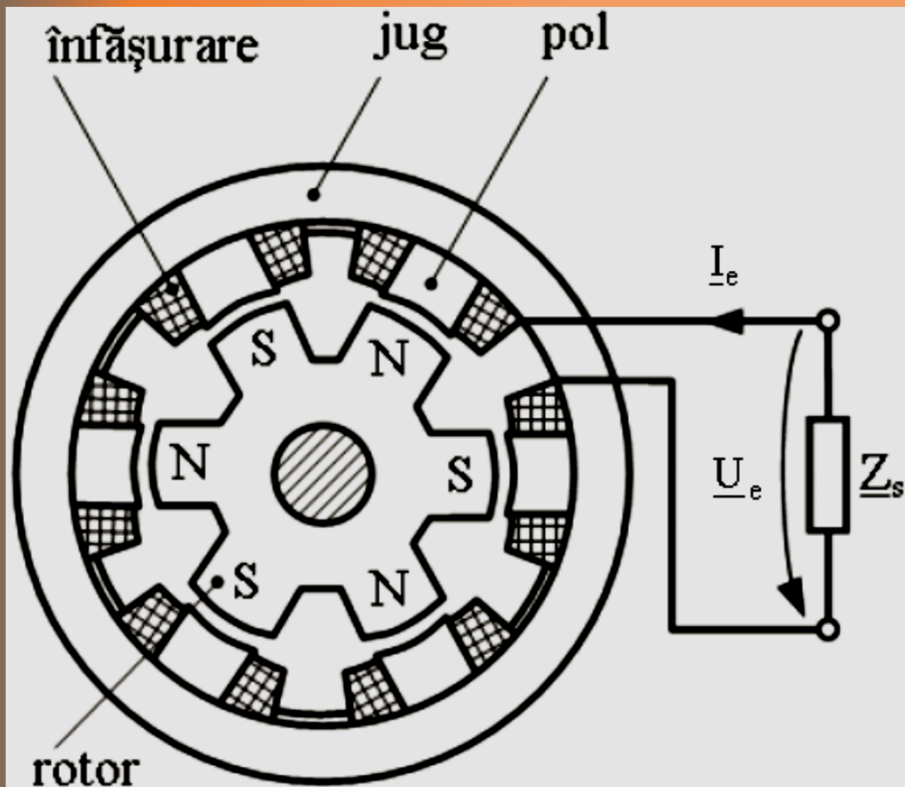
Se recomandă ca funcționarea tahogeneratorului sa aibă loc la viteze de 10-20% din valoarea de sincronism.

Se utilizează frecvențe de 400 Hz tocmai pentru ca viteza de sincronism să fie mult mai mare.

Frecvența tensiunii la bornele înfășurării de sarcină este aceeași cu frecvența tensiunii înfășurării de excitație și este independentă de viteza rotorului (fiind plasată tot pe statorul mașinii asincrone).



TAHOGENERATORUL SINCRON



Satorul mașinii are, de regulă, o înfășurare monofazată plasată pe poli aparenti (ca in figură) sau repartizată in crestături.

Rotorul este o roată polară cu magneți permanenți.

Tensiunea la bornele înfășurării statorice (la gol) indusă este:

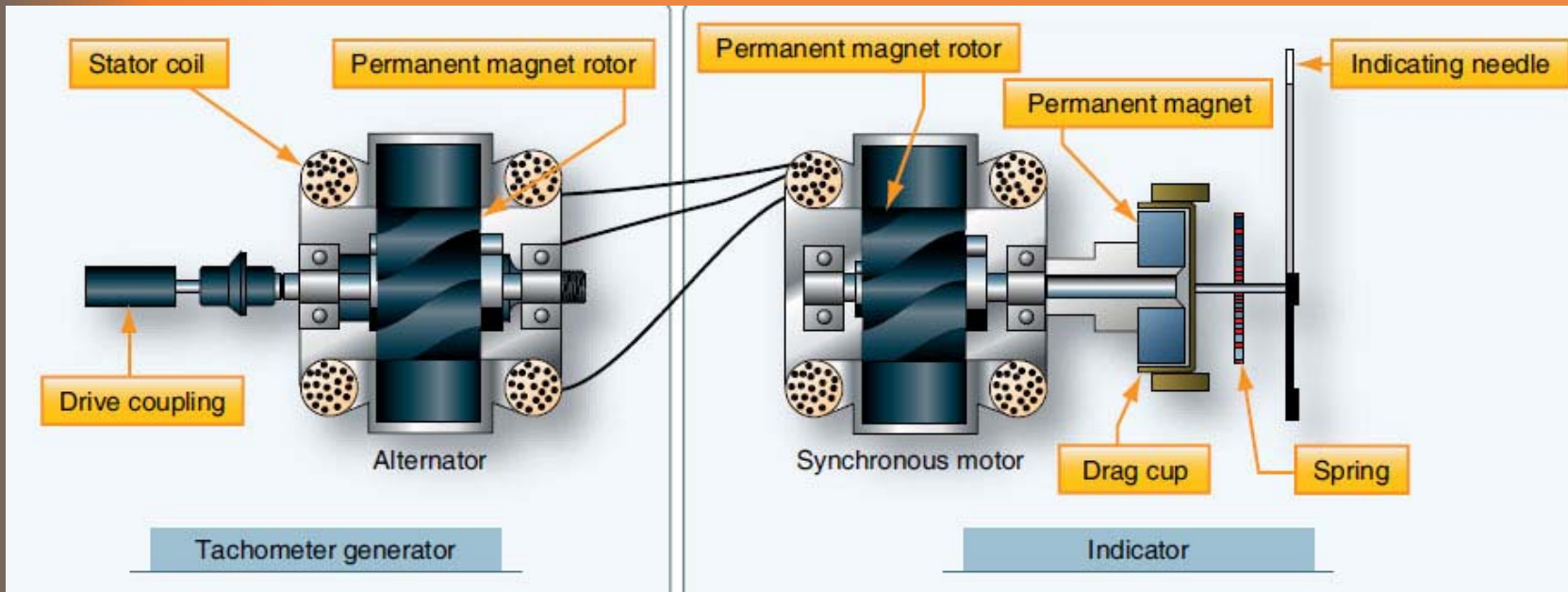
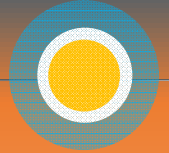
$$E = 4,44 \cdot f \cdot k_b \cdot N \cdot \phi_e = 4,44 \cdot \frac{p \cdot n}{60} \cdot k_b \cdot N \cdot \phi_e = k_e \cdot n$$

La funcționarea in sarcină, caracteristica $U_e=f(n)$ se curbează accentuat datorită reacției indusului și a variației impedanțelor cu turația.

Tensiunea la borne are frecvența variabilă.

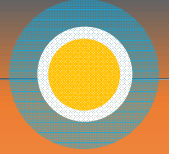
Se folosește, de regulă, numai pentru măsurarea turației. Nu se folosește in bucle automate de reglaj.

Sistem de măsură a turației arborelui cotit acționat de motoare cu piston pe aeronave



Sistemul conține un tahogenerator sincron, un motor sincron cu magneti permanenți pe rotor și un „speedometru”.

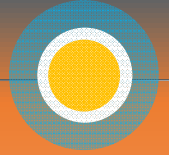
Tensiunea de frecvență variabilă produsă de tahogenerator alimentează un motor sincron ce rotește magnetul permanent al speedometrului. Câmpul variabil induce în paharul neferomagnetic curenți turbionari care creează la rândul lor un câmp. Apare un cuplu de atracție mutuală ce tinde să rotească paharul și acul indicator ce este în legătură mecanică cu acesta. Nu are loc o rotație continuă întrucât există un arc ce limitează acest lucru. Cu cât viteza este mai mare cu atât cuplul ce acționează asupra paharului este mai mare și deviația acului indicator este mai mare.



	Avantaje	Dezavantaje
Tahogeneratorul de c.c.	<ul style="list-style-type: none">- Are precizia cea mai ridicată dintre toate tahogeneratoarele;- Nu are nevoie de sursă de alimentare	<ul style="list-style-type: none">- Prezența sistemului colector perii;- Pot apărea paraziți ce pot constitui semnale de comandă nedorite.
Tahogeneratorul asincron bifazat	<ul style="list-style-type: none">- Nu are contacte alunecătoare;- Rotor cu inerție redusă;- Tensiunea măsurată are frecvență constantă.	<ul style="list-style-type: none">- Are nevoie de sursă de alimentare pentru înfășurarea de excitație (eventual de frecvență ridicată);- Tensiunea nu depinde întru totul liniar de viteză.
Tahogeneratorul sincron	<ul style="list-style-type: none">- Construcția cea mai simplă și mai robustă;- Nu are nevoie de sursă de alimentare	<ul style="list-style-type: none">- Are precizia cea mai scăzută dintre toate tahogeneratoarele;- Tensiunea la borne are frecvență variabilă.

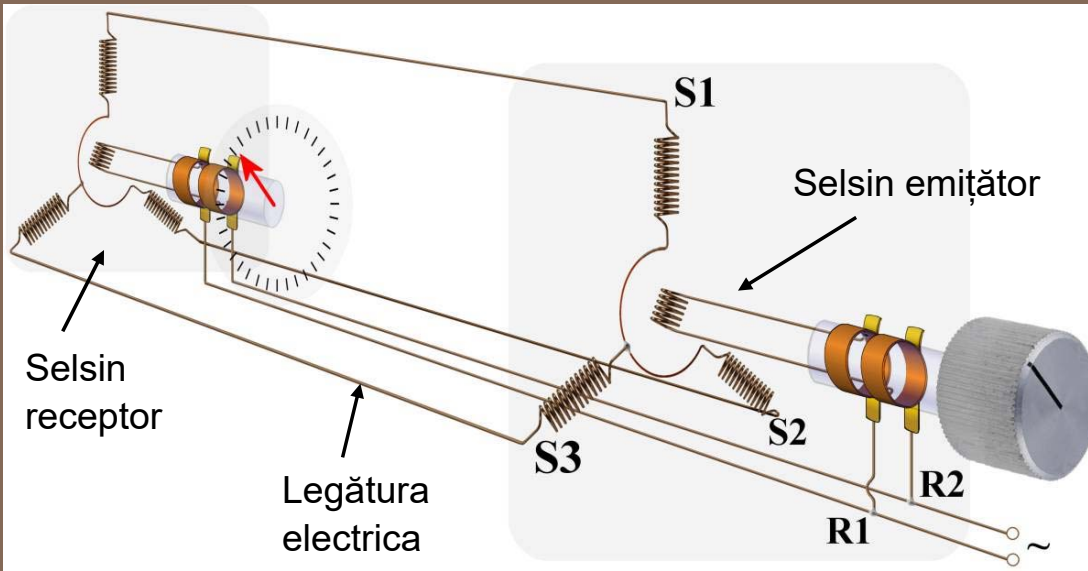
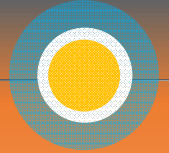
SELSSINE





Selsinele sunt mașini electrice de construcție specială, destinate transmisiei sincrone a mișcărilor unor elemente mobile între care **NU EXISTĂ** legătură mecanică.



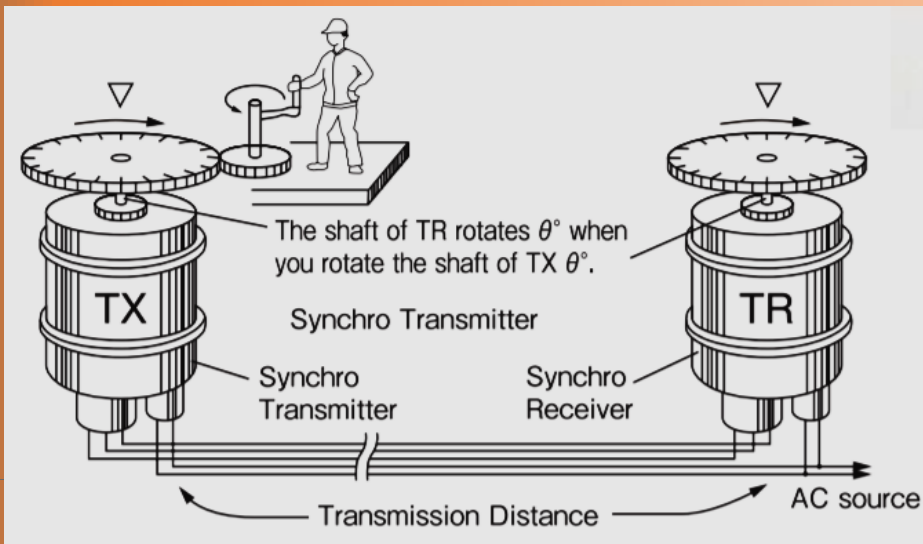


Structura unui sistem de transmisie sincronă a mișcării cu selsine

De regulă, se utilizează câte două unități (selsine) identice, fiecare dintre ele fiind cuplată mecanic la un element mobil.

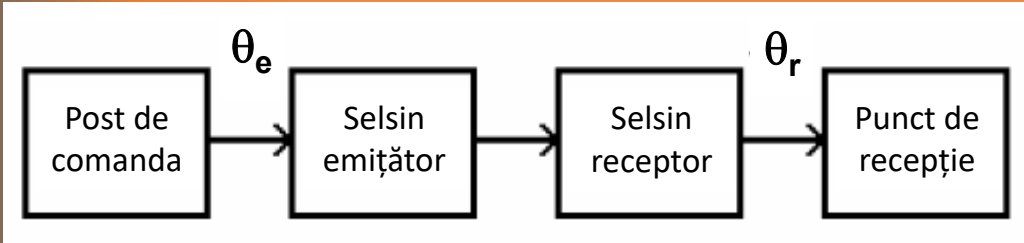
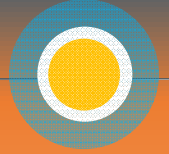
Selsinul ce preia mișcarea mecanică de comandă se numește *selsin emițător* iar cel care execută transmiterea sincronă a mișcării, *selsin receptor*.

Intre cele două selsine există *doar* legătură electrică.

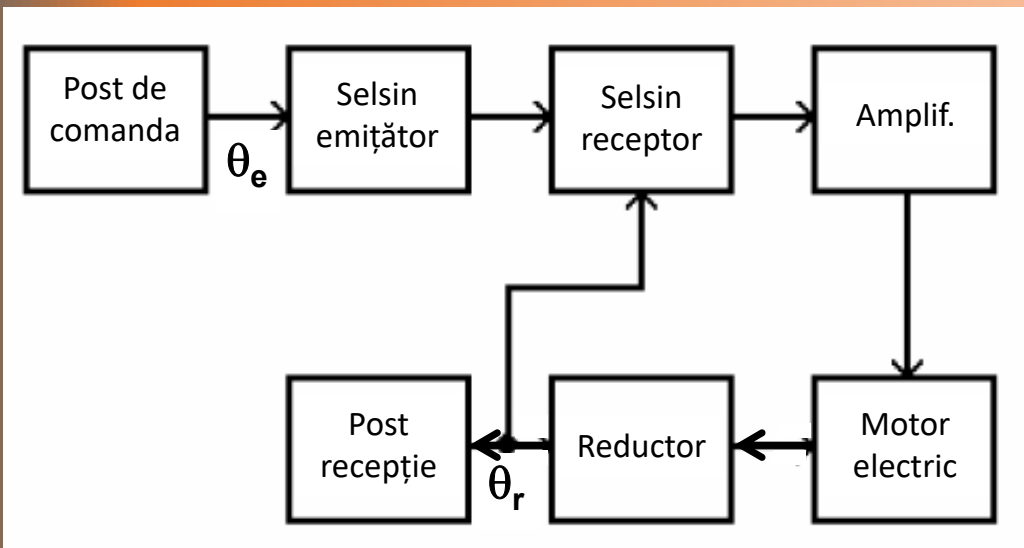




Regimuri de funcționare



A. Regim de indicator

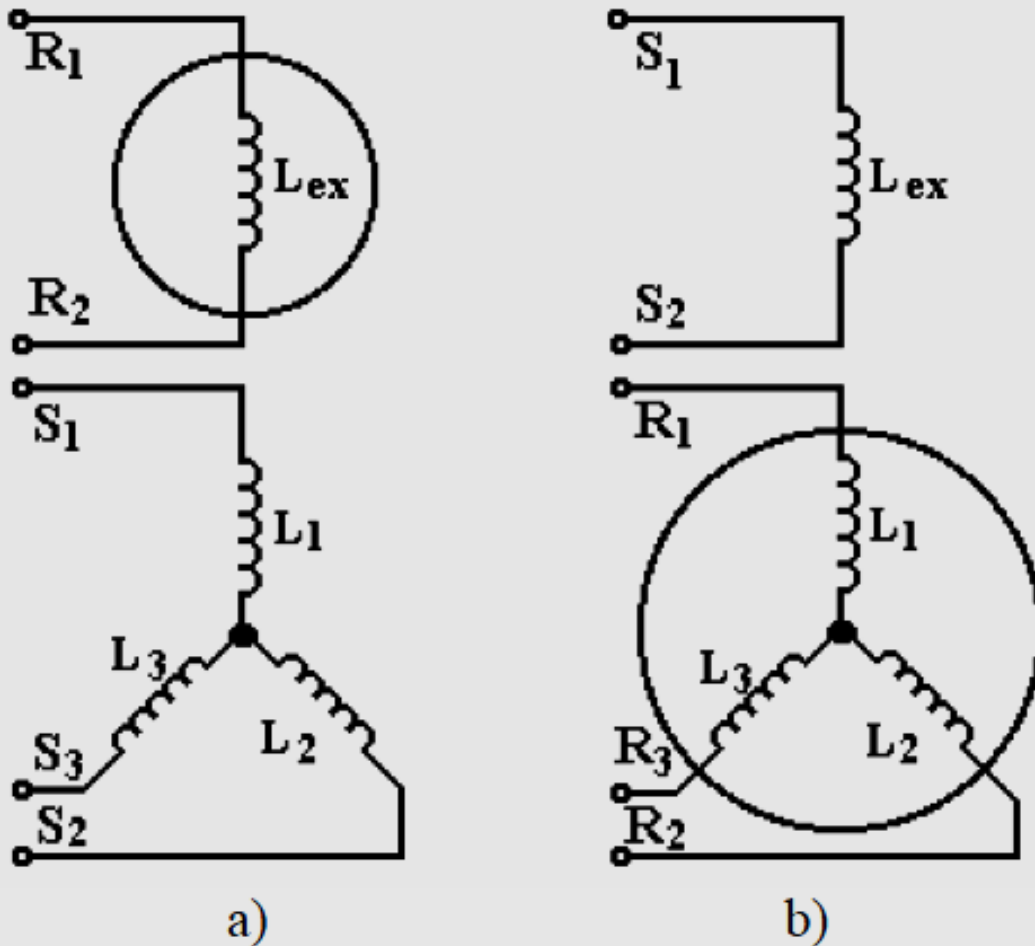
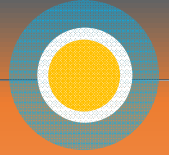


B. Regim de transformator

A. Regim de indicator. In acest regim, unghiul θ_e comandat de la punctul de comandă printr-o acțiune mecanică este preluat de selsinul emițător care îl transmite pe cale electrică selsinului receptor. Acesta execută o mișcare de rotație cu unghiul θ_r (ideal egal cu θ_e) ce este transmisă mecanic la punctul de recepție. De regulă, punctul de recepție este un aparat indicator, prin urmare cuplul rezistent impus de punctul de recepție este foarte mic.

B. Regim de transformator. Acest regim se folosește atunci când in postul de recepție există un mecanism ce are cuplu rezistent mare. Unghiul de comandă θ_e , preluat din postul de comandă prin intermediul selsinului emițător și transmis electric către selsinul receptor, determină un semnal electric, ce este amplificat și transmis unui motor electric, care, prin intermediul unui reductor, duce la anularea diferenței $\theta_e - \theta_r$.

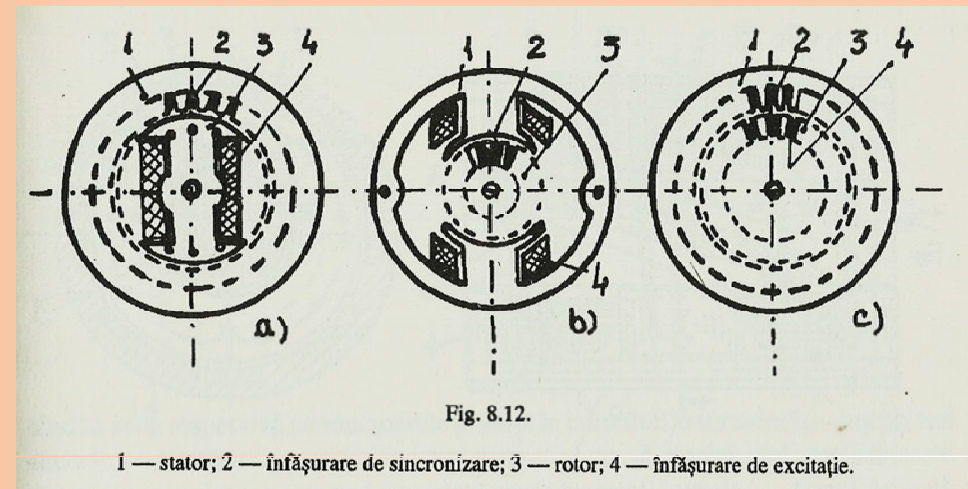
Construcție, tipuri constructive



Selsinele sunt mașini electrice cu DOUA înfășurări: o înfășurare *monofazată*, numită *înfășurare de excitație*; o înfășurare *trifazăată*, numită *înfășurare de sincronizare*. Legătura electrică se realizează întotdeauna între înfășurările de sincronizare.

a) Înfășurare trifazăată pe stator, înfășurare monofazată pe rotor; în acest caz mașina are două inele respectiv două perii.

b) Înfășurare trifazăată pe rotor, înfășurare monofazată pe stator; în acest caz mașina are trei inele respectiv trei perii.



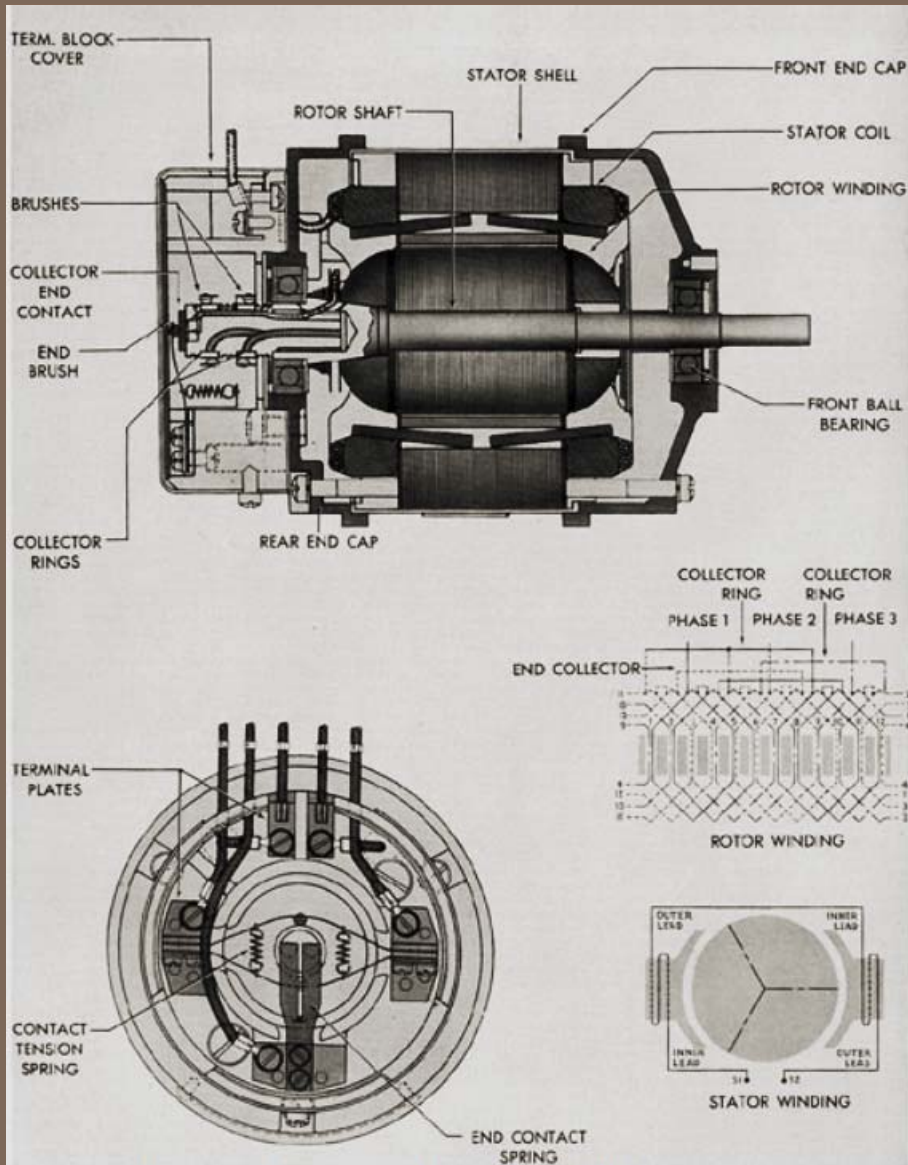
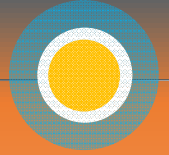


Figure 10-1. Sectional view of type "A" transmitter.

Miezul magnetic este realizate din tole de foarte bună calitate (permalloy).

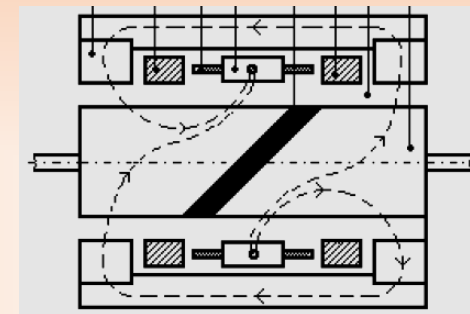
Există variante constructive cu rotor anizotrop și înfășurare monofazată de tip concentrat sau variantă constructivă cu stator cu poli aparenti și înfășurare monofazata de tip concentrat. De asemenea, o altă variantă constructivă presupune atât stator cât și rotor cu creștături uniform distribuite și ambele înfășurări de tip repartizat.

Înfășurările trifazate, de sincronizare, se leagă de regulă în stea.

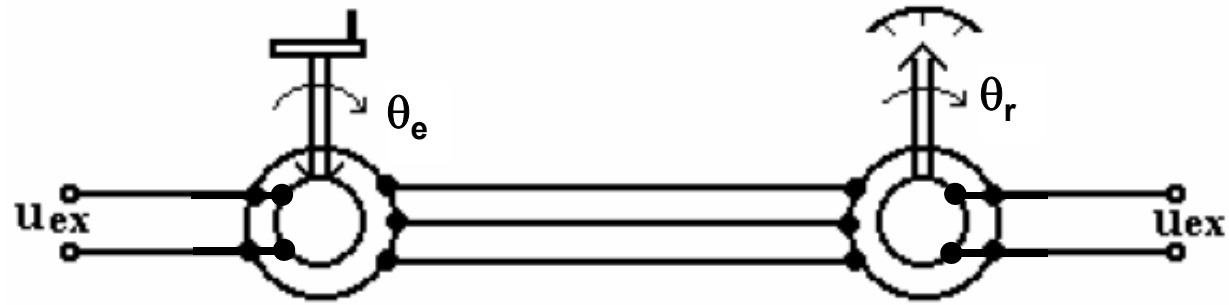
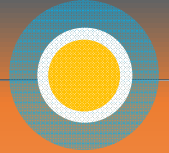
Periile și inelele sunt, de asemenea, de foarte bună calitate și au, de regulă, contacte argintate.

De obicei, selsinele sunt mașini bipolare.

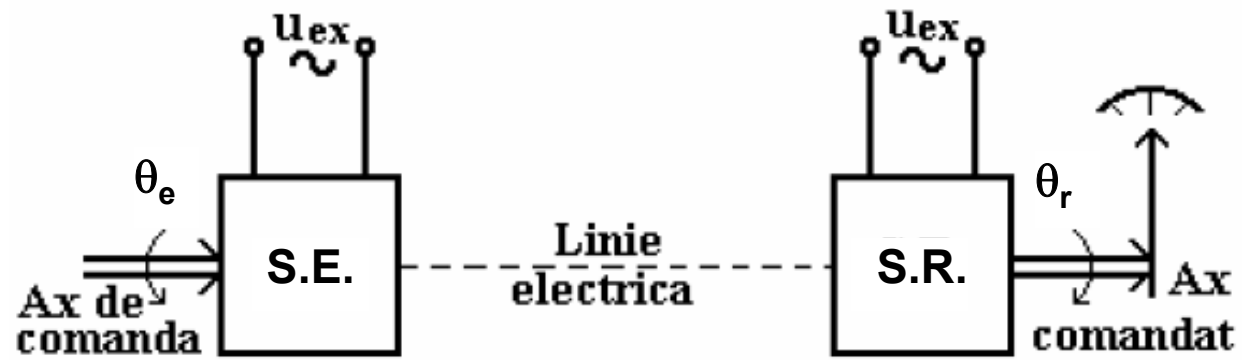
Există variante constructive fără contacte (sunt eliminate periile și inelele). Construcția este destul de complicată și, de regulă, acestea introduc erori suplimentare.



Selsin utilizat de US Navy pe nave și submarine



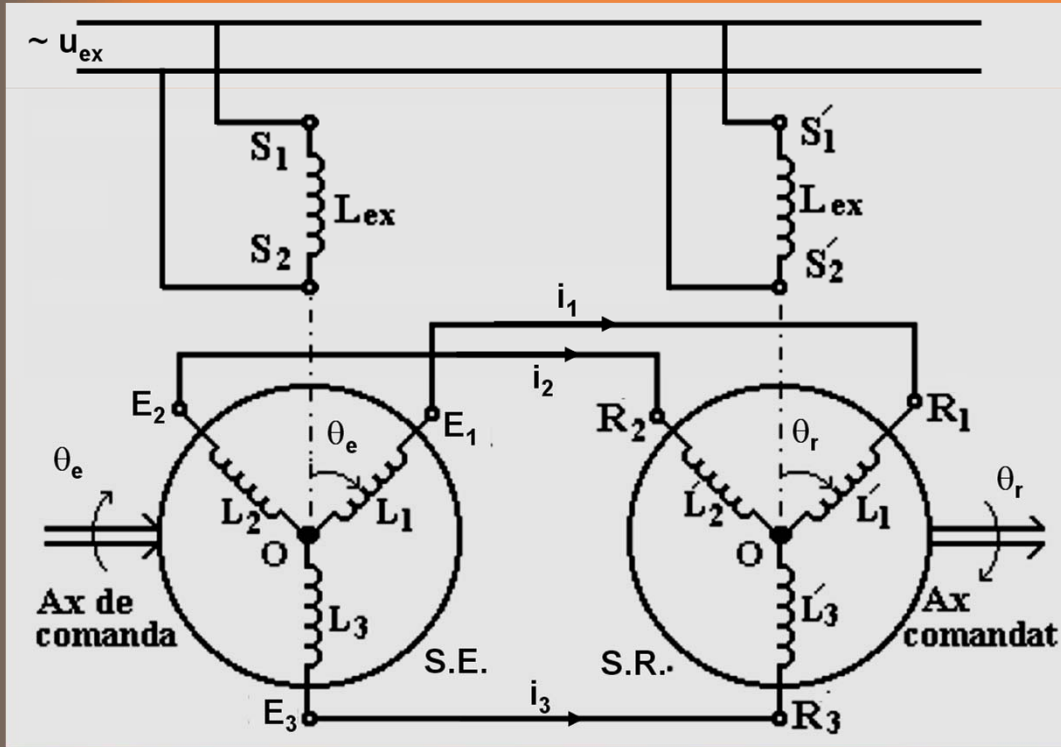
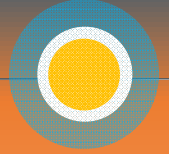
Simbolizarea unui sistem indicator cu selsine



Schema funcțională a unui sistem indicator cu selsine



Sistem de funcționare în *regim indicator*



În regim de indicator, înfășurările monofazate ale ambelor selsine sunt conectate la o sursă monofazată de tensiune.

Tensiunea alternativă aplicată înfășurării de excitație, S1-S2, a selsinului emițător, induce în înfășurarea trifazată tensiuni de fază a căror valoare depinde de poziția axelor înfășurărilor trifazate față de axa înfășurării monofazate prin unghiul θ_e . Fenomenele se petrec identic și în selsinul receptor, unde avem unghiul de decalaj θ_r . Dacă cele două unghiuri sunt identice atunci și tensiunile induse au aceeași valoare. Prin urmare, NU există curenți între cele două înfășurări trifazate.

În cazul în care, de la axul de comandă, se modifică valoarea unghiului θ_e , atunci tensiunile din cele două înfășurări trifazate vor fi diferite, ceea ce duce la apariția curenților i_1, i_2, i_3 .

Interacțiunea acestor curenți cu câmpul inductor produs de înfășurarea S'1-S'2 dă naștere unui cuplu ce rotește rotorul selsinului receptor până la anularea diferenței dintre θ_e și θ_r .

Se realizează o mișcare sincronă între axul de comandă și axul comandat, fără existența unei legături mecanice între ele.

La capătul axului comandat se află un ac indicator al unui aparat de măsură.



1. Prin alimentarea înfășurării de excitație monofazată a selsinului emițător ia naștere un câmp alternativ a cărui inducție este:

$$\mathbf{b}(t) = \mathbf{B}_{max} \cos \omega t$$

2. Fluxurile fasciculare ce intersectează înfășurările de fază depind de poziția acestora față de axa înfășurării de excitație prin unghiul θ_e :

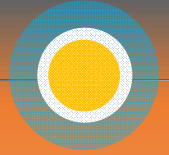
$$\begin{cases} \varphi_{1E} = \Phi_{max} \cdot \cos \theta_e \cdot \cos \omega t \\ \varphi_{2E} = \Phi_{max} \cdot \cos(\theta_e - 2\pi/3) \cdot \cos \omega t \\ \varphi_{3E} = \Phi_{max} \cdot \cos(\theta_e - 4\pi/3) \cdot \cos \omega t \end{cases}$$

3. Conform legii inducției electromagnetice, aceste fluxuri induc în înfășurare de sincronizare tensiunile:

$$\begin{cases} u_{1E}(t) = U_{emax} \cdot \cos \theta_e \cdot \sin \omega t \\ u_{2E}(t) = U_{emax} \cdot \cos(\theta_e - 2\pi/3) \cdot \sin \omega t \\ u_{3E}(t) = U_{emax} \cdot \cos(\theta_e - 4\pi/3) \cdot \sin \omega t \end{cases} \quad \text{unde: } U_{emax} = \Phi_{max} \cdot N \cdot \omega$$

4. In mod analog, în înfășurările selsinului receptor se induc tensiuni ce depind însă de unghiul θ_r :

$$\begin{cases} u_{1R}(t) = U_{emax} \cdot \cos \theta_r \cdot \sin \omega t \\ u_{2R}(t) = U_{emax} \cdot \cos(\theta_r - 2\pi/3) \cdot \sin \omega t \\ u_{3R}(t) = U_{emax} \cdot \cos(\theta_r - 4\pi/3) \cdot \sin \omega t \end{cases}$$



5. Dacă tensiunile induse în cele două înfășurări de sincronizare nu sunt egale (pentru că $\theta_e \neq \theta_r$), atunci apare un sistem de curenți:

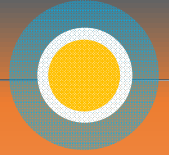
$$\begin{cases} I_{1max}(\theta_e, \theta_r) = \frac{U_{1E} - U_{1R}}{Z} = \frac{U_{emax}}{Z} \cdot (\cos \theta_e - \cos \theta_r) \\ I_{2max}(\theta_e, \theta_r) = \frac{U_{1E} - U_{1R}}{Z} = \frac{U_{emax}}{Z} \cdot [\cos(\theta_e - 2\pi/3) - \cos(\theta_r - 2\pi/3)] \\ I_{3max}(\theta_e, \theta_r) = \frac{U_{1E} - U_{1R}}{Z} = \frac{U_{emax}}{Z} \cdot [\cos(\theta_e - 4\pi/3) - \cos(\theta_r - 4\pi/3)] \end{cases}$$

6. Interacțiune dintre câmpul de excitație al selsinului receptor și curenții ce străbat înfășurarea lui de sincronizare dă naștere unui cuplu de sincronizare, M_s , ce rotește rotorul selsinului receptor în sensul anulării diferenței ($\theta_e - \theta_r$):

$$M_s = k \cdot \Phi_{max} \cdot \frac{U_{emax}}{Z} \cdot \sin \theta \quad \text{unde: } \theta = \theta_e - \theta_r$$



Un cuplu similar acționează și asupra rotorului selsinului emițător însă, deoarece acesta este mai mic decât cuplul impus din postul de comandă, unghiul θ_e rămâne ca unghi fix de referință.

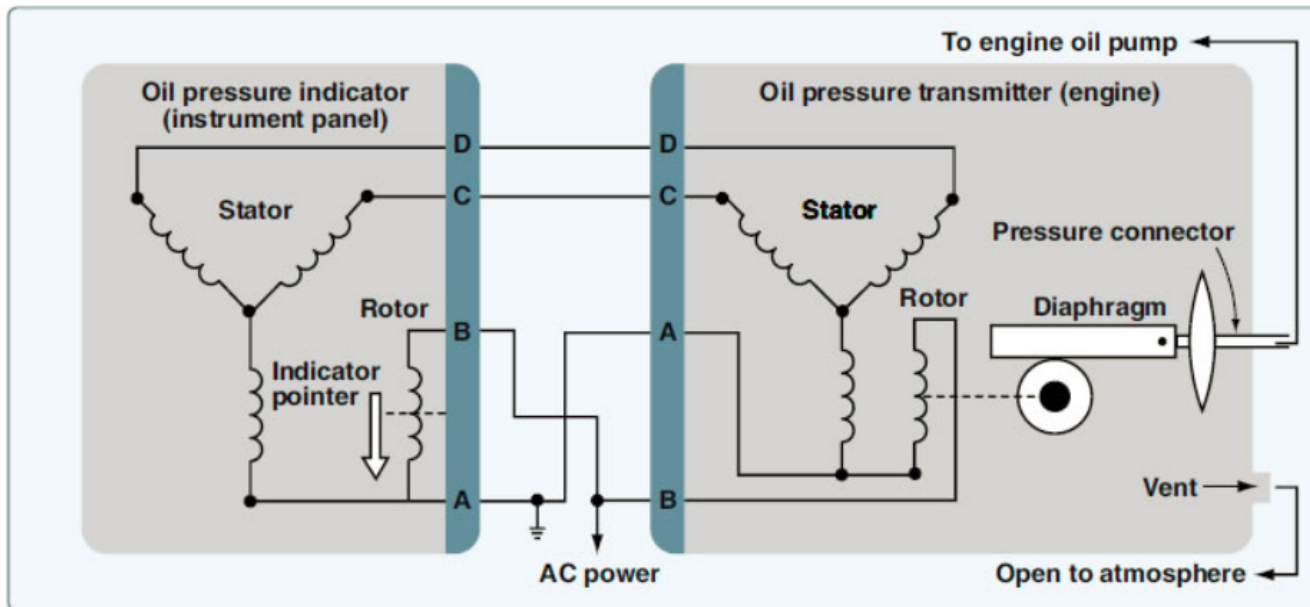


Remote Indicating Fuel and Oil Pressure Gauges

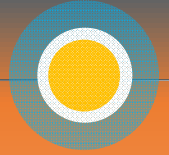
Fuel and oil pressure indications can be conveniently obtained through the use of synchro systems. As stated previously, running fuel and oil lines into the cabin to direct reading gauges is not desirable. Increased risk of fire in the cabin and the additional weight of the lines are two primary deterrents.

By locating the transmitter of a synchro system remotely, fluid pressure can be directed into it without a long tubing run. Inside the transmitter, the motion of a pressure bellows can be geared to the transmitter rotor in such a way as to make the rotor turn. [Figure 10-51] As in all synchros, the transmitter rotor turns proportional to the pressure sensed, which varies the voltages set up in the resistor windings of the synchro stator. These voltages are transmitted to the indicator coils that develop the magnetic field that positions the pointer.

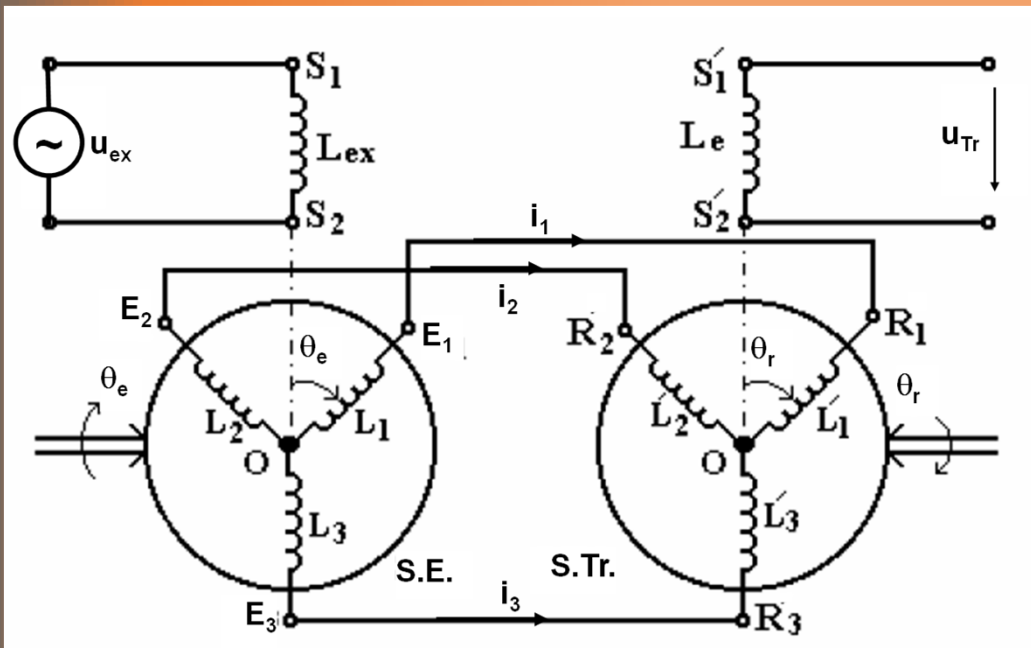
Often on twin-engine aircraft, synchro mechanisms for each engine can be used to drive separate pointers on the same indicator. By placing the coils one behind the other, the pointer shaft from the rear indicator motor can be sent through the hollow shaft of the forward indicator motor. Thus, each pointer responds with the magnet's alignment in its own motor's magnetic field while sharing the same gauge housing. Labeling the pointer's engine 1 or 2 removes any doubt about which indicator pointer is being observed. A similar principle is employed in an indicator that has side-by-side indications for different parameters, such as oil pressure and fuel pressure in the same indicator housing. Each parameter has its own synchro motor for positioning its pointer.



Aplicații pe aeronave: Indicarea nivelului de combustibil sau a presiunii uleiului pe aparatele de bord din cabina de pilotaj



Sistem de funcționare în *regim transformator*



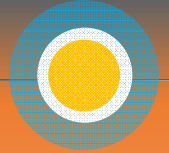
În regim de transformator, diferența unghiulară de poziție ($\theta_e - \theta_r$) este transformată într-o tensiune a cărei amplitudine este proporțională cu această diferență.

Se alimentează numai înfășurarea de excitație a selsinului emițător.

Tensiunea indusă în înfășurarea sa rotorică determină apariția sistemului de curenți i_1, i_2, i_3 .

Cei trei curenți, ce străbat și înfășurările de fază ale selsinului receptor (care în această aplicație poartă numele de selsin transformator), creează fluxuri ce induc tensiuni în înfășurarea monofazată, tensiuni ce sunt proporționale cu unghiul θ_r .

Tensiunea rezultantă este proporțională cu unghiul ($\theta_e - \theta_r$).



1. In mod analog funcționării sistemului indicator, alimentarea înfășurării de excitație a selsinului emițător determină inducerea unui sistem trifazat de tensiuni în înfășurarea de sincronizare, tensiuni ce depind de poziție prin unghiul θ_e :

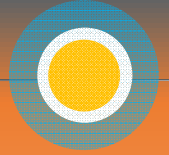
$$\begin{cases} u_{1E}(t) = U_{emax} \cdot \cos \theta_e \cdot \sin \omega t \\ u_{2E}(t) = U_{emax} \cdot \cos(\theta_e - 2\pi/3) \cdot \sin \omega t \\ u_{3E}(t) = U_{emax} \cdot \cos(\theta_e - 4\pi/3) \cdot \sin \omega t \end{cases} \quad \text{unde: } U_{emax} = \Phi_{max} \cdot N \cdot \omega$$

2. In circuitul închis al înfășurărilor de sincronizare se stabilește sistemul de curenți i_1, i_2, i_3 :

$$\begin{cases} I_{1max} = \frac{U_{emax}}{Z} \cdot \cos \theta_e \\ I_{2max} = \frac{U_{emax}}{Z} \cdot \cos(\theta_e - 2\pi/3) \\ I_{3max} = \frac{U_{emax}}{Z} \cdot \cos(\theta_e - 4\pi/3) \end{cases}$$

3. Acești curenți, prin fluxurile pe care le creează, induc fiecare o tensiune în înfășurarea monofazată a selsinului transformator:

$$\begin{cases} U_{1maxTr} = U_{maxTR} \cdot \cos \theta_e \cdot \cos \theta_r \\ U_{2maxTr} = U_{maxTR} \cdot \cos(\theta_e - 2\pi/3) \cdot \cos(\theta_r - 2\pi/3) \\ U_{3maxTr} = U_{maxTR} \cdot \cos(\theta_e - 4\pi/3) \cdot \cos(\theta_r - 4\pi/3) \end{cases}$$



4. Expresia amplitudinii tensiunii rezultante este:

$$U_{rezTr} = \frac{3}{2} U_{maxTR} \cdot \cos(\theta_e - \theta_r)$$

iar expresia valorii instantanee este:

$$u_{rezTr}(t) = \frac{3}{2} U_{maxTR} \cdot \cos(\theta_e - \theta_r) \cdot \sin \omega t$$

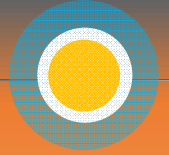
5. Tensiunea depinde de unghiul de dezacord ($\theta_e - \theta_r$) și are aceeași variație sinusoidală ca tensiunea de alimentare a excitației selsinului emițător.

6. Valoarea acestei tensiuni este MAXIMA atunci când $\theta_e = \theta_r$ și este zero pentru $\theta_e - \theta_r = 90^\circ$.

7. De regulă, poziția rotorului selsinului transformator este fixată la un unghi de 90° , astfel încât tensiunea indusă să fie zero atunci când pozițiile celor două selsine coincid.



Erorile selsinelor



In cazul selsinelor, eroare se referă la nerealizarea condiției de egalare a celor două unghiuri: θ_e și θ_r . Pot fi următoarele cauze:

- a) Imperfecțiuni constructive. Cele două selsine pot avea impedanțe diferite ale fazelor. Pot exista echilibrări defectuoase ale rotorului, sau frecări diferite în lagăre. Pot exista căderi de tensiune diferită la contactele alunecătoare.
- b) Selsinele pot lucra la distanțe mari în condiții de mediu complet diferite (de exemplu de temperatură).
- c) Dacă liniile de legătură sunt foarte lungi, impedanța acestora devine comparabilă impedanțelor fazelor. Acest lucru determină scăderea curentului respectiv a amplitudinii tensiunii induse în înfășurarea monofazată a selsinului transformator sau scăderea cuplului de sincronizare în regim de indicator.
- d) În regim de indicator, cuplul rezistent la arborele selsinului receptor poate determina o „zonă moartă”, de insensibilitate, ce afectează obținerea unui unghi de dezacord nul.
- e) Prezența unui curent de sarcină semnificativ în înfășurarea monofazată a selsinului receptor (la regimul transformator), atunci când impedanța circuitului amplificator nu este mult mai mare decât a înfășurării selsinului, determină o „reacție a indusului” importantă și o diminuare semnificativă a tensiunii.
- f) În regim de funcționare dinamică, de arbore, când selsinul receptor urmărește în mod continuu rotirea selsinului emițător, este de dorit funcționarea la turație mult mai mică decât „turația de sincronism”, pentru a nu se pierde sincronismul mișcării. Drept urmare, alimentarea înfășurărilor monofazate se face la frecvențe mari (400 Hz sau 1000 Hz).



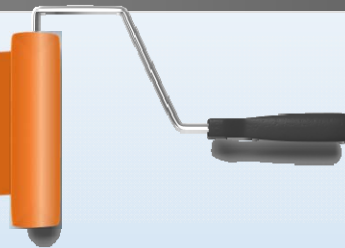
CUVINTE CHEIE



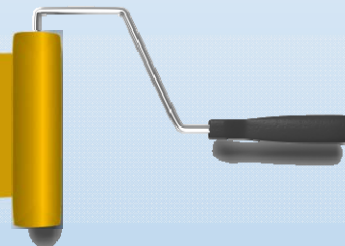


CUPRINS

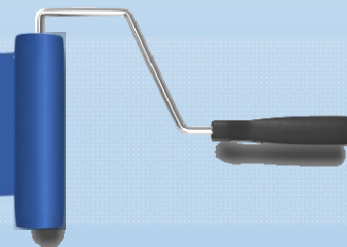
1. Tipuri constructive



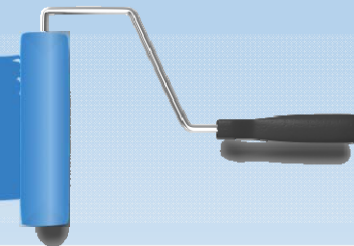
2. Comanda servomotoarelor de c.c.



3. Ecuațiile de funcționare



4. Caracteristici de funcționare



Definiție

Servomotoarele sunt motoare integrate in sisteme de comandă automată sau sisteme de reglare automată care acționează un element de execuție, transformând un semnal electric de comandă într-o mișcare de rotație sau translație.

CLASIFICARE



Servomotoare electrice
(de c.c. sau de c.a.)



Servomotoare hidraulice



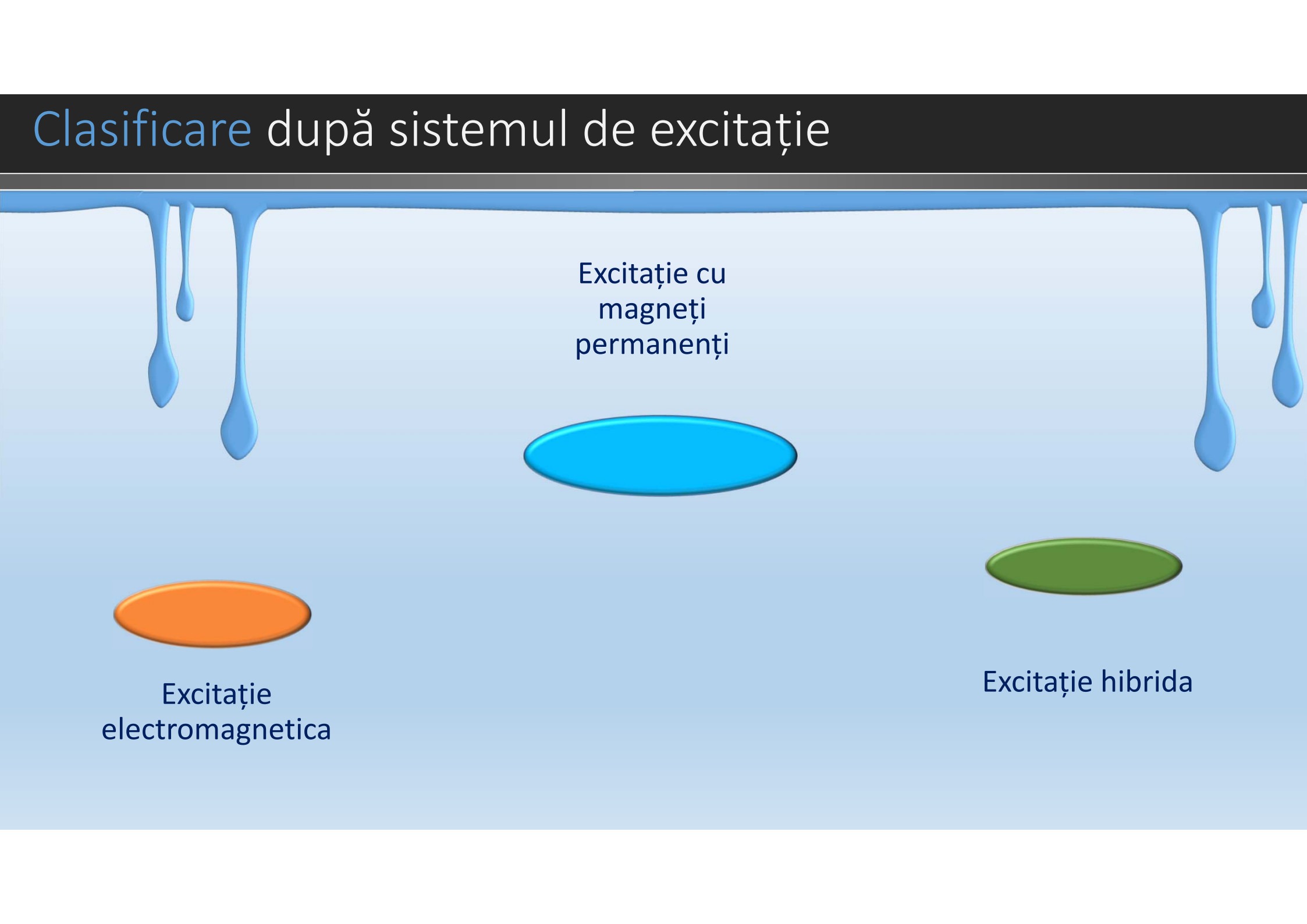
Servomotoare
pneumatice

Caracteristici speciale ale servomotoarelor



- **Caracteristici de reglare si mecanice cât mai liniare;**
- **Reglaj de viteză in limite foarte largi si prin procedee cât mai simple;**
- **Cuplu de pornire mare;**
- **Capacitate de suprasarcină ridicată;**
- **Constantă electromecanică de timp redusă;**
- **Gabarit si greutate specifică mici;**
- **Absența autopornirii.**

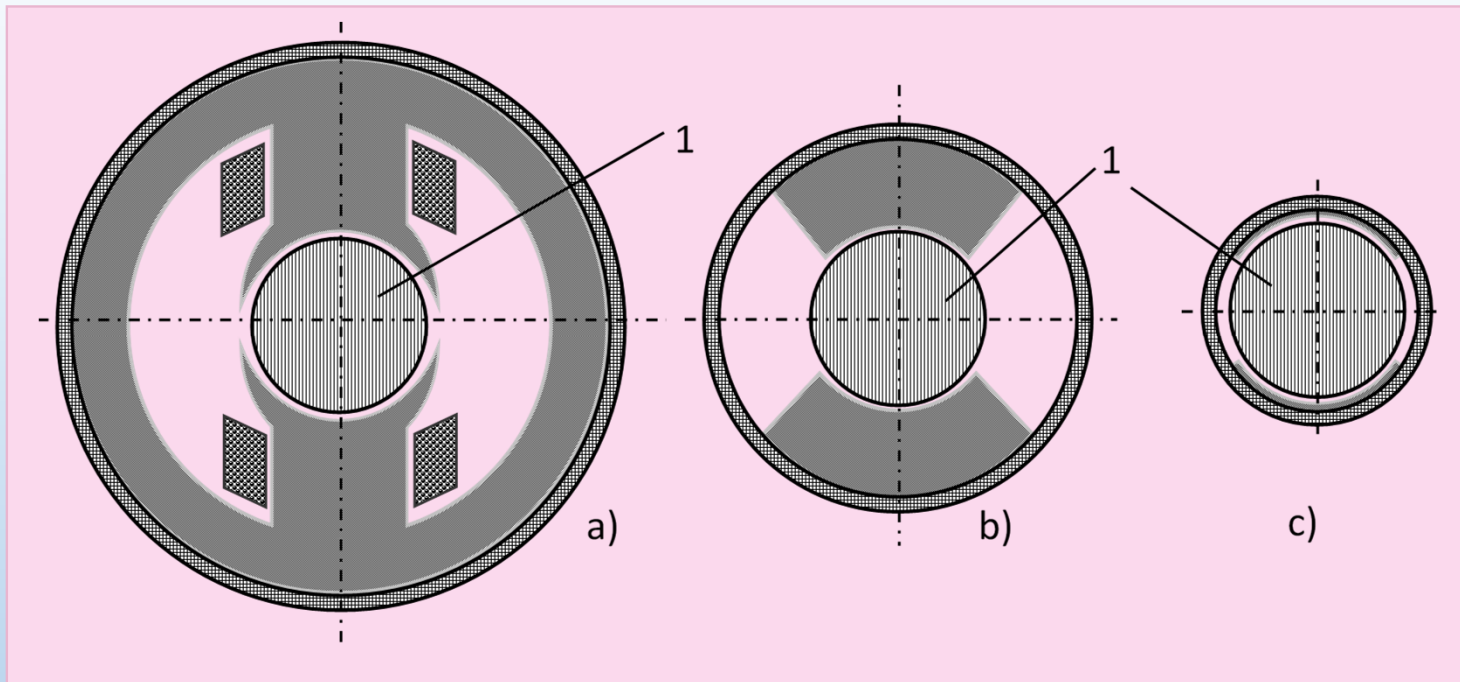
Clasificare după sistemul de excitație



Excitație cu
magneți
permanenți

Excitație
electromagnetica

Excitație hibrida

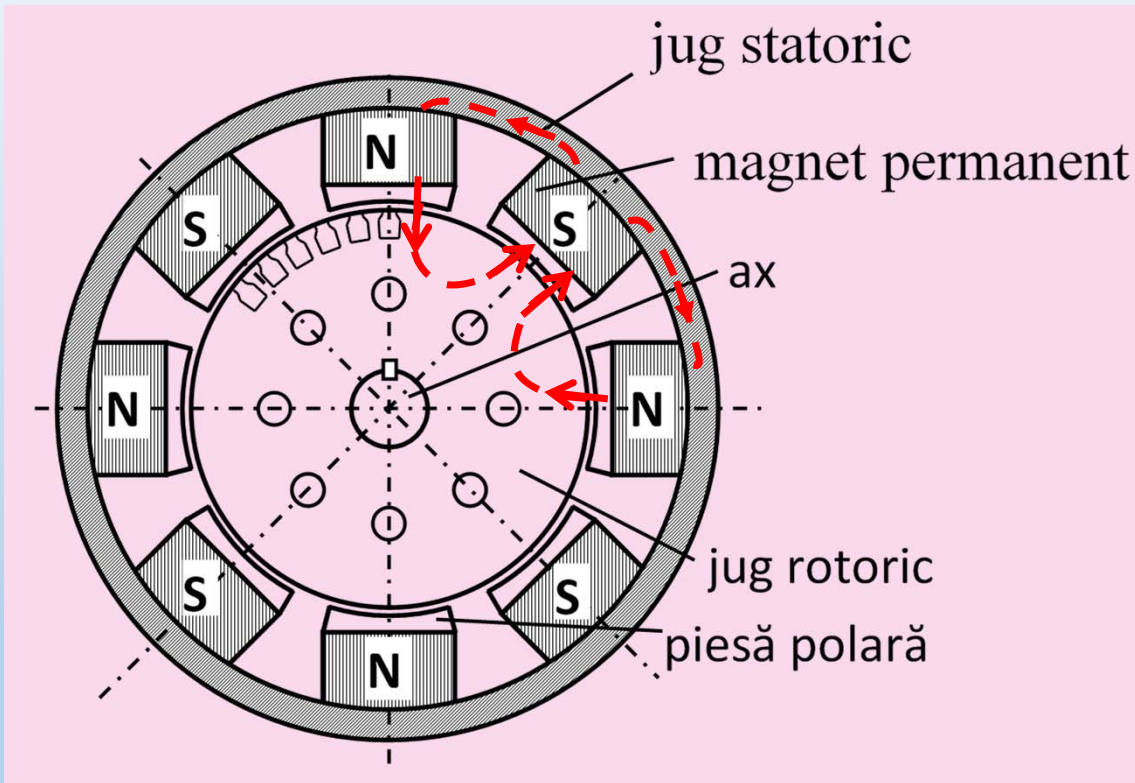


Comparație a volumului servomotoarelor de c.c. având același rotor și aceeași lungime (pentru aceeași putere): a) cu excitație electromagnetică, b) cu ferite, c) cu magneți pe bază de pământuri rare



- ✓ Servomotoarele cu excitație electromagnetică pot dezvolta puteri și cupluri electromagnetice mai mari decât cele cu excitație cu magneți permanenți.
- ✓ Sistemul de excitație cu magneți permanenți simplifică construcția servomotoarelor și permite obținerea unui volum mai mic pentru aceeași putere dezvoltată.

I. Servomotoare cu rotor cilindric



Polii inductori sunt magneți permanenți metalici de tip Alnico, cu inducție remanentă mare și câmp coercitiv mic (lungime mare și secțiune mica).

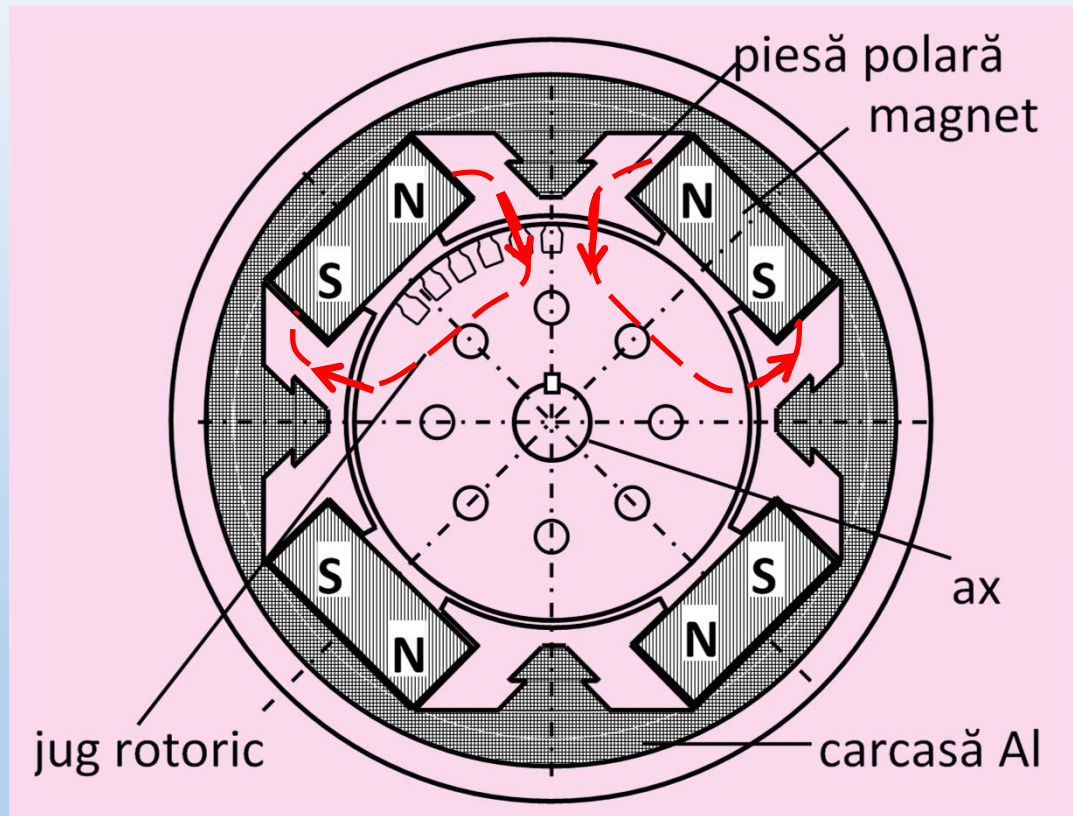
Sunt prevăzute *piese polare* din material feromagnetic ce au rolul de a reduce efectul de demagnetizare a magneților permanenți de către reacția indusului.

Jugul statoric (ce reprezintă și carcasa mașinii) este din oțel și are rol de închidere a liniilor de câmp.

Modificarea reluctanței circuitului magnetic (de exemplu scoaterea rotorului pentru eventuale reparații) determină o demagnetizare semnificativă a magneților permanenți care necesită o remagnetizare.

De regulă, pe magneții permanenți sunt plasate înfășurări destinate remagnetizării lor.

Numărul de poli ai acestei structuri este limitat la 4-8 unități.



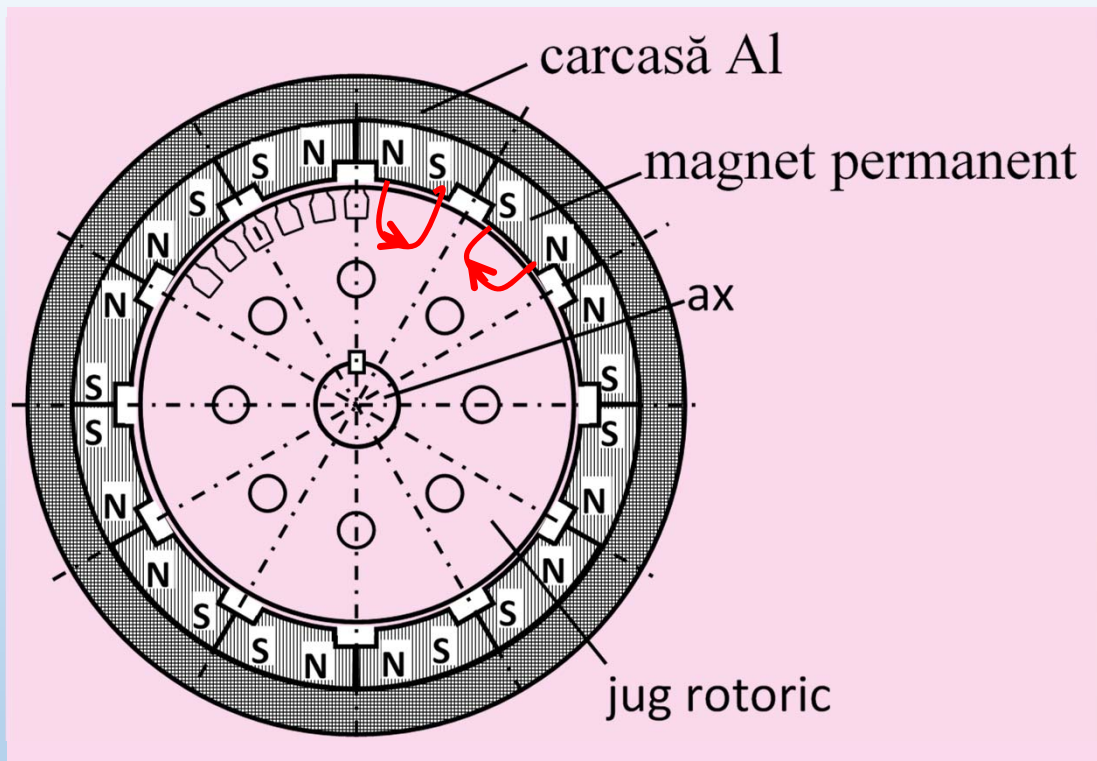
Polii inductori sunt magneți permanenți metalici de tip Alnico, (variante Tyconal), cu inducție remanentă ceva mai mică decât la structura anterioară și câmp coercitiv ceva mai mare).

Magneții permanenți sunt plasați pe coardă.

Piesele polare au rolul, în primul rând, de închidere a liniilor de câmp.

Carcasa este din material neferomagnetic (aliaj din aluminiu) și are doar rol de susținere mecanică.

Numărul de poli ai acestei structuri este limitat la 4-8 unități.



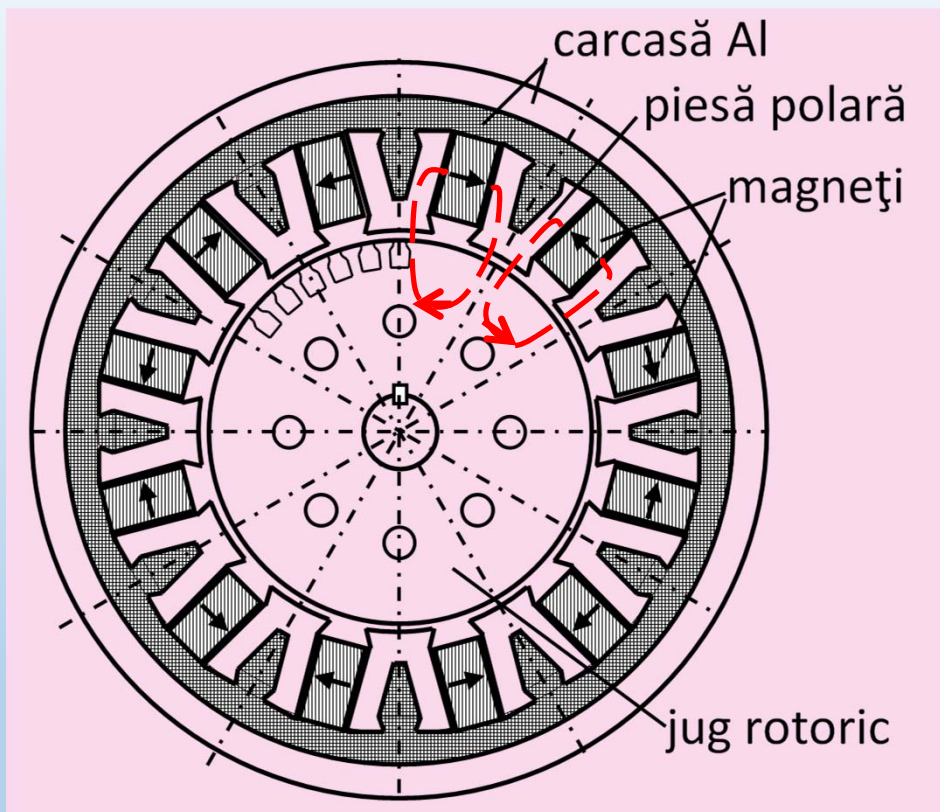
Poli inductori sunt magneți permanenți tip ferite, cu inducție remanentă mică și câmp coercitiv mic (lungime mică și secțiune mare).

Nu sunt necesare *piese polare* din material feromagnetic. Feritele nu se demagnetizează datorită reacției indusului.

Jugul statoric (ce reprezintă și carcasa mașinii) este din aluminiu.

Pot fi realizate mașini cu un număr mai mare de poli (10-12 unități).

Construcția cu ferite acceptă modificarea reluctanței circuitului magnetic, fără o demagnetizare semnificativă a magneților permanenți. Nu există înfășurări de remagnetizare plasate pe magneții permanenți.

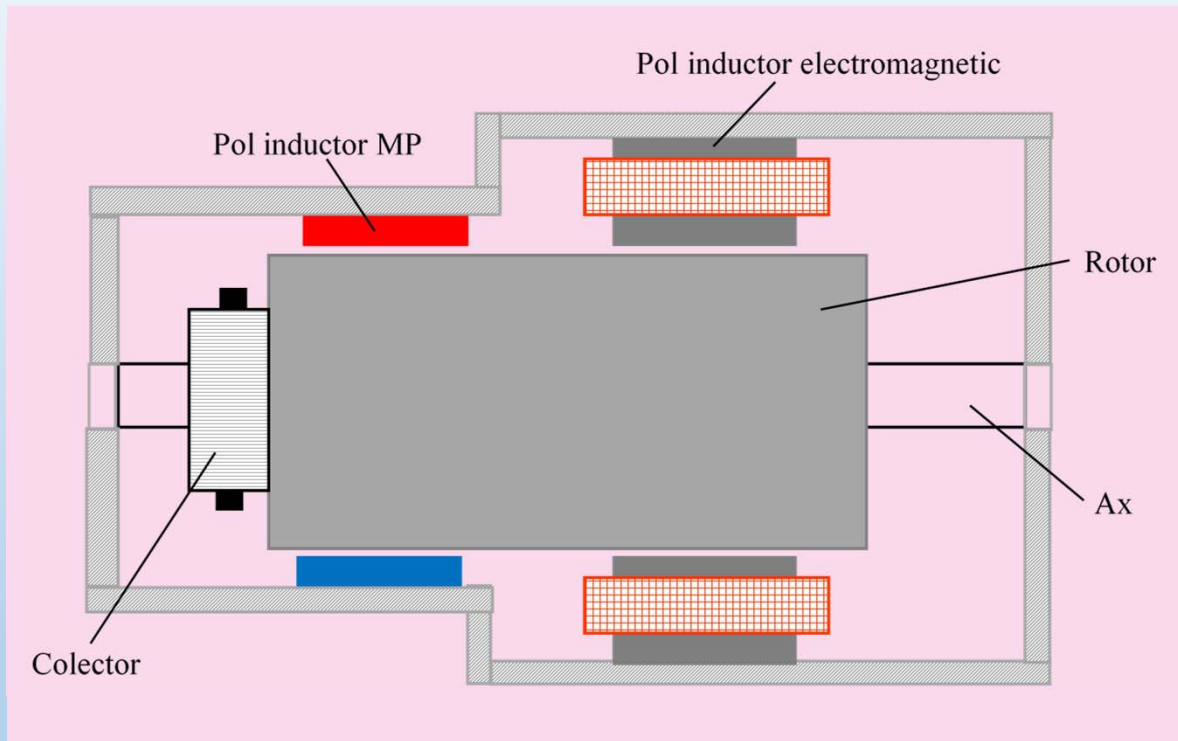


Polii inductori sunt magneți permanenți tip ferite, cu inducție remanentă mică și câmp coercitiv mic (lungime mică și secțiune mare).

În această variantă apar *piese polare* din material feromagnetic, pentru închiderea liniilor de câmp.

Jugul statoric (ce reprezintă și carcasa mașinii) este din aluminiu.

Pot fi realizate mașini cu un număr mai mare de poli (10-12 unități).



Servomotor cu excitație hibrida

Există simultan două tipuri de excitație: cu magneți permanenți (ce furnizează un câmp inductor constant in amplitudine) și electromagnetică (furnizează un câmp variabil ca amplitudine).

Câmpul creat de electromagneți poate fi in același sens cu câmpul creat de magneții permanenți (deci un flux rezultat mai mare) sau in sens contrar (câmp rezultat mai mic).

Prin alimentarea diferită a excitației electromagnetice, se pot obține 2 viteze, fără să fie necesară variația tensiunii pe excitație sau indus.

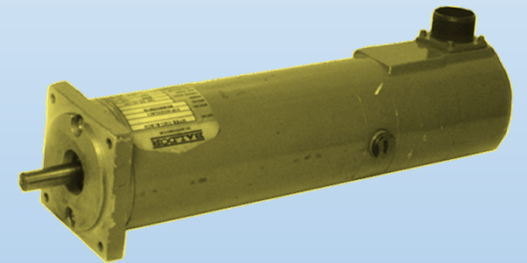
Există variante constructive la care înfășurarea de excitație are priză mediană, rezultând astfel posibilitatea obținerii a 4 viteze).



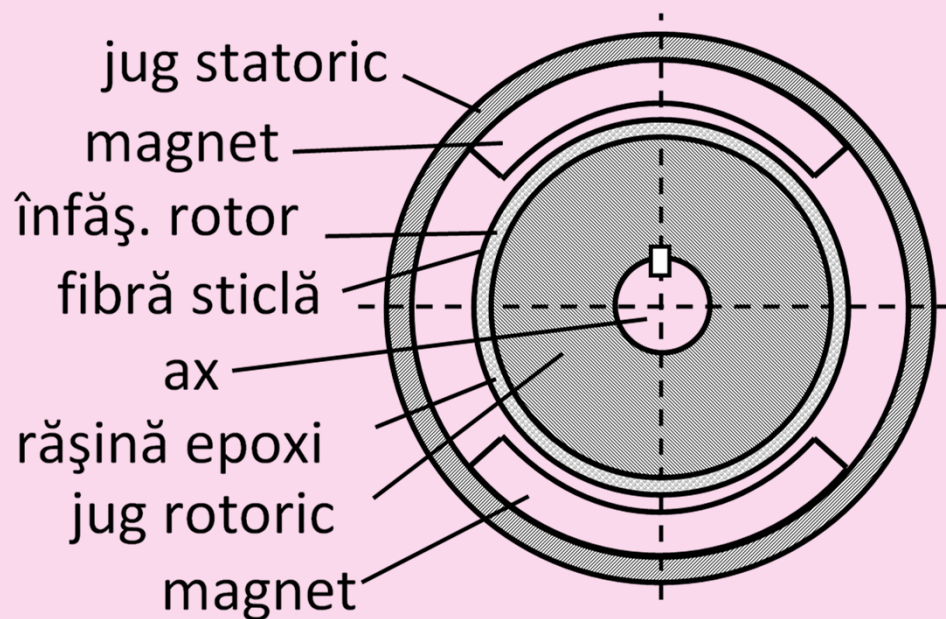
Servomotoarele cu excitație electromagnetică au, de regulă, puteri mari (până la 10-20 kW).

Servomotoarele cu rotor cilindric și creștături rotorice au, în general, lungimea mult mai mare decât diametrul (raport diametru/lungime sub 0,3), ceea ce permite obținerea unor constante electromecanice reduse (moment de inerție redus).

Deoarece suportă adesea șocuri de curent (sau de cuplu), proiectarea acestora se face pentru funcționare la nominal, în condiții de densități de curent mai mici decât la mașinile echivalente de utilizare normală.



II. Servomotoare cu rotor cilindric fără creștături



Prezența creștăturilor pe rotor determină o variație a reluctanței circuitului magnetic, respectiv o variație a cuplului electromagnetic. La viteze mici, această variație este inacceptabilă.

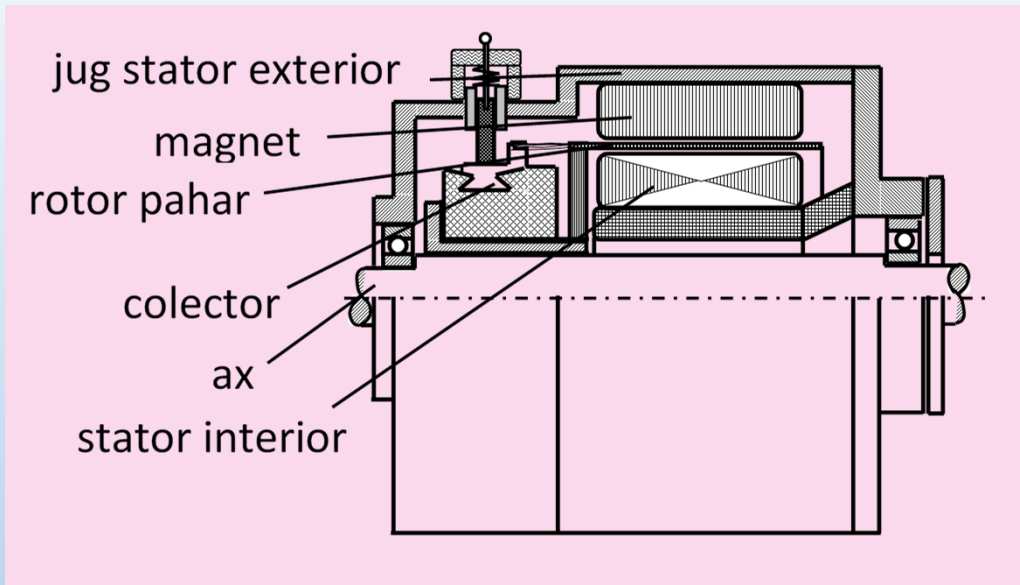
Se elimină creștăturile, iar înfășurarea se plasează pe exteriorul rotorului neted, fiind înglobată în rășini epoxidice și consolidată cu fibra de sticlă.

Acest tip de construcție duce însă la mărirea întrefierului.

Regimurile tranzitorii (dinamice) sunt superioare. Constantele de timp sunt de 2-4 ms.

Excitația poate fi cu magneți permanenți sau electromagnetică. Se construiesc până la aprox. 3 kW.

III. Servomotoare cu rotor pahar, neferomagnetic



Mașina are două statoare: unul exterior, pe care sunt plasați magneții permanenți și cel de-al doilea interior, având doar rol de închidere a liniilor de câmp magnetic.

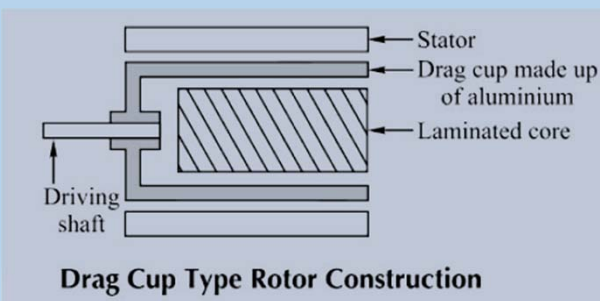
Rotorul este realizat din material neferomagnetic (rășini sau material plastic) și are formă de pahar, fiind plasat între cele două statoare.

Înfășurarea rotorică se lipește și consolidează pe rotor.

Diametrul rotorului este cam 1/2-1/3 din lungime. Această construcție și lipsa fierului rotoric determină constante de timp sub 0,1 ms.

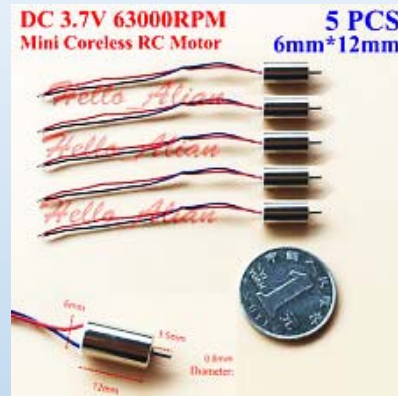
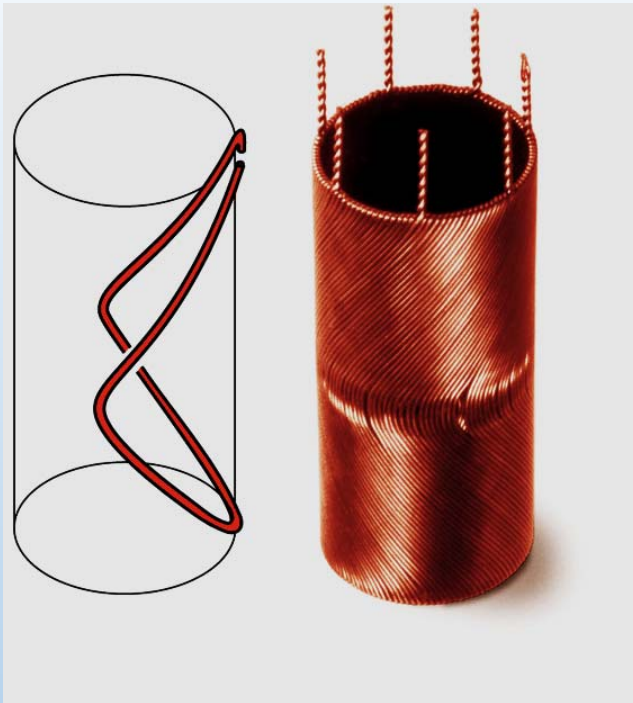
Domeniul de reglaj al vitezei poate fi de 1:40000.

Se pot obține accelerații de până la $1200 \frac{\text{rot/min}}{\text{ms}}$.



Schita – structura servomotor cu rotor pahar

Rotor pahar din material neferomagnetic



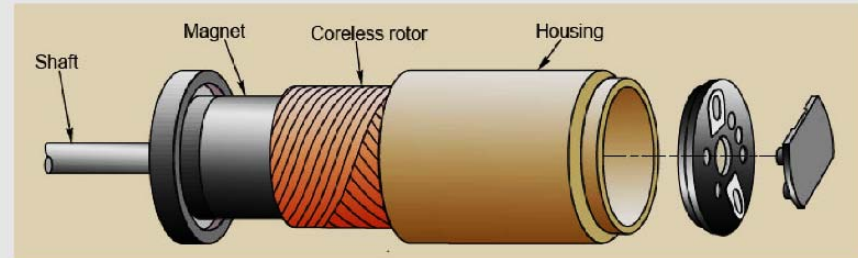
Se poate elimina paharul neferomagnetic, rotorul fiind reprezentat doar de înfășurare, ce este consolidată cu rășini speciale (self-supporting winding).



CORELESS MOTORS

Coreless Dc Motors, are a specialized form of DC motors. These motors are used where small motors and rapid acceleration, is needed. The difference of a coreless motor is; this type of motor has a rotor that is constructed **without any iron core**.

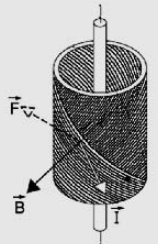
Coreless Motor Structure



This design forms a self-supporting rotor structure which includes magnet and wire. The wire forms a special pattern and ensures mechanical strength.

Coreless Motors Generate Low Electrical Noise

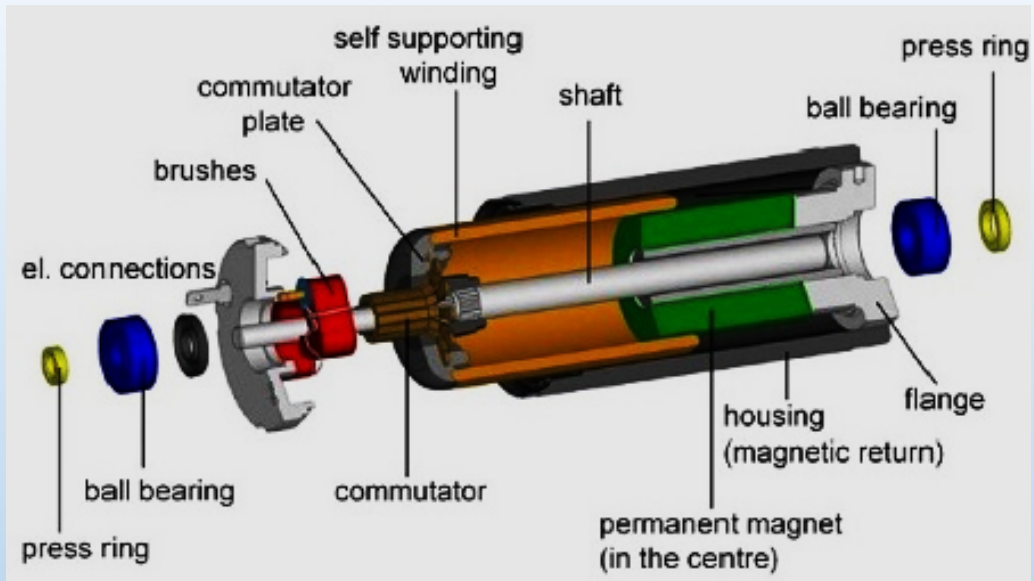
Coreless micro dc motors creates low levels of electromagnetic fields. Elimination of the iron core diminishes rotor inductance and arcing. Wiring structure of coreless design creates less arc, so lower sparking levels generate less EMI. Also arcing produces electrical noise and reduces the life of brushes.



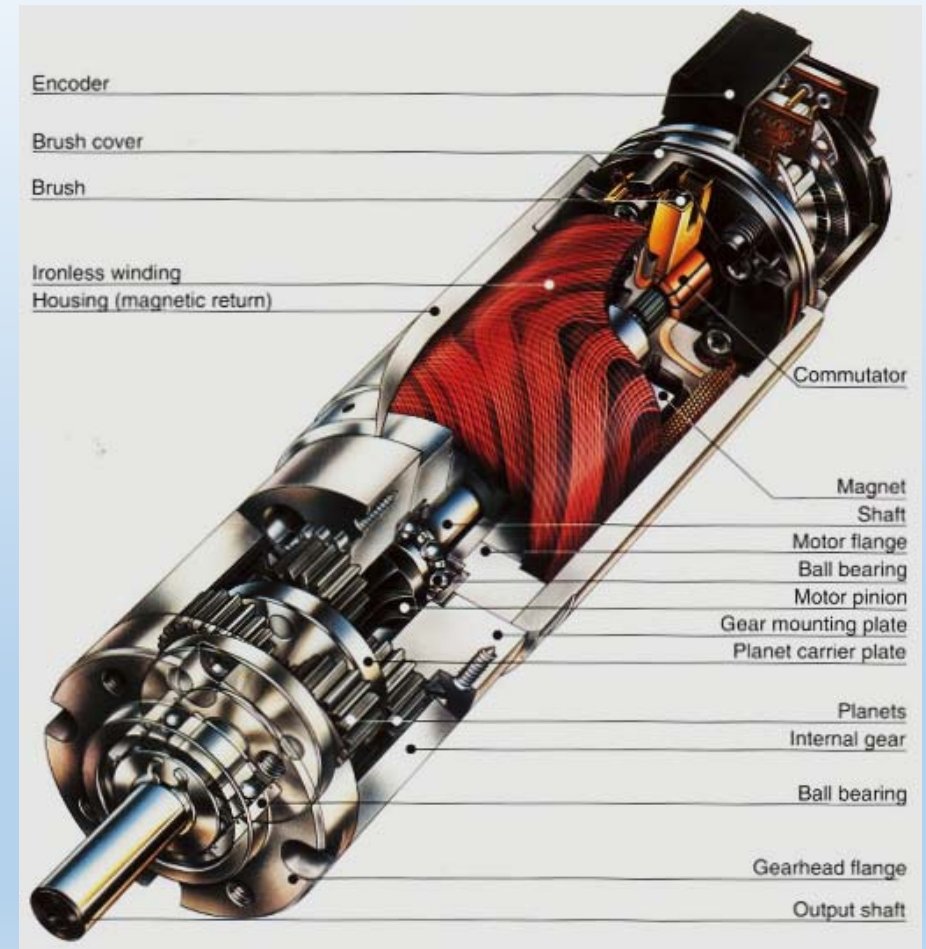
Coreless Motors have High Efficiency Rates



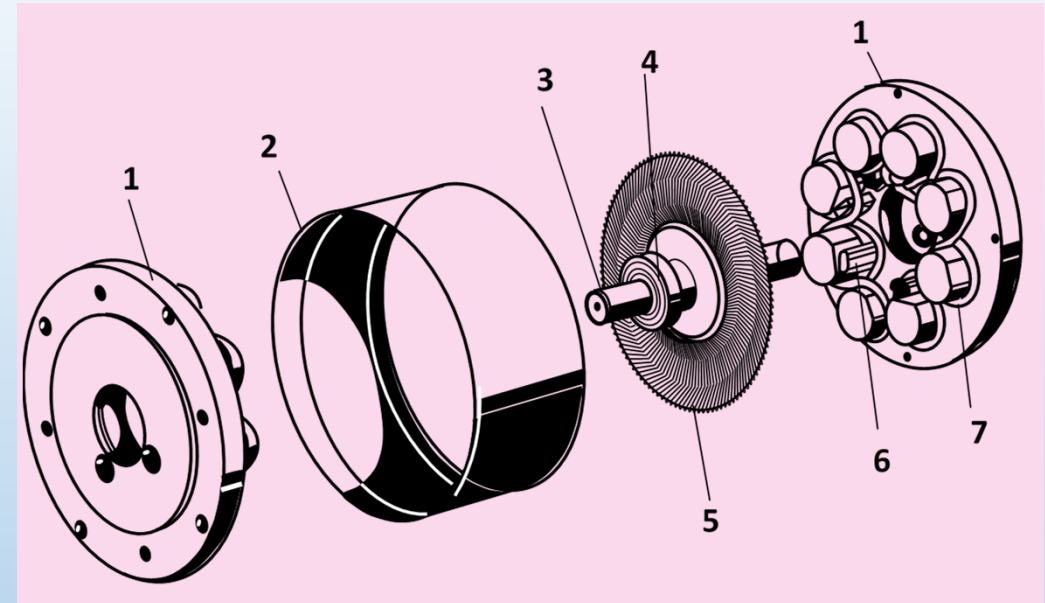
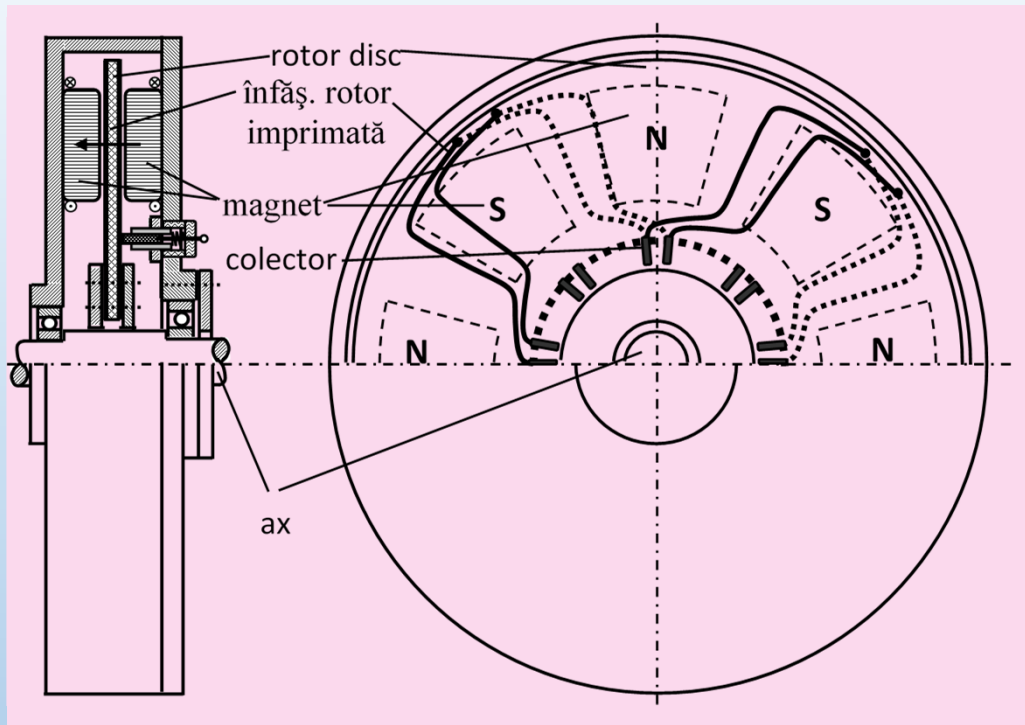
These motors also have very high efficiency rates. A coreless motor has less current losses, so it is more efficient than a cored motor.



Magneții permanenți sunt plasați pe statorul interior, iar carcasa motorului joacă rol și de traseu de închidere a liniilor de câmp.



IV. Servomotoare cu rotor disc și întrefier axial



Detalii de construcție: 1- Flanșă echipată cu magneți permanenți, 2- Carcasă-jug, 3 - Arbore, 4- Rulment, 5- Rotor-disc, 6 - Suport-perie, 7 - Înfășurare de magnetizare

Rotorul este un disc din material neferomagnetic (fibre de sticlă, material plastic, etc.).

Înfășurarea rotorică este imprimată pe rotor (analog circuitelor electronice) sau ștanțată din tablă de Cu de 0,2 mm și apoi lipită pe rotor cu rășini epoxidice. Este o înfășurare de tip ondulat.

La capătul dinspre axul mașinii „conductoarele” au o porțiune mai îngroșată, care reprezintă lamelele de colector.

Periile calcă pe aceasta porțiune a înfășurării, iar contactul este de tip „planar”.

Statorul este realizat din două flanșe feromagnetice pe care sunt prinși magneți permanenți – polii inductori ai mașinii.

Polii inductori, așezați față în față, sunt de polaritate opusă astfel încât liniile de câmp se închid de la un pol la altul în direcție axială (colinar cu axul mașinii) prin întrefierul în care se găsește și discul rotoric, respectiv înfășurarea indusă.

Avantaje:

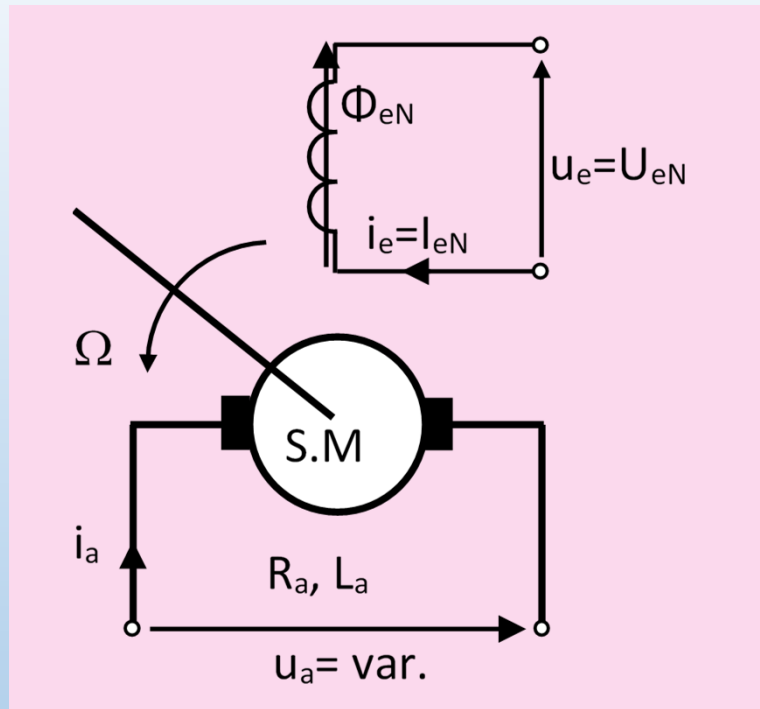
- ✓ Datorită lipsei fierului din circuitul rotoric, caracteristicile de funcționare sunt liniare;
- ✓ Constantele electrice de timp sunt reduse (sub 0,1 ms) întrucât inductanțele sunt mici;
- ✓ Înfășurarea rotorică este foarte bine ventilată astfel încât se pot accepta densități de curent mult mai mari decât la variantele cu înfășurări plasate în creștături (45 A/mm^2 față de 5 A/mm^2);
- ✓ Randamentul este mai bun ca urmare a eliminării pierderilor în fierul rotoric;
- ✓ Greutate mai mică a mașinii.

Dezavantaje:

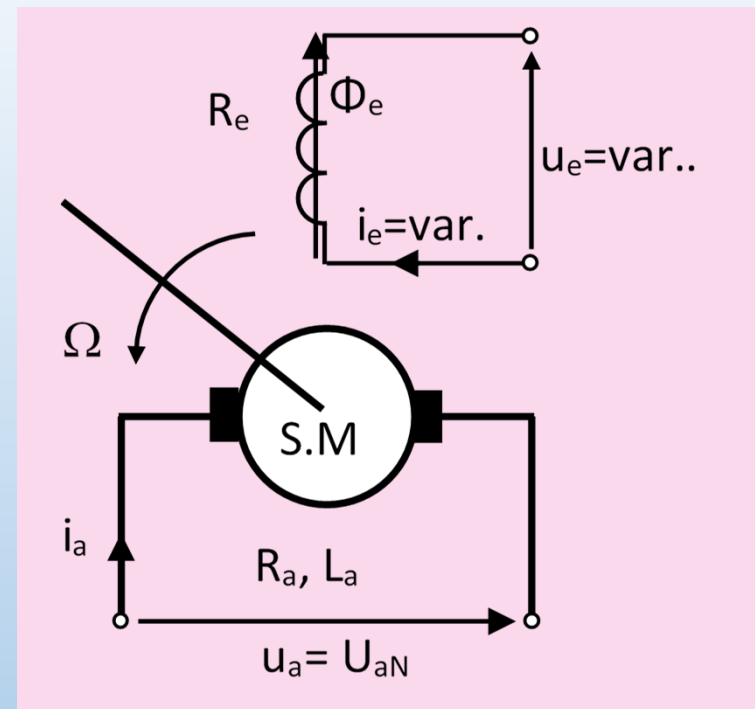
- ✓ Constantele electromecanice de timp rămân relativ mari datorită razei mari de girație a rotorului;
- ✓ Tensiunea aplicată înfășurării rotorice este relativ mică (30-60 V) datorită numărului redus de conductoare;
- ✓ Din considerente mecanice – viteza se limitează la 2000-3000 rot/min.
- ✓ Întrefierul este relativ mare.



Comanda și ecuațiile de funcționare ale servomotoarelor de c.c. cu excitație separată



Comanda prin indus



Comanda prin excitație

Comanda prin indus: fluxul de excitație rămâne constant, se modifica tensiunea circuitului indusului;

Comanda prin excitație: se modifică fluxul de excitație, tensiunea pe circuitul indusului rămâne constantă. Se poate aplica numai la motoarele cu excitație electromagnetică.

I. Comanda prin indus ($\phi = ct.$) – valabilă și în cazul servomotorului cu magneți permanenți

Ecuția de tensiuni a servomotorului este:

$$U_A = E + R_A \cdot I_A + \Delta U_p \quad \text{respectiv:} \quad U_A = E + R_A \cdot I_A \quad \text{dacă se neglijează căderea de tensiune la perii}$$

Expresia tensiunii induse este: $E = k_e \cdot n \cdot \phi = k_e \cdot \frac{60 \cdot \Omega}{2\pi} \cdot \phi = k_1 \cdot \Omega$ unde: $k_1 = k_e \cdot \frac{60}{2\pi} \cdot \phi$

Expresia cuplului este: $M = k_m \cdot \phi \cdot I_A = k_e \cdot \frac{30}{\pi} \cdot \phi \cdot I_A = k_1 \cdot I_A$

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

Prin eliminarea lui E și I_A se obține: $U_A = k_1 \cdot \Omega + R_A \cdot \frac{M}{k_1}$

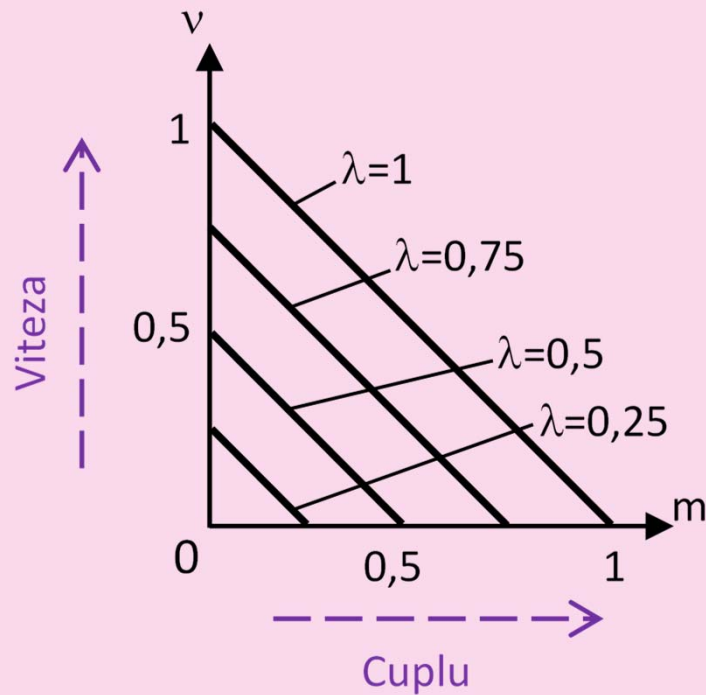
$$k_m = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi}$$

$$\frac{k_e}{k_m} = \frac{\pi}{30}$$

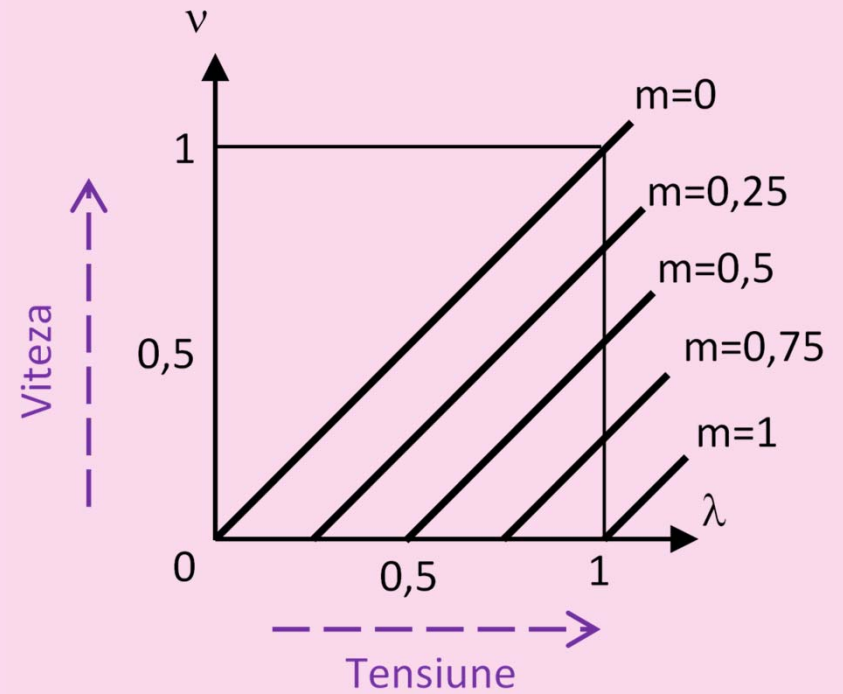
sau:

$$\Omega = \frac{U_A}{k_1} - \frac{R_A}{k_1^2} \cdot M$$

Caracteristicile mecanice



Caracteristicile de reglaj

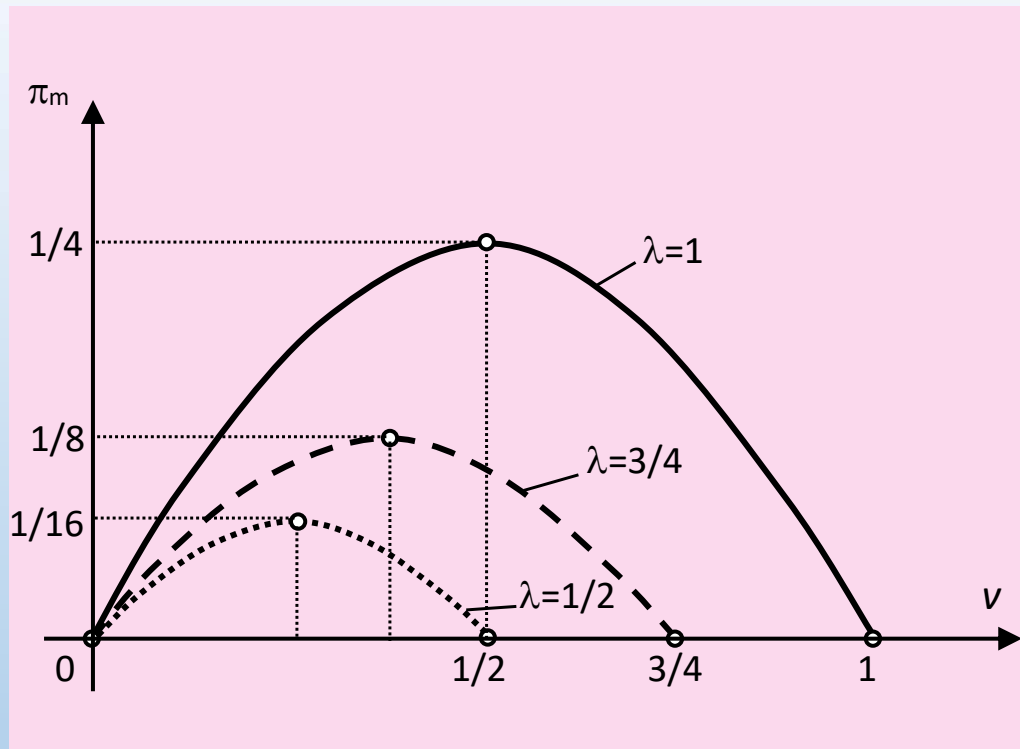


Pentru reprezentarea in mărimi relative se definesc următoarele rapoarte:

$$v = \frac{\Omega}{\Omega_0} \quad \lambda = \frac{U_A}{U_{eN}} \text{ - coeficient de semnal; } \quad m = \frac{M}{M_{pN}} \quad M_{pN} = \frac{k_1}{R_A} \cdot U_{AN} \quad \Omega_0 = \frac{U_{AN}}{k_1}$$

Caracteristicile (mecanice și de reglaj) sunt liniare si paralele. In realitate apar mici deviații datorită reacției indusului.

Curbele de variație a puterii utile (puterii mecanice)



$$P_u = M \cdot \Omega = \left(\frac{k_1}{R_A} \cdot U_A - \frac{k_1^2}{R_A} \cdot \Omega \right) \cdot \Omega$$

La pornire și la mersul în gol: $P_u=0$

Valoarea maximă se obține din:

$$\frac{dP_u}{d\Omega} = \frac{k_1}{R_A} \cdot U_A - \frac{2k_1^2}{R_A} \cdot \Omega$$

Iar valoarea lui Ω pentru care se obține valoarea maximă a puterii este:

$$\frac{dP_u}{d\Omega} = 0 \rightarrow \Omega = \frac{U_A}{2k_1} = \frac{1}{2} \cdot \Omega_0$$

Dacă se raportează puterea utilă, P_u , la puterea absorbită la pornire, P_{ap} , atunci se definește raportul: $\pi_m = \frac{P_u}{P_{ap}}$

Curbele de variație a puterii utile arată că puterea maximă se obține la o viteză egală cu jumătate din viteza maximă de mers în gol.

II. Comanda prin excitație ($U_A = ct.$)

$$\begin{cases} U_A = E + R_A \cdot I_A & \text{- Ecuația de tensiuni} \\ E = k_e \cdot n \cdot \phi = k_m \cdot \Omega \cdot \phi = k' \cdot \Omega \cdot I_e & \text{- Expresia tensiunii induse} \\ U_e = R_e \cdot I_e & \text{- Expresia tensiunii de excitație} \end{cases}$$

$$M = k_m \cdot \phi \cdot I_A = k' \cdot I_e \cdot I_A \quad \text{- Expresia cuplului electromagnetic}$$

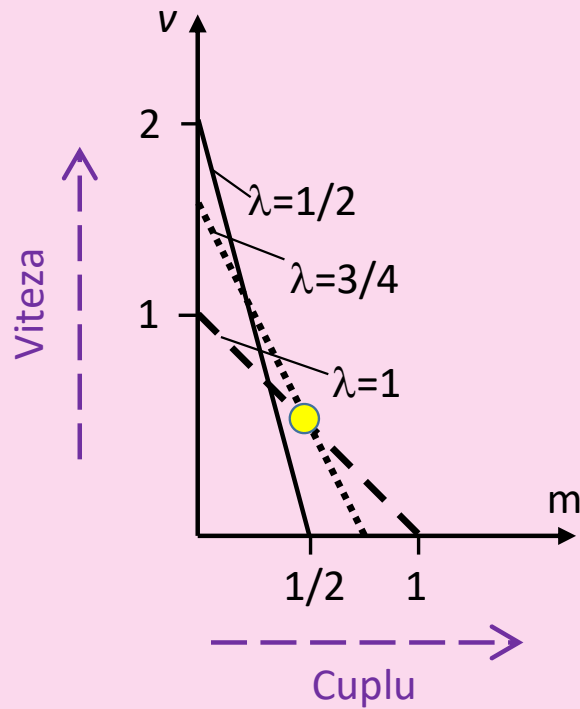
$$U_A = R_A \cdot \frac{M}{k' \cdot I_e} + k' \cdot I_e \cdot \Omega = \frac{R_A \cdot R_e}{k' \cdot U_e} \cdot M + \frac{k' \cdot U_e}{R_e} \cdot \Omega$$

$$M = \frac{k' \cdot U_A \cdot U_e}{R_A \cdot R_e} - \frac{(k')^2 \cdot U_e^2}{R_A \cdot R_e^2} \cdot \Omega$$

- Expresia caracteristicii mecanice $M=f(\Omega)$

$$M_p = \frac{k' \cdot U_A}{R_A \cdot R_e} \cdot U_e \quad \text{- Expresia cuplului de pornire}$$

Caracteristicile mecanice



Caracteristicile mecanice sunt liniare (drepte) care însă NU sunt paralele și au puncte de intersecție. Aceasta înseamnă că, pentru un anumit cuplu constant la arbore, funcționarea la o anumită viteză impusă se poate obține din două valori distincte ale tensiunii de excitație.



Este o situație de *neunivocitate*, inacceptabilă în sistemele de comandă și control.

Comanda prin excitație se folosește, de regulă, la putere constantă.

CONCLUZII



Comanda prin indus prezintă avantaje importante în raport cu comanda prin excitație:

» Important

1. Caracteristicile mecanice sunt liniare și univoce;

» Important

2. Răspunsul dinamic al servomotorului este mai rapid atunci când controlul se face pe înfășurarea rotorică. Acest lucru se datorează faptului că înfășurarea rotorică este „mai puțin inductivă și mai mult rezistivă” în comparație cu înfășurarea de excitație separată.

Caracteristicile reale ale servomotoarelor de c.c.



Liniaritatea caracteristicilor este afectată de fenomene ce au fost neglijate:

- S-au neglijat frecările statice (mai ales la servomotoarele cu magneți permanenți unde se constată „prinderi electromagnetice” pentru anumite poziții ale rotorului);
- Frecările vâscoase s-au considerat proporționale cu viteza de rotație;
- S-a neglijat căderea de tensiune la perii;
- S-au neglijat efectele reacției indusului;
- S-a neglijat variația rezistenței înfășurărilor (îndeosebi înfășurarea rotorică) cu temperatura;
- Tensiunea aplicată indusului, în cazul în care servomotoarele sunt alimentate de la redresoare comandate, nu este perfect continuă (riplu de tensiune). Rezultă că tensiunea indusă are o componentă continuă și o componentă cvasi-armonică. Rezultă existența unui curent cu o componentă continuă și o componentă alternativă. Rezultă o variație a vitezei și un riplu de cuplu.

Click Mouse to Advance Points after animation plays

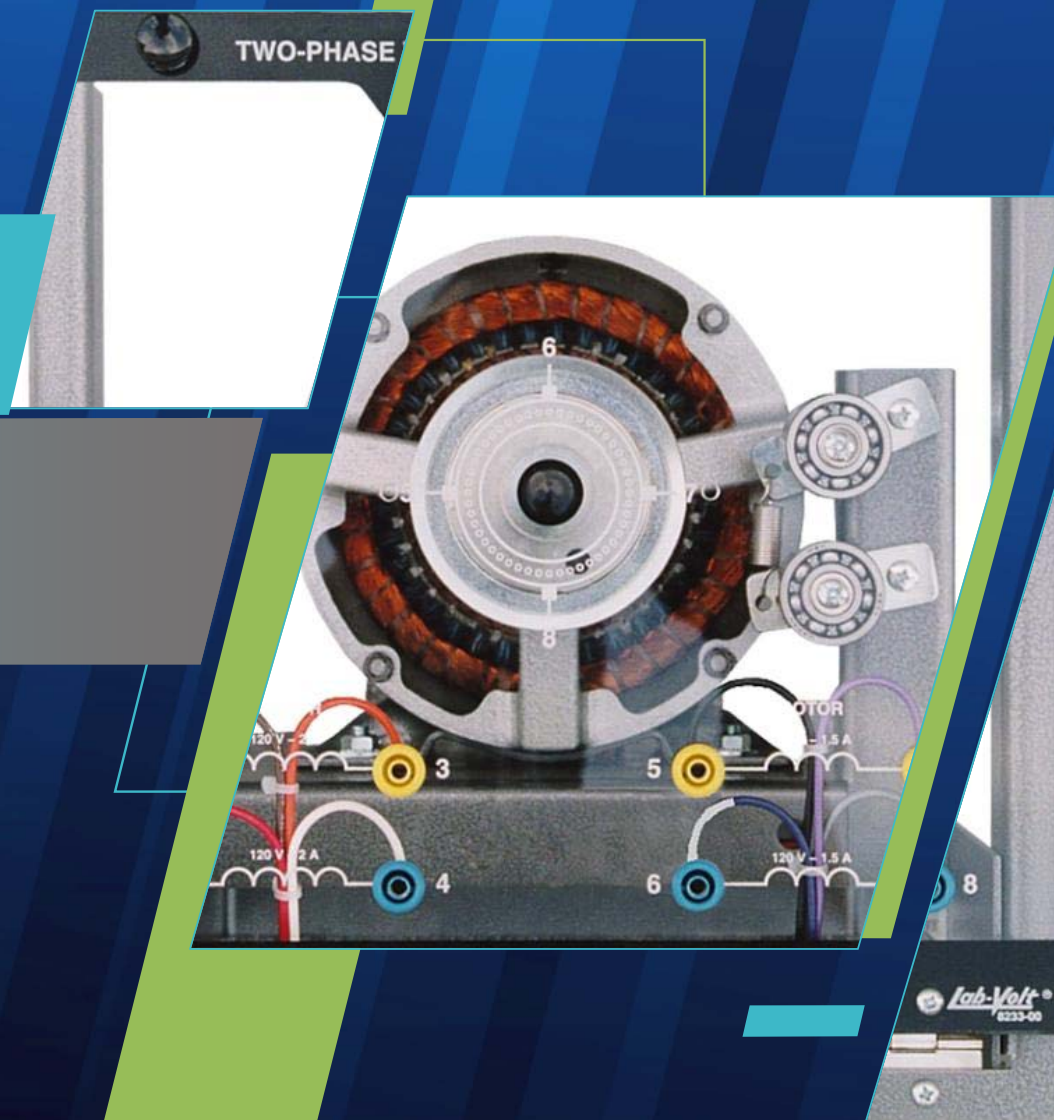
Cuvinte cheie



- Rotor cilindric
- Rotor disc
- Rotor pahar
- Comanda prin indus
- Caracteristici liniare

SERVOMOTOARE DE C.A. ASINCRONE

Curs 5



CLASIFICARE



**Servomotoare
trifazate cu rotor
in sc**



**Servomotoare
bifazate**

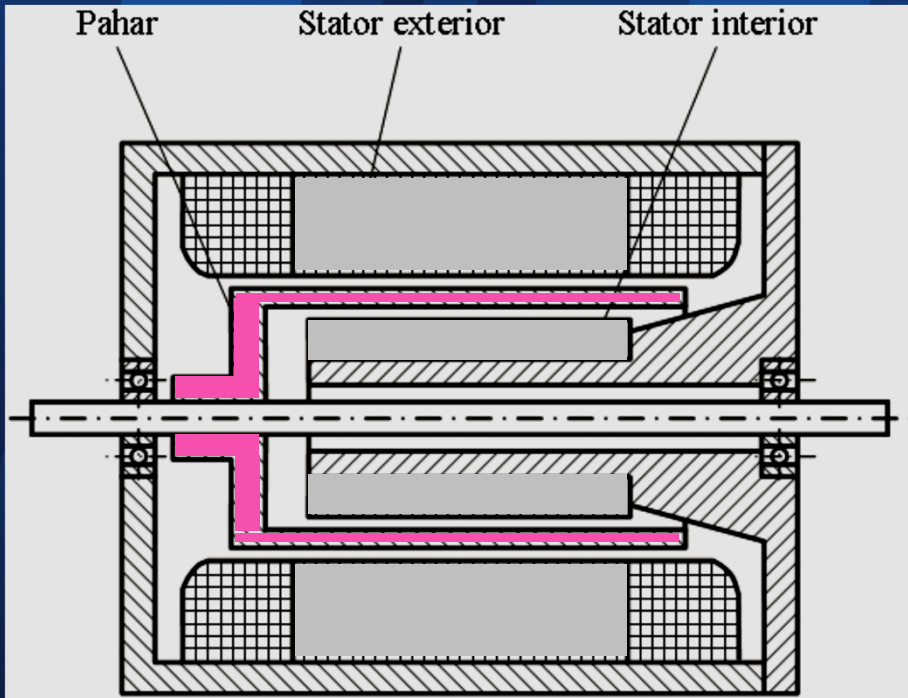


**Servomotoare
trifazate cu rotor
masiv**

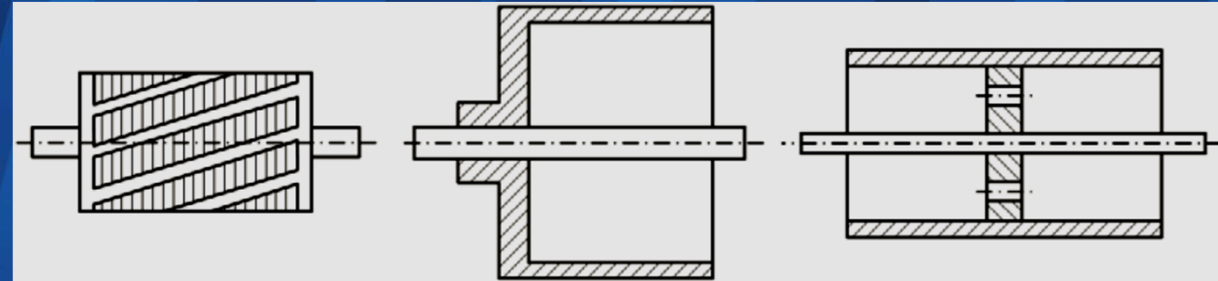
Servomotoare
asincrone bifazate
(SAB)



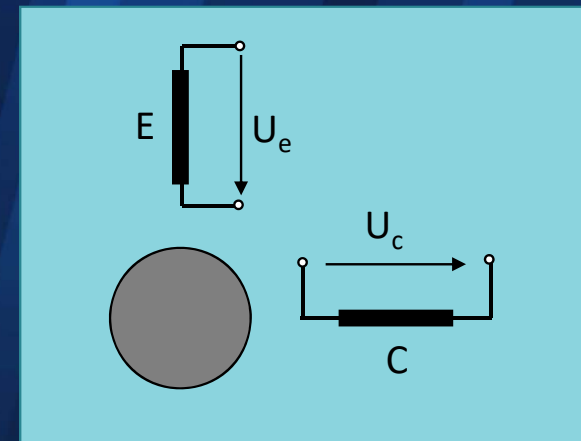
Construcția SAB



Secțiune transversală – servomotor cu rotor pahar



Structuri rotorice: cu colivie, tip pahar neferomagnetic, tip cilindru feromagnetic.



Structura electrică

Satorul este realizat din tole având creștături uniform distribuite.

Înfășurarea statorică este BIFAZATA – două înfășurări monofazate decalate spațial la 90° el.

Una din înfășurări reprezintă înfășurarea de *excitație* (E) iar cea de a doua reprezintă înfășurarea de *comanda* (C). Cele două înfășurări sunt alimentate de la aceeași sursă de tensiune monofazată sau de la surse diferite.

Circuitul fazei de comandă trebuie să permită modificarea amplitudinii tensiunii și (sau) a defazajului acesteia în raport cu înfășurarea de excitație.

Rotorul poate fi construit în următoarele variante:

- Cu înfășurare în colivie având rezistența echivalentă mărită;
- Cu rotor pahar neferomagnetic (din aluminiu sau aliaje Al+Cu). Grosimea materialului paharului este de 0,2-0,3 mm. La această construcție apare un stator interior pentru închiderea liniilor de câmp;
- Cu rotor cilindric, feromagnetic. Grosimea cilindrului este de 2-3 mm.

În cazul variantei cu rotor pahar este necesară prezența unui al doilea stator, statorul interior, pentru închiderea liniilor de câmp. Rotorul pahar este plasat între cele două statoare.

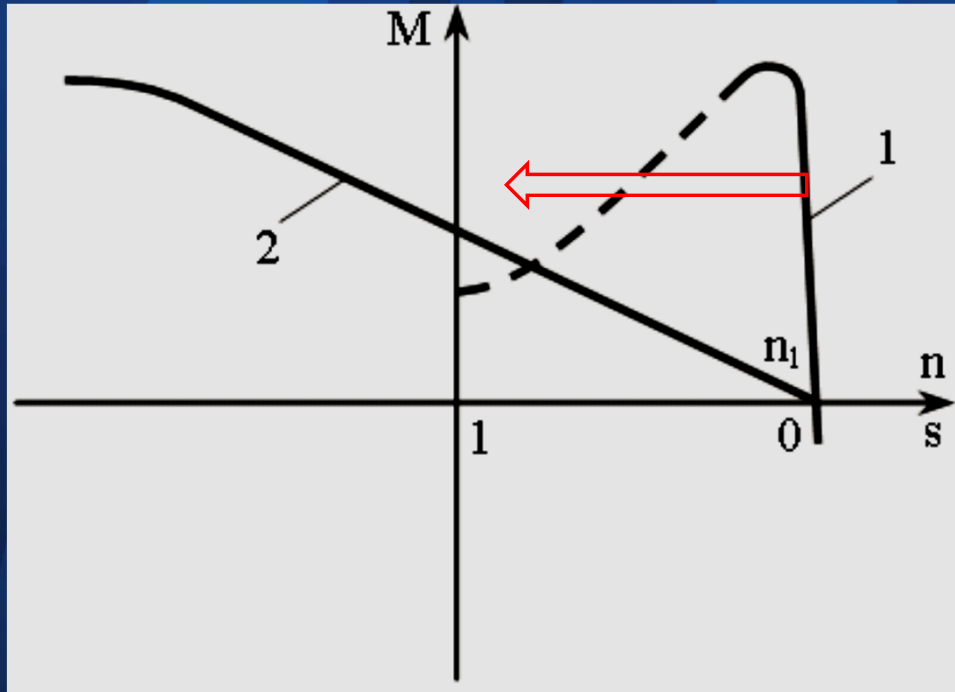
Principiul de funcționare

Principiul de funcționare, în cazul mașinilor cu rotor pahar sau rotor cilindric feromagnetic, se bazează pe apariția curenților turbionari (datorită câmpului magnetic învârtitor produs de cele două înfășurări) în rotor.

Situația este echivalentă existenței unui număr „infini” de bare rotorice.

Acești curenți se închid pe direcție axială și, prin interacțiune cu câmpul inductor, dau naștere cuplului electromagnetic ce determină rotirea rotorului.

În cazul mașinii cu rotor cilindric și înfășurare în colivie, funcționarea este identică cu cea de la mașina asincronă de construcție „clasică”.



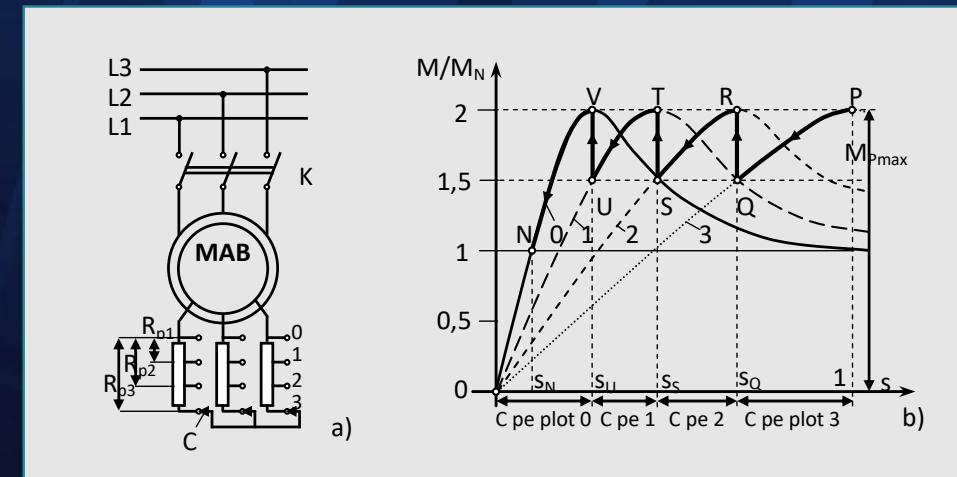
Caracteristica mecanică, $n=f(M)$, a mașinilor asincrone cu rezistență mărită în rotor (curba 2)



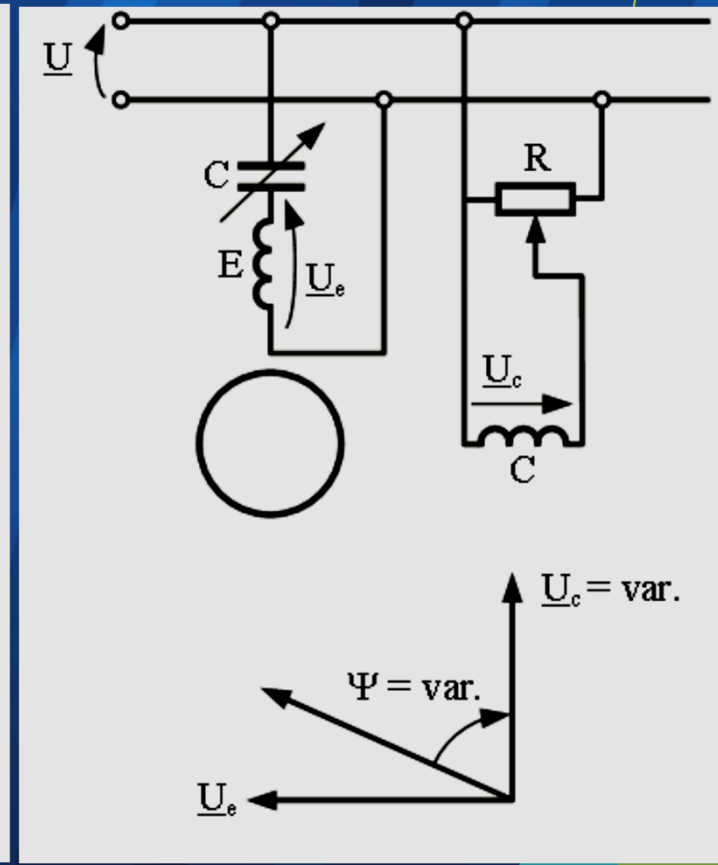
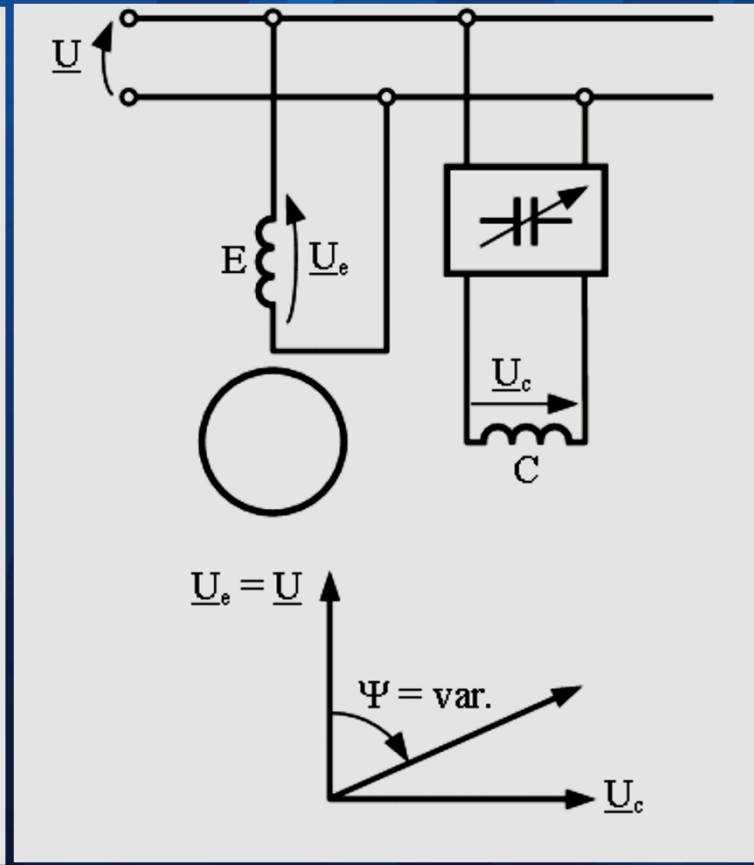
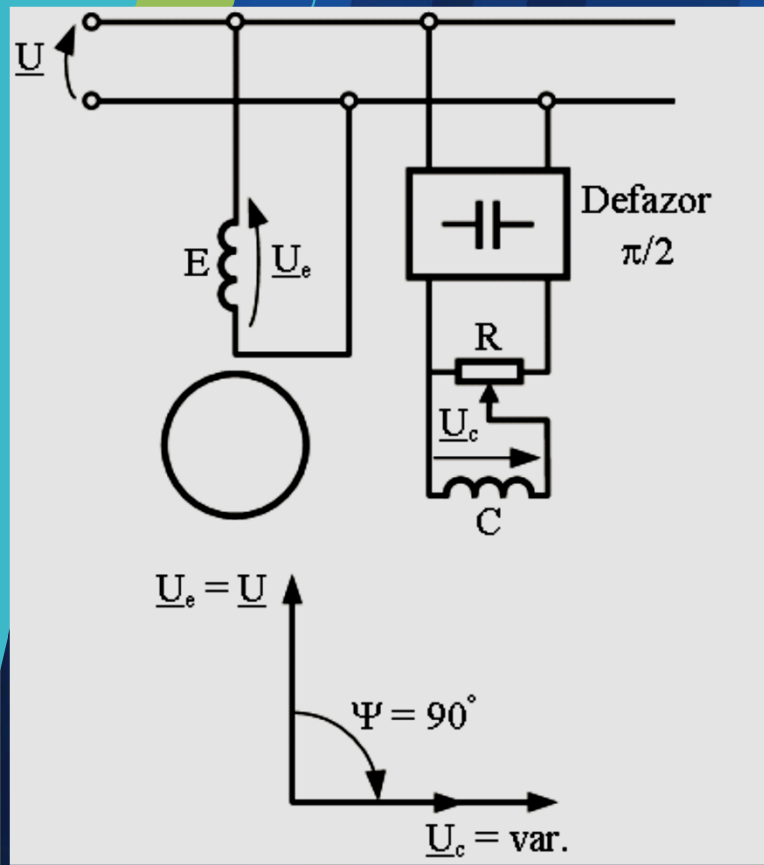
La toate variantele constructive rezistența echivalentă a rotorului este mare.

Mărirea semnificativă a rezistenței echivalente a rotorului determină inclinarea caracteristicii mecanice (curba 1 ocupă poziția curbei 2). În acest fel se asigură existența fenomenului de **autofrânare** la servomotoarele bifazate.

Inclinarea caracteristicii $M=f(s)$ la motorul asincron trifazat cu rotor bobinat prin introducerea unei rezistențe în circuitul rotoric



Scheme de alimentare a servomotorului asincron bifazat

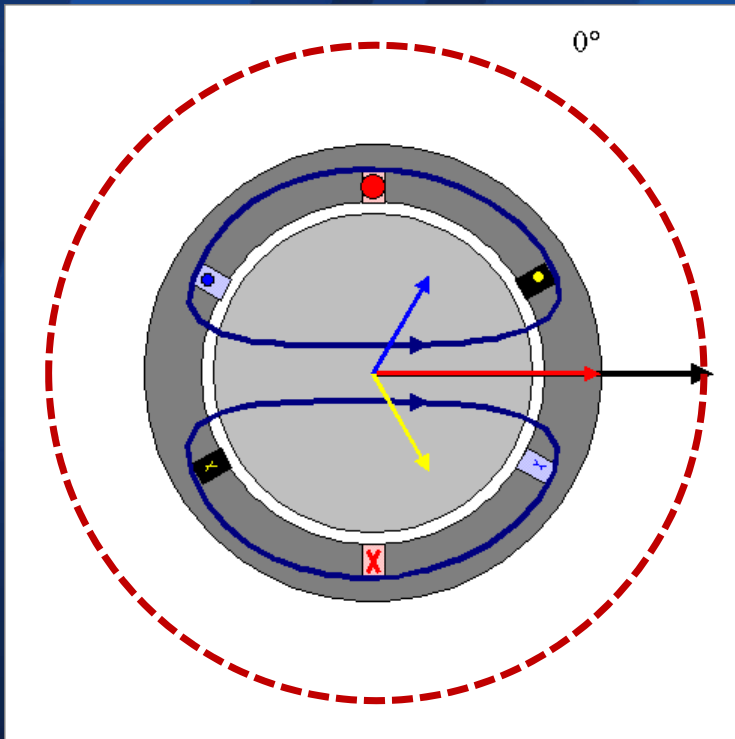


1. Tensiune de excitație fixă; tensiune de comandă variabilă in amplitudine

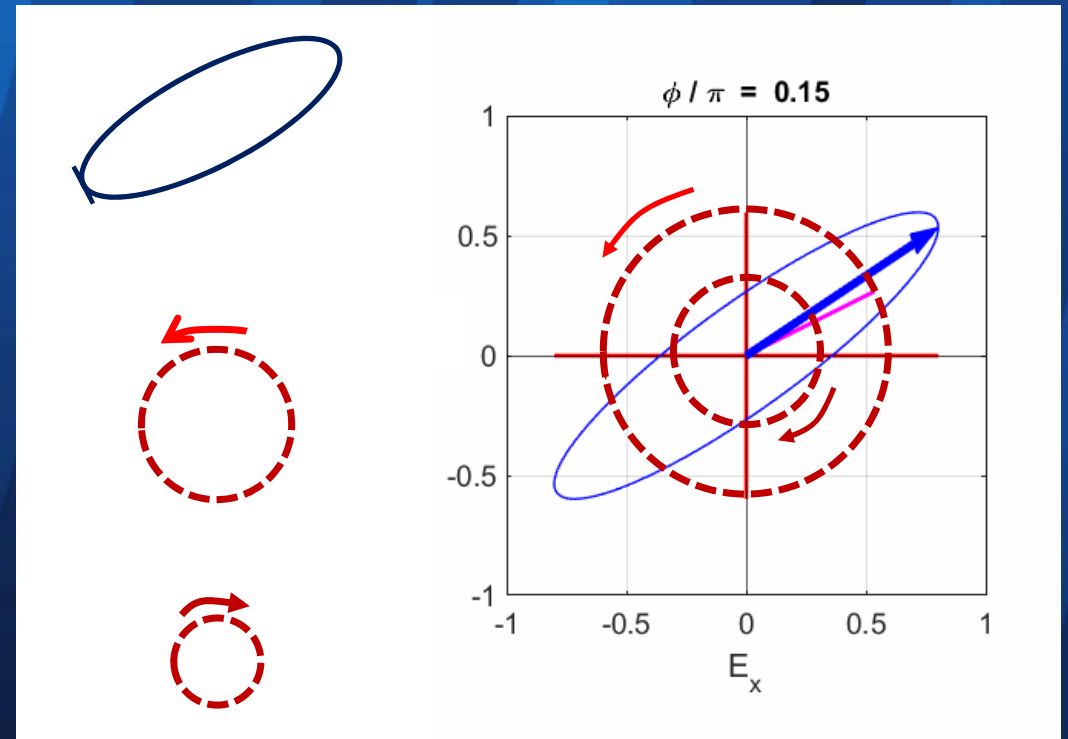
2. Tensiune de excitație fixă; tensiune de comandă constantă ca amplitudine dar variabilă ca fază in raport cu tensiunea de excitație

3. Se modifică faza tensiunii de excitație precum și amplitudinea tensiunii de comandă.

Câmp magnetic învârtitor CIRCULAR



Câmp magnetic învârtitor ELIPTIC



Câmpul magnetic învârtitor ELIPTIC se descompune in doua câmpuri magnetice circulare, de amplitudini diferite si care se rotesc in sensuri contrare. Într-o mașină electrică, câmpul învârtitor de amplitudine mai mare determină cuplul ce fixează sensul de rotație in timp ce câmpul de amplitudine mai mică determină un cuplu electromagnetic de frânare.

Alimentarea servomotorului bifazat cu tensiuni egale (pe înfășurarea de excitație și înfășurarea de comandă) și defazate la 90° el. determină funcționarea la câmp învârtitor CIRCULAR.

Crearea oricărei nesimetrii (tensiuni de amplitudini diferite pe cele două înfășurări sau defazaj diferit de 90° el.) duce la transformarea câmpului circular într-un câmp ELIPTIC. Acesta are o componentă directă (mai mare) ce determină rotirea rotorului și o componentă mai mică inversă, ce reprezintă un cuplu de frânare.

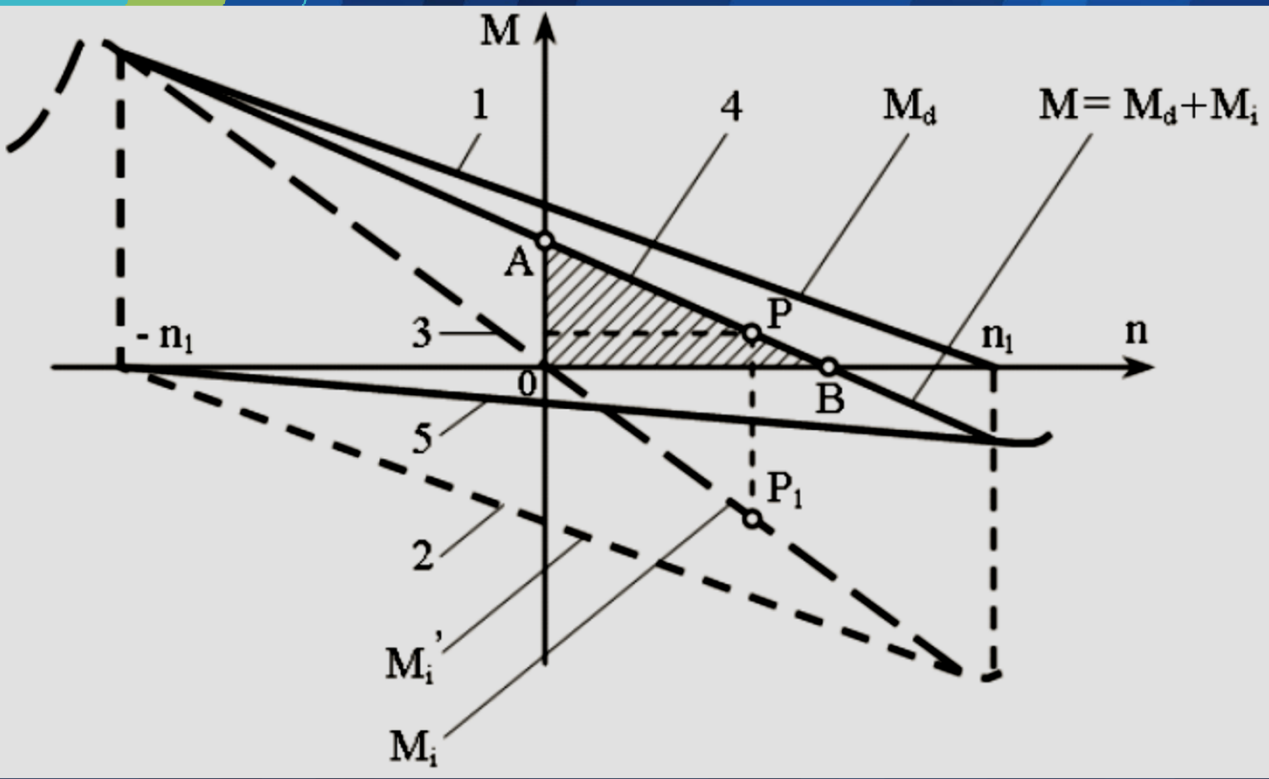
Variația vitezei servomotorului bifazat înseamnă, în fapt, „alterarea” câmpului învârtitor.

In schema 1 de comandă, defazorul din circuitul înfășurării de comandă asigură unghiul de defazaj de 90° între curenții de pe cele două faze statorice (defazaj ce rămâne fix). Amplitudinea tensiunii poate fi modificată prin intermediul unei rezistențe variabile (soluție simplă dar cu pierderi importante de tip Joule) sau cu dispozitive electronice.

In schema 2 de comandă, defazorul din circuitul înfășurării de comandă creează un unghi variabil de defazaj între curenții de pe cele două faze statorice, în timp ce amplitudinea celor două tensiuni rămâne aceeași.

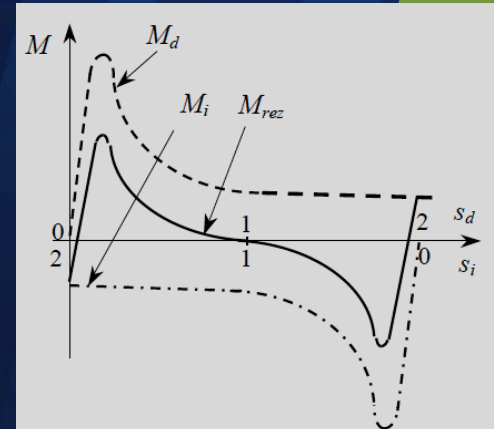
In schema 3 de comandă se modifică atât defazajul curenților (cu un defazor plasat în circuitul înfășurării de excitație) cât și amplitudinea tensiunii de comandă.

Autofrânarea servomotorului asincron bifazat



- 1 – caracteristica cuplului direct in funcționare bifazata cu câmp eliptic;
- 5 – caracteristica cuplului invers in funcționare bifazata cu câmp eliptic;
- 4 – caracteristica cuplului rezultat in funcționare bifazata cu câmp eliptic;
- 2 - caracteristica cuplului invers in funcționare monofazata;
- 3 - caracteristica cuplului rezultat in funcționare monofazata;
- P – punct de funcționare in bifazat;
- P₁ – punct de funcționare in monofazat

Explicativa la existenta fenomenului de autofrânare la servomotorul asincron bifazat



Caracteristica $M=f(s)$ a motorului monofazat „clasic”

Se consideră că SAB-ul este alimentat la ambele înfășurări, astfel încât câmpul magnetic este eliptic; acest câmp se descompune în două câmpuri circulare, unul direct și altul invers, iar cuplurile corespunzătoare, direct și invers, reprezentate în figură prin curbele 1 și 5. În urma compunerii lor, se va obține curba rezultantă 4. Punctul de funcționare P se găsește în porțiunea din primul cadran al curbei 4 (pe segmentul AB), corespunzător unui anumit cuplu al SAB-ului, egal în modul cu valoarea cuplului rezistent al mașinii de lucru (cuplu de sarcină) și unei anumite viteze, mai mică decât turația de sincronism, n_1 .

În momentul întreruperii alimentării înfășurării de comandă, câmpul devine alternativ, iar caracteristica $M=f(n)$ devine curba 3, adică rezultanta câmpurilor direct și invers (curbele 1 respectiv 2) corespunzătoare unei mașini monofazate. Punctul de funcționare se deplasează, brusc, din P în $P1$ (întrucât, în primul moment, viteza de rotație se conservă). Punctului $P1$ îi corespunde un cuplu al SAB-ului negativ, în același sens cu cuplul rezistent, având ca efect frânarea rotorului, punctul de funcționare deplasându-se rapid spre O , până la oprire. Acest fenomen de autofrânare se manifestă numai dacă înfășurarea de excitație rămâne alimentată de la rețea.

În funcționarea SAB-ului cu ambele înfășurări alimentate, funcție de amplitudinile celor două tensiuni și defazajele dintre ele, punctul de funcționare se găsește pe o caracteristică, a cărei porțiune din primul cadran se plasează între origine și caracteristica ideală (corespunzătoare alimentării înfășurărilor pentru care, în mașină, se obține un câmp învârtitor circular).



Pentru ca SAB-ul să prezinte autofrânare este necesară îndeplinirea următoarei condiții: rezistența rotorică raportată (R'_2) trebuie să fie mai mare decât suma dintre reactanța de magnetizare și reactanța de dispersie raportată a rotorului.

$$R'_2 > X_m + X'_{s2}$$

Comanda servomotorului asincron bifazat

Expresia cuplului mediu dezvoltat de SAB este:

$$M_e = \frac{2p\lambda U_e^2}{\Omega_s \cdot R} \sin \Psi - v \cdot \frac{pU_e^2}{\Omega_s \cdot R} (1 + \lambda^2)$$

unde: p - numărul de perechi de poli; R - rezistența echivalentă a rotorului; λ - coeficientul de semnal ($\lambda = U_c/U_e$); U_e - tensiunea de excitație; Ψ - unghiul de defazaj dintre curenții pe cele două înfășurări; v - viteza relativă a rotorului ($v = \Omega_r/\Omega_s$); Ω_s - viteza de sincronism

Expresia cuplului de pornire se obține pentru $v = 0$:

$$M_{ep} = \frac{2p\lambda U_e^2}{\Omega_s \cdot R} \sin \Psi$$

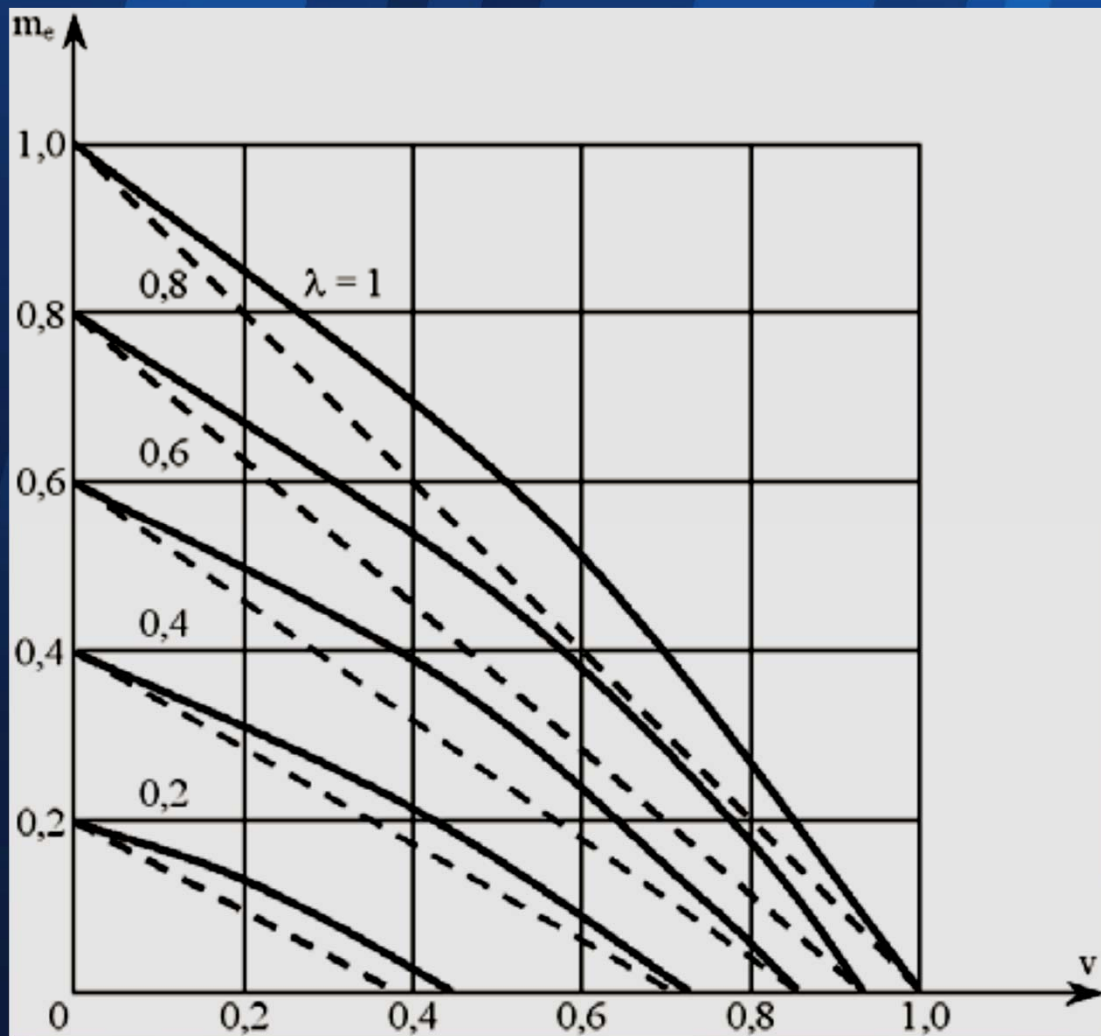
a cărei valoare maximă corespunde situației $\lambda = 1$ și $\sin \Psi = 1$, adică atunci când câmpul învârtitor este unul circular:

$$M_{ep \max} = \frac{2pU_e^2}{\Omega_s \cdot R}$$

Se definește cuplul electromagnetic relativ, m_e , ca raportul: $m_e = M_e/M_{ep \max}$ și are expresia:

$$m_e = \lambda \cdot \sin \Psi - v \cdot \frac{(1 + \lambda^2)}{2}$$

Caracteristicile mecanice pentru comanda in amplitudine



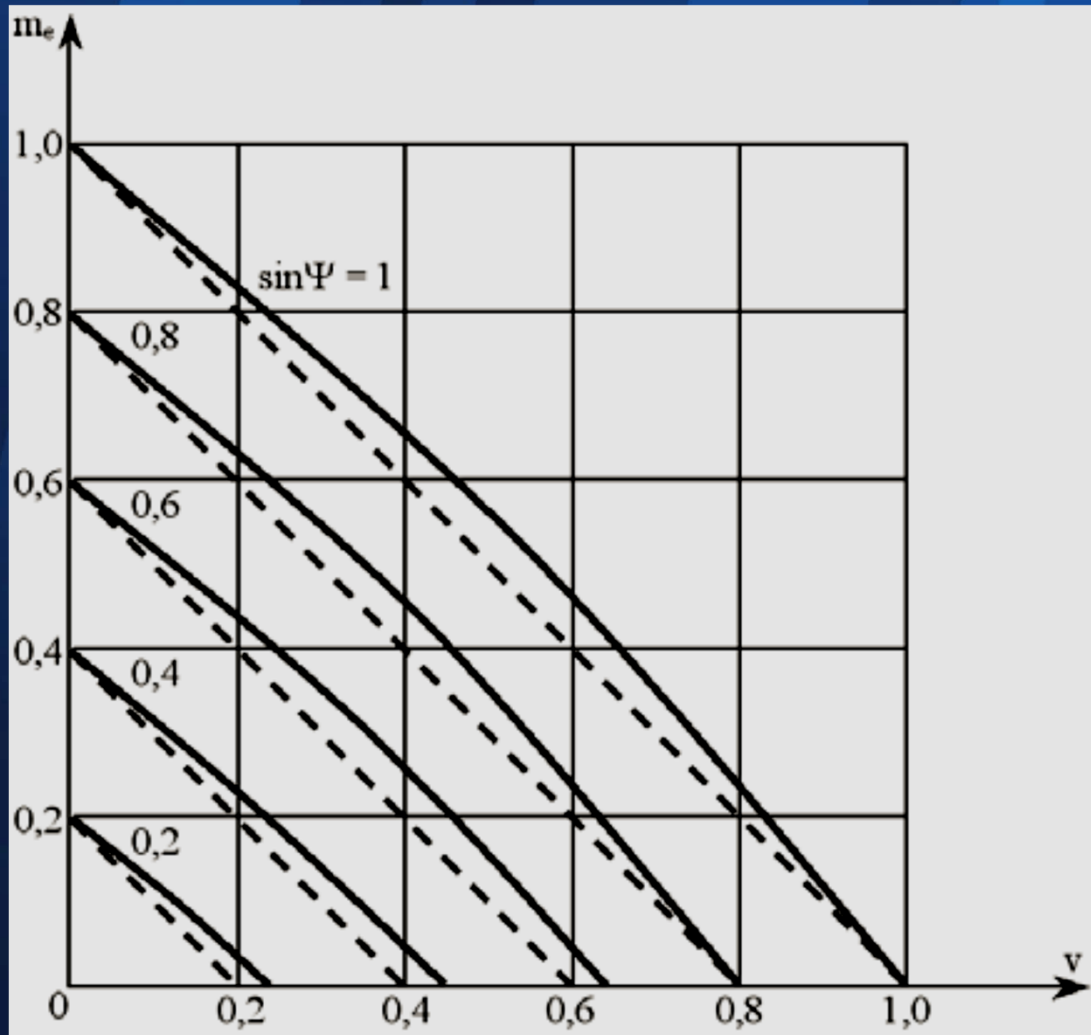
$$m_e = \lambda - v \cdot \frac{(1 + \lambda^2)}{2}$$

Caracteristicile ideale (obținute pentru $\sin\Psi=1$) sunt drepte (liniile punctate de pe figură), iar panta acestora este diferită (caracteristicile nu sunt paralele între ele).

Cu cât coeficientul de semnal λ este mai mic (adică tensiunea de comandă în raport cu tensiunea de excitație) cu atât viteza scade mai repede odată cu creșterea cuplului la arbore.

În realitate, caracteristicile sunt neliniare (cele cu linie plină de pe figură).

Caracteristicile mecanice pentru comanda in fază

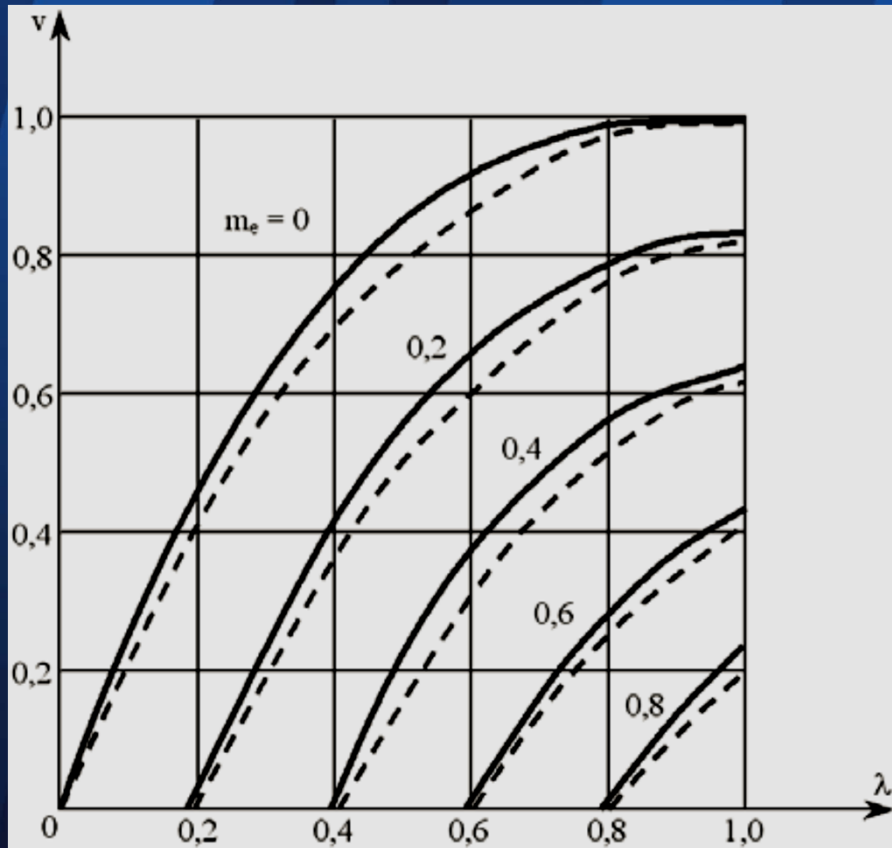


$$m_e = \sin \Psi - v$$

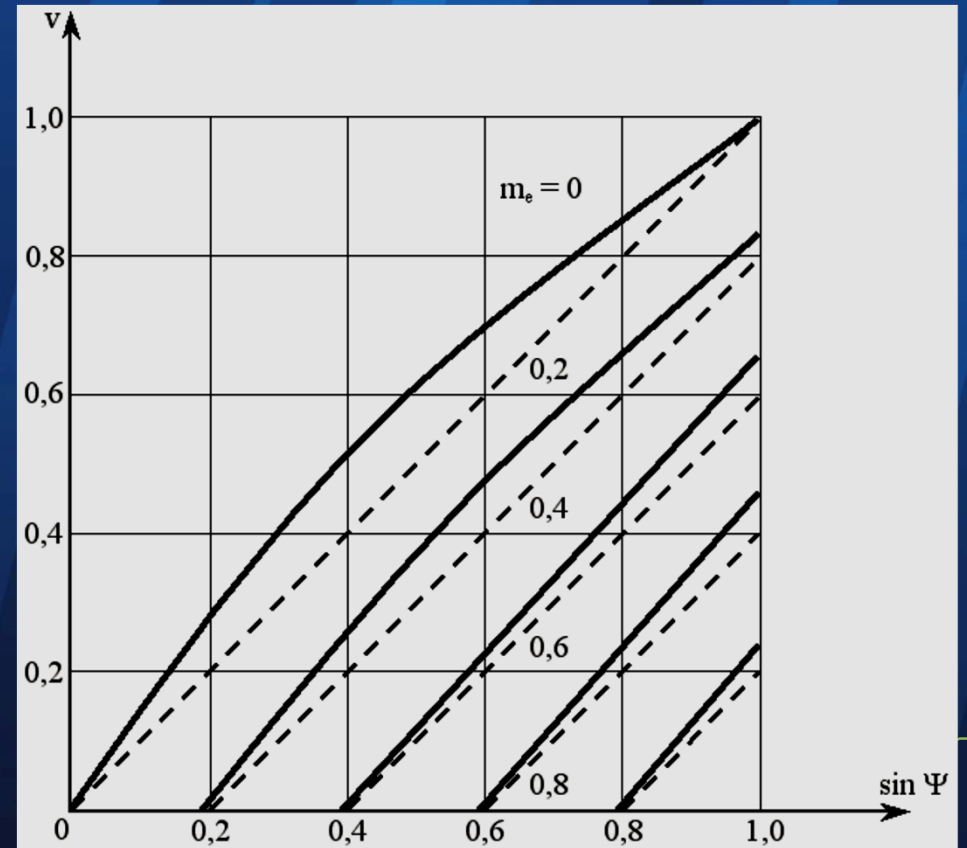
Caracteristicile ideale (obținute pentru $\lambda=1$) sunt drepte (liniile punctate de pe figură), și au aceeași pantă (caracteristicile sunt paralele între ele).

În realitate, caracteristicile sunt neliniare (cele cu linie plină de pe figură).

Caracteristicile de reglaj al vitezei la cuplu constant



Comanda in amplitudine, $v = f(\lambda)$, pentru $\sin \Psi = 1$



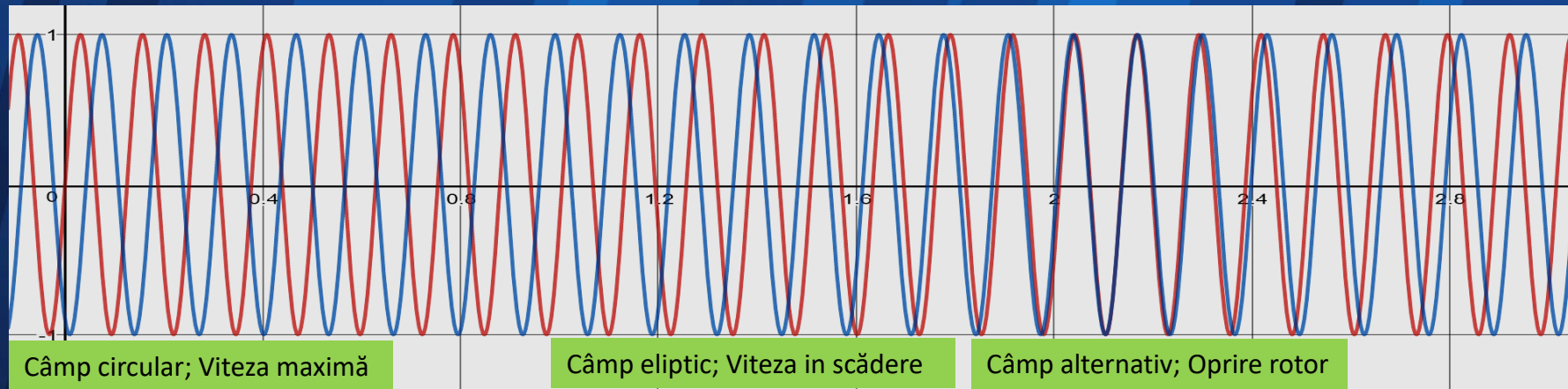
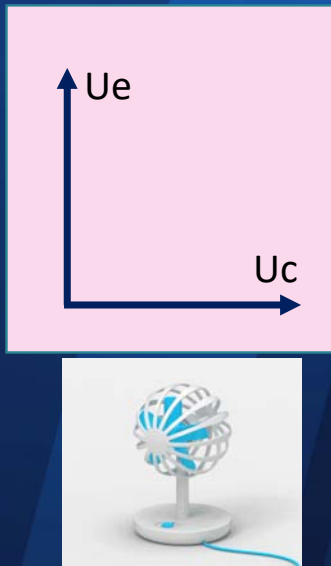
Comanda in faza, $v = f(\sin \Psi)$, pentru $\lambda = 1$



La *comanda în amplitudine* caracteristicile mecanice sunt, aproximativ, *drepte de pante diferite, dependente de pătratul coeficientului de semnal*, mai *dezavantajoase*, din acest punct de vedere, *decât cele ale servomotoarelor de curent continuu*;

La *comanda în fază* se obțin *caracteristici mecanice de pantă constantă, asemănătoare cu cele ale servomotoarelor de curent continuu*; de aceea, în sistemele automate liniare se preferă acest mod de comandă.

Comanda reversibilă a servomotorului asincron bifazat



Acest tip de comandă permite servomotorului asincron bifazat să efectueze mișcări oscilatorii ale rotorului.

Cele două înfășurări, de excitație și de comandă, se alimentează cu tensiuni de amplitudine egală, defazate la 90° el., dar de frecvență diferită ($f_e \neq f_c$). De regulă, diferența este mică (1-2 Hz).

Inițial, când defazajul este de 90° , servomotorul funcționează cu un câmp magnetic învârtitor circular. Datorită diferenței de frecvență, fazorul U_e (de exemplu) rămâne în urmă și unghiul dintre cele două tensiuni descrește. Servomotorul funcționează cu un câmp eliptic, din ce în ce mai pronunțat care duce la scăderea vitezei rotorului.

În momentul în care cei doi fazori se suprapun, câmpul devine alternativ și, datorită autofrânării, rotorul se oprește. Apoi fazorul U_c trece în fața lui U_e , câmpul începe din nou să devină eliptic, iar rotorul începe să se rotească în sens invers. Viteza crește până se atinge din nou 90° între cei doi fazori.

Urmează, din nou, decelerare, oprire și inversarea sensului de rotație. Practic, se obține o mișcare oscilatorie. Timpul de oscilație depinde de cuplul rezistent și amplitudinea tensiunilor pe cele două înfășurări.


CUVINTE CHEIE



**Rezistență
rotorică mărita**

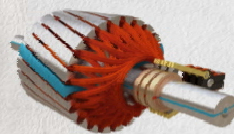


**Câmp
eliptic**



**Comandă in
amplitudine si
fază**

Motorul asincron cu rotor masiv



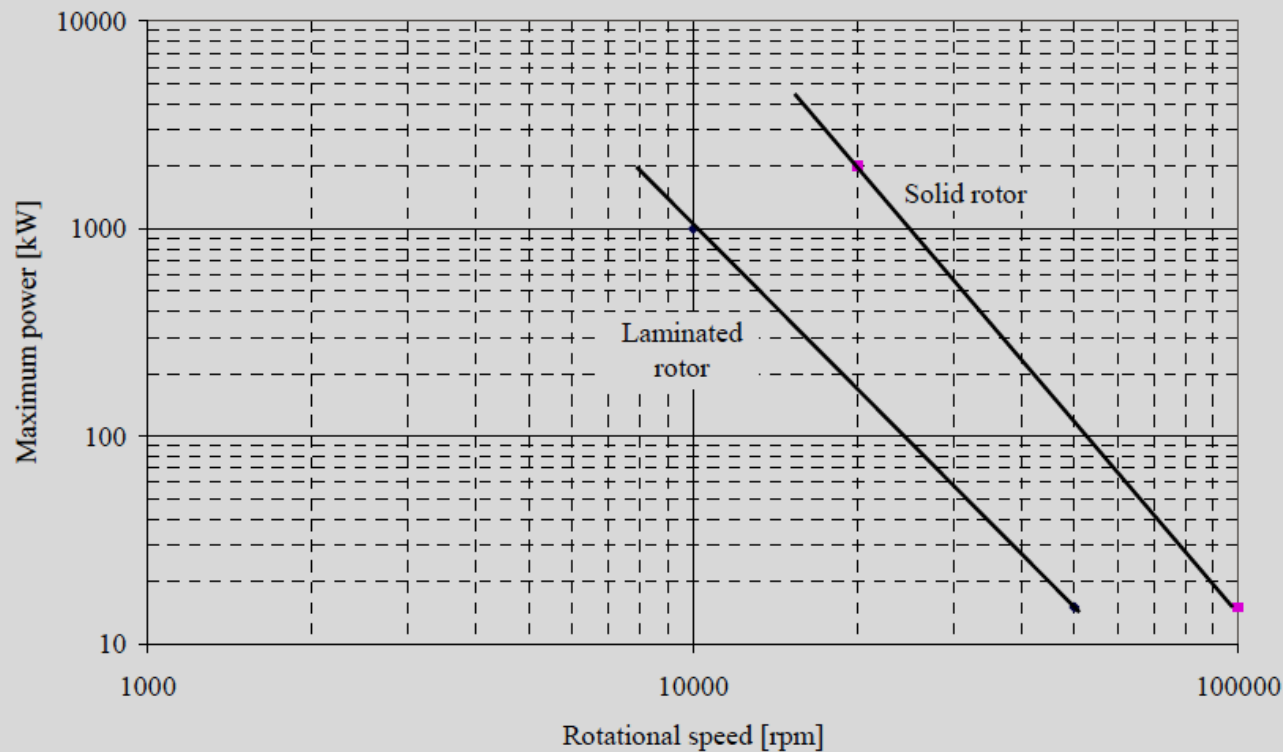


Fig. 1.1. Powers limited by the rotor material yield stress (700 MPa) versus rotational speed (Jokinen 1988).

Limita de funcționare ($P=f(n)$), a mașinilor cu rotor lamelat respectiv masiv

Principalul motiv al înlocuirii rotorului realizat din tole cu rotorul masiv constă în posibilitatea acestuia de a funcționa la turații mai mari, în limitele eforturilor mecanice la rupere și curgere.

Principiul de funcționare se bazează pe apariția, în rotorul masiv, a curenților turbionari ce se închid pe direcție axială.

Situația este echivalentă existenței unui număr „infini” de bare rotorice. Acești curenți interacționează cu câmpul învârtitor statoric, producând un cuplu ce determină rotirea rotorului.

Cuplul produs de motorul cu rotor masiv este mai mic decât cel la motoarele cu rotor având înfășurare (în colivie sau de tip bobinat) iar alunecarea este mai mare (deci viteza mai mică) corespunzător aceluiași cuplu rezistent la arbore.

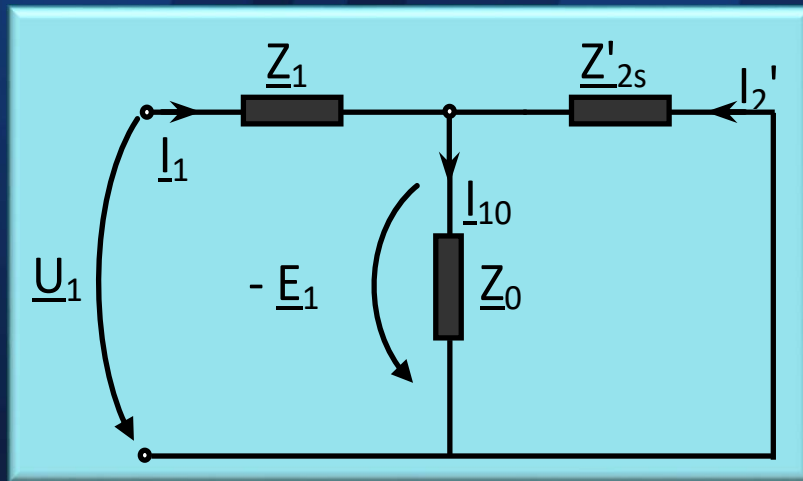
Curenții induși în rotorul masiv se concentrează la suprafața rotorului pe o adâncime numită **adâncime de pătrundere**. Valoarea acestei mărimi depinde de frecvența curentului indus și de caracteristicile de material ale rotorului:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega \cdot \mu}}$$

unde: ρ - rezistivitatea electrică a materialului; μ - permeabilitatea magnetică a materialului.

La 50 Hz, adâncimea de pătrundere pentru fier este de 1,8-2 mm iar pentru cupru, de 9,5 mm. La frecvență de 1-2 Hz, adâncimea de pătrundere pentru rotoarele de fier masiv ajunge la 20 mm.

Modificarea adâncimii de pătrundere cu frecvența face ca, la variația sarcinii, odată cu variația alunecării să se modifice și adâncimea de pătrundere. Aceasta duce la modificarea rezistenței dar și a reactanței echivalente a rotorului – fenomen ce nu se petrece la motorul asincron cu înfășurare rotorică și circuit magnetic lamelat.

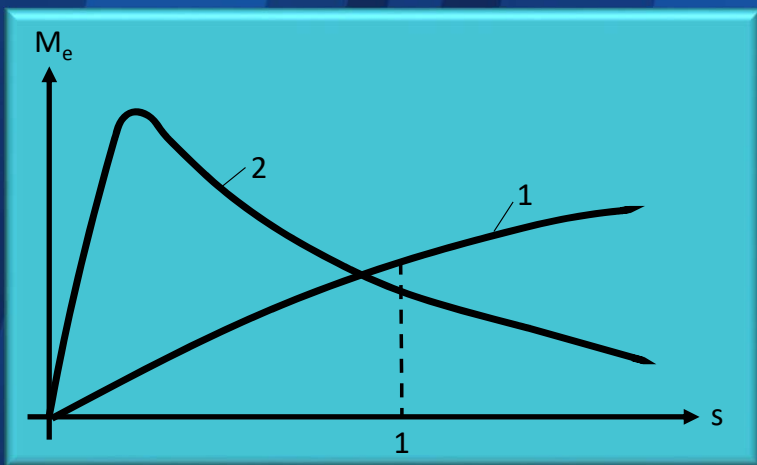


$$Z'_{2s} = \frac{R'_2}{s} + j \cdot X'_{\sigma 2}$$

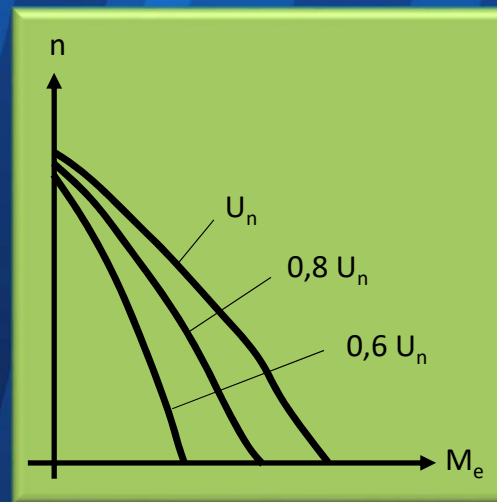
- rotor lamelar cu înfășurare

$$Z'_{2s} = \frac{R'_{20}}{\sqrt{s}} + j \cdot \frac{X'_{\sigma 20}}{\sqrt{s}}$$

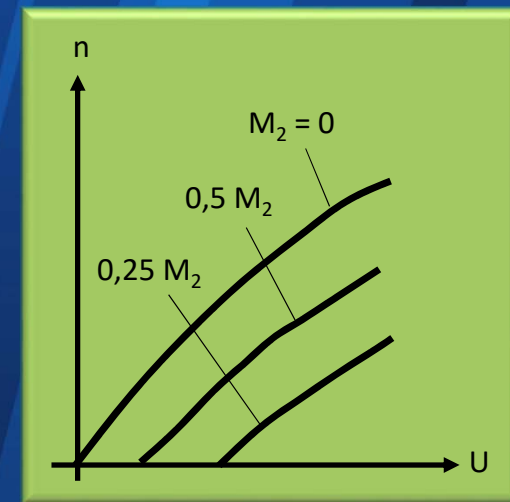
- rotor masiv



a)



b)



c)

Caracteristicile motoarelor cu rotor masiv: a) Caracteristica $M=f(s)$, curba 1 in comparație cu cea a mașinii asincrone clasice, curba 2; b) caracteristicile mecanice; c) caracteristicile de reglaj al vitezei

Caracteristicile mecanice sunt, in general, univoce, întrucât alunecarea critică este supraunitară. Panta acestor caracteristici este diferită funcție de tensiunea de alimentare, ceea ce constituie un dezavantaj in raport cu servomotoarele de c.c.

Caracteristicile de reglaj sunt cvasi paralele ceea ce reprezintă un avantaj in acționările industriale.

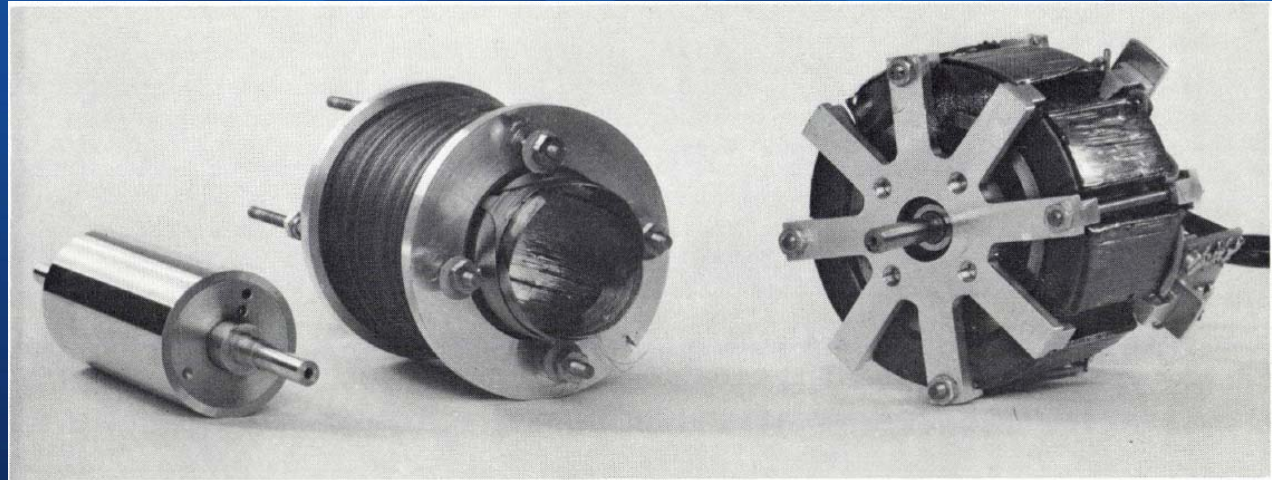


Fig. 1. Two prototypes of high-speed induction motors with a solid iron rotor. The stator coils are not in slots but are situated in the air gap. The motor on the left has thin coils, the one on the right has toroidal coils wound around the stator iron. Both motors were designed for speeds between 36 000 and 40 000 rev/min and a power of about 300 W.

Servomotoare asincrone trifazate cu rotor masiv

- Rotorul este realizat din material feromagnetic compact. NU există creștături, NU există înfășurare rotorică.
- Uneori, rotorul și axul mașinii reprezintă o singură piesă.



Servomotor asincron trifazat cu rotor masiv prevăzut cu creștături

Prezența unor creștături pe periferia exterioară a rotorului determină o mai bună penetrare a acestuia de către câmpul magnetic inductor și creșterea cuplului electromagnetic dezvoltat.

Pentru îmbunătățirea performanțelor se pot plasa inele din material conductor (Cupru de ex.) la capetele laterale ale rotorului (similar inelelor de scurtcircuitare a coliviei de veveriță).

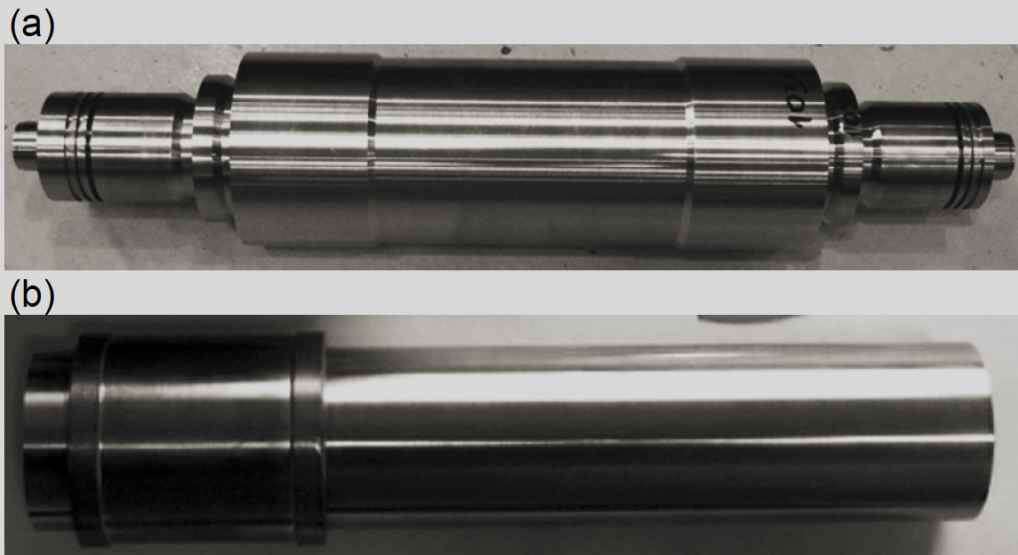


Fig. 4.32. Solid rotors with explosive welded copper sleeves for: (a) 300 kW, 63 krpm IM; (b) 3.5 kW, 120 krpm IM. Photo courtesy of *Sundyne Corporation*, Espoo, Finland.

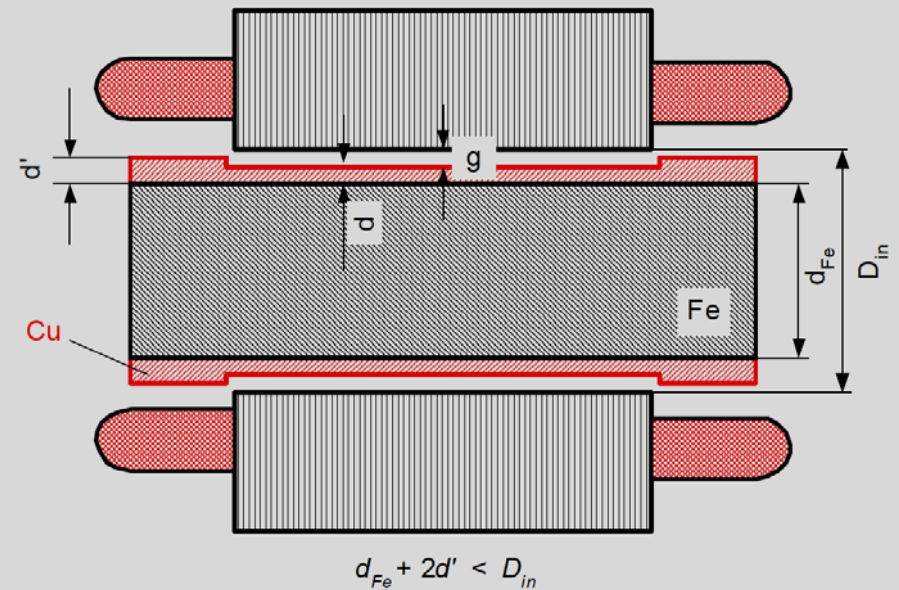


Fig. 4.33. Solid rotor coated with copper layer for high speed induction machines according to U.S. Patent 5473211 [14].

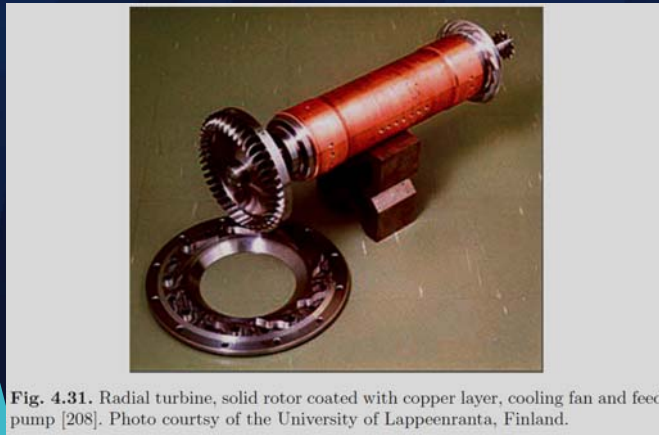
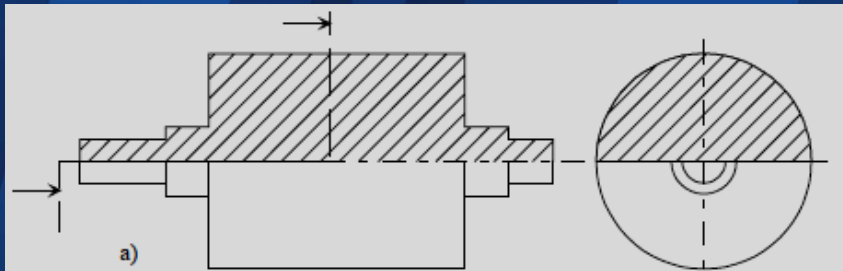


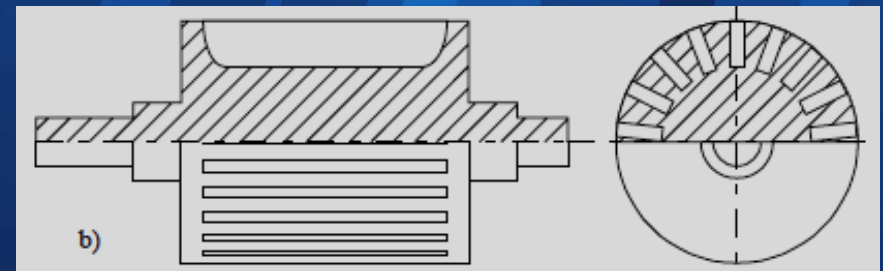
Fig. 4.31. Radial turbine, solid rotor coated with copper layer, cooling fan and feed pump [208]. Photo courtesy of the University of Lappeenranta, Finland.

Varianta constructiva de rotor masiv cu cămașa din folie de Cu.

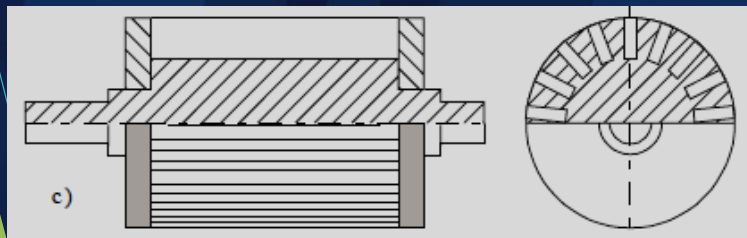
Variante constructive de mașini asincrone cu rotor masiv



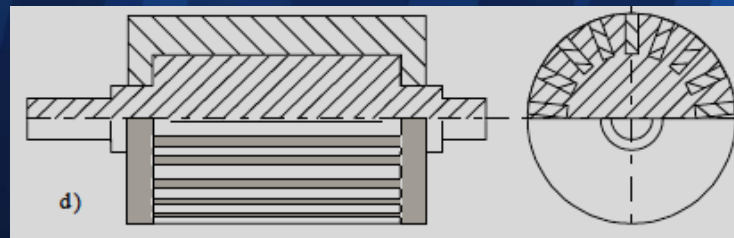
a) Rotor masiv, neted, corp comun cu axul mașinii



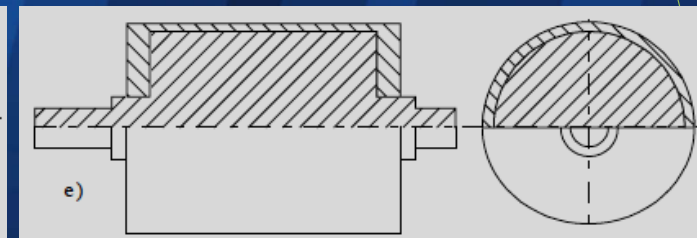
b) Rotor masiv, cu creștături axiale



c) Rotor masiv, cu creștături axiale și inele conductoare neferomagnetice laterale



d) Rotor masiv, cu creștături și înfășurare în scurtcircuit



e) Rotor masiv, neted acoperit cu material conductor (folie de Cu)

Rotorul masiv realizat într-o singură piesă (rotor+ax) are abilități superioare în a face față solicitărilor mecanice și termice la funcționarea la viteze mari.



Materialul rotorului trebuie să realizeze un compromis între:

- Rezistivitatea electrică (cât mai mică);
- Valoarea inducției de saturație (cât mai mare);
- Valoarea permeabilității magnetice relative (peste 1000);
- Valoarea rezistenței mecanice la rupere (cât mai mare).

Pentru creșterea performanțelor mașinii cu rotor masiv este necesară folosirea unor materiale cu rezistivitate electrică cât mai mică și inducție remanentă cât mai mare.

Materiale feromagnetice utilizate la construcția rotoarelor masive

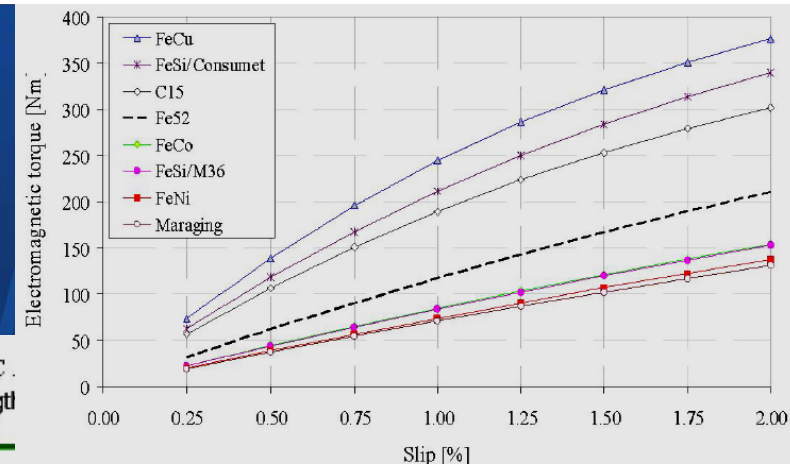
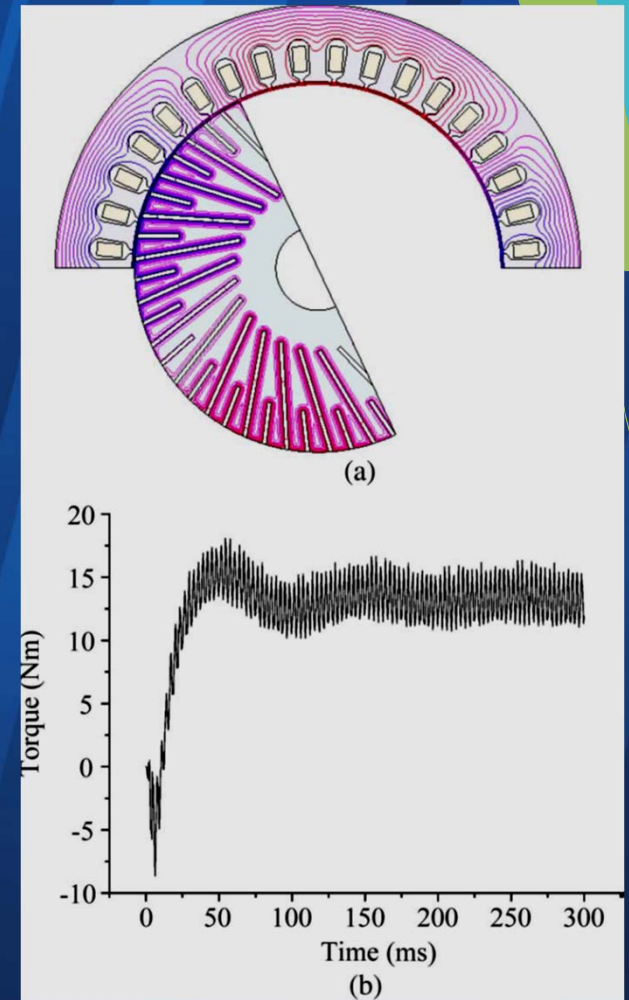
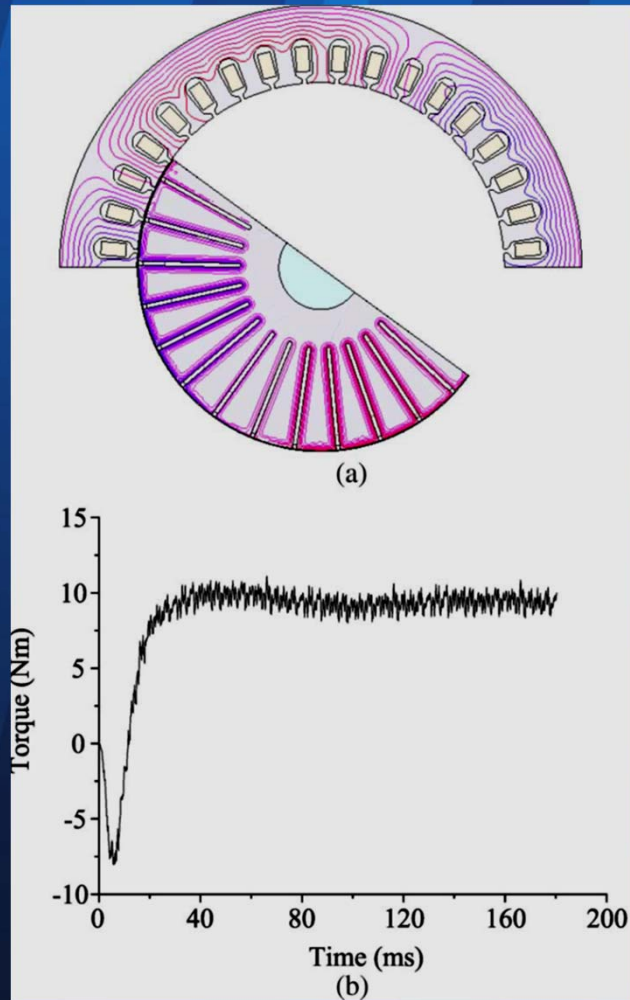
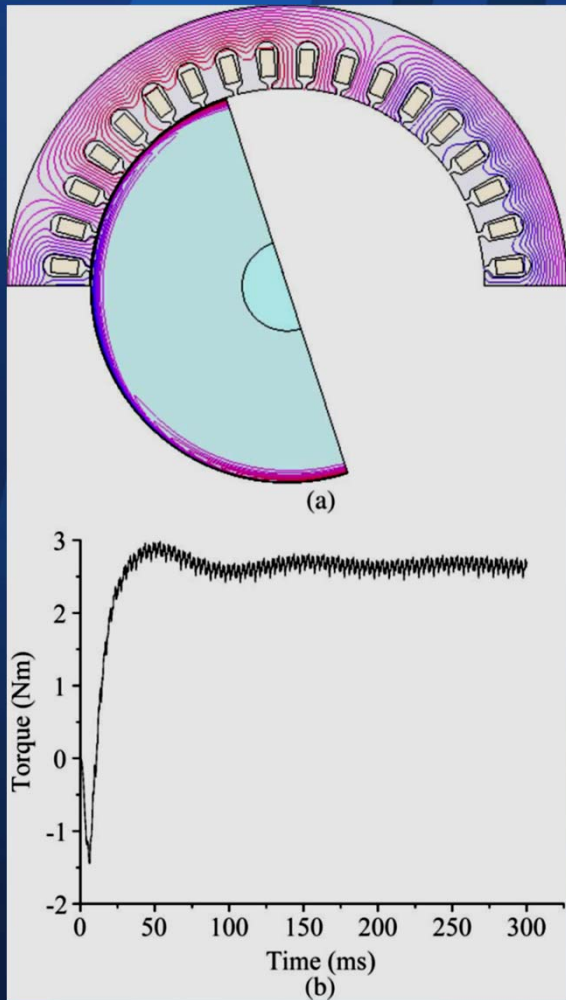


Fig 9. The effect of the solid-rotor material on the generated electro-magnetic torque as a function of slip.

TABLE 1. ELECTROMAGNETIC AND MECHANICAL PARAMETERS OF THE FERROMAGNETIC .

Ferromagnetic alloy	Composition [%]				Resistivity [$\mu\Omega\text{cm}$]	Saturation flux density [T]	Initial Relative permeability	Tensile strength yield [MPa]			
Carbon Steel Fe52	C	0,55	Si	0,2	25,7	1,9	~1000	300			
	Mn	1,6	V	0,09							
			Fe	> 97,5							
Low carbon Steel C15	C	0.12 - 0.18	Fe	99.13 - 99.58	15,9	1,9	~1000	330	440	7,87	MatWeb www.matweb.com
	Mn	0.3 - 0.6									
Maraging Steel Vascomax C250	Al	0,1	Ni	18,5	49,0	1,9	500	1800	~2200	8,00	Measured at LUT
	C	0,03	Si	0,1							
	Co	8,5	Ti	0,2							
	Mo	3,25	Zr	0,01							
			Fe	69							
Fe-Cu Alloy			Cu	5	11,0	1,6	~1000	424	-	7,92	Measured at LUT
			Fe	95							
Fe-Si Alloy Silicon Steel M36	Si	2,2	Mn	0,25	41,0	2,04	1485	300	390	7,75	[6] [7]
	C	0,01	Al	0,3							
			Fe	~97							
Consumet	Si	0,15	Mn	0,15	13,0	2,15	~1000	190	345	7,86	Carpenter www.cartech.com
	C	0,02	V	0,1							
			Fe	99,5							
Fe-Co Alloy Supermendur			V	2	40,0	2,4	800	400	800	8,15	[7] Carpenter www.cartech.com
			Co	49							
			Fe	49							
Fe-Ni Alloy High Permeability Alloy 49	C	0,02	Si	0,35	48,2	1,5	6500	255	545	8,18	Carpenter www.cartech.com
	Mn	0,5	Ni	48							
			Fe	51							



- Prezenta creștăturilor în rotorul masiv determină o creștere semnificativă (de 3,46 ori în acest exemplu) a cuplului electromagnetic al mașinii.
- Inclinarea creștăturilor atât axial cât și longitudinal accentuează creșterea cuplului dar mărește ripplul de cuplu.



- Construcție simplă, cost scăzut;
- Robustețe mare;
- Nivel scăzut de vibrații, stabilitate mecanică mare;
- Cheltuieli de întreținere reduse, întreținere ușoară;
- Curent de pornire mai mic decât la varianta cu înfășurare rotorică (este cu câteva procente mai mare decât curentul nominal) ;
- Cuplu mai mare de pornire.



- Performanțe inferioare mașinii asincrone cu înfășurare rotorică: densitate mică de putere; randament scăzut; factor de putere mic.

Aplicațiile specifice implică funcționarea la viteze mari și foarte mari: pompe de înaltă presiune; sisteme de compresie a gazului la înaltă presiune; filaturi de nailon (100.000 rot/min); ultra-centrifuge pentru îmbogățirea uraniului (60.000 rot/min); mașini pentru prelucrarea diamantelor (80.000 rot/min).

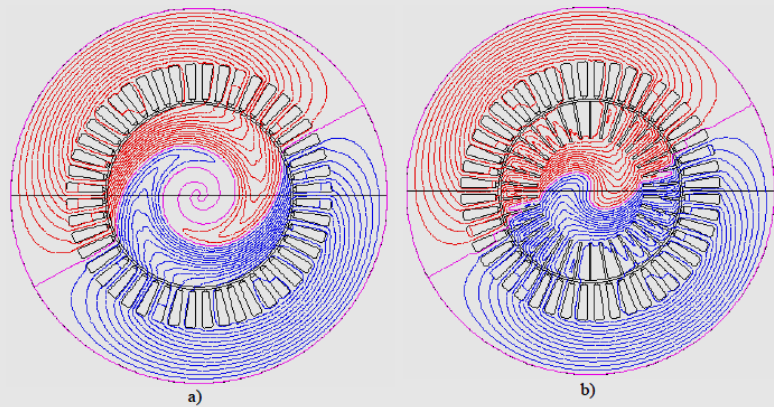


Fig. 4.13. Flux lines of a) a smooth solid-rotor and b) a slitted solid-rotor induction motor at 1.5% slip.

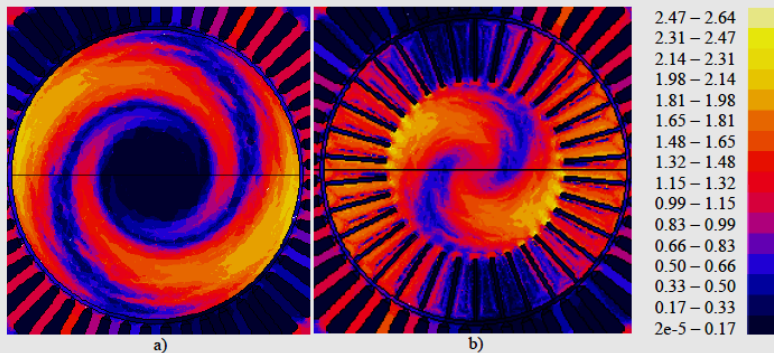


Fig. 4.14. Flux density distribution of a) a smooth solid-rotor and b) a slitted solid-rotor induction motor at 1.5% slip.

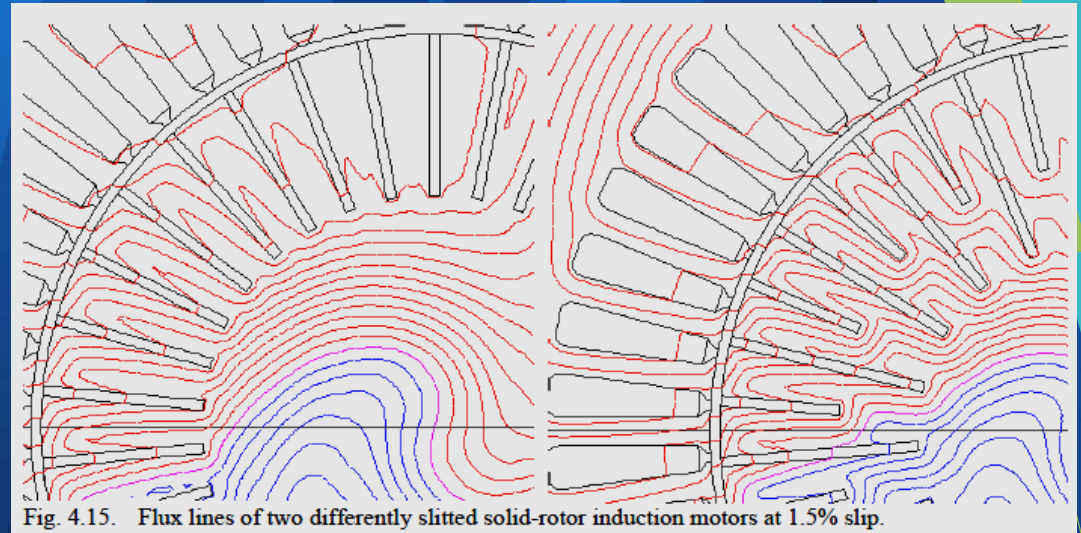


Fig. 4.15. Flux lines of two differently slitted solid-rotor induction motors at 1.5% slip.

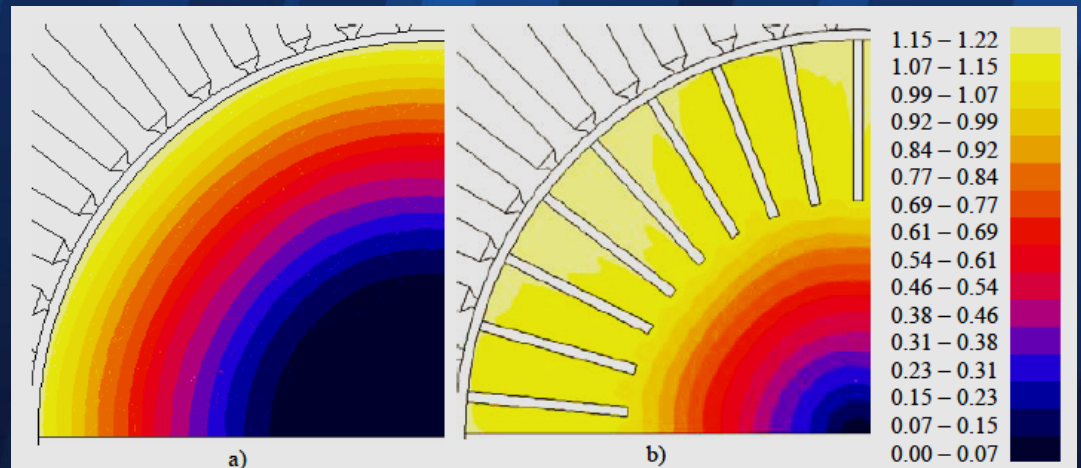


Fig. 4.16. Current density distributions [A/mm²] of a) a smooth solid rotor and b) a slitted solid-rotor induction motor at 1.5% slip. The time-harmonic solution is used and thus the rotor surface harmonic current densities are not present. Please compare the result with the result of Fig. 3.16.

Rezultate obținute prin simulare folosind metoda elementului finit.

CUVINTE CHEIE

**Curenți
turbionari**

**Adâncime de
pătrundere**

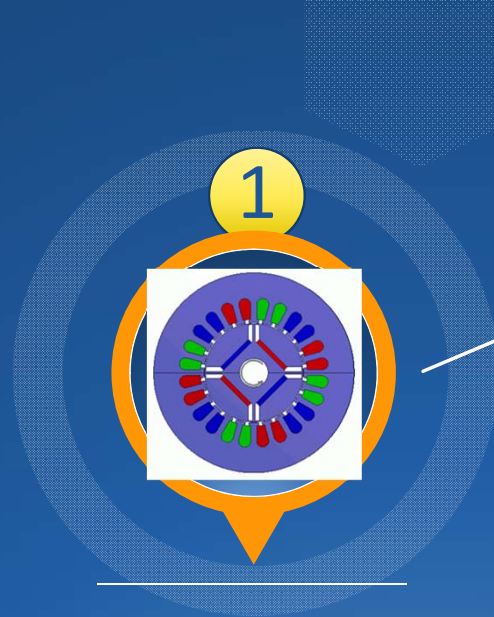
**Întrefier
neted**

CURS 6

Servomotoare cu magneti permanenti
sincrone tip AC



Cuprins



**Motoare cu
magneți
permanenți**



**Structuri
Halbach**



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.

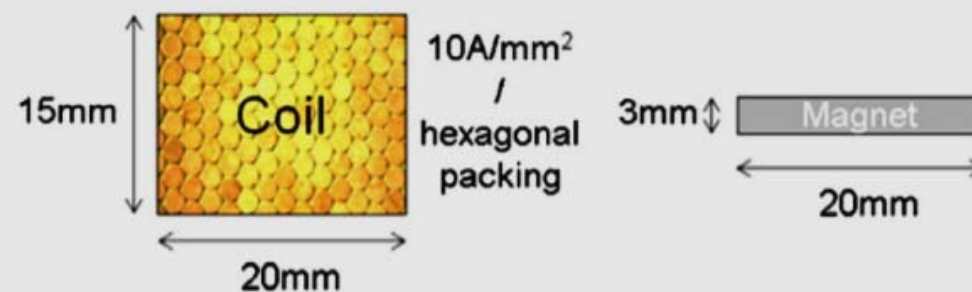


Fig. 4. A simple comparison between the area of electromagnet coil and NdFeB magnet required to produce the same magnetic field.

Clasificare generală



PMSM

Motoare sincrone cu magneți
permanenți
**Permanent Magnet Synchronous
Motors**

A

BLDC

Motoare cu magneți permanenți și
comutație electronică
Brushless DC Motors

B



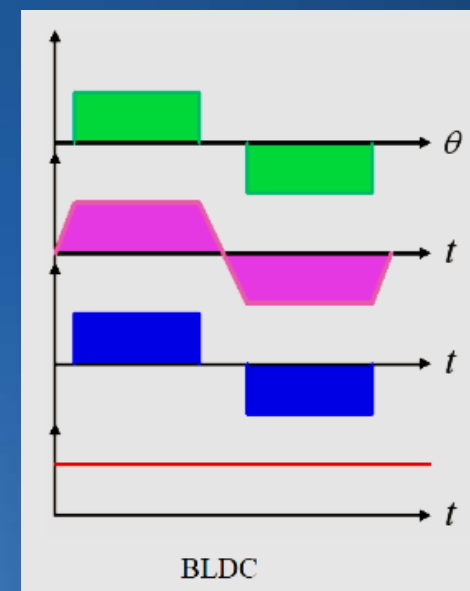
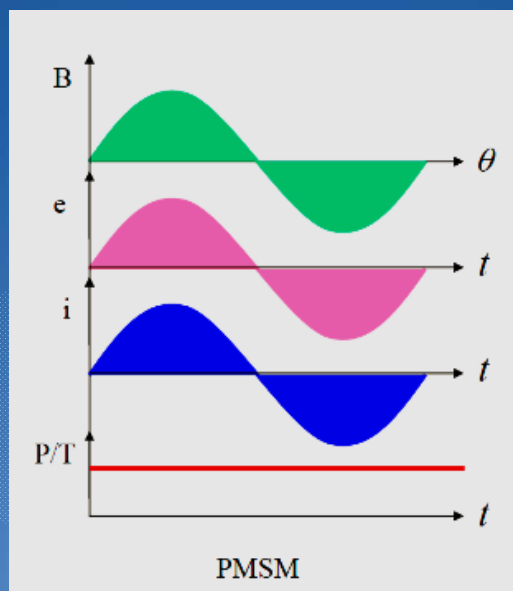
Caracteristici generale

!	PMSM	BLDC
Curba inducției în întrefier	Distribuție sinusoidală	Distribuție rectangulară
Tensiunea indusă – back EMF	Undă sinusoidală	Undă trapezoidală
Curentul statoric	Undă sinusoidală	Undă rectangulară

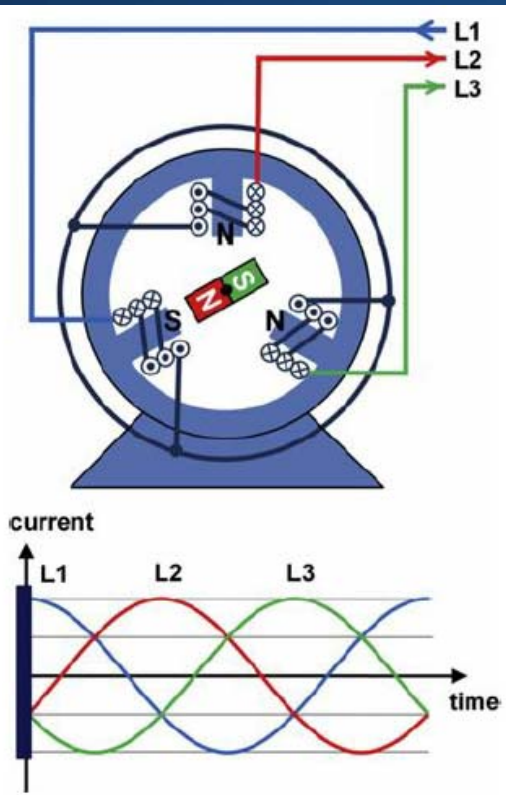
Depind de construcția mașinii



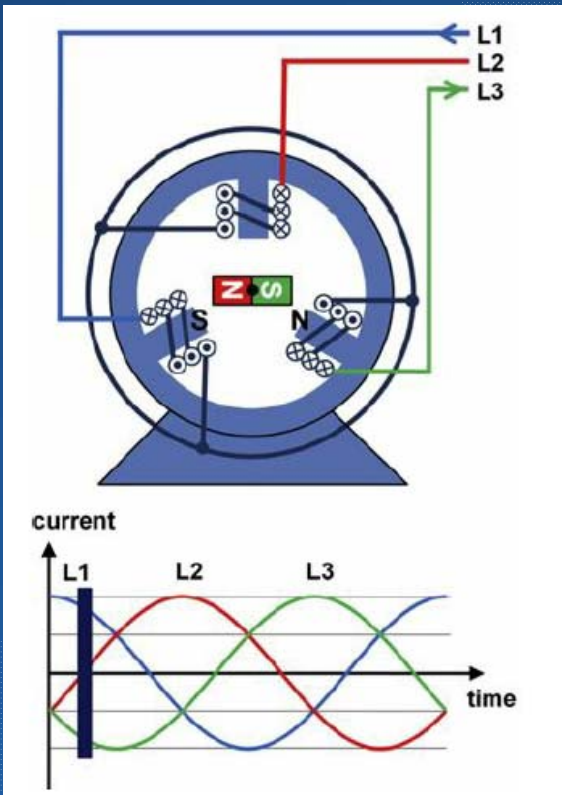
Depind de sistemul de alimentare



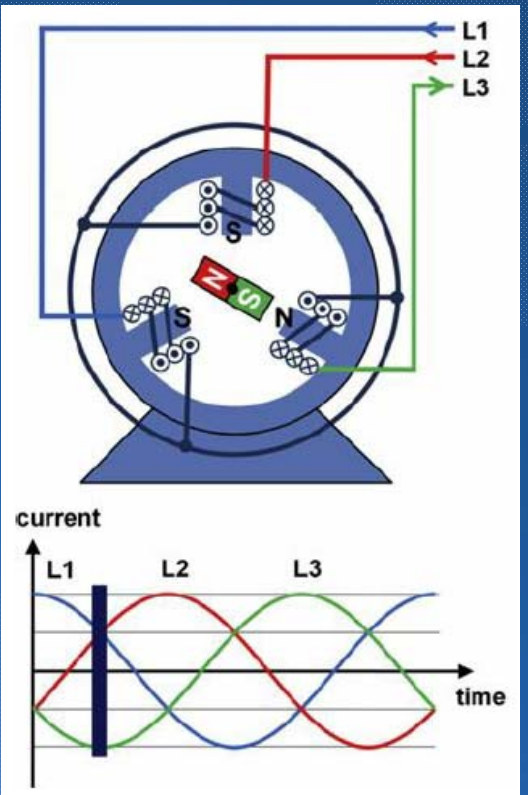
Principiu de funcționare



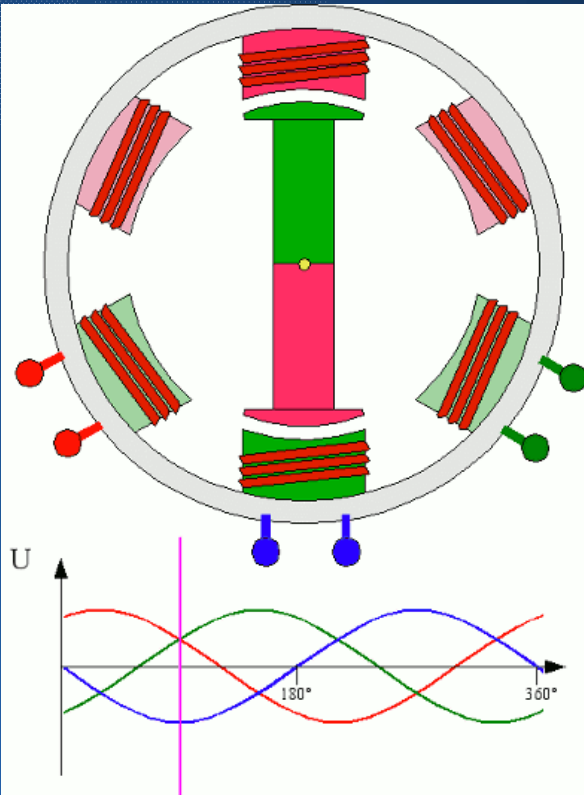
a) $\omega t = 0$



b) $\omega t = 30^\circ$



c) $\omega t = 60^\circ$



d)

Explicații



Motorul sincron cu magneți permanenți se alimentează de la un sistem sinusoidal de tensiuni. In figurile din slide-ul anterior, deși pe stator apar poli aparenti și înfășurări de tip concentrat, in realitate statorul este uniform crestas și are o înfășurare de tip repartizat. Cei trei poli aparenti statorici din figură subliniază doar caracterul trifazat al statorului.

In figura a), curenții sistemului trifazat au următoarele valori: maxim pozitiv in faza L1 respectiv valoare medie negativă prin fazele L2 și L3. Se formează doi poli statorici ce duce la orientarea rotorului pe poziția indicată in figură.

In figura b), curentul prin faza L2 este nul, iar prin fazele L1 și L3 curenții sunt egali și de semn contrar. Polii statorici creați in această situație determină rotirea rotorului într-o poziție de echilibru (fazele L1 și L3 atrag in mod egal polii magnetici rotorici).

In figura c), curentul prin faza L3 devine maxim negativ, iar prin fazele L1 și L2 curenții sunt egali, pozitivi și de valoare medie. Rotorul se rotește pentru a ocupa noua poziție de echilibru.

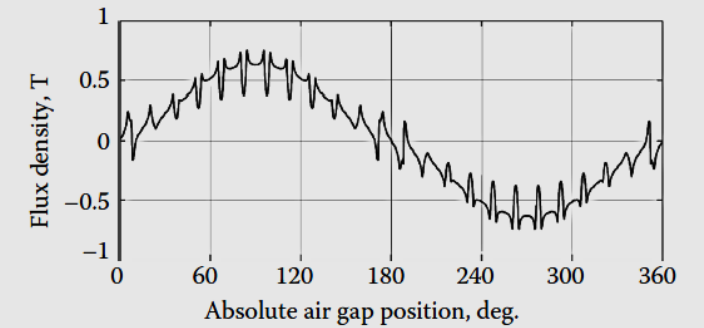
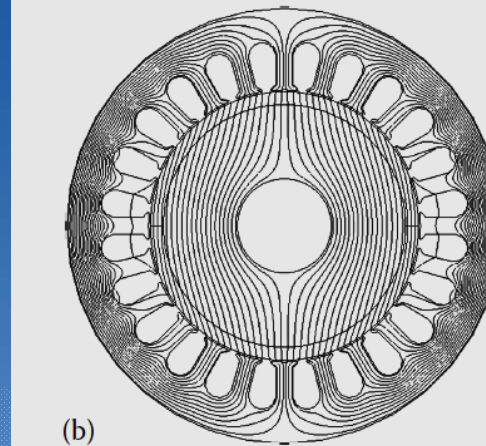
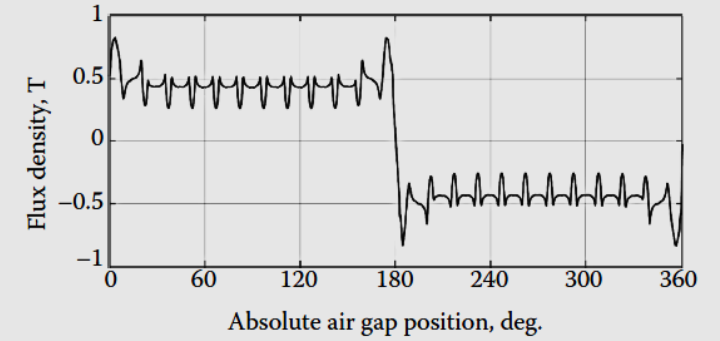
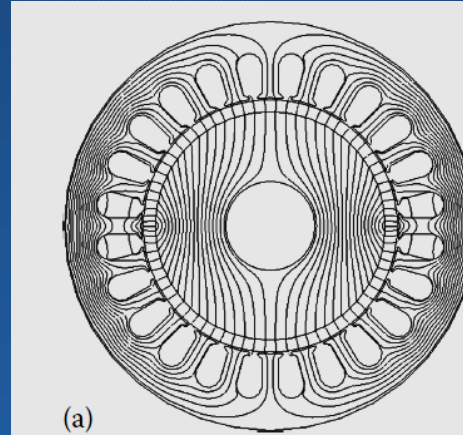
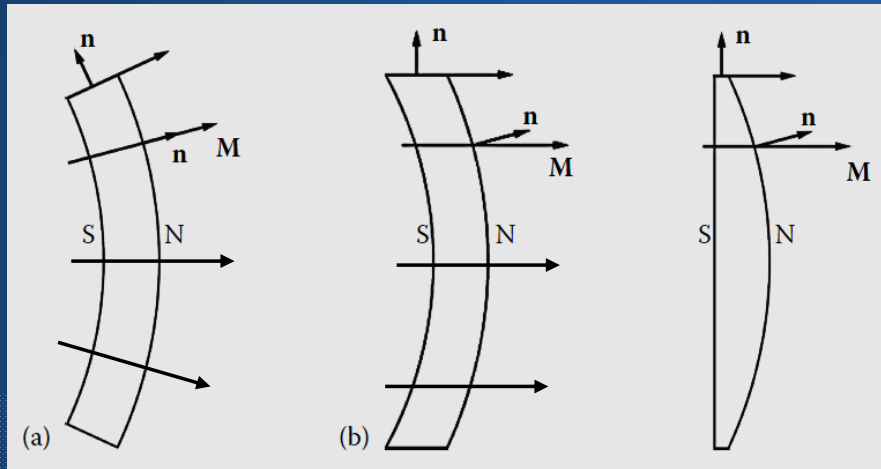
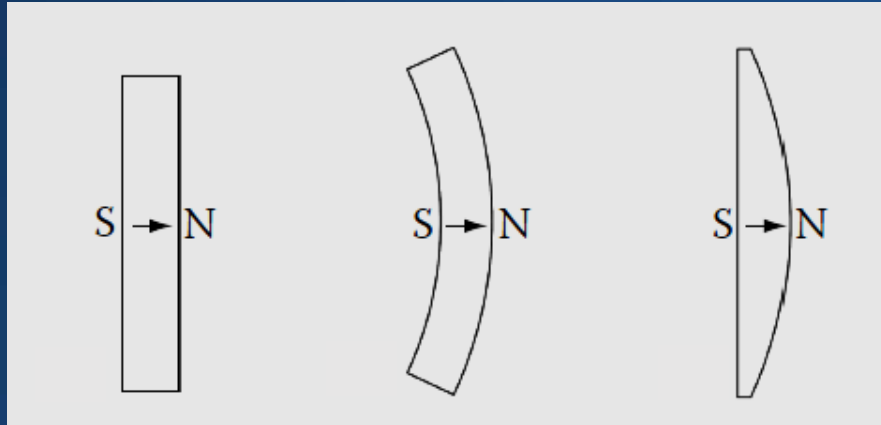
Mișcarea rotorului și alinierea polilor rotorici cu cei statorici reprezintă rotirea sincronă a celor două câmpuri magnetice (statoric si rotoric) ce caracterizează orice mașină electrică sincronă.



Deși structurile cu poli aparenti au APARENT număr de poli diferit pe stator și rotor, motoarele cu magneți permanenți tip AC au ÎNTOTDEAUNA același număr de poli magnetici pe rotor (poli din magneți permanenți) respectiv stator (poli electromagnetici). Funcționarea respectă principiul cuplării polilor de polaritate opusă de pe cele două armături și a rotirii lor sincrone. Cuplul dezvoltat este cuplul de atracție mutuală.



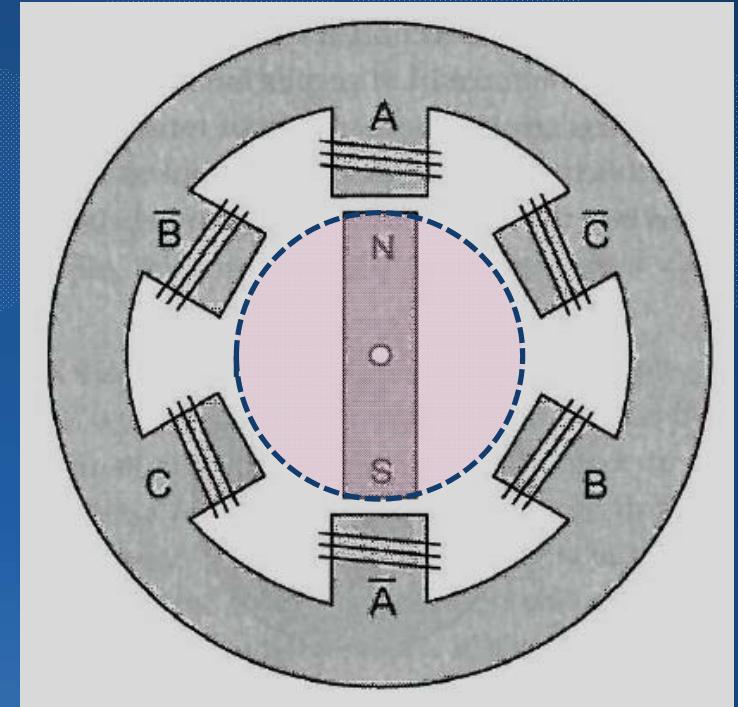
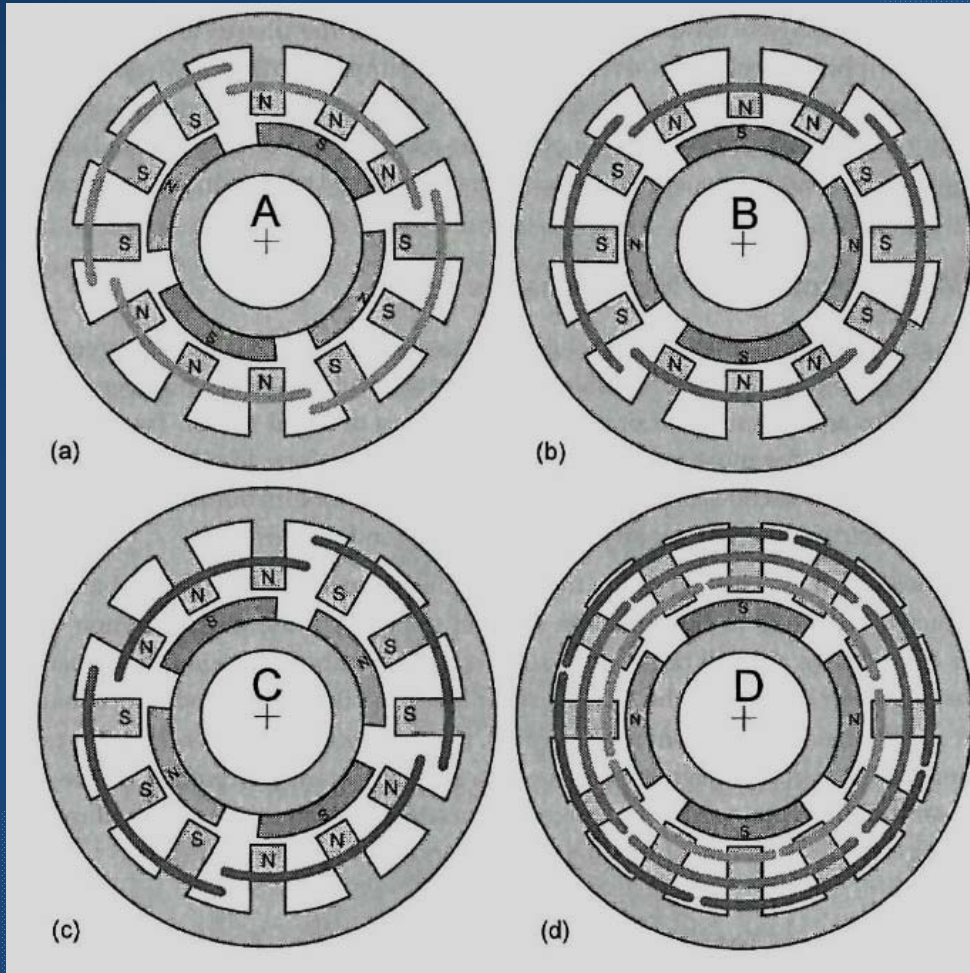
Tipuri de magnetizare a magneților permanenți



a) Magnetizare de tip radial (produce un câmp magnetic trapezoidal în întrefier – caracteristic BLDC);

b) Magnetizare de tip paralel (produce un câmp magnetic sinusoidal în întrefier – caracteristic PMSM).

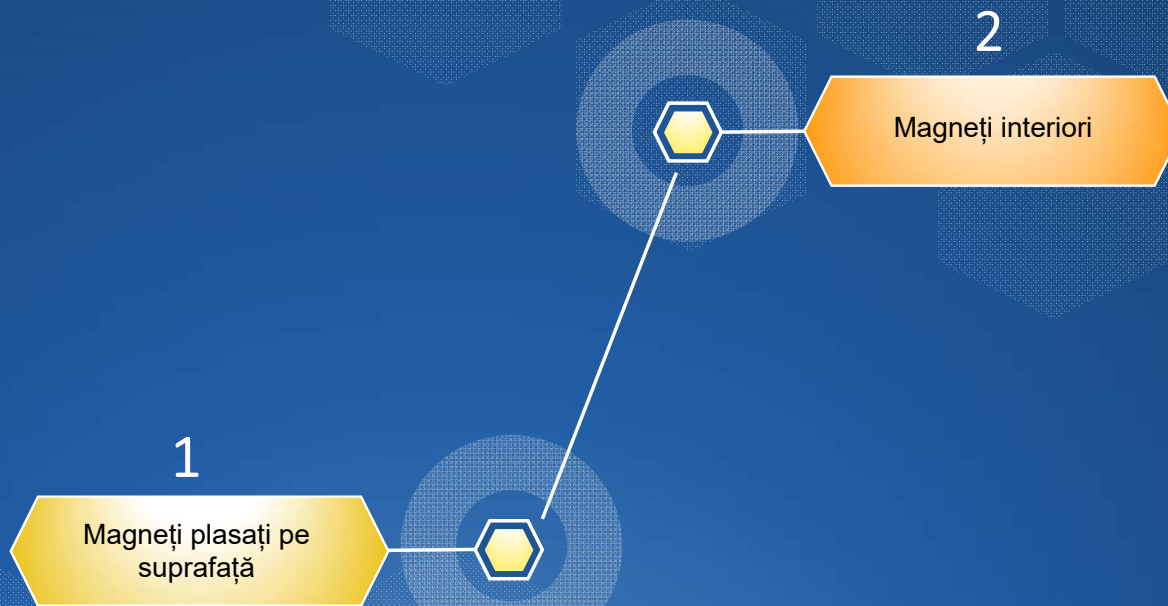
Variante structurale



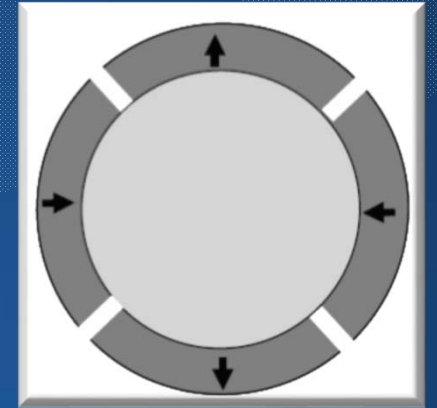
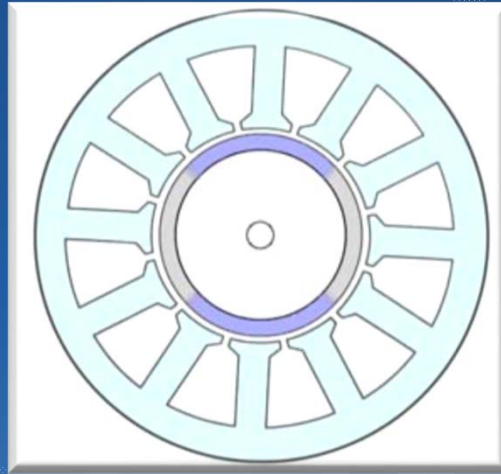
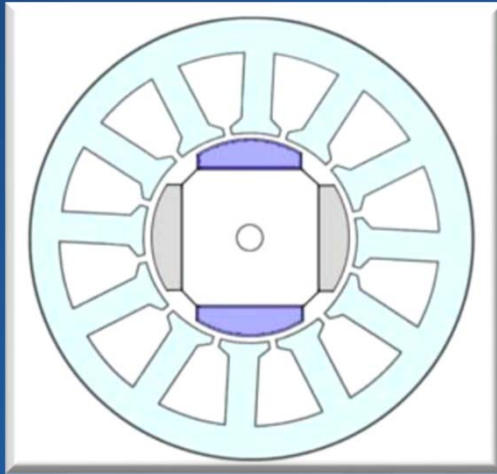
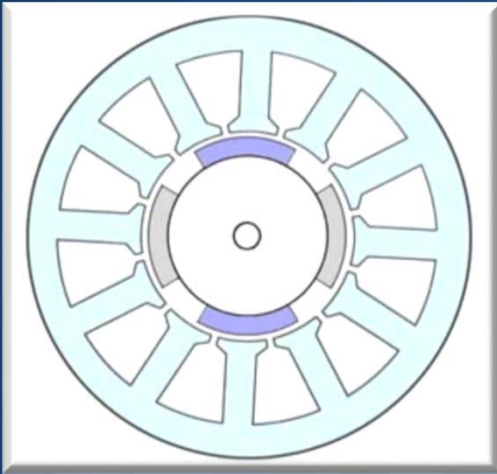
Stator cu poli aparenti si infasurari de tip concentrat alimentate de la sistem trifazat sinusoidal; rotor cu anizotropie de forma.

Stator cu dinți si crestături uniforme distribuite si infasurare de tip repartizat; rotor cilindric cu poli magnetici plasați pe suprafață.

Structuri rotorice

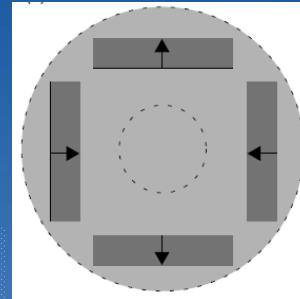
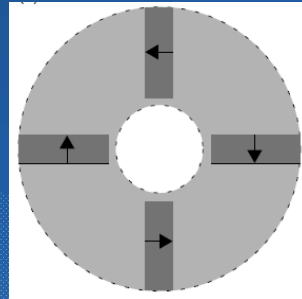
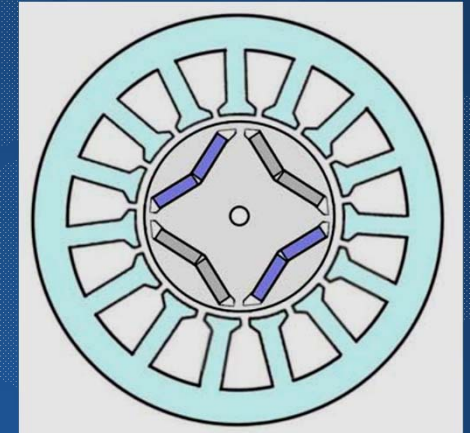
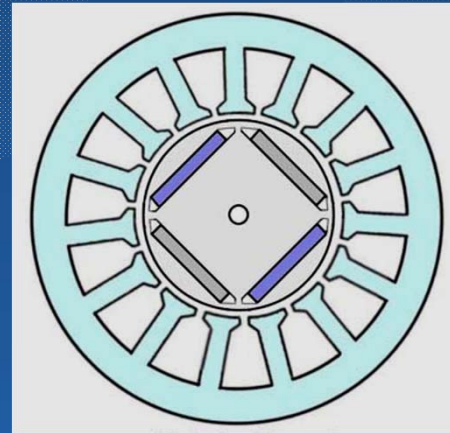
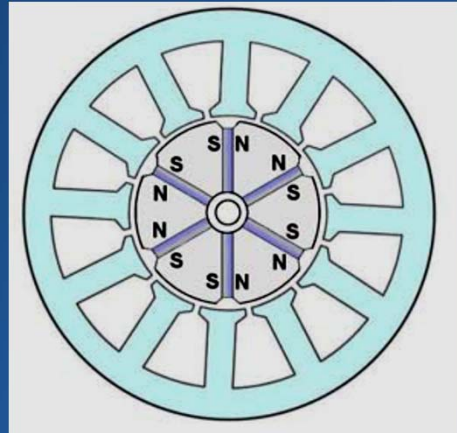
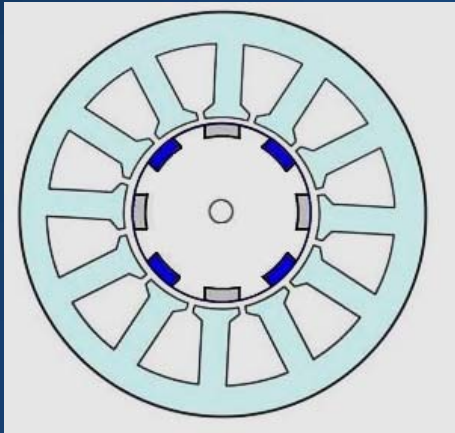


1  Magneți plasați pe suprafață



Majoritatea mașinilor cu magneți permanenți au magneții plasați pe suprafața rotorului („surface mounted PMs”).

De regulă, magneții sunt pe baza de pământuri rare (NdFeB) întrucât, datorită câmpului coercitiv de valoare mare, nu sunt atât de sensibili la demagnetizare datorită reacției indusului.



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).

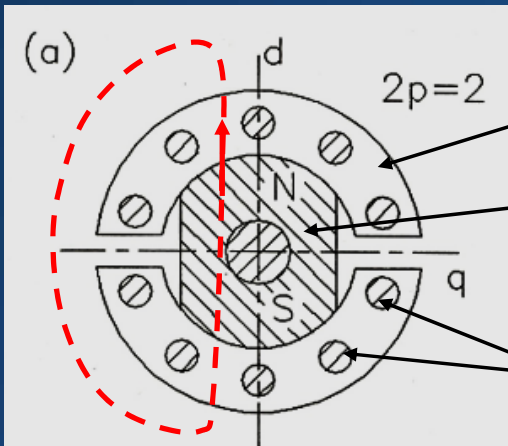


STRUCTURI ROTORICE



MP





Inel rotoric feromagnetic

Magnet permanent tip Alnico

Bare din Al (înfășurare de pornire/amortizare)

Rotorul lui Merrill

- Inelele feromagnetice rotorice protejează magnetul permanent împotriva demagnetizării datorita câmpului de reacție statoric.
- Lățimea istmurilor inelelor feromagnetice determina mărimea fluxului de dispersie.

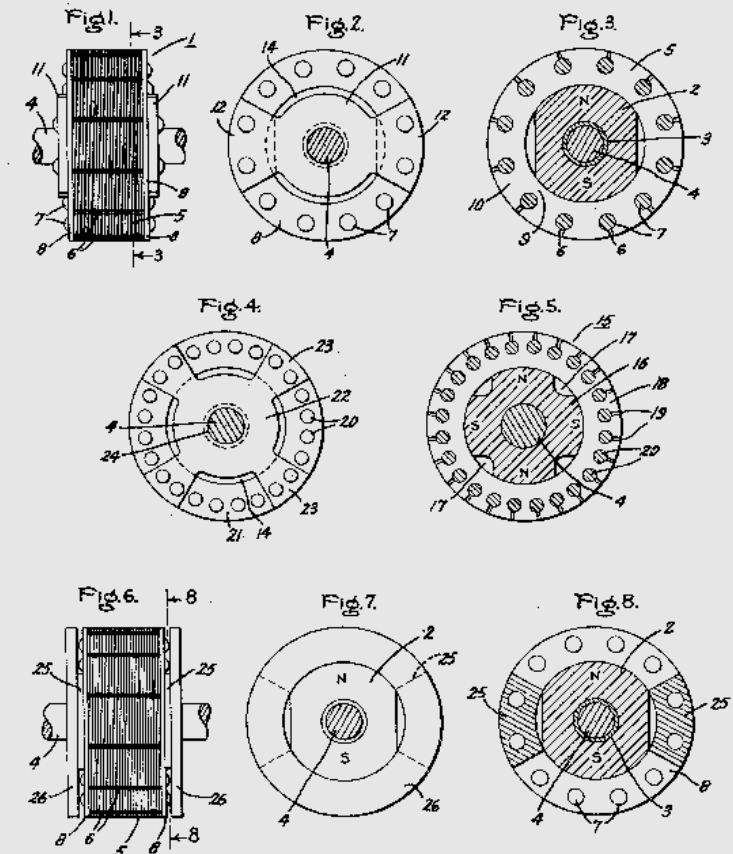
Feb. 27, 1951

F. W. MERRILL

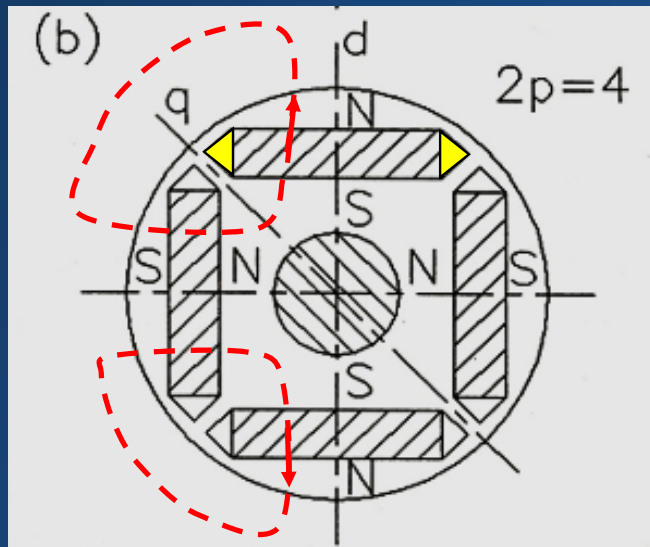
2,543,639

ROTOR FOR SYNCHRONOUS INDUCTION MOTORS

Filed Oct. 29, 1949



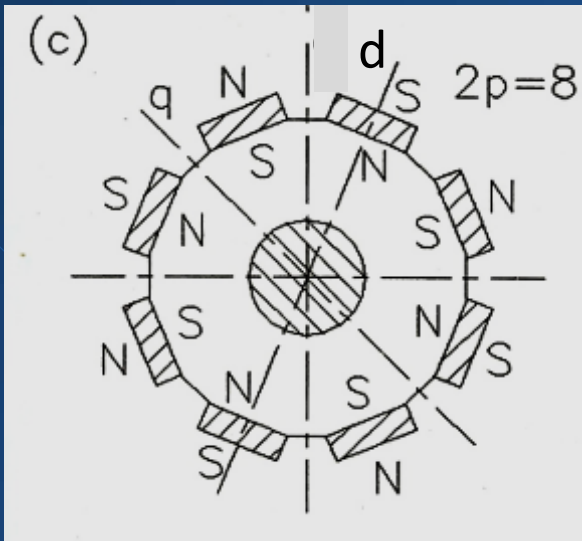
Inventor:
Frank W. Merrill,
by Ernest C. Britton
His Attorney.



Magneți permanenți interiori („interior permanent magnet motor”, IPM)

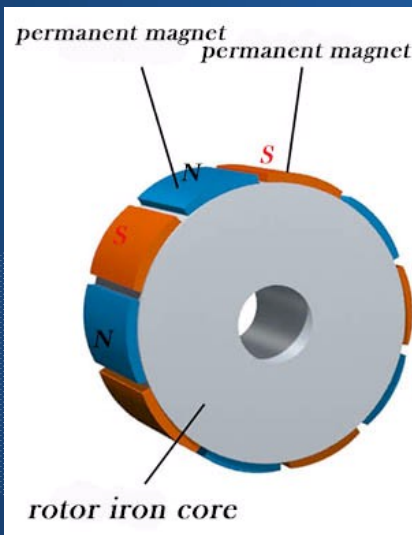
- Magneții permanenți sunt magnetizați radial.
- Întrucât aria suprafeței polului magnetului permanent este mai mică decât aria polului magnetic rotoric, inducția în întrefier este mai mică decât inducția la suprafața magnetului permanent.
- Zona galbenă este o zonă neferomagnetică ce împiedică închiderea liniilor de câmp direct între magneții rotorici.
- Reactanța sincronă longitudinală, X_d , este mai mică decât reactanța sincronă transversală, X_q .
- Magnetul permanent este foarte bine protejat împotriva forței centrifuge.
- Această structură este recomandată pentru viteze mari.

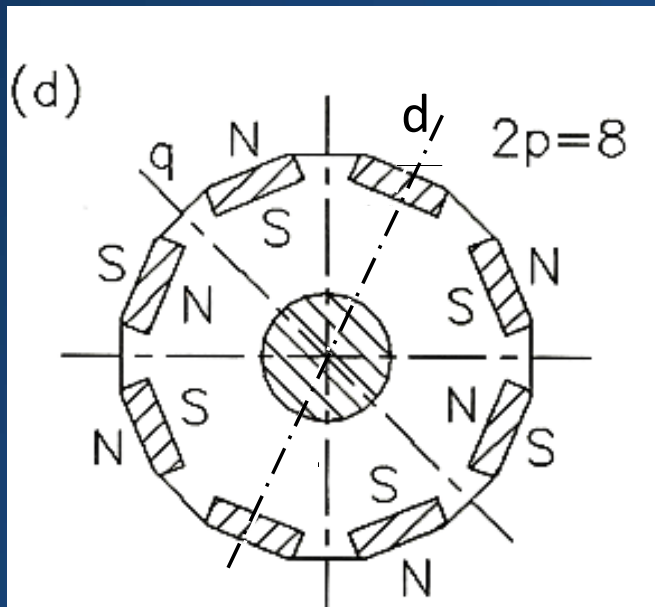




Magneți permanenți pe suprafață („surface permanent magnet motor”)

- Magneții permanenți sunt magnetizați radial.
- Întrefierul este mai mare și este dat de suma grosimii magnetului permanent și a întrefierului propriu-zis.
- Adeseori structura rotorică este introdusă într-un cilindru de material conductor, neferomagnetic (aliaj de Al, de ex.). În acest fel magneții sunt protejați împotriva forțelor centrifuge dar și a demagnetizării datorită fluxului de reacție. Totodată, cilindrul oferă un cuplu de pornire în asincron (se induc curenți turbionari ca la rotorul pahar al SAB) respectiv joacă rol de amortizare a oscilațiilor specifice mașinii sincrone.
- Dacă se folosesc magneți de tip NdFeB, reactanța sincronă longitudinală, X_d , este practic egală cu reactanța sincronă transversală, X_q . Cuplul de reluctanță este nesemnificativ.

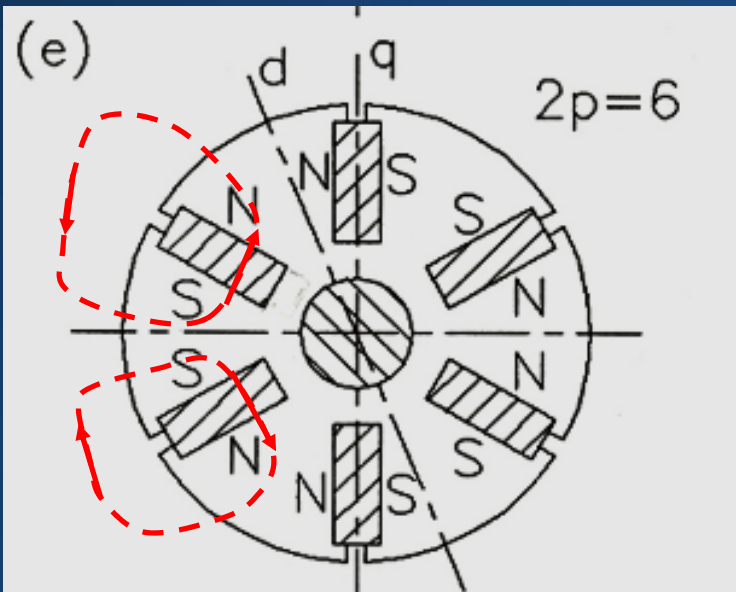




Magneți permanenți interiori („inset permanent magnet motor”)

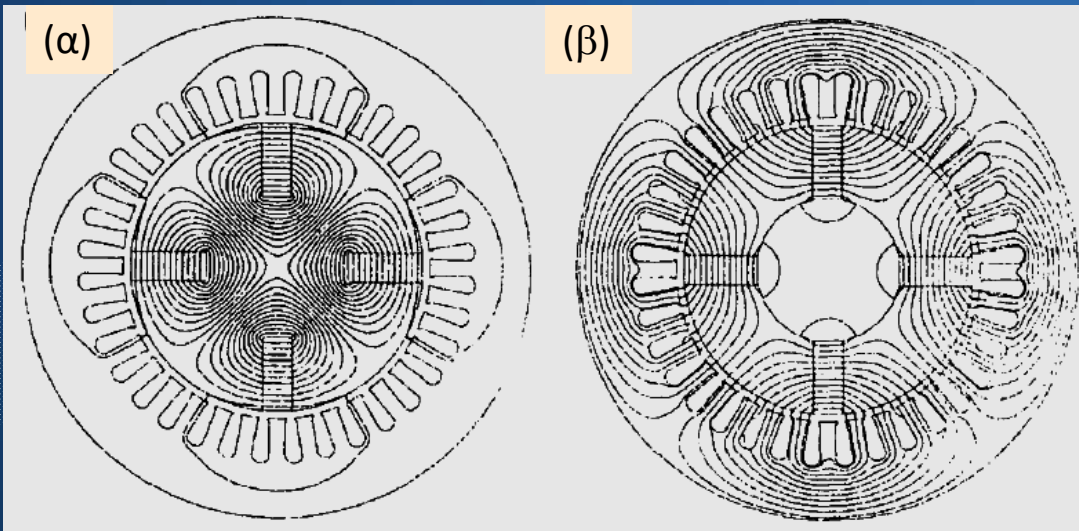
- Magneții permanenți sunt magnetizați radial și introduși în creștături la suprafața rotorului.
- Reactanța sincronă longitudinală, X_d , este mai mică decât reactanța sincronă transversală, X_q .
- Tensiunea indusă în înfășurarea statorică (back EMF) este mai mică decât în cazul echivalent al magneților pe suprafață.





Magneți permanenți îngropați („buried permanent magnet motor”)

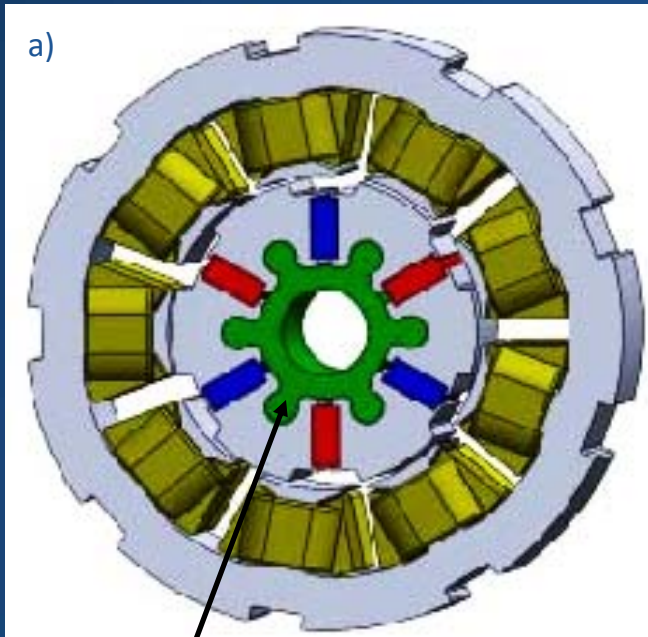
- Magneții permanenți sunt magnetizați circumferențial și introduși în creștături adânci.
- Axul mașinii TREBUIE să fie neferomagnetic.
- Zona rotorică între ax și magneții permanenți trebuie proiectată cu atenție.
- Magnetul permanent este foarte bine protejat împotriva forței centrifuge.
- Întrucât suprafața magneților permanenți este mai mare decât suprafața polului rotoric, are loc o „concentrare” a liniilor de câmp iar inducția în întrefier este mai mare decât inducția remanentă a fiecărui magnet în parte.



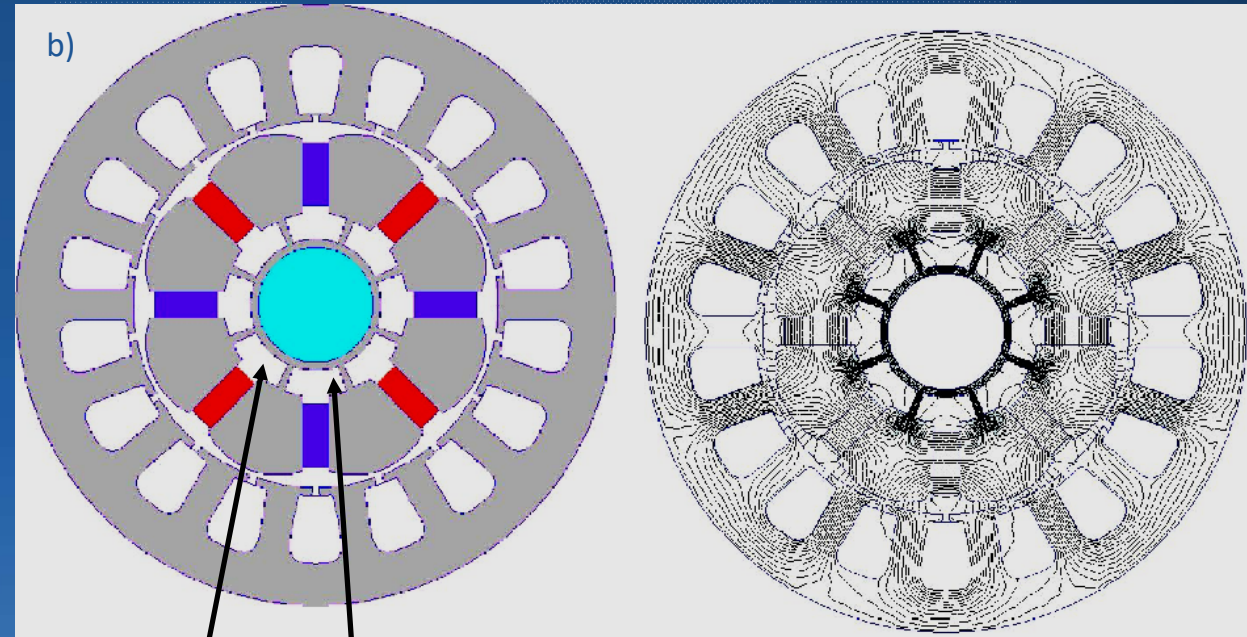
(α) – Întrucât axul mașinii este realizat din material feromagnetic, liniile câmpului magnetic se închid preponderent prin ax și nu prin stator.

(β) - Axul neferomagnetic obligă liniile de câmp să se închidă în mod corect prin stator.

Soluții constructive pentru variantele de rotoare cu magneți permanenți magnetizați circumferențial (spoke PMs structure)



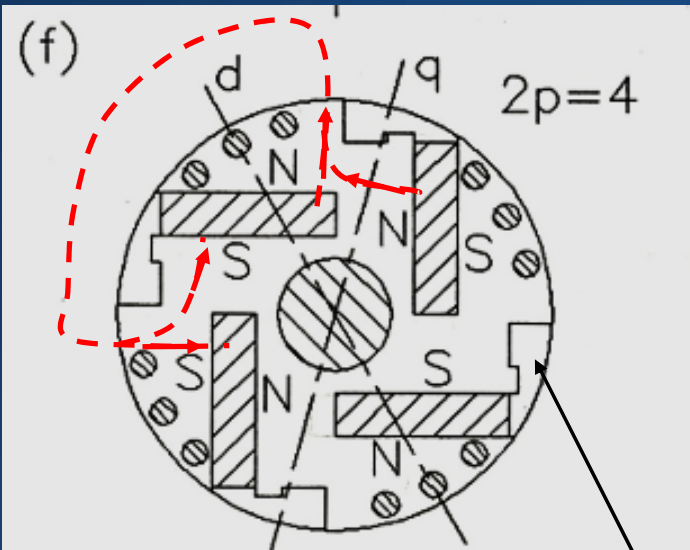
Bucșă neferomagnetică



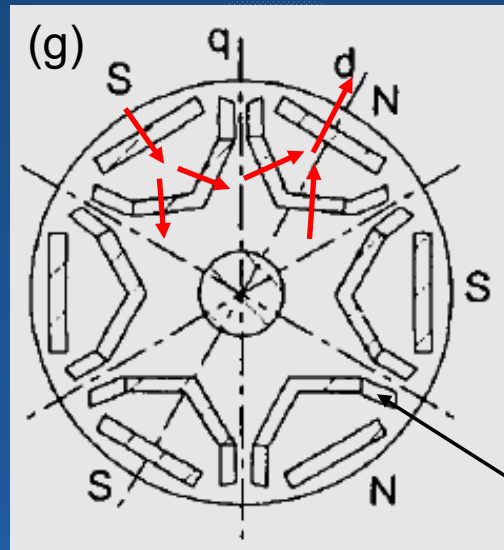
Zone neferomagnetice
(de ex. aer)

În figura a) se plasează o bucșă neferomagnetică pe axul mașinii astfel încât, traseul liniilor de câmp să fie blocat în acea zonă.

În figura b) se elimină o parte din jugul feromagnetic rotoric. Rămân doar porțiuni înguste care, deși reprezintă trasee viabile de închidere a liniilor de câmp, datorită secțiunii lor reduse, se saturează rapid, iar majoritatea liniilor de câmp se închid prin stator.



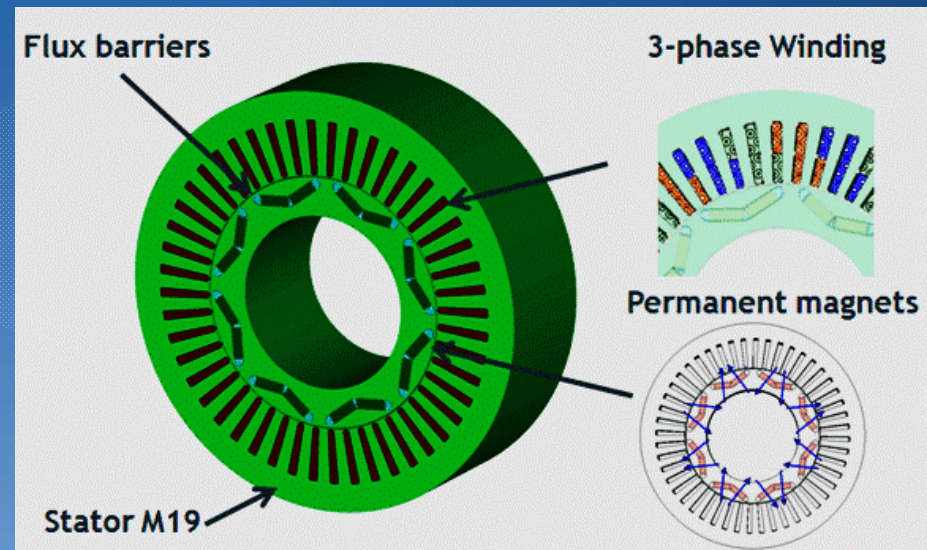
material neferomagnetic








aer sau material neferomagnetic

f – structură asimetrică

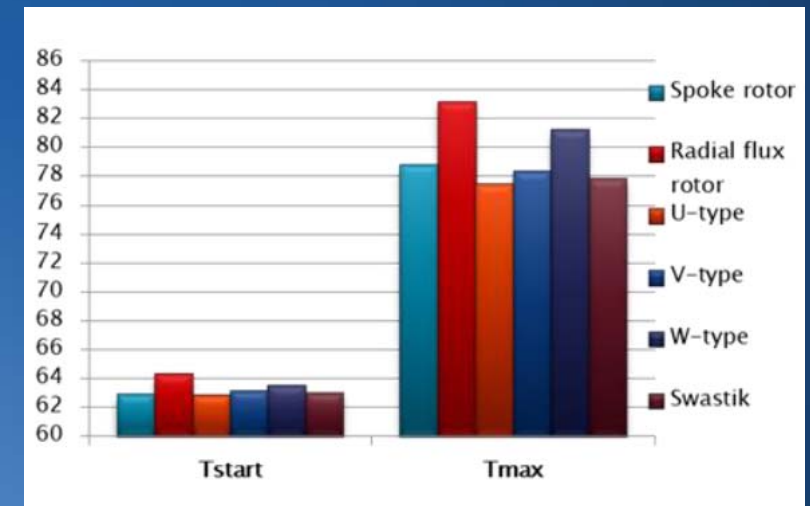
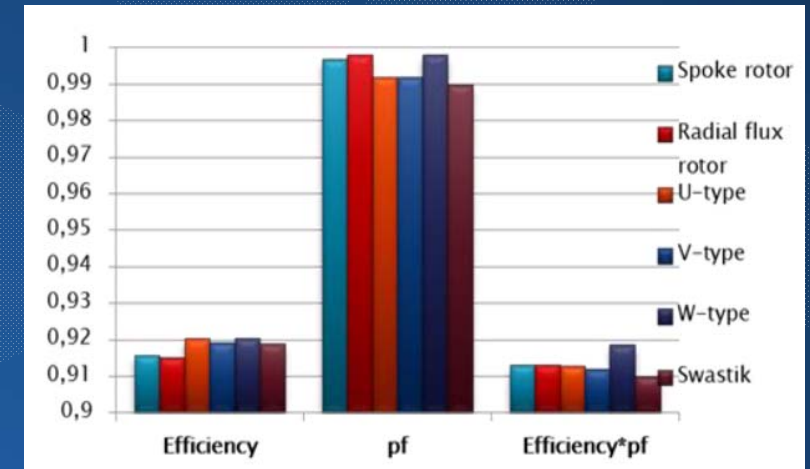
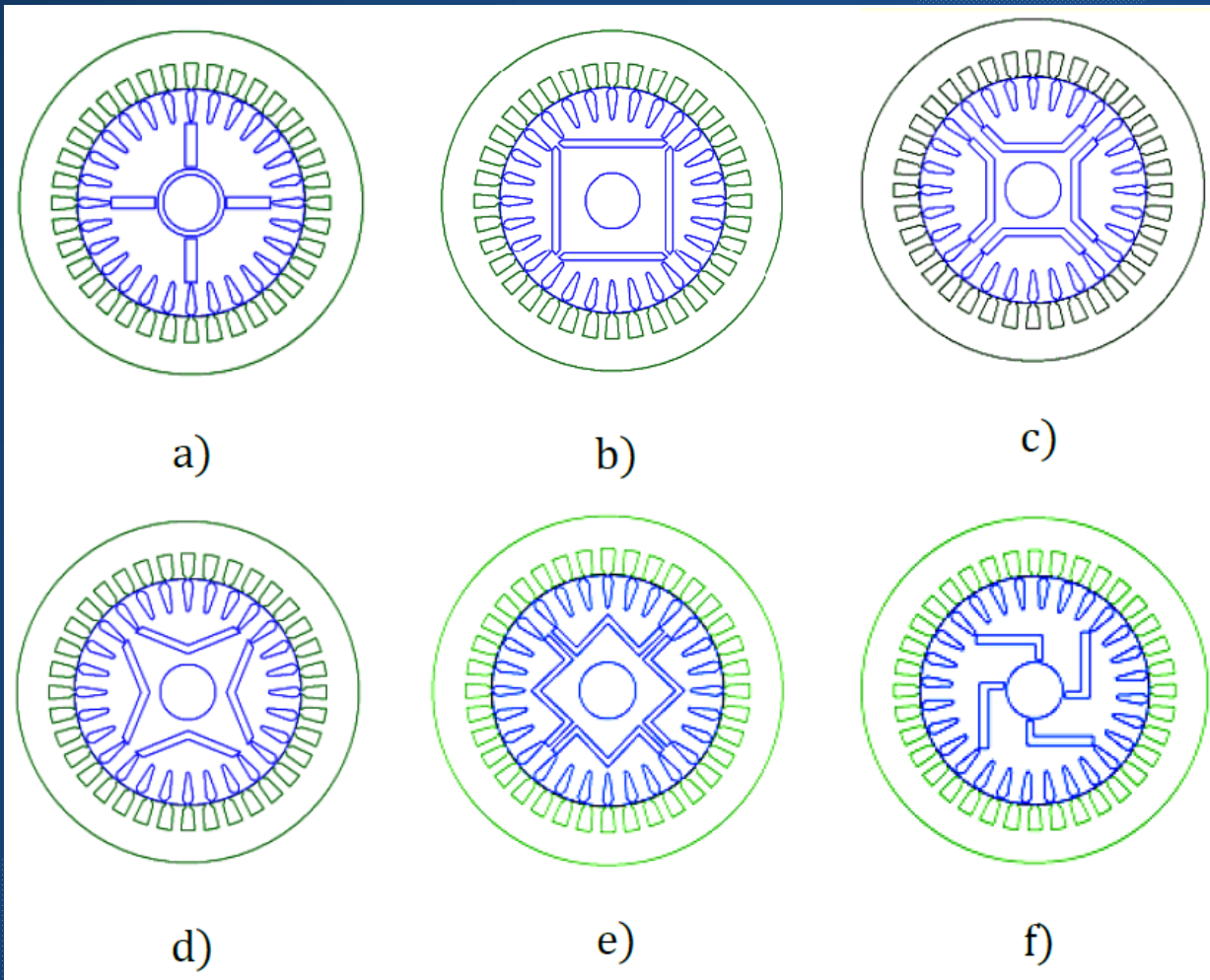
g - structură cu două rânduri de magneți permanenți





Magneți pe suprafață	Magneți interiori
Inducția în întrefier este mai mică decât valoarea B_r	Inducția în întrefier poate fi mai mare decât valoarea B_r (mai ales la rotoarele cu mai mult de 4 poli) 
Construcție simplă a rotorului 	Construcție relativ complicată (adeseori axul este neferomagnetic)
Magneții permanenți <u>nu sunt</u> protejați împotriva fluxului de reacție	Magneții permanenți <u>sunt</u> protejați împotriva fluxului de reacție 
Pierderi prin curenți turbionari în magneții permanenți	Fără pierderi prin curenți turbionari în magneții permanenți 
Înfășurare de pornire/amortizare scumpă	Înfășurare de pornire/amortizare mai ieftină sau lipsind complet 

Studiu comparativ asupra performanțelor structurilor rotorice cu magneți permanenți interiori



(a) Spoke rotor, (b) Radial flux magnetic circuit structure, (c) U-type magnetic circuit structure, (d) V-type magnetic circuit structure, (e) W-type magnetic circuit structure, (f) Swastika magnetic circuit structure



Geometria rotorului joacă un rol important in stabilirea performanțelor mașinii.

Motoarele cu magneți pe suprafață au un diametru al rotorului mai mic, cu inerție mai mică și performante dinamice superioare.

La motoarele cu magneți permanenți interiori, reactanța sincronă transversală este mai mare decât reactanța sincronă longitudinală (reluctanța magnetică pe axa d este mai mare decât reluctanța magnetică pe axa q), situație inversă față de cazul mașinii sincrone cu excitație electromagnetică.

$$X_q > X_d$$

Motoarele cu magneți permanenți interiori au robustețe mecanică mai mare, întrefier mai mic și sunt, de regulă, utilizate in aplicații ce funcționează la putere constantă.



Alegerea numărului de poli și a numărului de faze

Motoarele cu magneți permanenți pot avea orice număr PAR de poli și orice număr de faze mai mare sau egal cu unu.

Mașinile cu doua și trei faze sunt cele mai uzuale, cele trifazate fiind dominante. Motivul constă în numărul minim de dispozitive semiconductoare necesar controlului acestor mașini.

Alegerea numărului de poli este mult mai flexibilă. Aceste motoare se construiesc cu numere de poli de până la 50 sau chiar mai mult. Uzual, numărul de poli este până în 10. Cu cât numărul de poli este mai mare cu atât cuplul dezvoltat la același curent este mai mare.

Creșterea numărului de poli duce însă la diminuarea dimensiunilor polilor magnetici. Numărul optim de poli este o funcție complexă ce ia în calcul geometria circuitului magnetic și proprietățile de material.

Cuplul electromagnetic la mașina cu magneți permanenți

$$M_e = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1}{d\theta} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_2}{d\theta} + i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{d\theta}$$

Expresia generală a cuplului electromagnetic produs într-o mașină generalizată având înfășurări parcurse de curent pe ambele armaturi

$$M_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} + \frac{1}{2} \phi^2 \frac{d\mathcal{R}}{d\theta} + Ni \frac{d\phi}{d\theta}$$

Expresia cuplului electromagnetic produs într-o mașină având înfășurări parcurse de curent pe o armatură și magneți permanenți pe cealaltă armatură

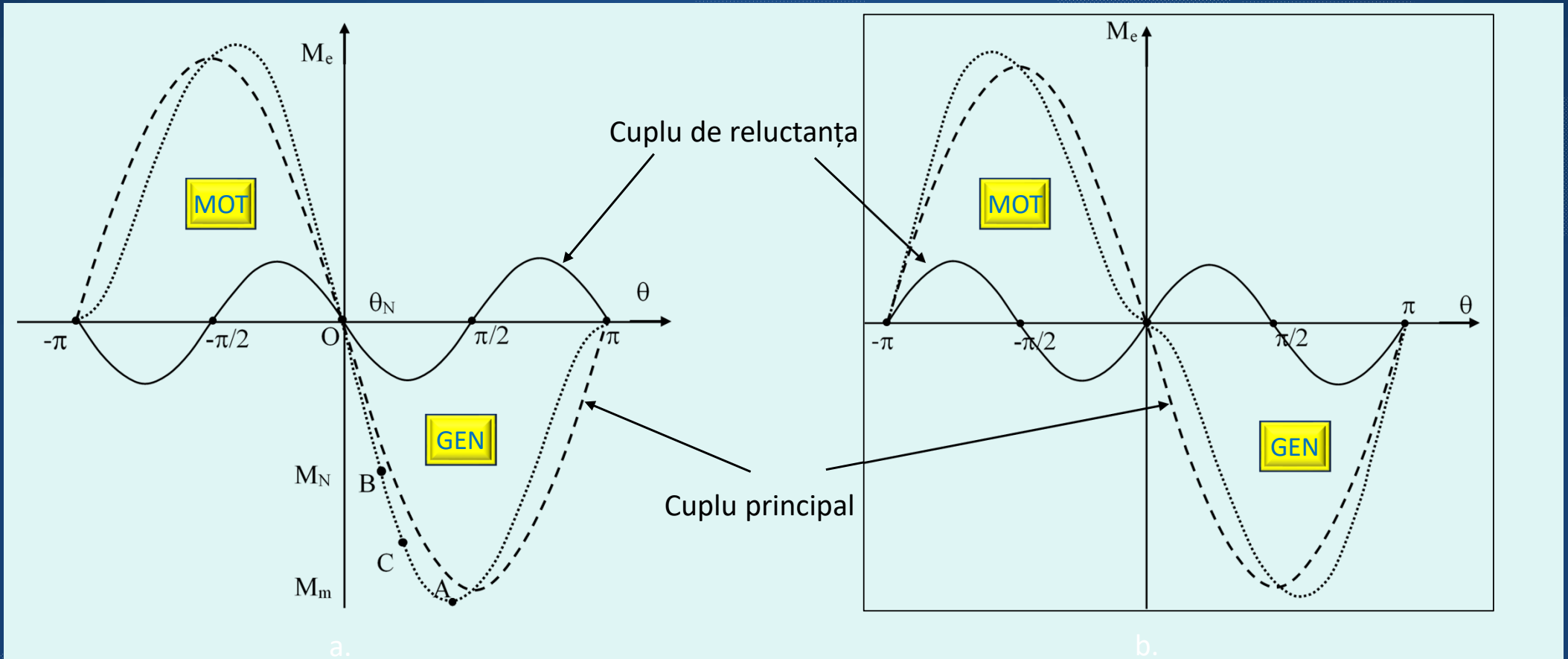
Primul termen apare ca urmare a variației inductanței, L , odată cu modificarea poziției rotorului (specific construcțiilor cu anizotropie de forma). Este o componenta *de reluctanță*.

Cel de-al doilea termen corespunde cuplului de pulsație („cogging torque”) ce apare ca urmare a modificării reluctanței, \mathcal{R} , a circuitului magnetic prin care se închide fluxul, ϕ , creat de magnetul permanent. Este, de asemenea un cuplu *de reluctanță*.

Cel de-al treilea termen reprezintă *cuplul de atracție mutuală* între bobinele parcurse de curent și magnetul permanent. Este cuplul principal al mașinii cu magneți permanenți, respectiv cuplul ce face rotorul să se rotească.

Primele două componente sunt considerate parazite în mașinile cu magneți permanenți, iar proiectarea are și scopul de minimizare a acestora.

Caracteristica unghiulară, $M_e=f(s)$



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

$$X_d > X_q$$

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

$$X_d < X_q$$

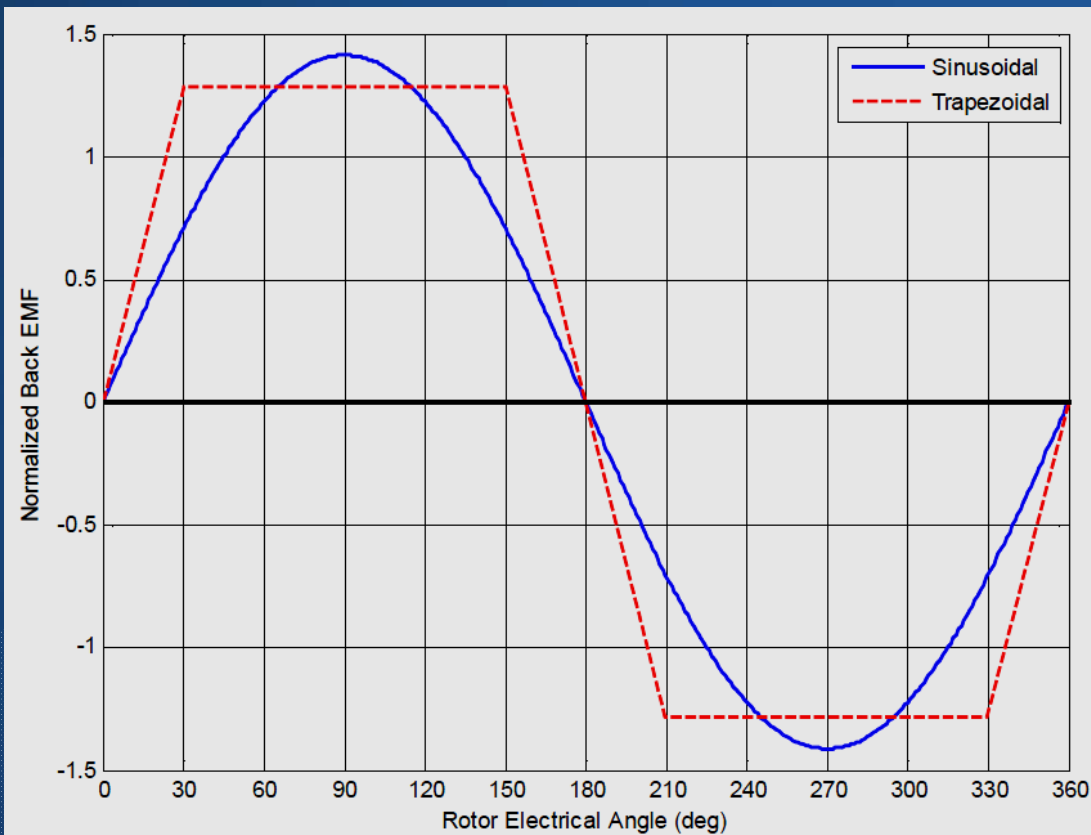
Atunci când reactanța sincronă transversală (X_q) devine mai mare decât reactanța sincronă longitudinală (X_d), componenta de reluctanță își schimbă defazajul față de componenta principală cu $\pi/2$. Cuplu rezultat își modifică ușor forma de variație dar și poziția punctelor de „cuplu maxim”.



În cazul motoarelor sincrone cu magneți permanenți la care, datorită structurii rotorului, reactanța sincronă transversală (X_q) devine mai mare decât reactanța sincronă longitudinală (X_d), are loc o creștere a unghiului intern maxim, ceea ce conferă o mai mare stabilitate la decroșare.

Back EMF

In cazul mașinilor cu magneți permanenți plasați pe rotor, conceptul de „back emf” se referă la tensiunea indusă în înfășurarea statorică de către sistem inductor al magneților permanenți, în lipsa prezenței curentului prin înfășurarea statorică (în gol).



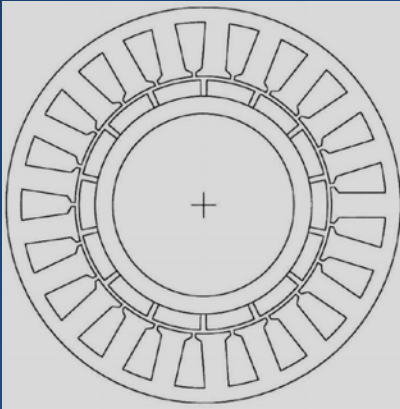
Formele de unda idealizate ale tensiunii induse la gol („back emf”)

Această tensiune indusă depinde, în amplitudine, de viteza rotorului.

Forma tensiunii induse depinde de:

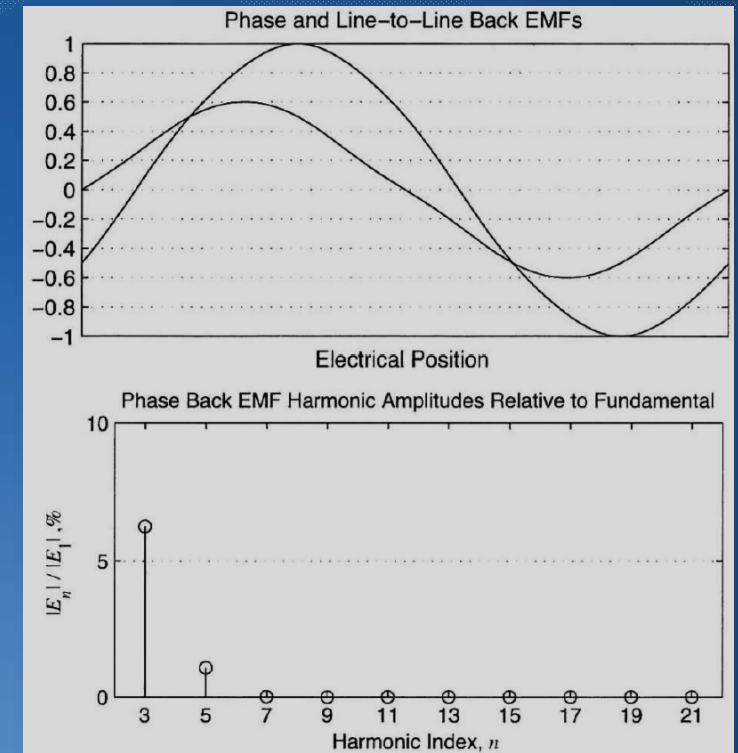
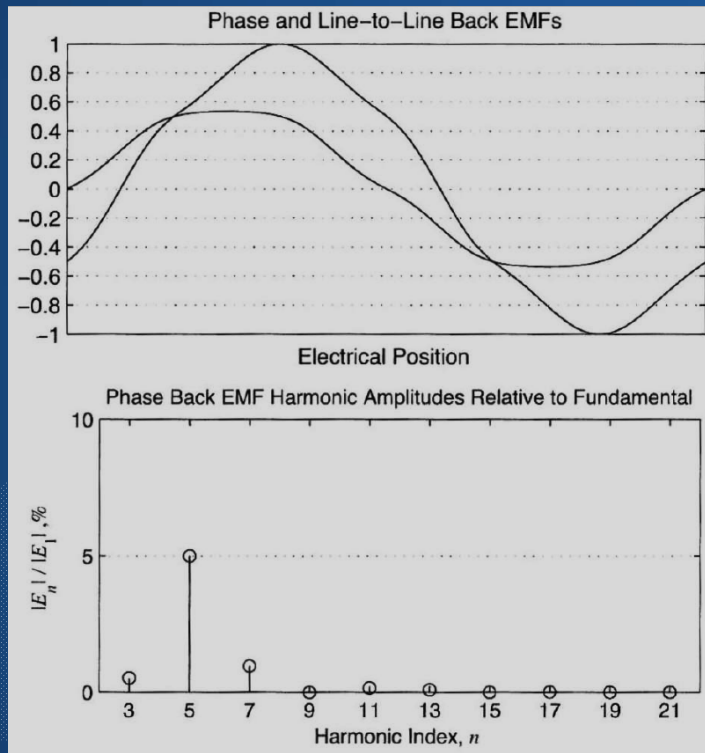
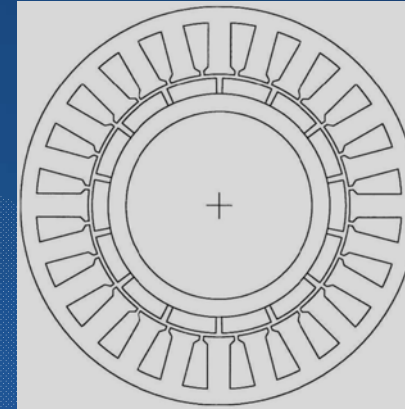
- forma magneților permanenți;
- modul de magnetizare a magneților permanenți (radial sau paralel);
- structura circuitului magnetic statoric (numărul de dinți statorici);
- tipul înfășurării statorice (înfășurări sinusoidale).

$2p=14$
 $Z=21$

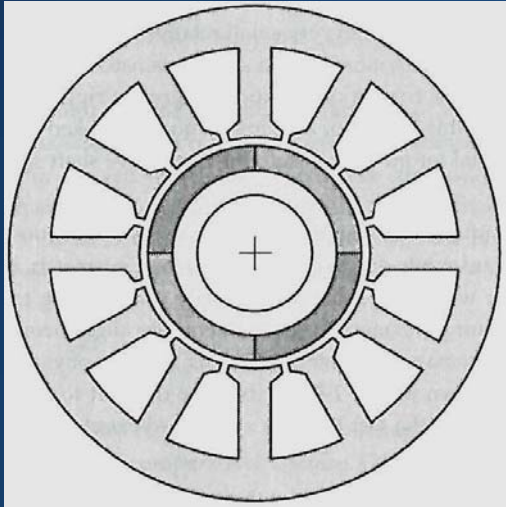


Back EMF

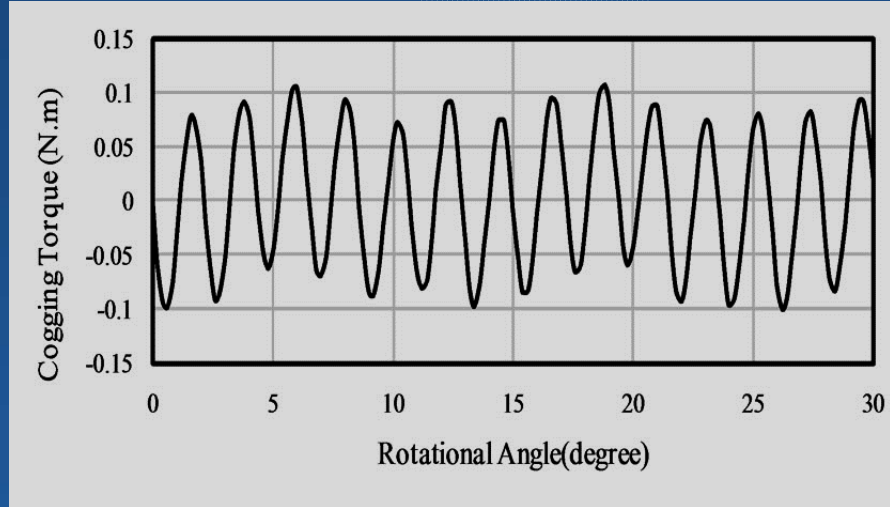
$2p=14$
 $Z=24$



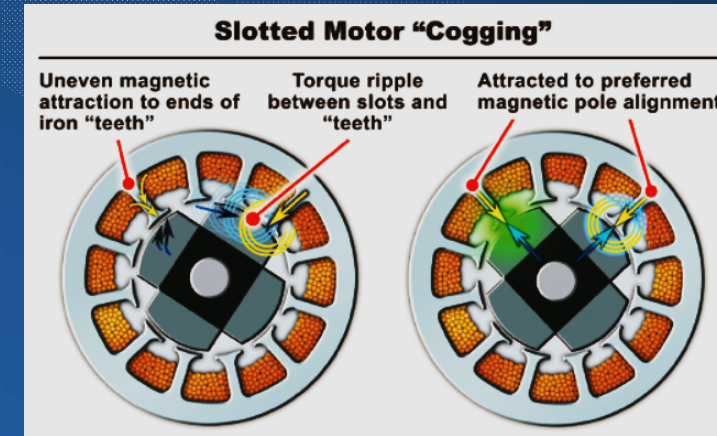
Cogging torque (cuplul de pulsație)



Mașina sincrona cu MP



Curba cuplului de pulsație („cogging torque)



Reprezintă cuplul ce apare la mașinile cu magneți permanenți ca efect al interacțiunii dintre magneții rotorici și creștăturile statorului, în lipsa oricărui curent prin înfășurarea statorică.

Existența istmurilor creștăturilor statorului determină o variație a reluctanței (\mathcal{R}) circuitului magnetic. „Piese polare” ale dinților rotorici au și rolul de a micșora această reluctanță astfel încât, cuplul de pulsație să fie diminuat.

La turații joase, acest cuplu se manifestă prin pulsații ale vitezei, ceea ce reprezintă un fenomen perturbator. La turații înalte, momentul de inerție al rotorului „filtrează” aceste pulsații care devin nesensibile.

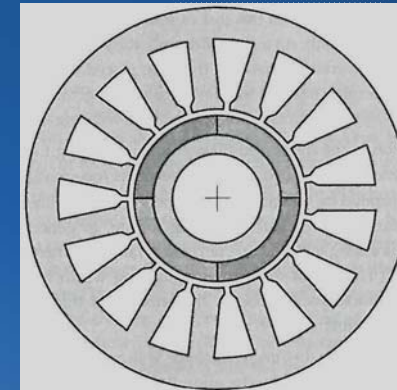
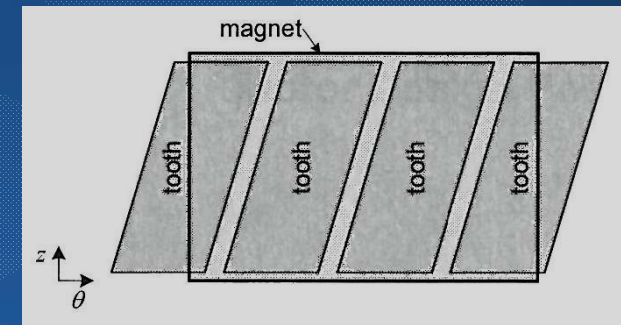
$$M_{cog} = -\frac{1}{2} \Phi^2 \frac{d\mathcal{R}}{d\theta}$$

Metode de reducere a cuplului de pulsație

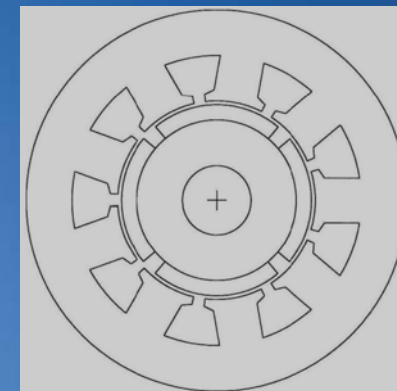
1. Înclinarea axială a creștăturilor statorice: se diminuează termenul $d\mathcal{R}/d\theta$ pe direcție axială.

2. Utilizarea unui număr fracționar de creștături pe pol $Q=Z/2p$ (numărul de poli NU trebuie să fie un submultiplu al numărului de creștături). Cuplurile de pulsație create de fiecare magnet în parte sunt defazate astfel încât rezultanta este mai mică.

3. Optimizarea formei magnetului permanent și a deschiderii arcului polar.

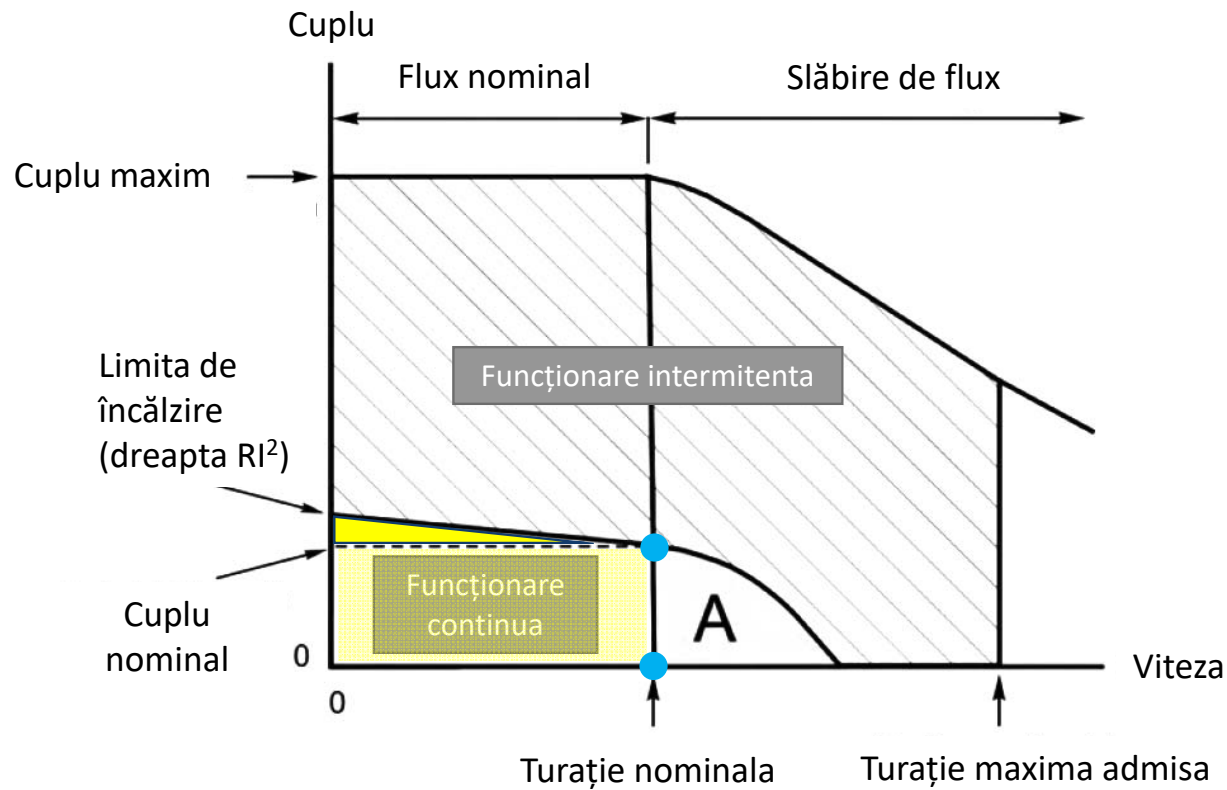


$$Q = 15/4$$

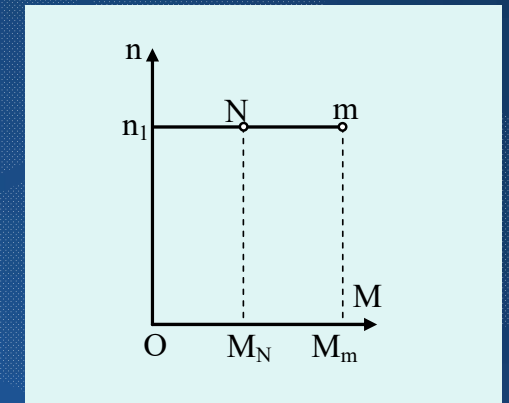


$$\alpha = (0,7-0,85)\tau$$

Caracteristica mecanică



Caracteristica mecanică – zone de funcționare ca servomotor



Caracteristica mecanică motor sincron



Când sunt destinate să funcționeze ca servomotoare, mașinile cu magneți permanenți acoperă o arie mult mai vastă de funcționare.

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.

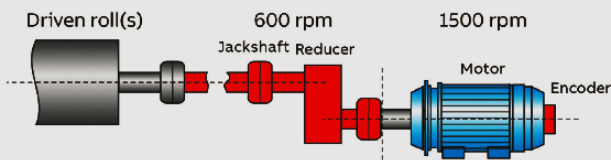
De fapt, funcționarea continuă este limitată de atingerea temperaturii limită, exprimată prin dreapta RI^2 (zona galben-intens). Menținerea puterii constante permite creșterea cuplului dezvoltat de mașină odată cu scăderea turației. De fapt are loc o ușoară extindere a zonei de funcționare continuă.

Pentru cupluri peste valoarea nominală este admisă o funcționare intermitentă (timp 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.

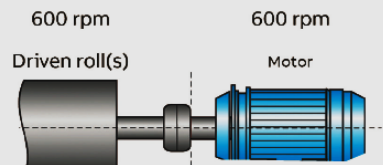
Pentru funcționarea la viteze mai mari, se poate aplica tehnica slăbirii fluxului în mașină („field weakening”) care trebuie acompaniată de scăderea cuplului. Exceptând zona A, este un mod de funcționare de asemenea intermitent, întrucât tehnica slăbirii de câmp presupune existența unui curent mai mare în înfășurarea statorică.

Aplicații – acționari cu motoare cu magneți permanenți – soluții ABB

Traditional solution: induction motor with gearbox



Permanent magnet solution



Fabrica de hârtie - acționarea valțurilor
(direct drive concept)

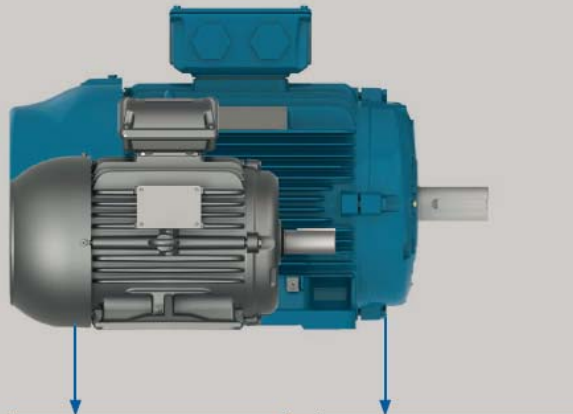


Sistem de propulsie maritima Azipod
(3,3 MW)

Motoarele ABB cu magneți permanenți sunt actualmente construite in limita de putere 17-2500 kW. Ele nu sunt destinate conectării directe la rețea ci numai prin intermediul unor invertoare special dedicate controlului după flux.

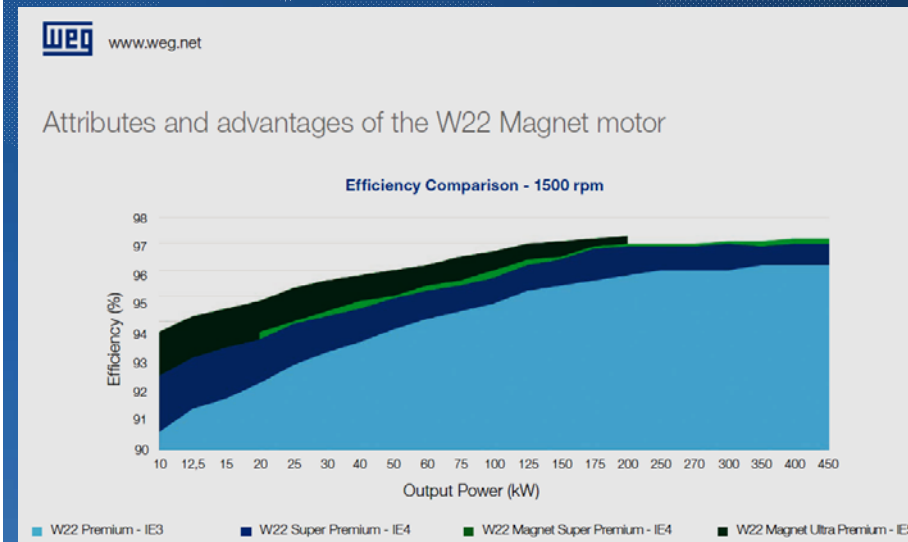
Aplicații – acționari cu motoare cu magneți permanenți – soluții WEG

Volume reduction



The image shows two 30kW, 3000 rpm motors side-by-side. The W22 Magnet Motor on the left is significantly smaller and more compact than the Induction Motor on the right. Blue arrows point from the text boxes below to the respective motors.

W22 Magnet Motor	Induction Motor
Output: 30kW	Output: 30 kW
Speed: 3000 rpm	Speed: 3000 rpm
Frame: 132M/L	Frame: 200L
Mass: 76 kg	Mass: 265 kg
Volume: 24 dm ³	Volume: 72 dm ³



Motoarele WEG cu magneți permanenți sunt actualmente construite in limita de putere 7,5-315 kW. Aplicații: pompe si ventilatoare, războaie de țesut, aparate de extrudare, compresoare, conveiere.

CUVINTE
CHEIE

Curent sinusoidal

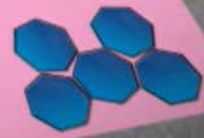
Magnetizare de tip paralel

Back EMF

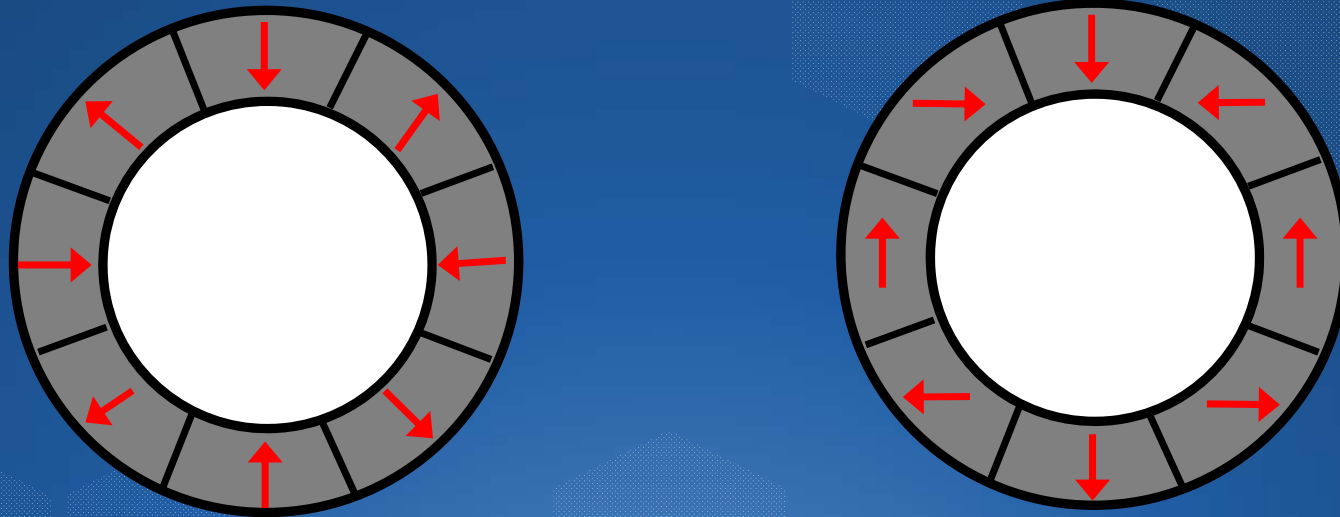
Cogging Torque



Structuri Halbach

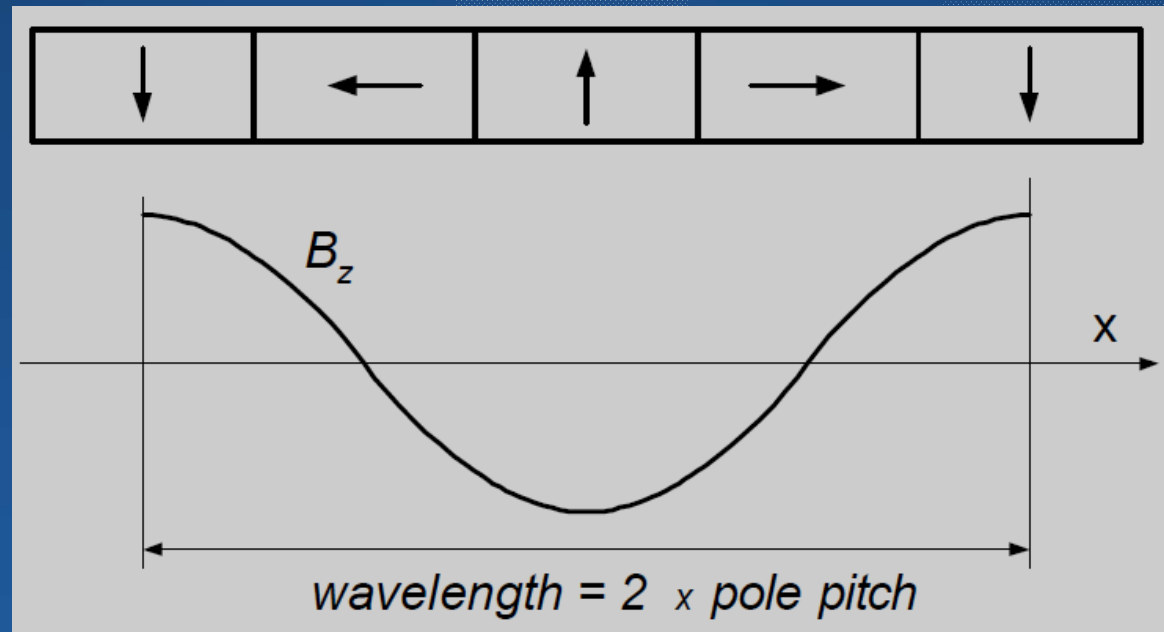


Halbach array concept

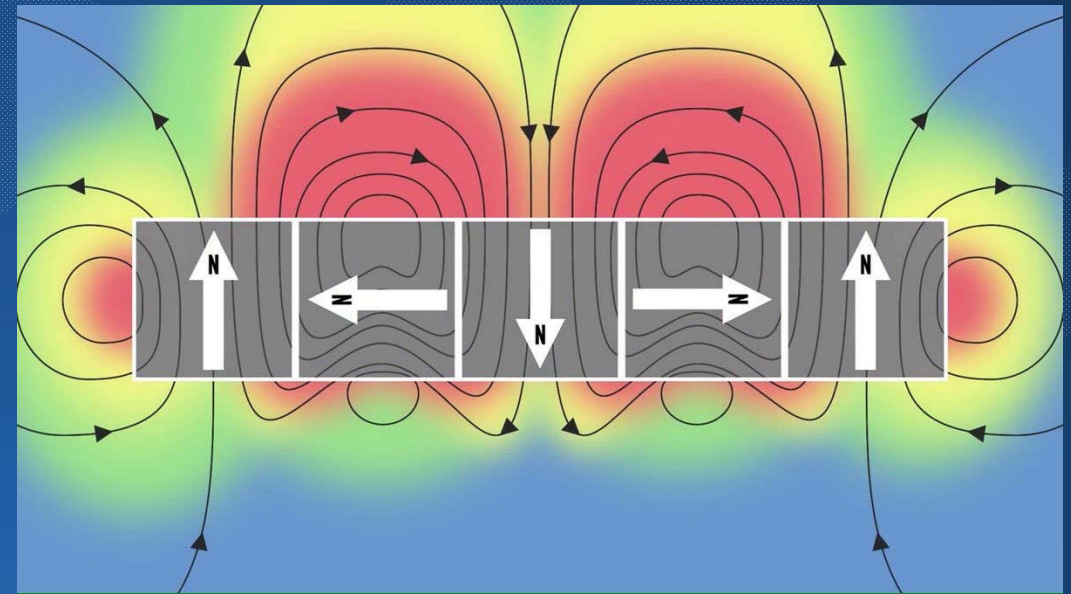
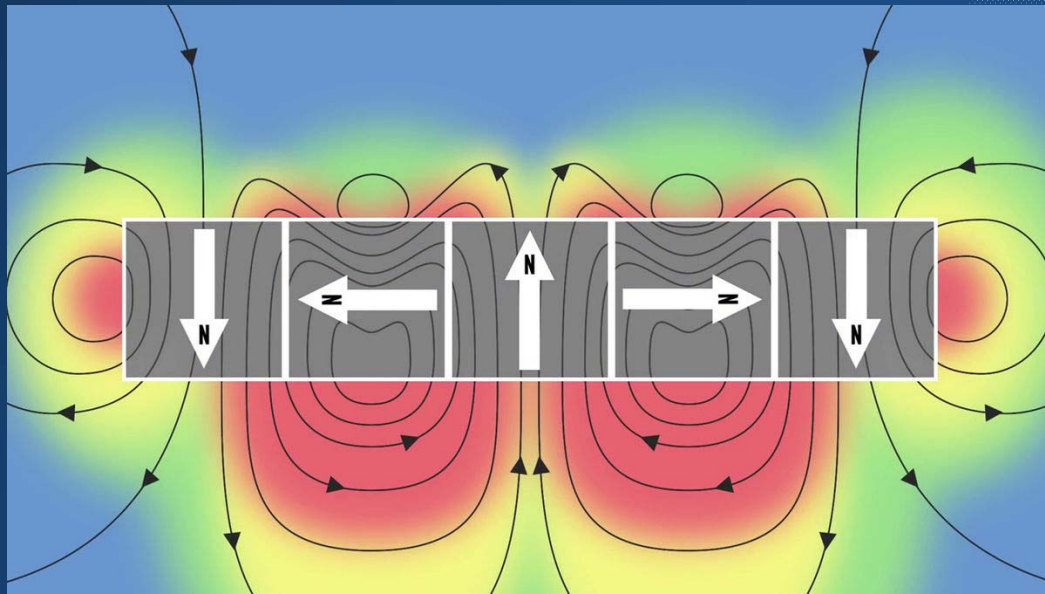


Structurile Halbach au fost investigate pentru prima dată de către Klaus Halbach începând cu anul 1979. Scopul primar al cercetării a fost găsirea unei posibilități de utilizare mult mai eficientă a magneților permanenți.

Esența conceptului propus constă în aranjarea particulară a magneților având direcții de magnetizare diferită.

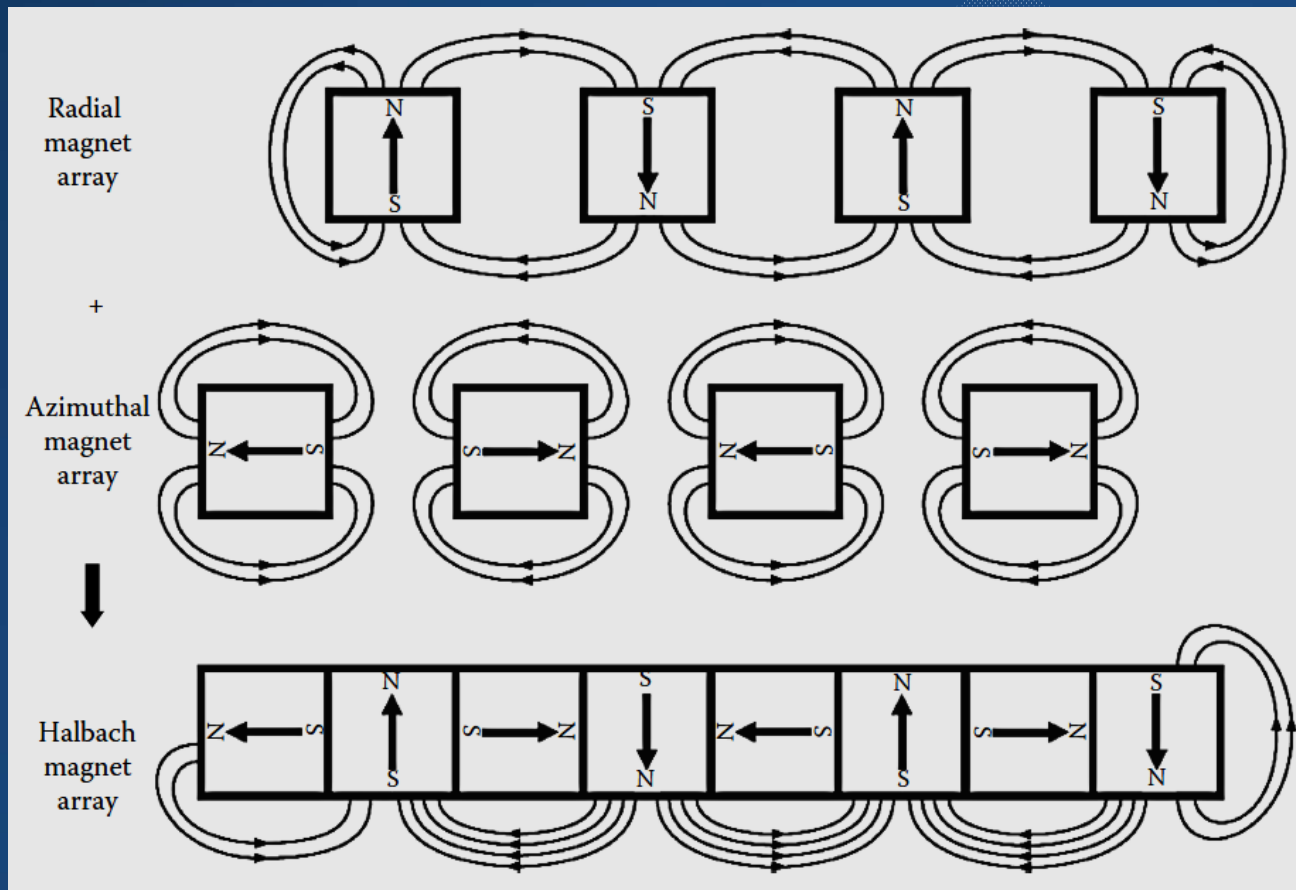


Pentru acest tip de aranjare a magneților permanenți se obține o variație sinusoidală a inducției magnetice de-a lungul structurii liniare.



Câmpul magnetic creat de structura Halbach este amplificat pe una din părți și anulat în parte opusă. Cele două părți sunt determinate de modul de aranjare a magneților respectiv a direcțiilor lor de magnetizare.





Explicativa la principiul structurilor Halbach.

Câmpul creat de structurile Halbach este o suprapunere de câmpuri radiale și azimutale ce determină o anulare a câmpului de o parte și amplificarea acestuia în partea opusă a structurii.

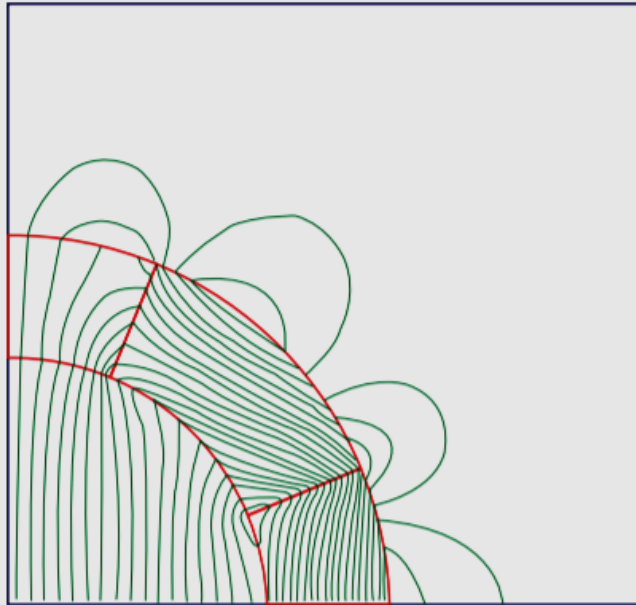


Figure 1b — Halbach Array Field Lines

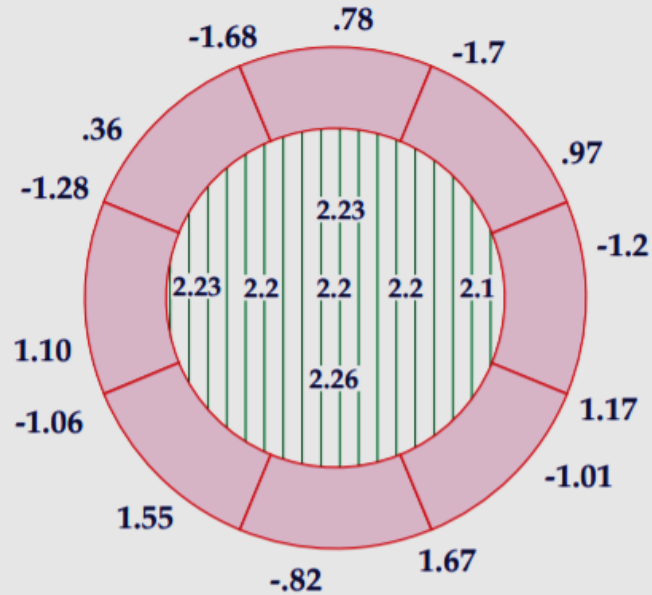


Figure 2 — Halbach Array Measured Field Values

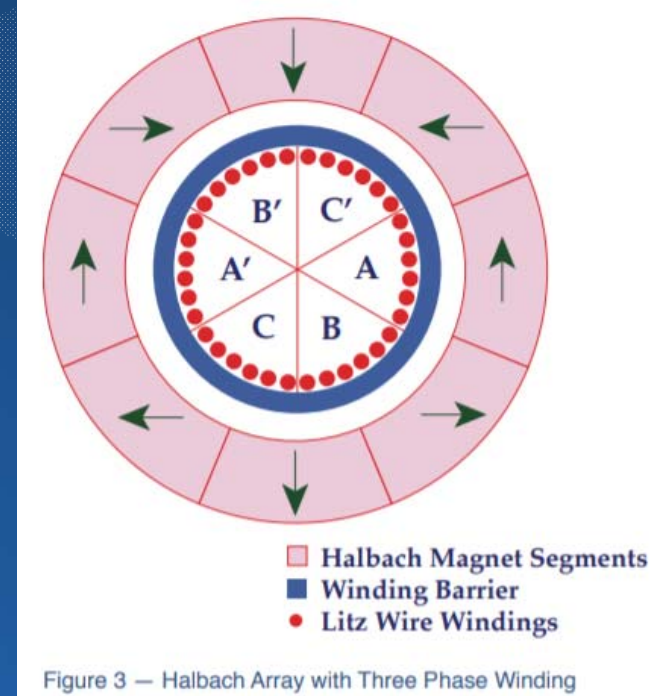
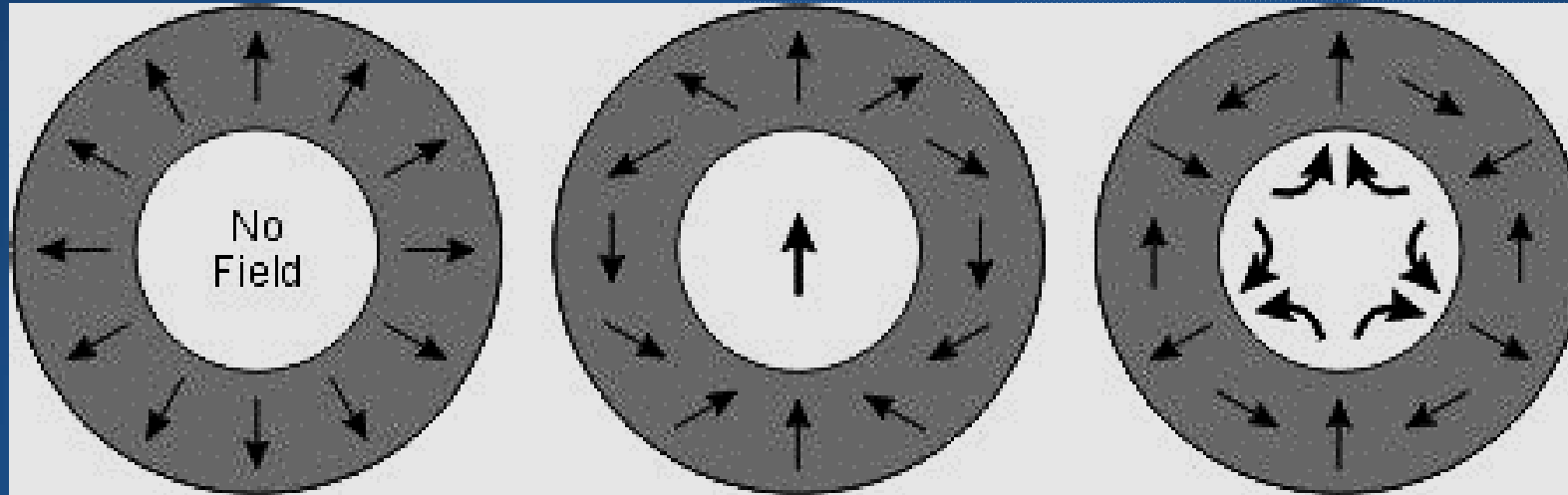


Figure 3 — Halbach Array with Three Phase Winding

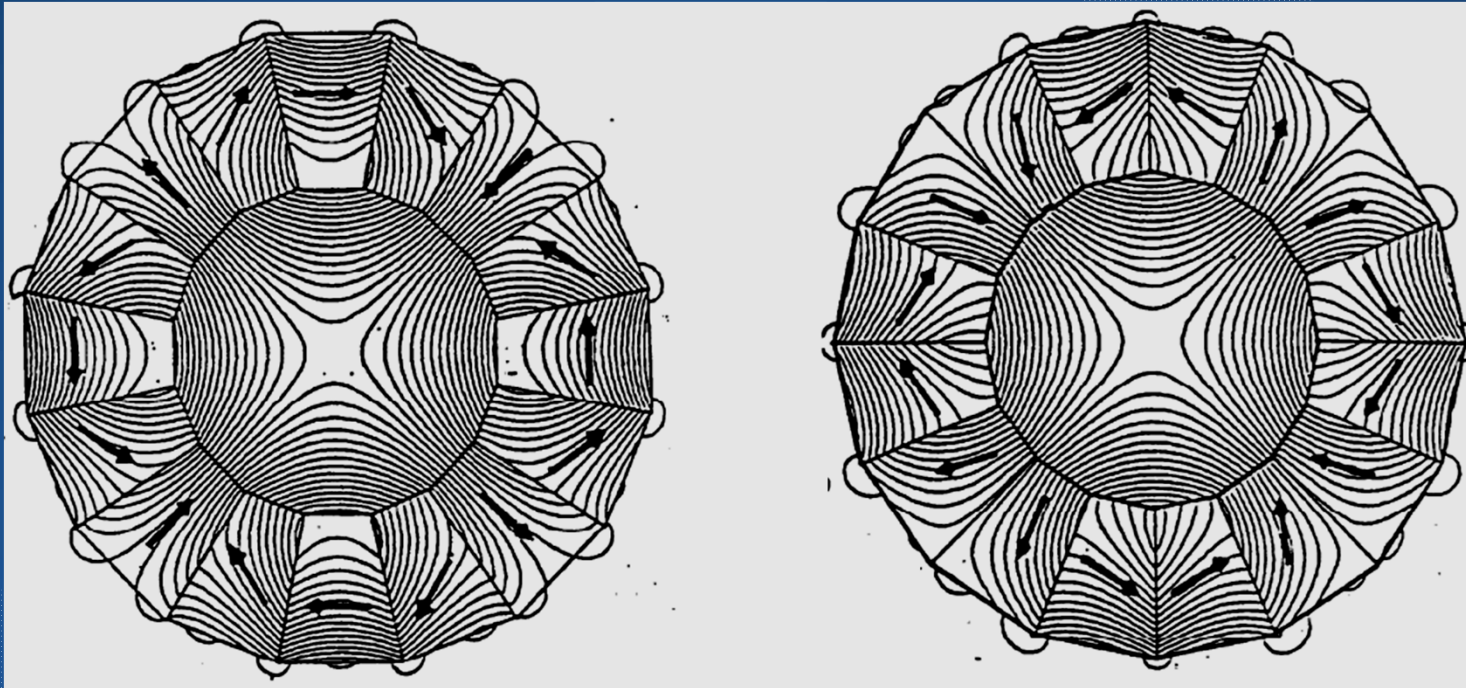
Pentru structura circulară cu 2 poli, pe care Halbach o consideră cea mai avantajoasă, s-a obținut un câmp uniform în interiorul structurii și o anulare aproape completă a câmpului în exterior. Fig 1b prezintă liniile de câmp obținute prin simulare MEF iar Fig. 2 arată valorile măsurate ale inducției.

Următorul pas a fost conceperea unui motor bazat pe structuri Halbach de către R.F. Post ce a propus structura din Fig. 3. Cea mai importantă caracteristică a acestei mașini este *lipsa completă* a „fierului”. Este o mașină electrică fără circuit magnetic ce vine cu toate avantajele ce caracterizează acest lucru. În cazul structurii din Fig. 3, înfășurarea trebuie în mod obligatoriu plasată în interiorul structurii.

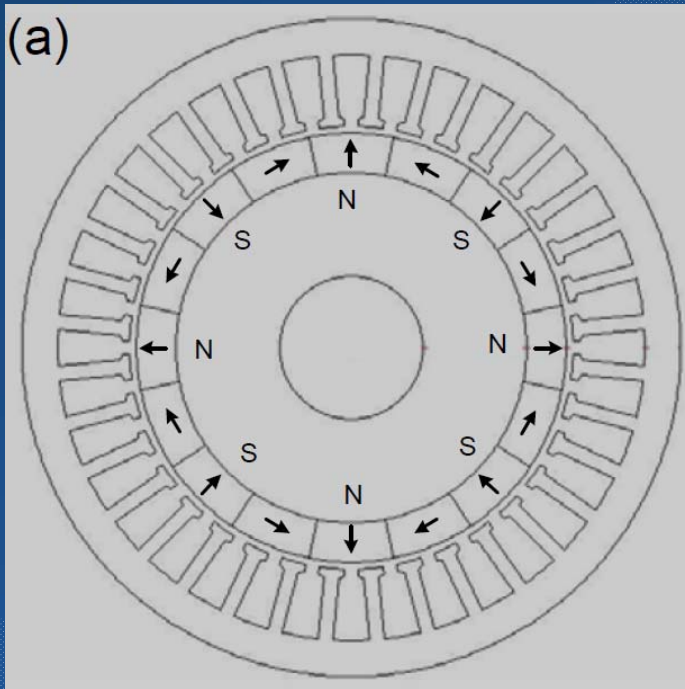


Modalități de realizare a unor structuri cu număr diferit de poli.

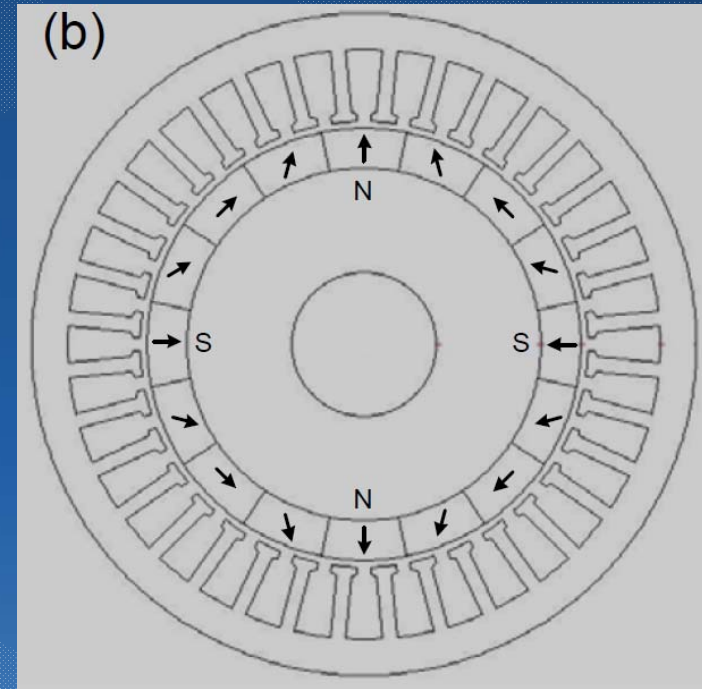
Modul de combinare a magneților permanenți cu diverse direcții de magnetizare permite obținere unor structuri circulare cu număr diferit de poli.



Structuri Halbach cu același număr de poli dar direcții de magnetizare diferită. Diferențele apar în curba inducției în întrefier.

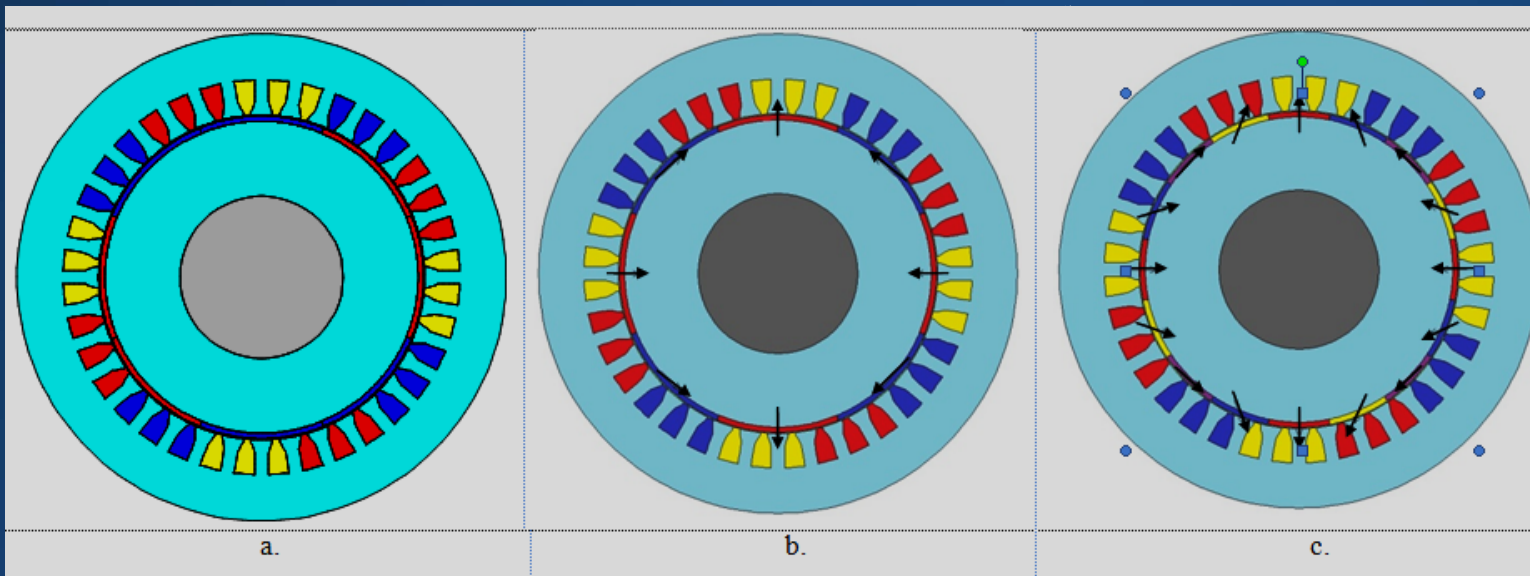


Structură Halbach cu 8 poli și direcții de magnetizare la 90°

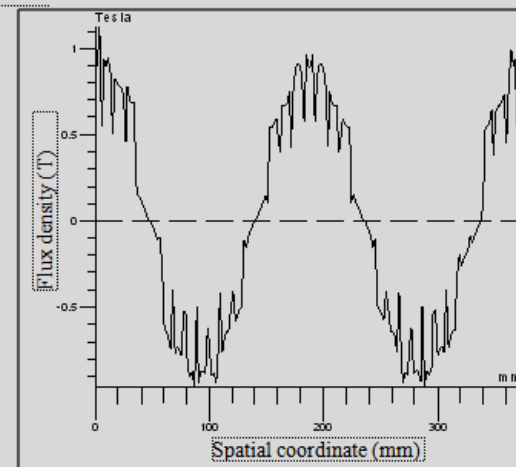
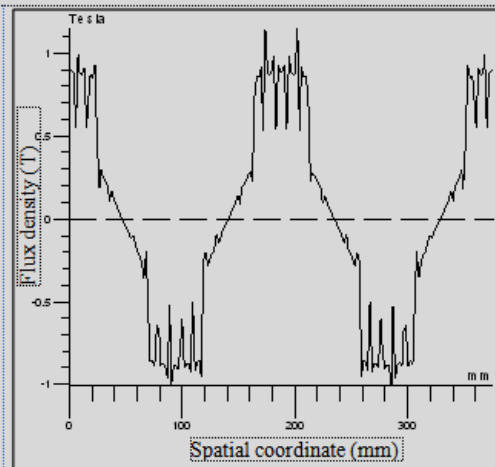
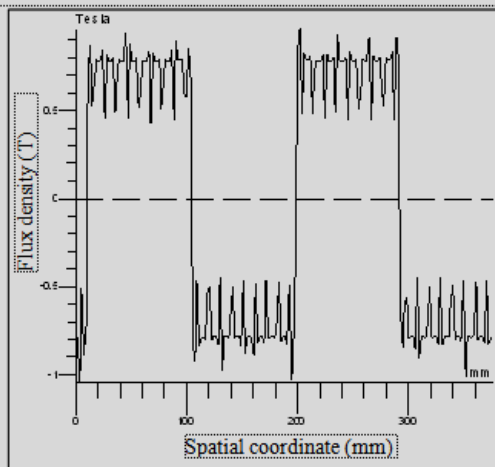


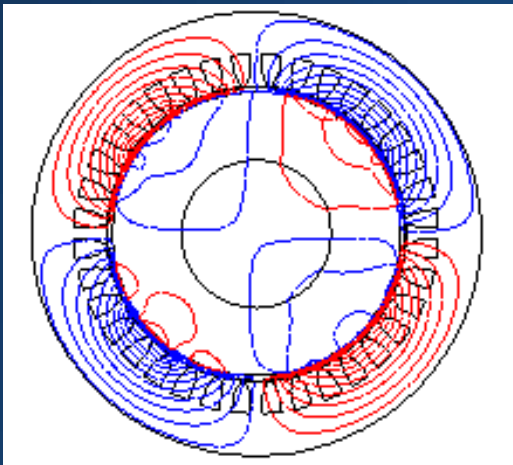
Structură Halbach cu 4 poli și direcții de magnetizare la 45°

Înfășurarea poate fi plasată și în exteriorul structurii circulare Halbach modificând în mod corespunzător direcțiile de magnetizare. Prezența circuitului magnetic statoric crește performanțele structurii Halbach.

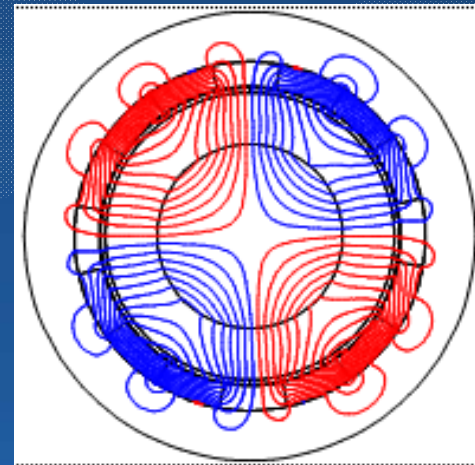
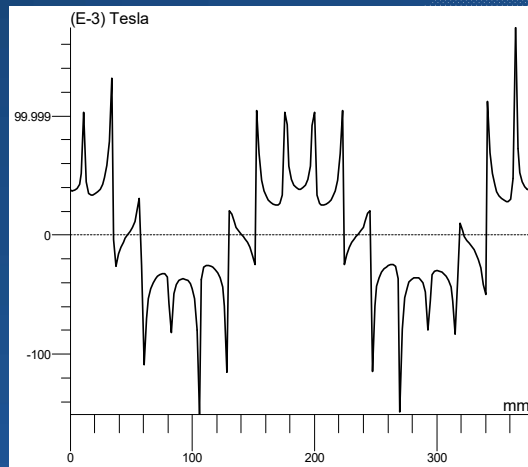


a – Magnetizare radială (structură clasică de PMSM - 4 PMs);
 b – Structură Halbach cu magnetizare $90^\circ - 45^\circ$ (8 PMs);
 c - Structură Halbach cu magnetizare $90^\circ - 45^\circ$ și magnetizare intermediară (16 PMs).

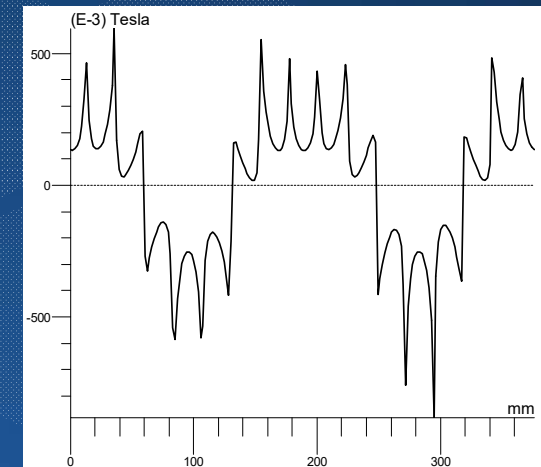




Rotor interior ($B=0,052T$)



b. Rotor exterior ($B=0,3T$)



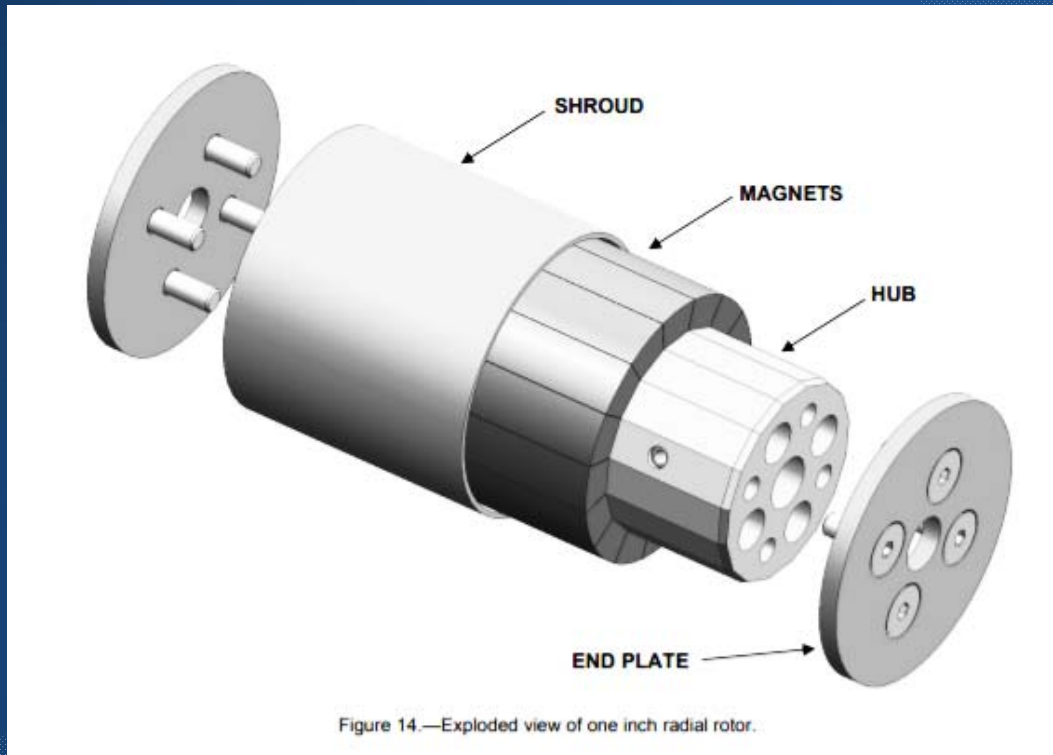
Structuri fără fier atât în stator cât și în rotor. Pentru obținerea unor inducții utilizabile este necesară mărirea volumului de magnet permanent (cazul b).

Distribuția liniilor de câmp în cazul unor structuri Halbach: distribuție exterioară (a) și rotor interior, respectiv distribuție interioară (b) și rotor exterior.



10 kW Halbach UHEHM1 Motor

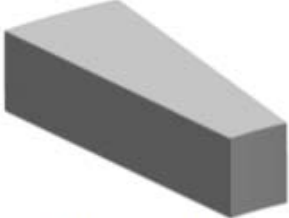
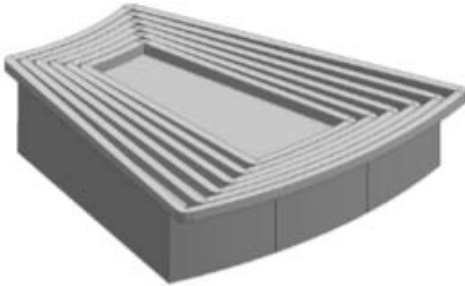
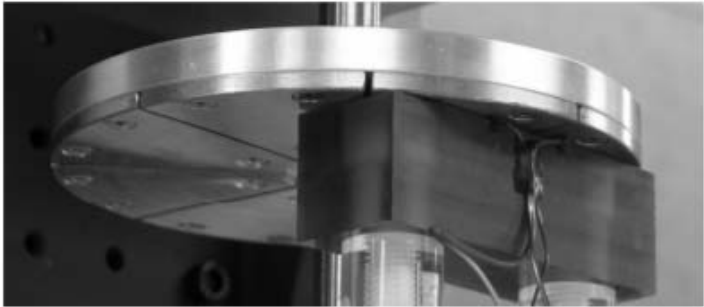
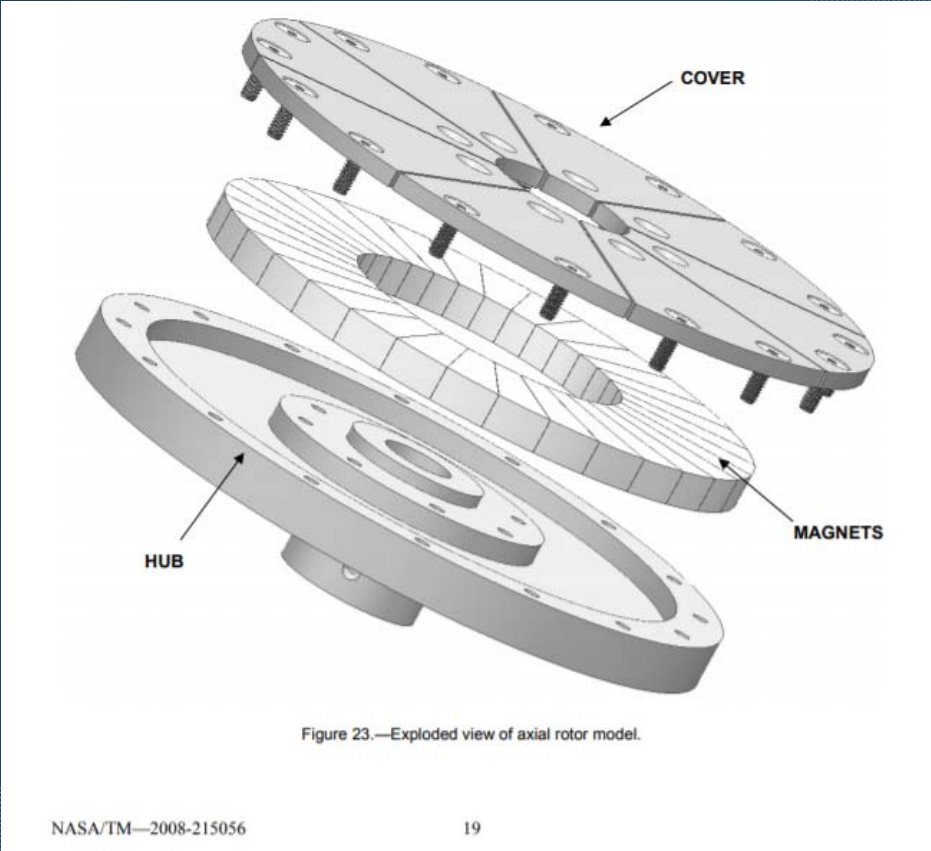
Rotor cu aranjament Halbach – structura radiala.



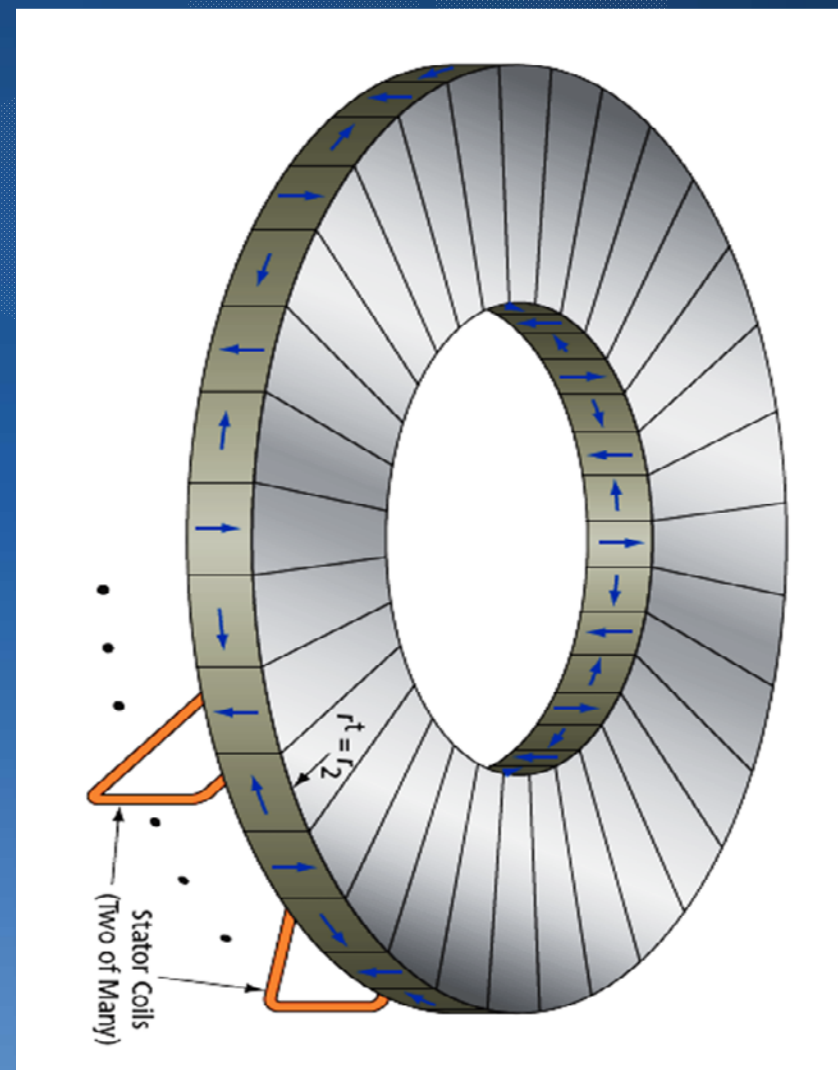
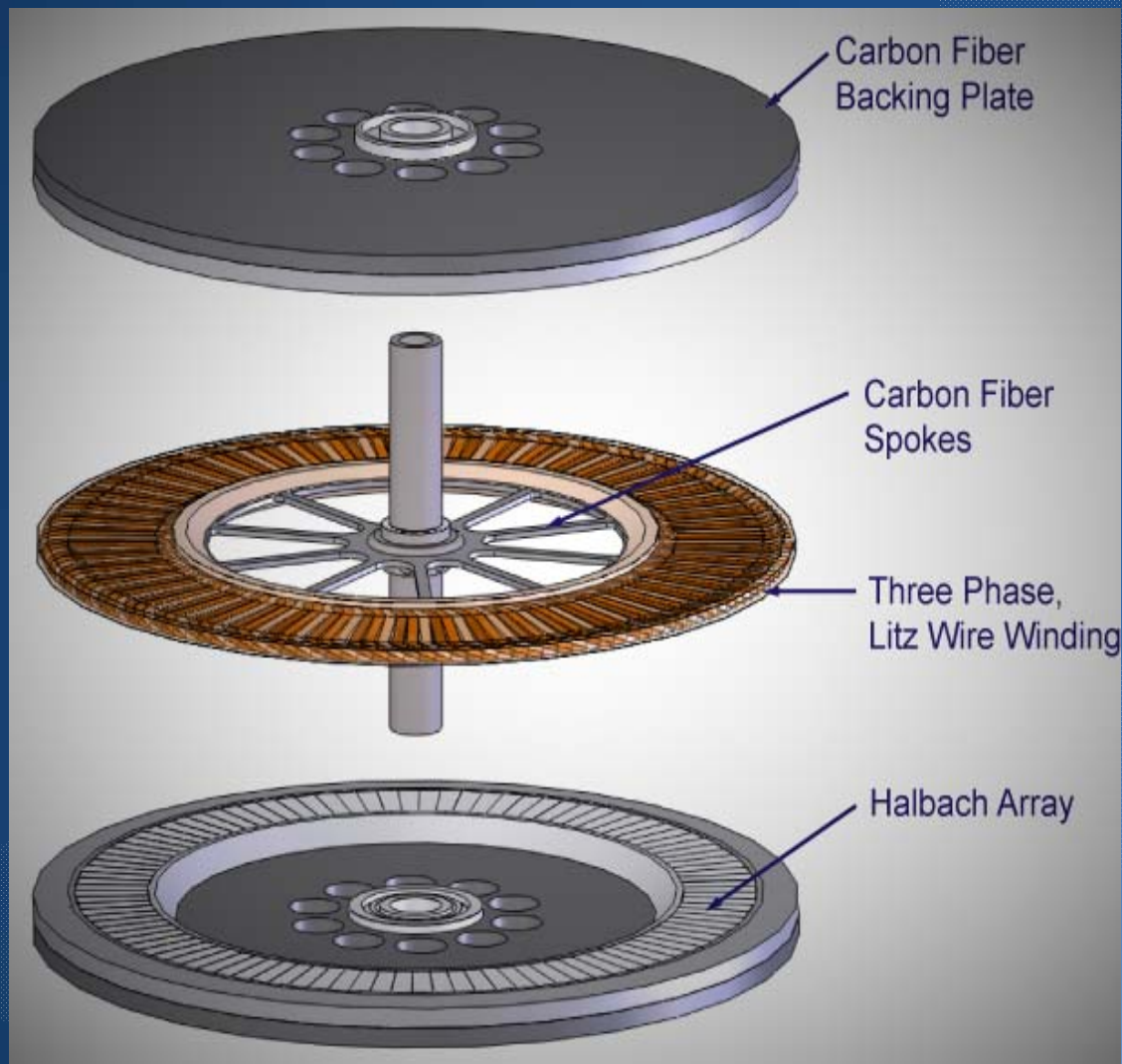
NASA/TM—2008-215056

15

Rotor cu aranjament Halbach – structura axiala



Aranjament Halbach pe structura de tip axial, fara fier in stator si rotor („ironless”)



Avantaje ale structurilor Halbach



1

Armonica fundamentală a câmpului este de 1,4 ori mai mare decât în cazul structurilor convenționale cu MP.

2

Aranjamentele Halbach pot fi plasate pe structuri neferomagnetice iar magneții permanenți pot fi lipiți direct pe un suport neferomagnetic (Al, plastic).

3

Câmpul magnetic creat este mai apropiat de o formă sinusoidală decât în cazul structurilor convenționale.

4

Câmpul magnetic creat în „zona slabă” este extrem de redus.

Caracteristici generale ale structurilor Halbach

1

Lipsa totală sau
parțială a fierului

2

Inerție redusă a
rotorului

3

Condiții de răcire
îmbunătățite prin
proiectare (răcire
forțată cu aer)

4

Greutate redusă

5

Construcție
compactă

6

Randament
ridicat

7

Funcționare
 silențioasă

8

Poate fi folosită
pentru funcționări
la viteze mari
(peste 10.000 rpm)



Servomotoare cu magneti permanenti *sincrone tip DC*



Curs 7



BLDC – **B**rush**L**ess **D**C

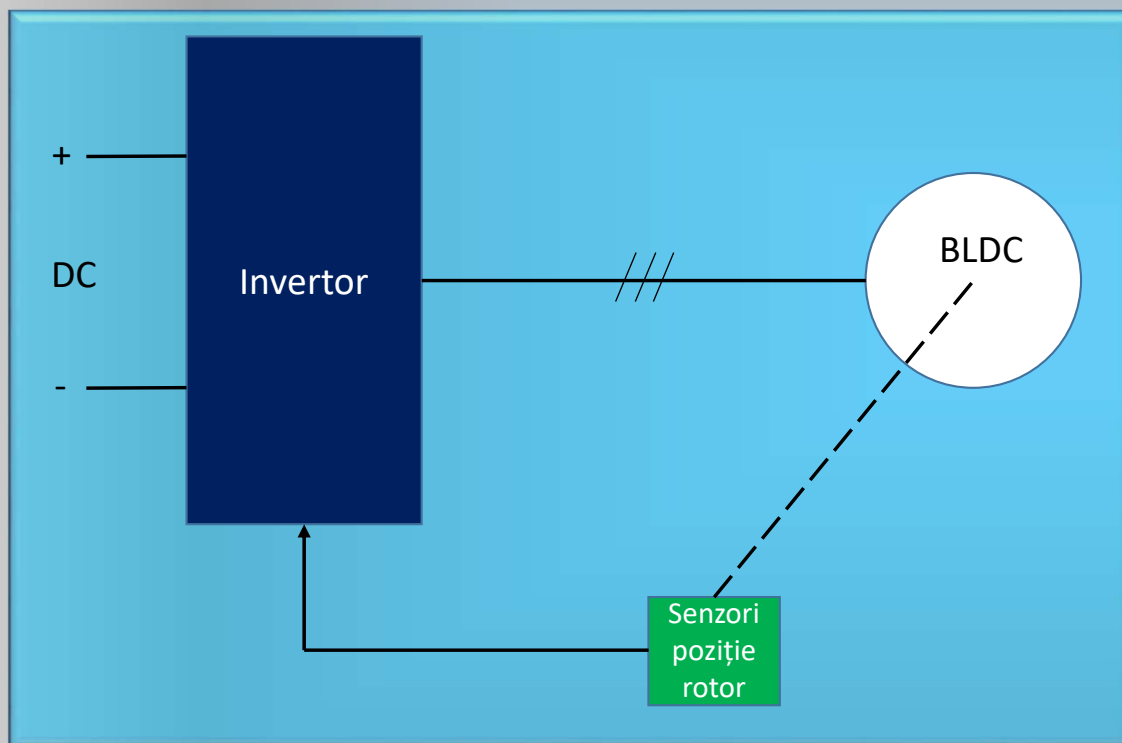
Motorul BLDC este un motor electric cu magneți permanenți plasați pe rotor și la care înfășurările statorului sunt alimentate succesiv de la o sursă de alimentare cu elemente semiconductoare.

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.



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

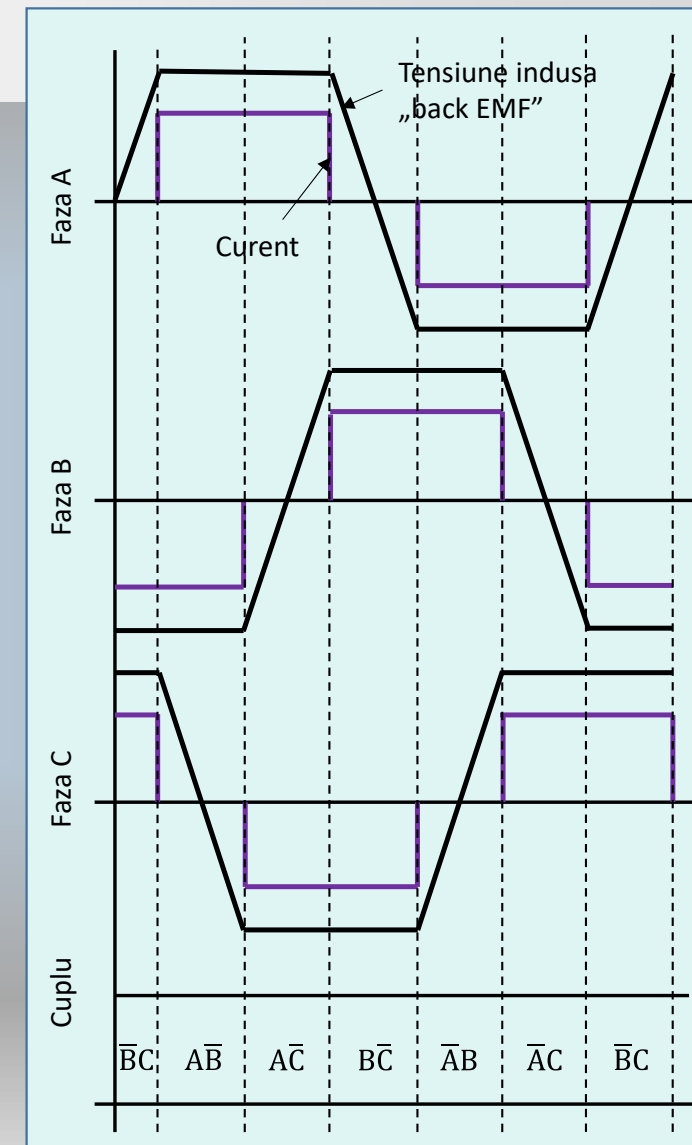
Curba inducției în întrefier
Distribuție rectangulară

Tensiunea indusă – back EMF
Undă trapezoidală

Curentul statoric
Undă rectangulară

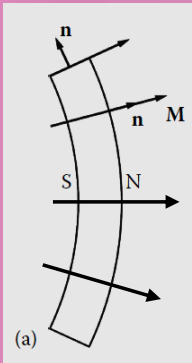
Atât tensiunea indusă în înfășurarea statorică cât și curentul de comandă aplicat înfășurărilor statorice au forme rectangulare (in opoziție cu formele de undă sinusoidale întâlnite la motoarele sincrone cu magneți permanenți tip AC): tensiunea indusă este trapezoidală iar curentul de comandă este dreptunghiular.

De asemenea, curba inducției în întrefier are o formă trapezoidală.

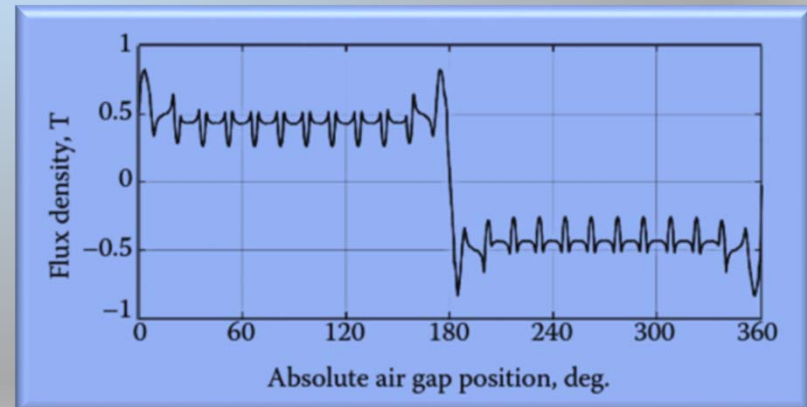


III.

Magnetizarea magneților permanenți



In cazul motorului BLDC, magneții permanenți de pe rotor au magnetizare de tip radial – direcții de magnetizare „neparalele”, ceea ce permite obținerea în întrefier a unei curbe a inducției de formă trapezoidală.

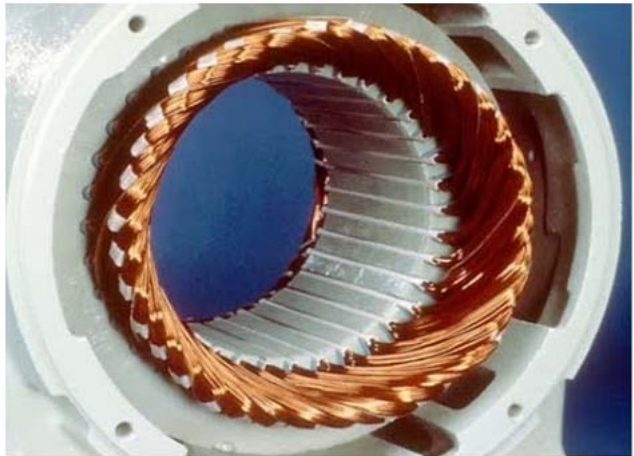


Curba inducției în întrefier la mașinile cu MP cu magnetizare radială

IV.

Tipul de înfășurare statorică

Distributed Winding



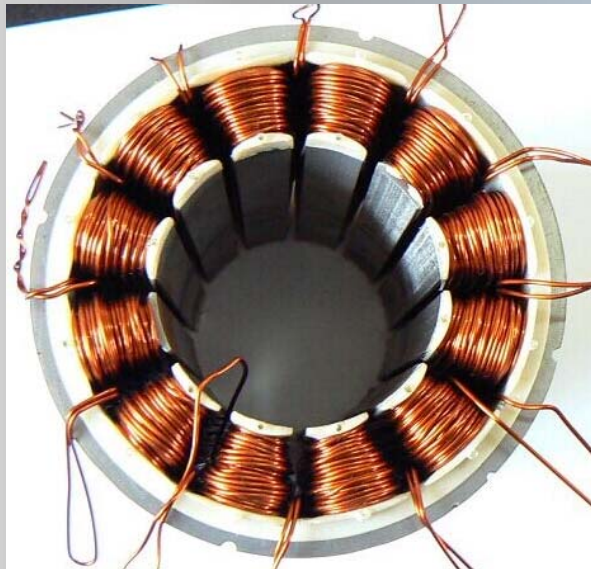
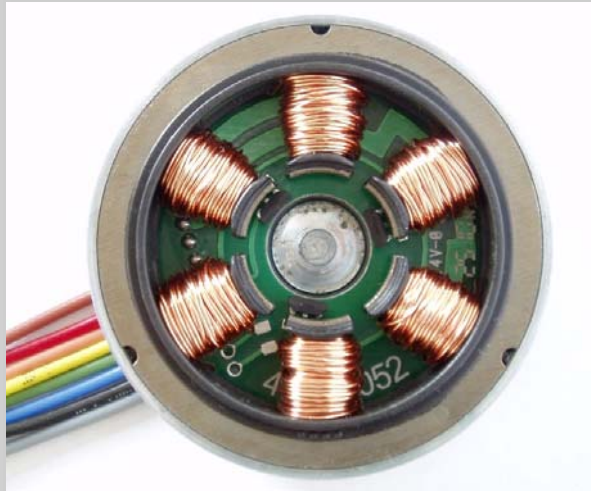
PMSM

Concentrated Winding



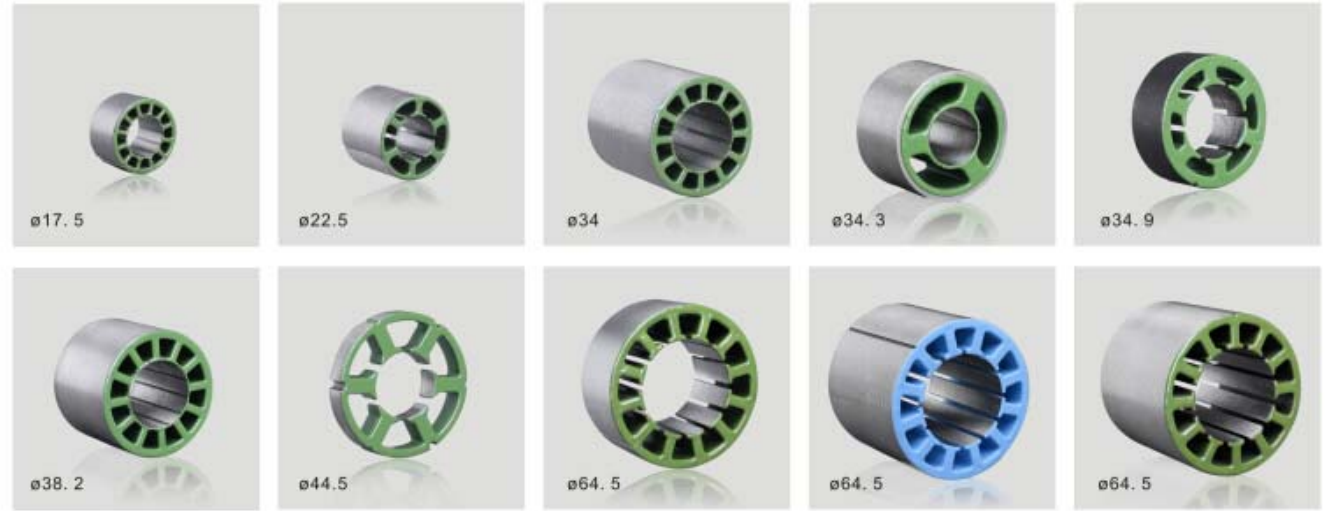
BLDC

Spre deosebire de motorul cu magneți permanenți tip AC (PMSM), motorul BLDC are înfășurări de tip concentrat pe dinte.



■ 内转子 / Inner Rotor

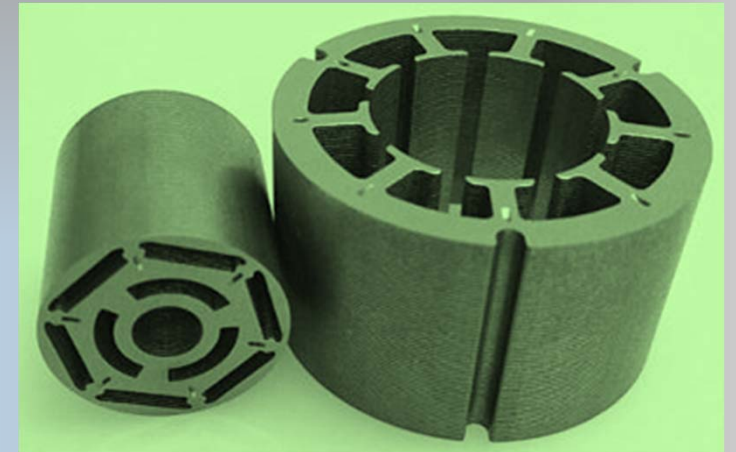
■ 60系列 / 60 Series



I. Statorul BLDC :

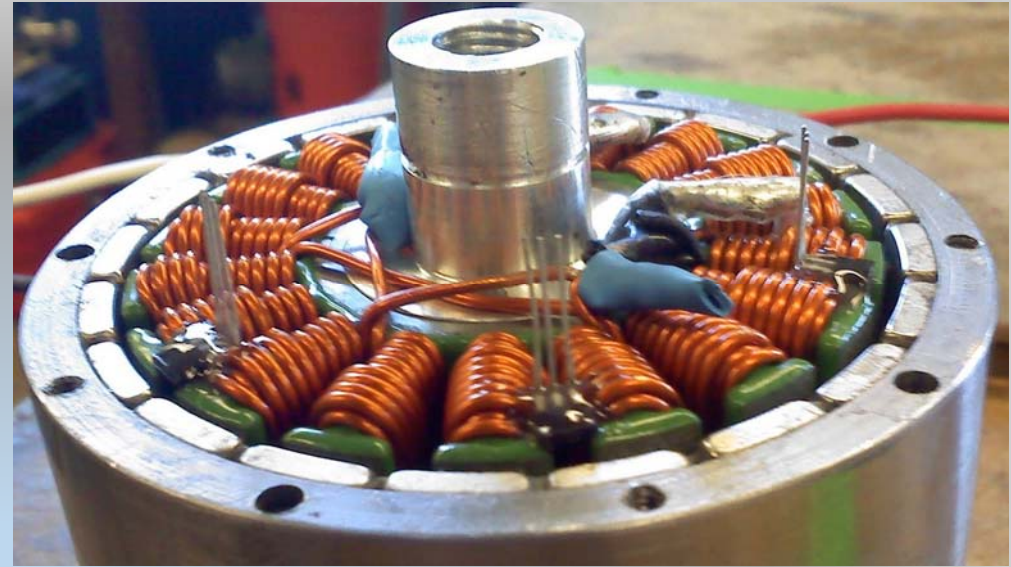
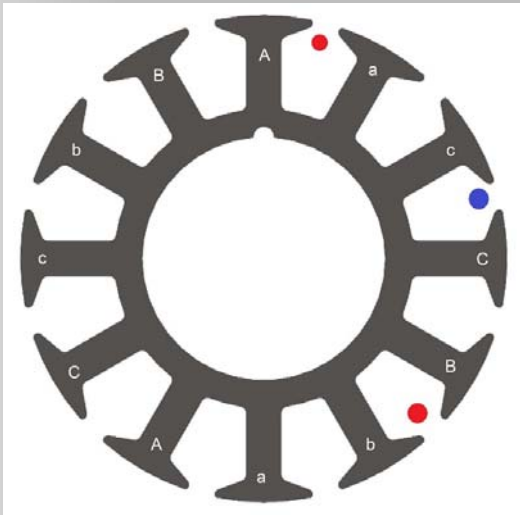
- Circuitul magnetic statoric este realizat din material feromagnetic și prezintă dinți uniform distribuiți.
- Înfășurarea statorică este formată din bobine (de tip concentrat) plasate individual pe dinții statorului. Cel mai adesea este o înfășurare trifazată dar există și variante bifazate sau multifazate.
- 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 in interior. Numărul de poli este par.



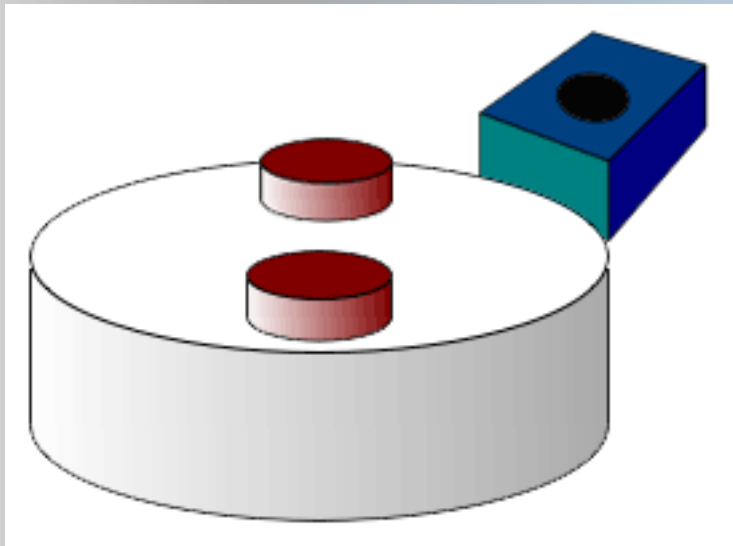
III. Senzori de poziție (senzori Hall):

- 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.

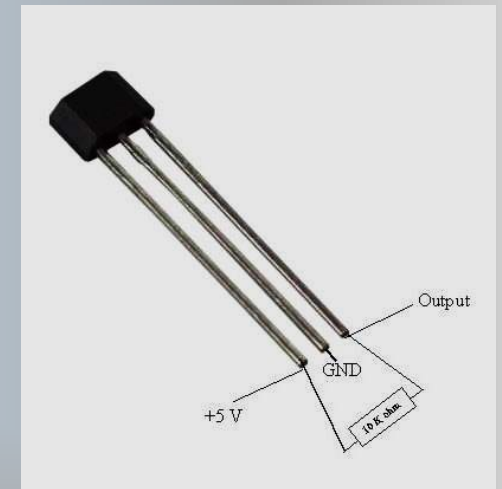
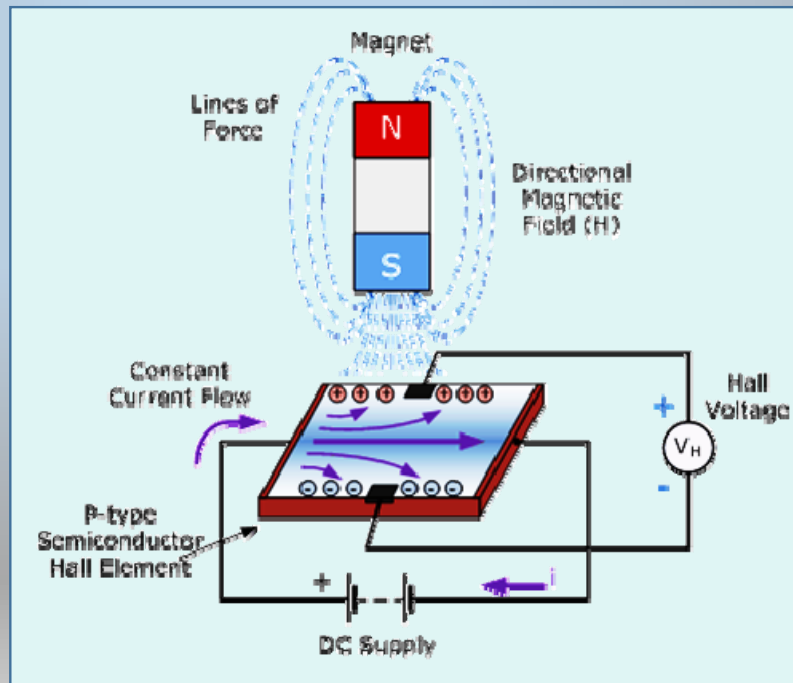


Determinarea poziției rotorului

1. Prin utilizarea traductoarelor bazate pe efectul Hall
2. Prin determinarea tensiunii induse în înfășurările statorice și deducerea poziției rotorului



Principiul traductoarelor Hall



Tranductor Hall

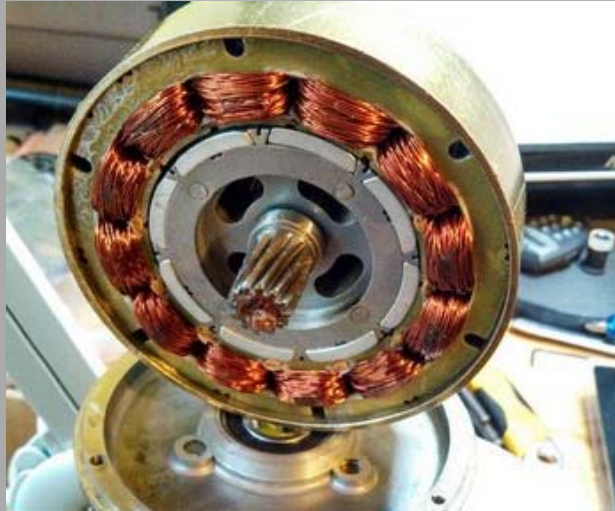
BLDC cu rotor interior

„INRUNNER”

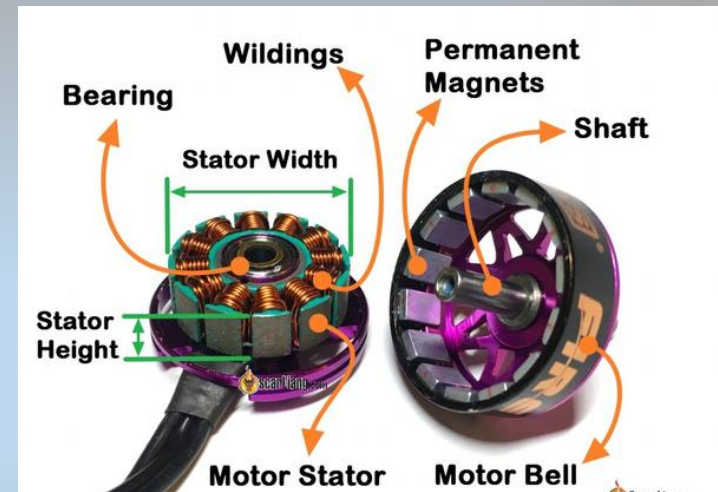
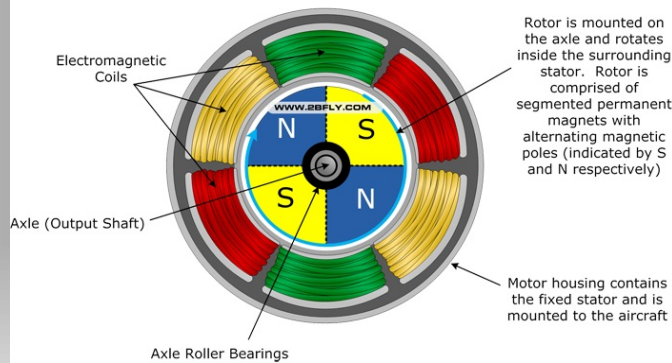
Clasificare

BLDC cu rotor exterior

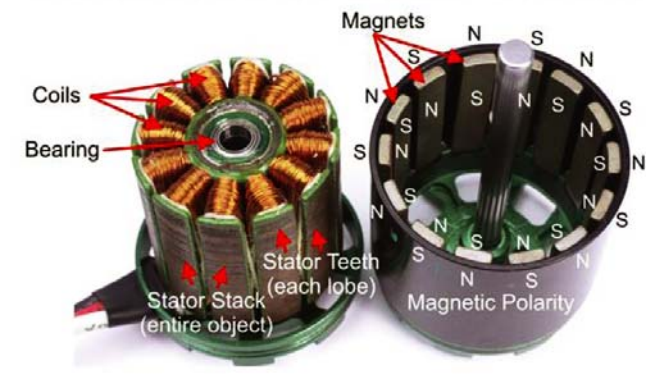
„OUTRUNNER”



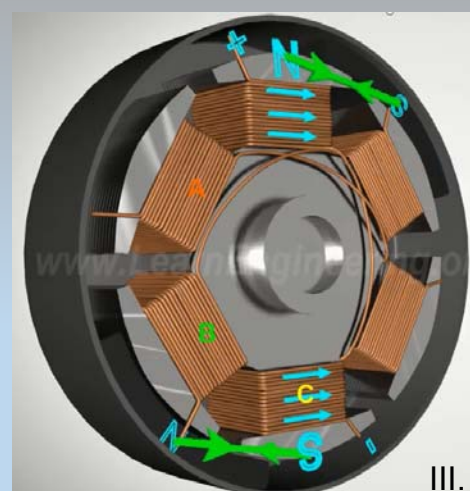
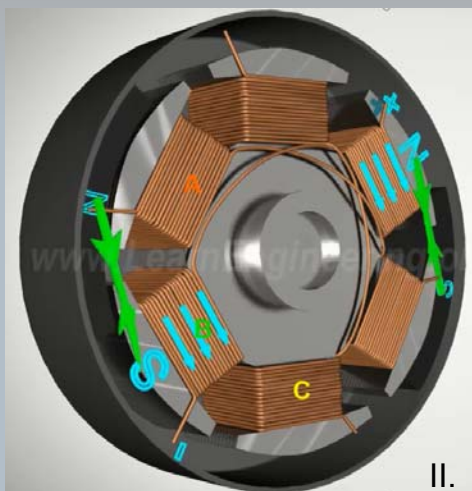
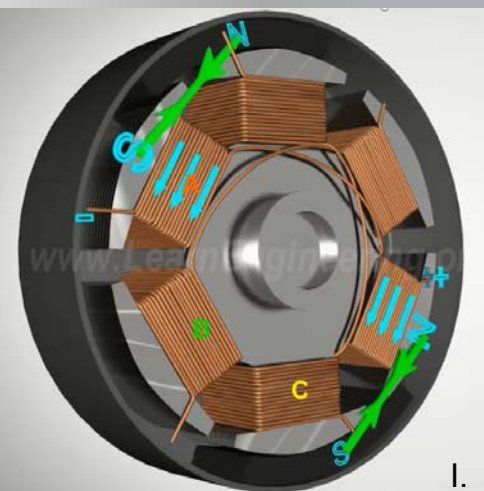
BLDC Inrunner Motor Anatomy



OUTRUNNER COMPONENTS



Principiu de funcționare

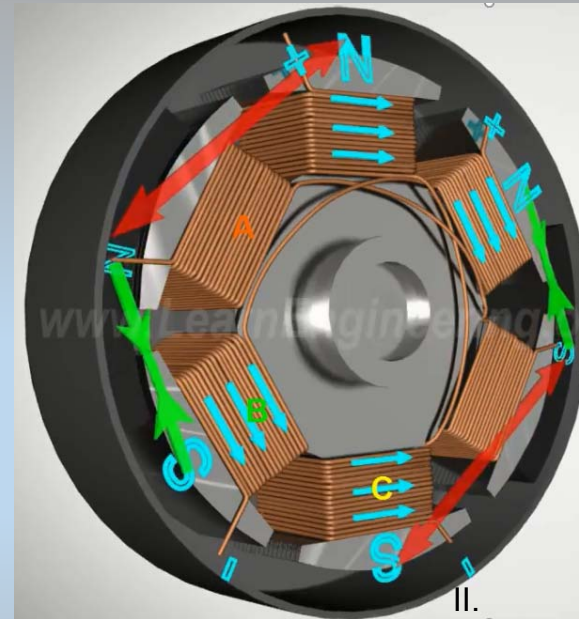
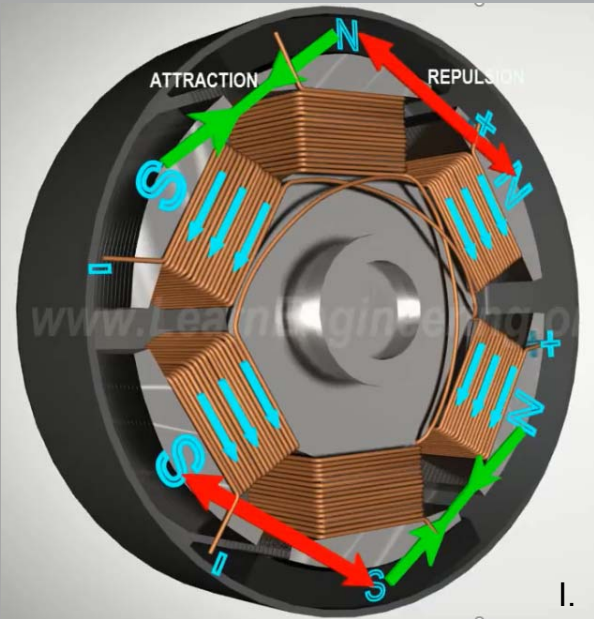


BLDC trifazat cu rotor exterior având doi poli magneți permanenți

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.

Sucesiunea alimentării fazelor determină un câmp „învârtitor”.

Principiu de funcționare

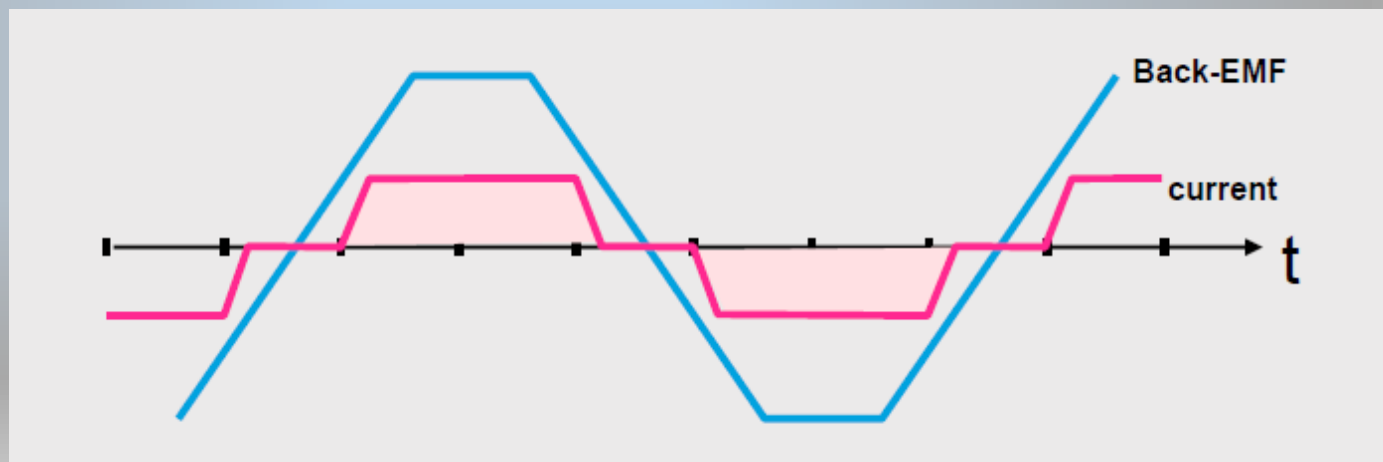


Alimentarea unei singure faze din cele trei a motorului BLDC ar face ca eficiența mașinii să fie destul de redusă. Drept urmare, se alimentează și o a doua fază, dar în așa fel încât să creeze poli statorici de o asemenea polaritate încât să determine un cuplu de respingere pentru polii rotorului. În 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

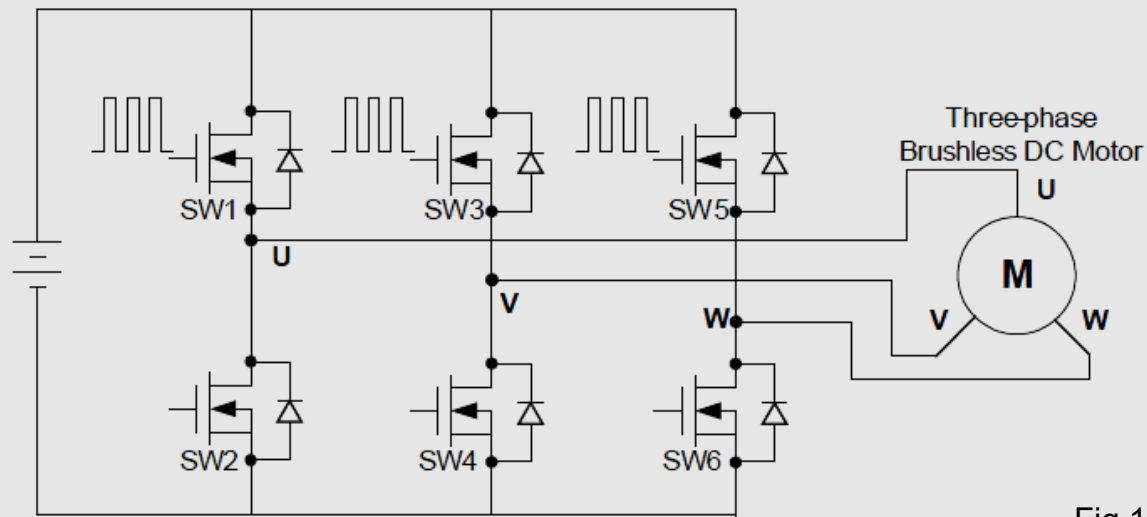


Fig.1

Se folosește o punte trifazată cu 6 elemente semiconductoare (in figură se folosesc 6 tranzistoare MOSFET)

Un ciclu complet de comandă (o rotire completă a rotorului) presupune 6 pași.

In orice moment sunt alimentate doar două din cele trei faze: una cu un curent pozitiv iar cealaltă cu un curent negativ.

Sucesiunea alimentării fazelor determină un câmp „învârtitor”.

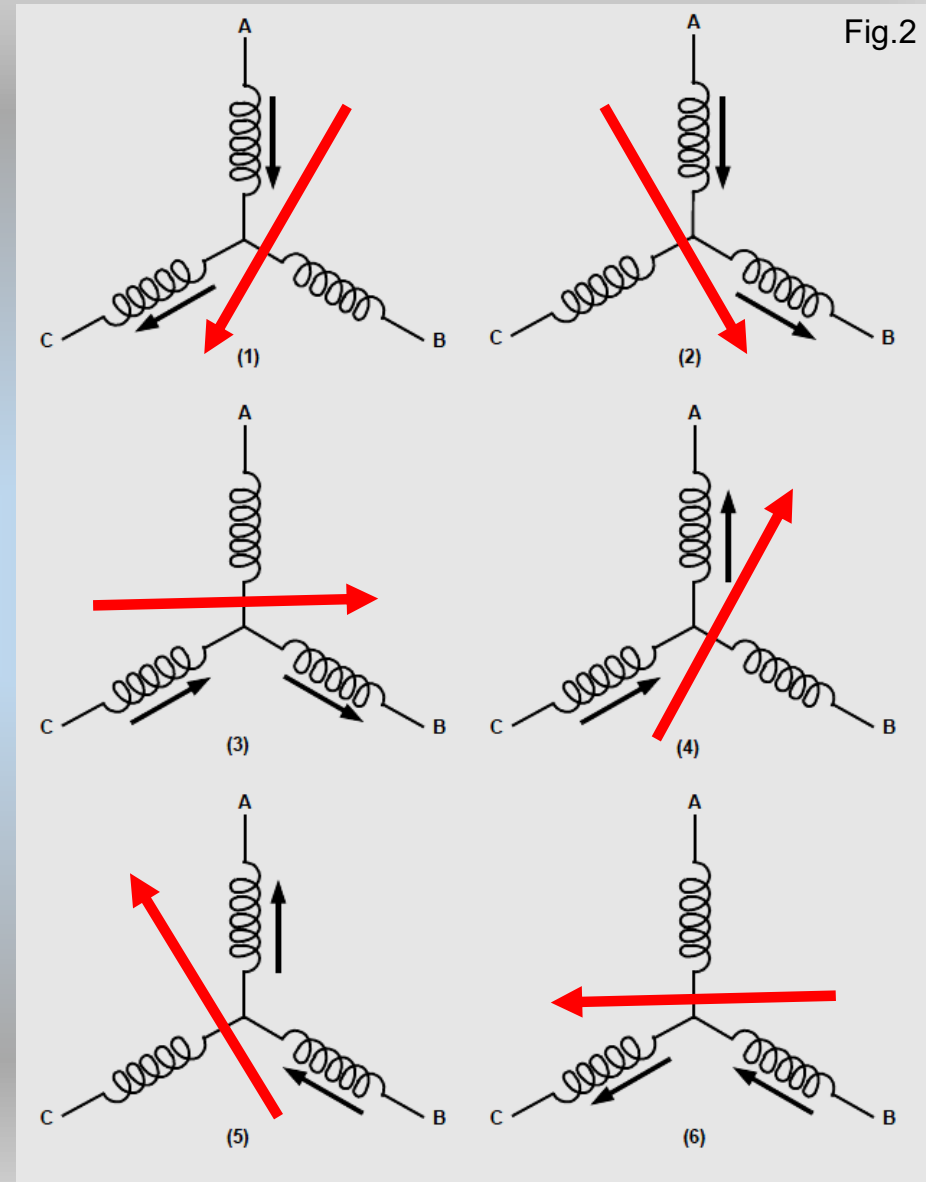


Fig.2

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).

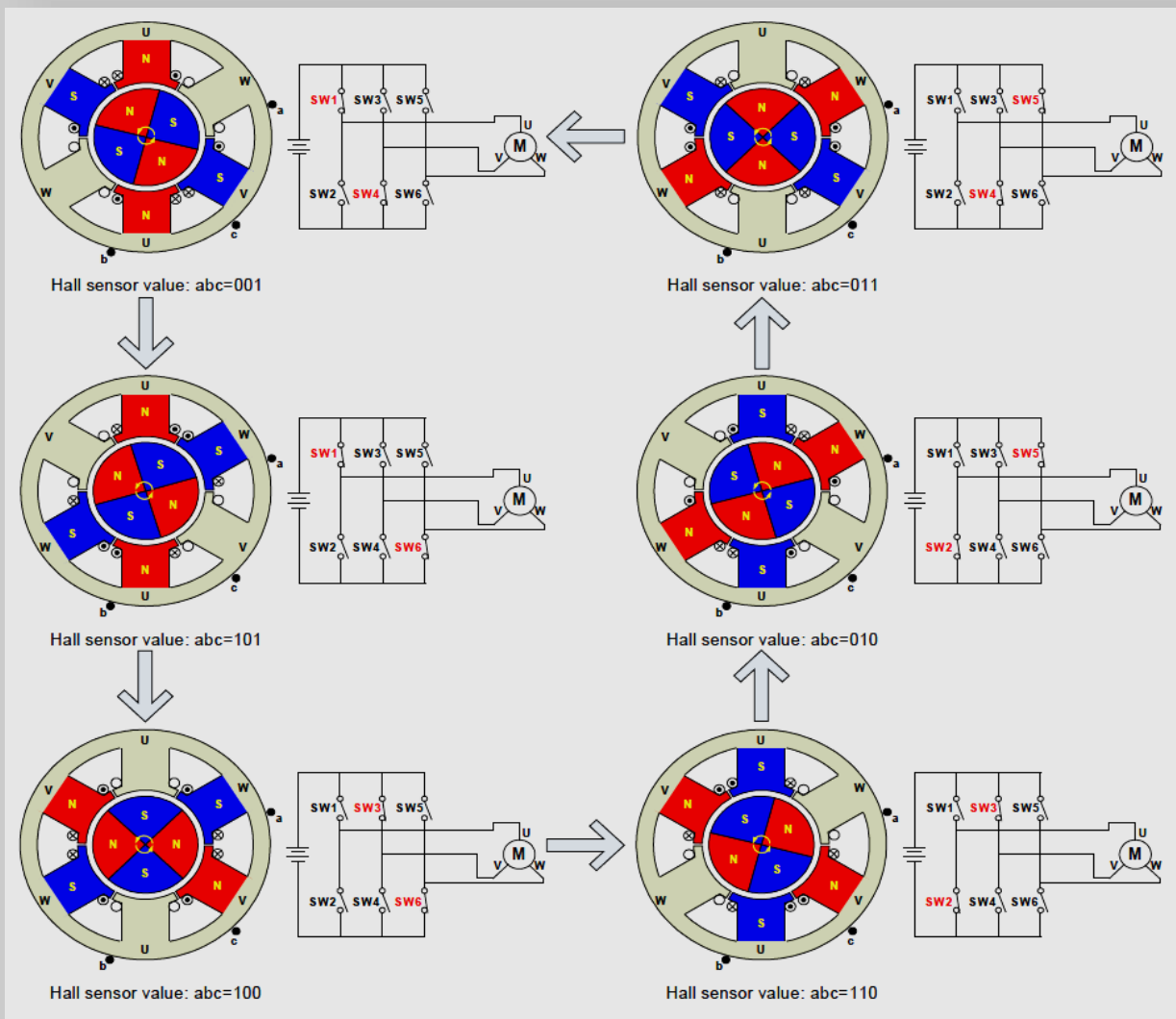
Pasul (3): Se întrerupe curentul prin faza A și se comandă faza C (conduc SW5 și SW4). Câmpul magnetic rezultat (săgeata roșie) se rotește cu încă 60° , în sens antiorar, față de pasul (2).

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 polifazătă distribuită ce determină rotirea sincronă a rotorului.

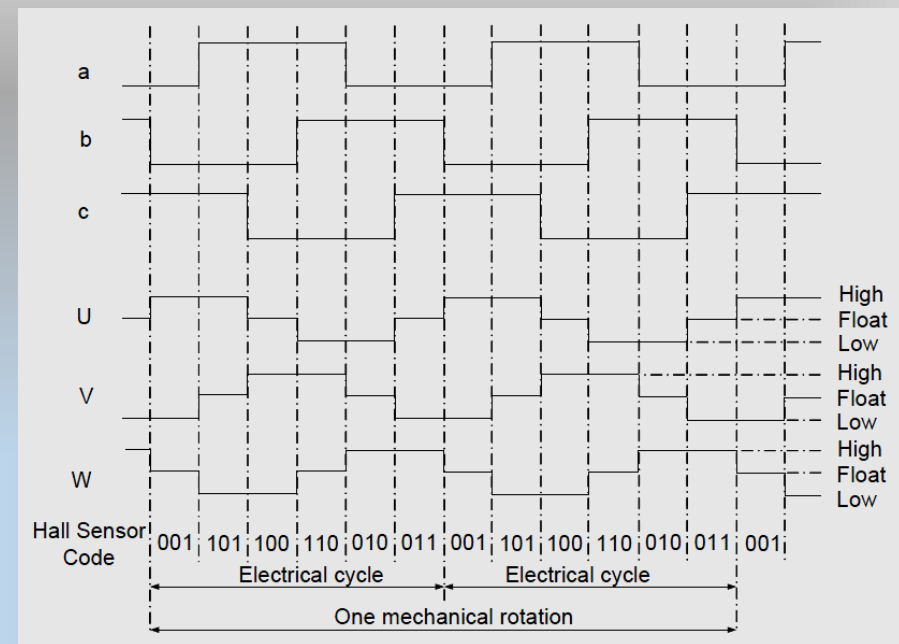
Procesul de comutare a curenților prin fazele statorice seamănă cu procesul comutației de la mașina de c.c.



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.



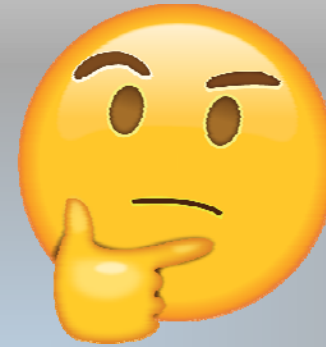
a)



b)

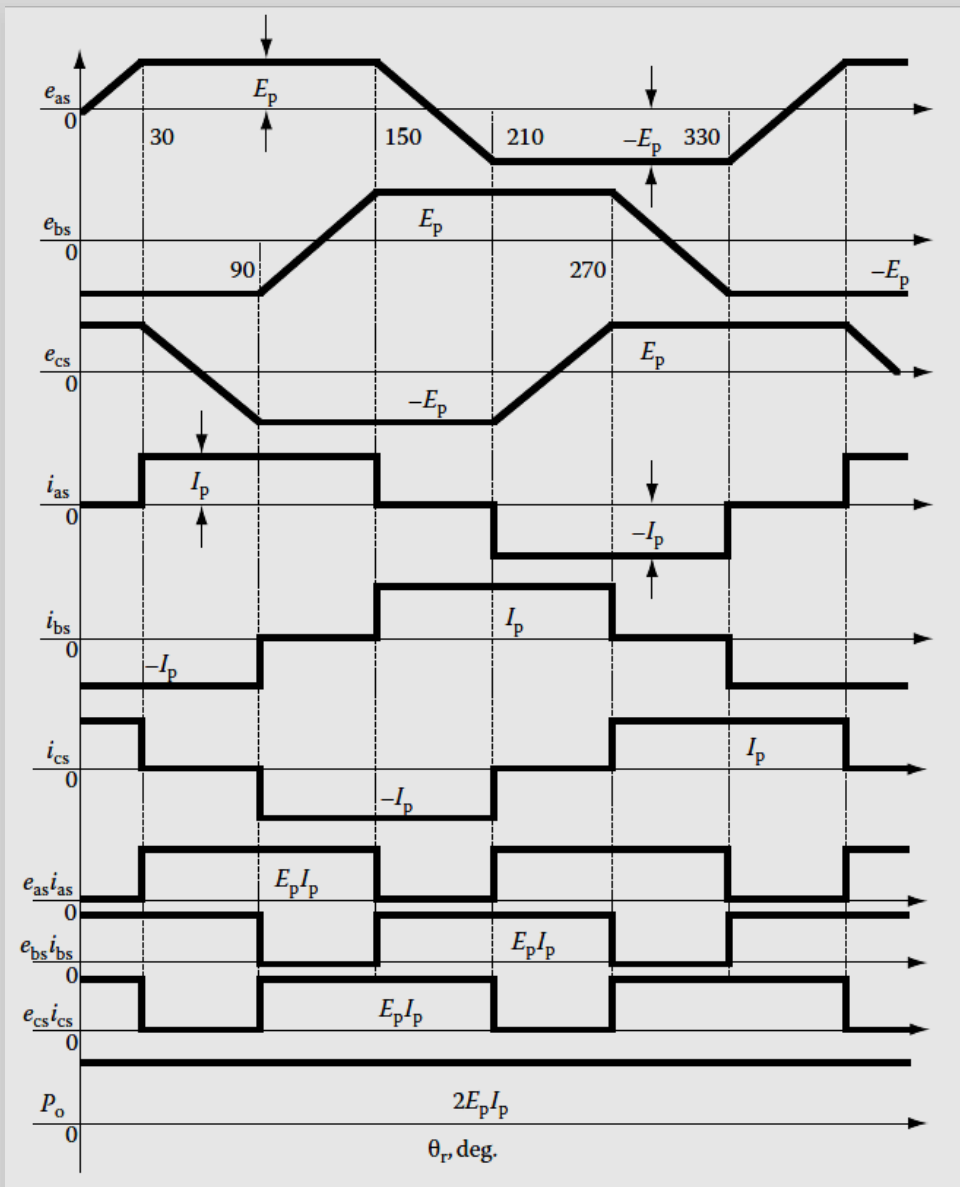
a) Succesiunea pașilor de comanda; b) Forma semnalelor traductoarelor Hall (a,b,c), și a curenților prin cele trei faze statorice (U,V,W).

De reținut



Alimentarea mașinii trifazate **SE POATE FACE** și alimentând **NUMAI** o singură fază la fiecare pas. Cuplul dezvoltat în acest caz se datorează atracției mutuale între polul electromagnetic statoric și polul magnet permanent rotorice.

În **REALITATE**, alimentarea motorului BLDC se face simultan pe două dintre cele trei faze. Astfel, pe lângă atracția dintre poli de polaritate opusă, apar și cupluri de respingere între poli statorici și rotorici de aceeași polaritate. Acest fapt duce la creșterea cuplului dezvoltat de motorul BLDC și la o utilizare mai eficientă a înfășurărilor statorice.



Tensiunea indusă in faza a

Tensiunea indusă in faza b

Tensiunea indusă in faza c

Curentul in faza a

Curentul in faza b

Curentul in faza c

Puterea fazei a

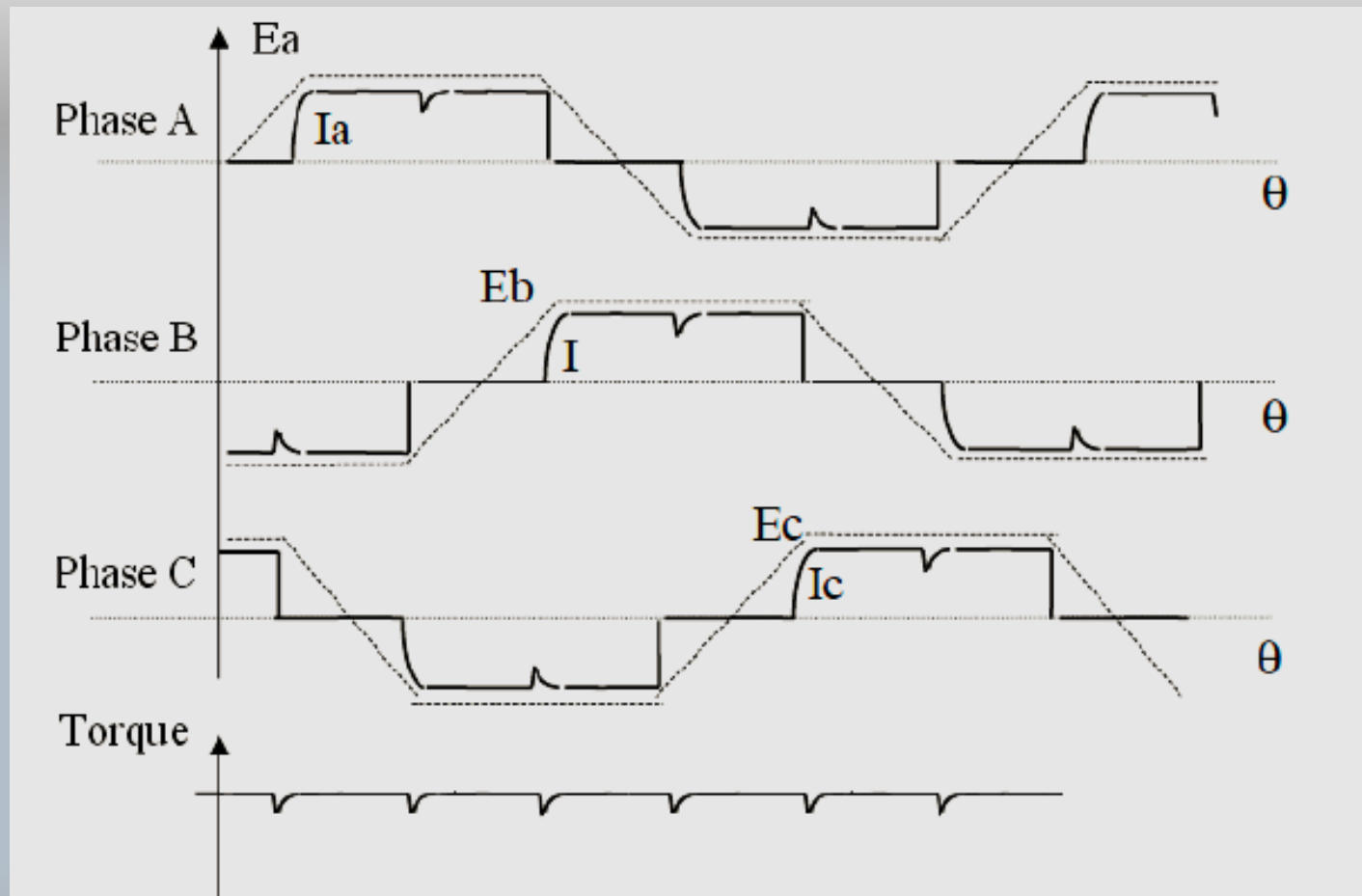
Puterea fazei b

Puterea fazei c

Puterea totală

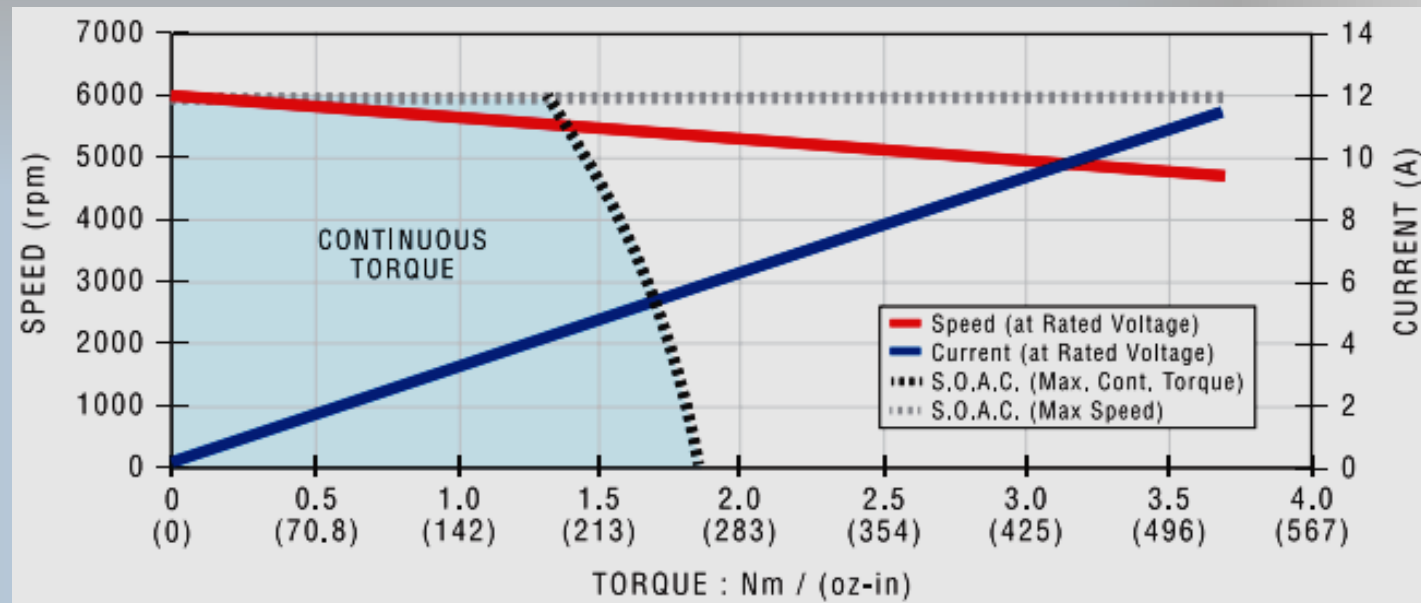
Comanda in curent acoperă cele 120° cât tensiunea indusă are valoarea maximă.

Formele de undă prezentate in figură sunt idealizate. In realitate, datorită inductanței fazelor, curenții sunt cvasi-trapezoidali.



Comutația curenților determină pulsații ale cuplului (acest fenomen nu apare la mașinile PMSM alimentate cu curenți sinusoidali).

Caracteristica mecanica a motorului BLDC



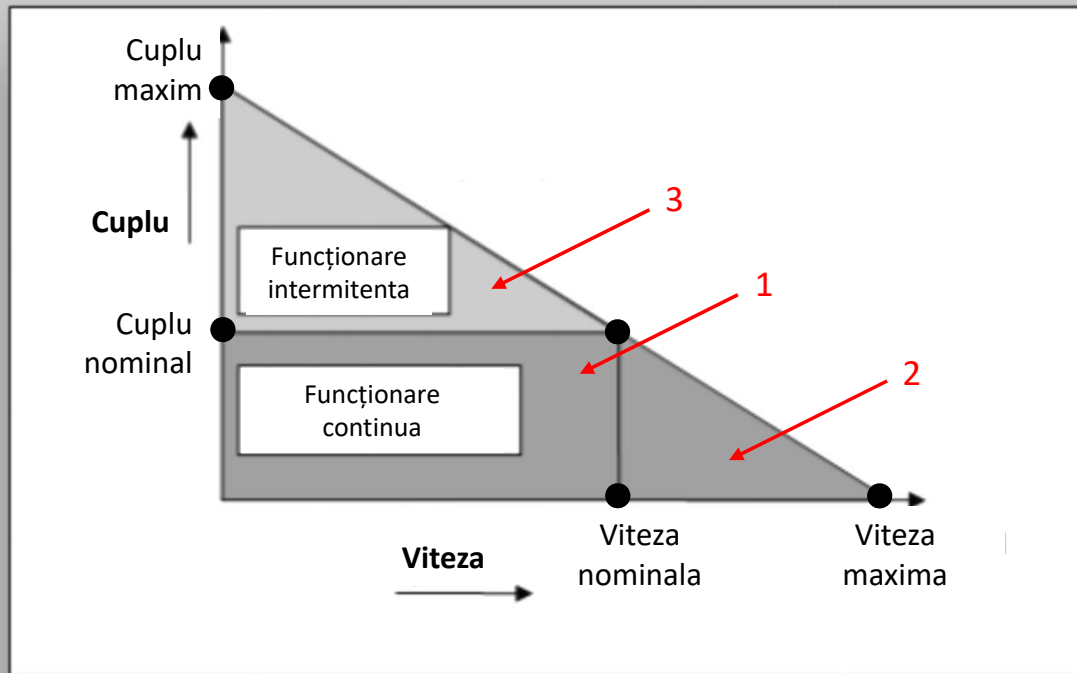
Motor BLDC tip EC083A – Pittman Comp.

$$m_e = \frac{k_m \cdot \Phi_{mp} \cdot \sin \beta}{R_s} \cdot U_s - \frac{k_m \cdot k_e \cdot (\Phi_{mp} \cdot \sin \beta)^2}{R_s} \cdot n$$

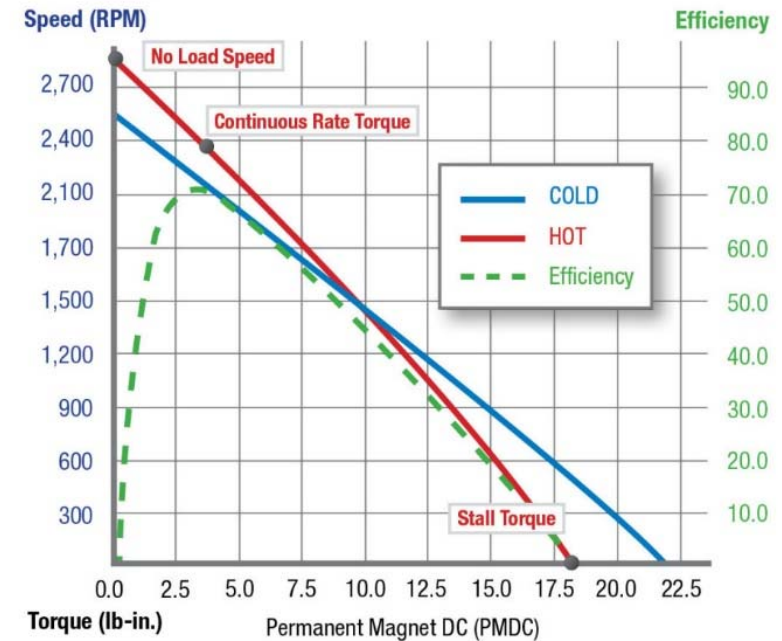
- β este unghiul de decalare in timp a semnalelor furnizate de traductorul de poziție

Caracteristica mecanică este similară cu cea a mașinii de c.c. cu excitație derivație (caracteristica roșie).





„Zone” de funcționare



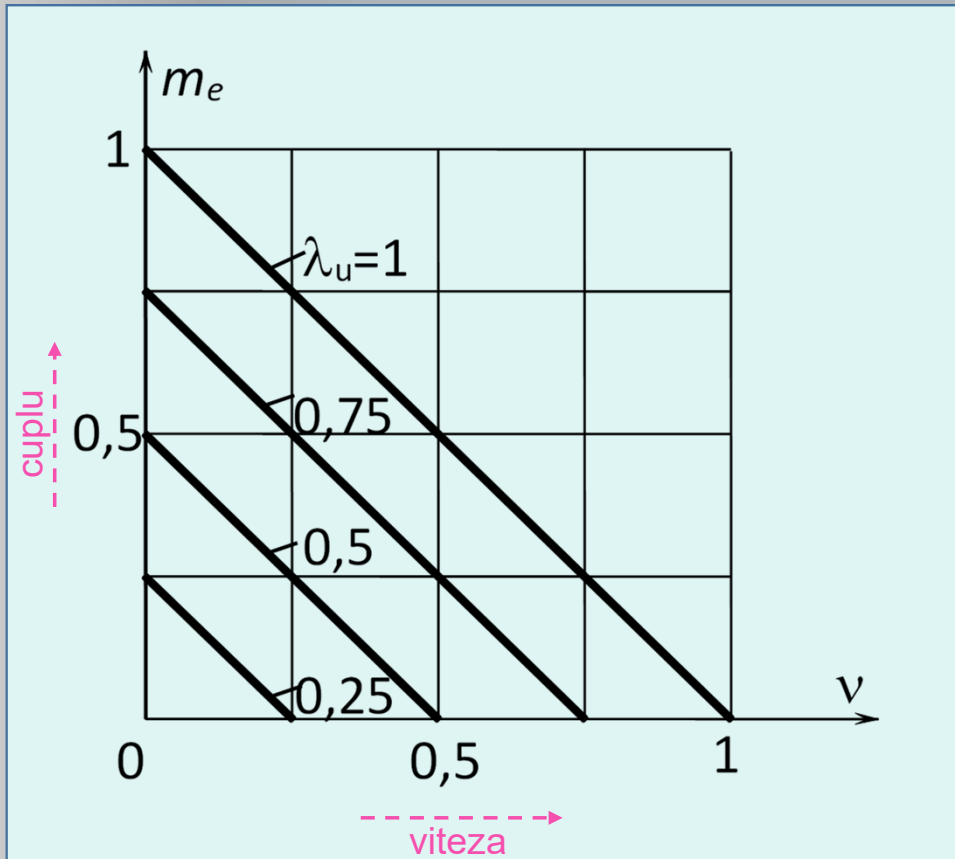
Caracteristica mecanică

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).

Caracteristici mecanice



$$m_e = \frac{M_{e0}}{M_{epN}} \quad - \text{ cuplul mediu relativ}$$

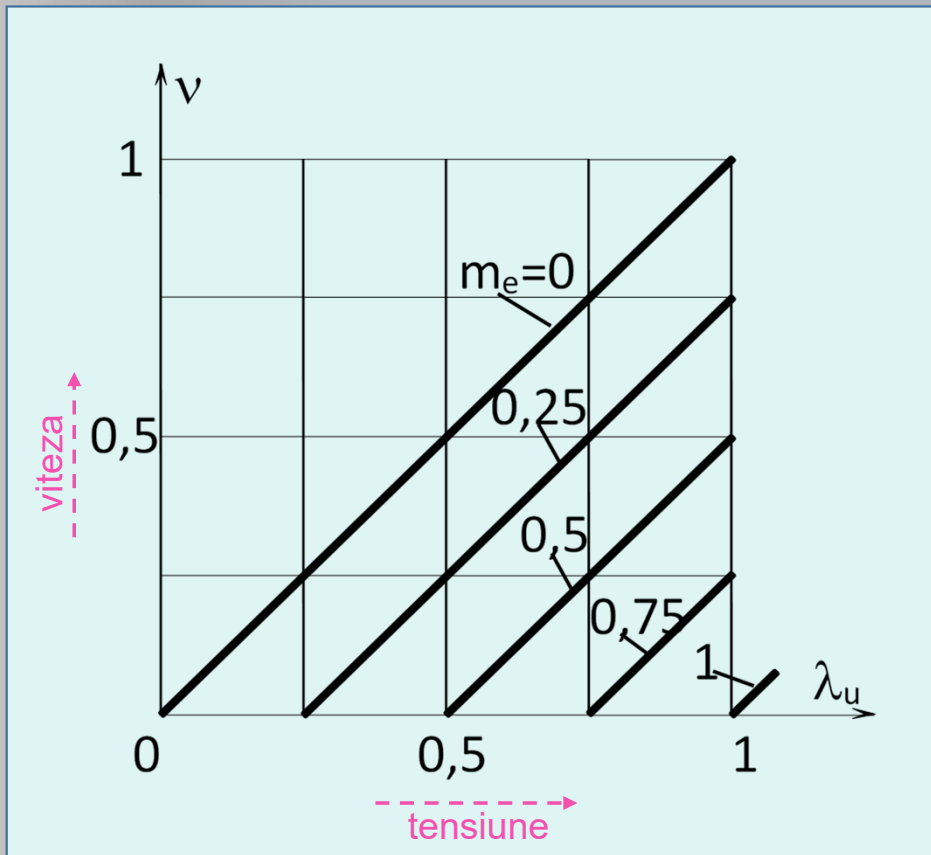
$$v = \frac{n}{n_0} \quad - \text{ viteza relativa}$$

$$\lambda_u = \frac{U_s}{U_{sN}} \quad - \text{ coeficientul de semnal in tensiune}$$

Caracteristicile mecanice (variația vitezei în funcție de cuplu) reprezintă o familie de drepte paralele extrem de favorabilă funcționării în sisteme de comandă cu viteză variabilă (ca servomotor) sau de poziționare.

Reglarea tensiunii se poate obține, de exemplu, prin comanda redresorului ce alimentează inverterul mașinii.

Caracteristici de reglaj



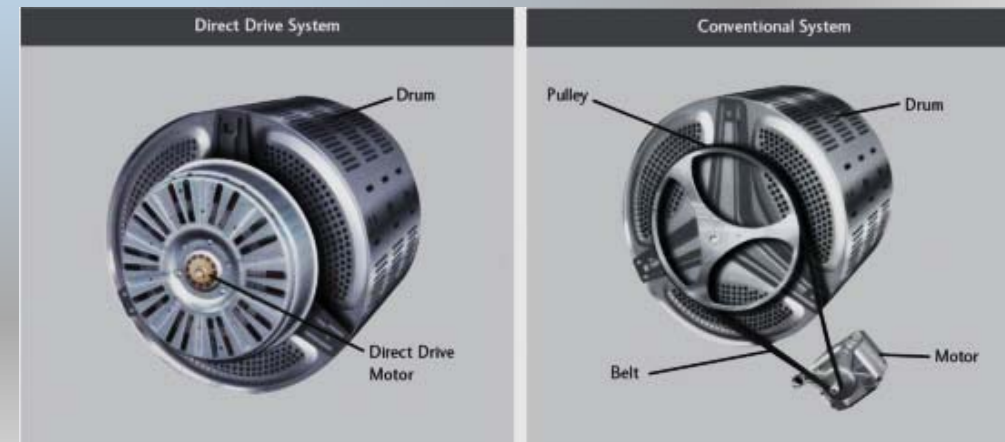
Caracteristicile de comandă (de reglaj), ce prezintă modul de variație a vitezei în funcție de tensiunea de alimentare, pentru diverse cupluri reprezintă, de asemenea, o familie de drepte paralele.



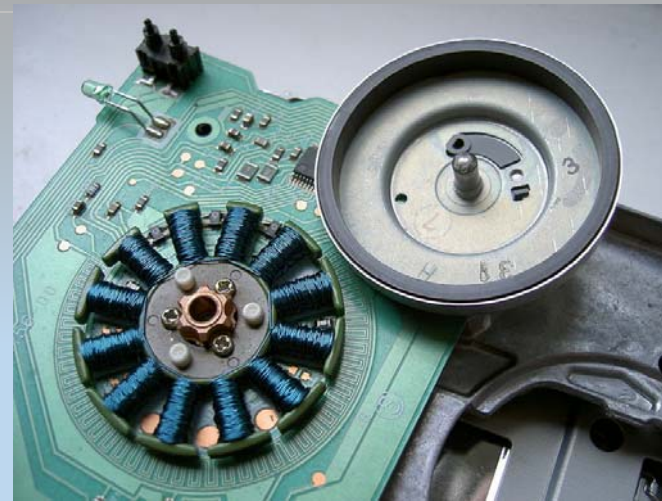
Aplicații



Mașini de spălat LG – direct drive.



Aplicații



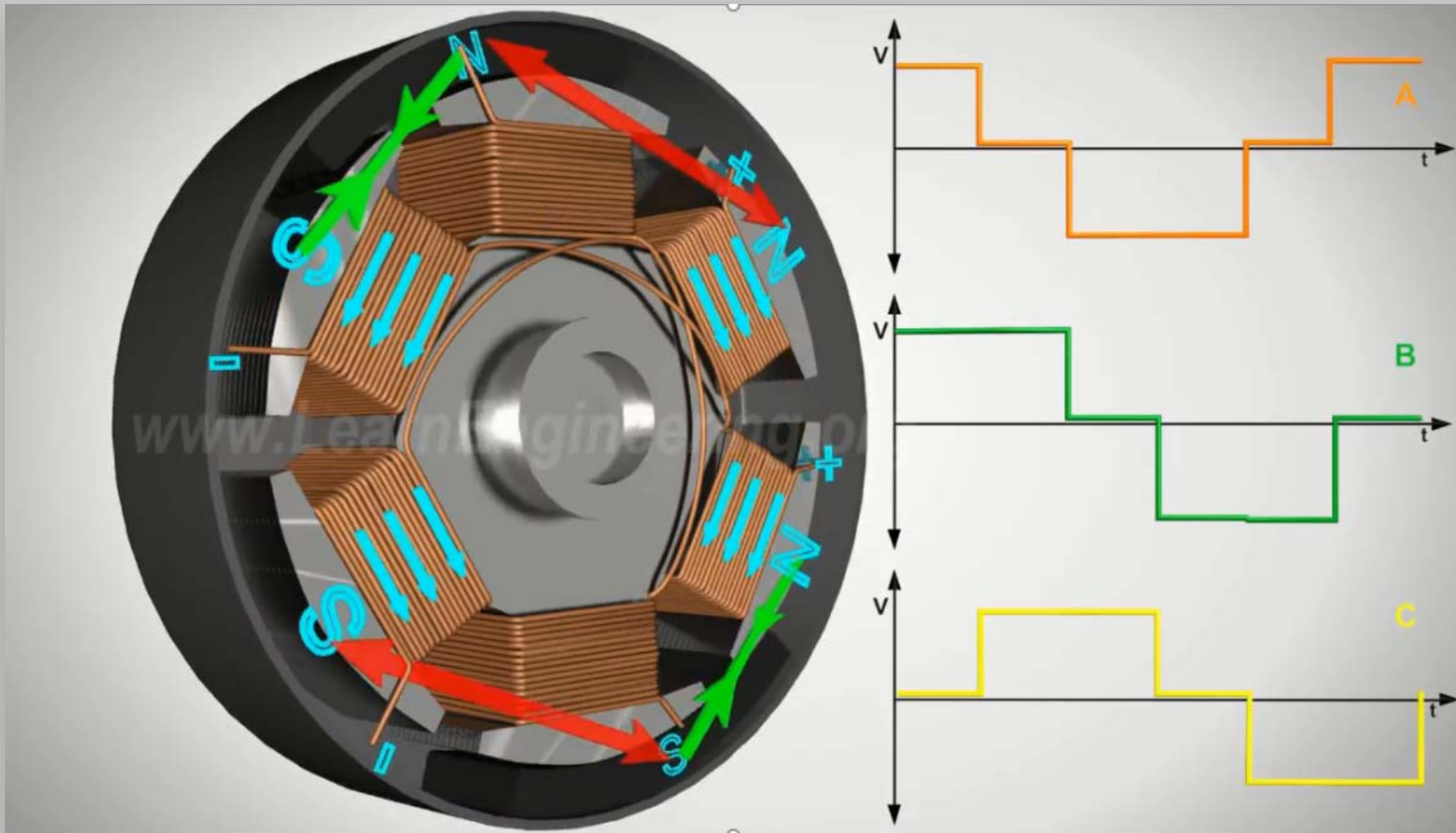
Floppy disk drive



Ventilator

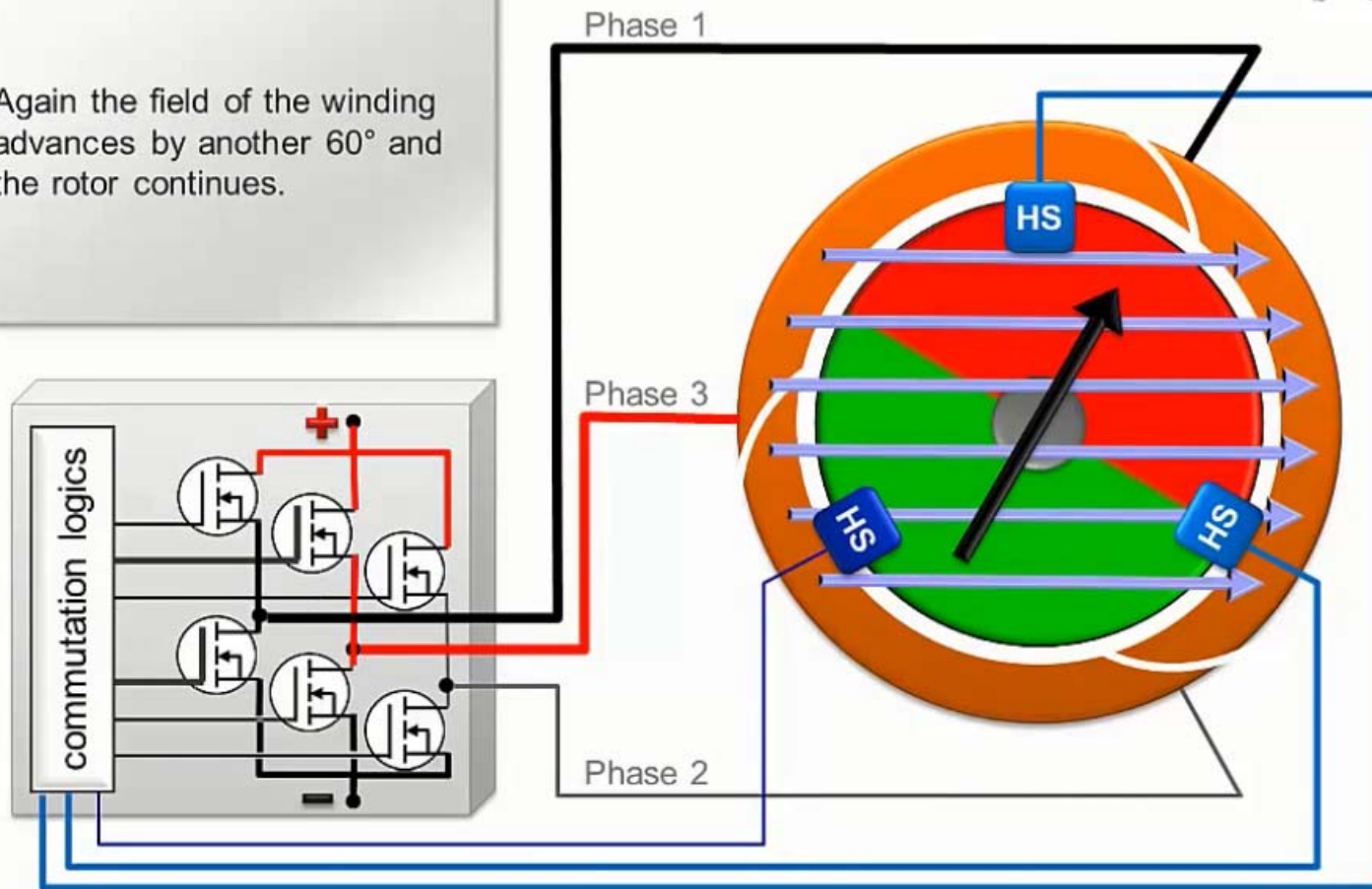


Hard disk drive



Film demonstrativ – construcția și principiul de funcționare la motorul BLDC

Again the field of the winding advances by another 60° and the rotor continues.

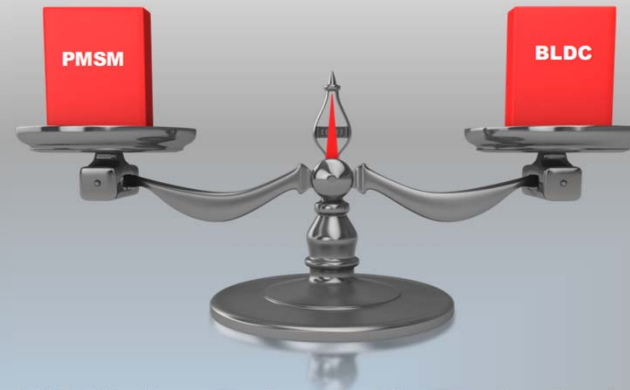


Film demonstrativ – comanda in 6 pași la motorul BLDC

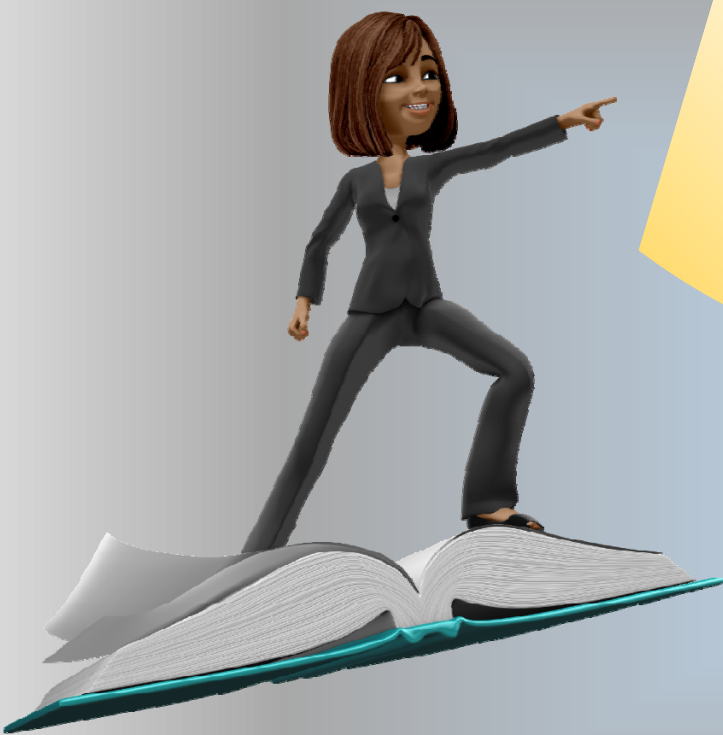


Avantaje	Dezavantaje
Raport CUPLU/VOLUM mare (densitate mare de cuplu)	Existența unei scheme de comandă și control electronice complexe fără care mașina NU poate funcționa
Randament ridicat	
Gamă largă de viteze	
Întreținere simplă	
Răspuns dinamic foarte bun	
Funcționare silențioasă	
Caracteristici mecanice și de reglaj paralele	

Comparație PMSM vs BLDC



1. **BLDC dezvoltă o putere mai mare cu 15.4% față de PMSM (la aceleași dimensiuni și mărimi electrice de intrare);**
2. **Circulația curenților prin înfășurările BLDC respectă un ciclu de 2/3 în comparație cu PMSM, unde curenții sunt permanenți prin cele trei faze. Pentru inverterul de alimentare aceasta presupune un timp mai mare de răcire a semiconductoarelor, ceea ce mărește fiabilitatea termică.**
3. **Curenții furnizați pentru înfășurările BLDC sunt rectangulari. Obținerea lor în inverter, pentru diverse frecvențe, este mai ușoară decât cea a curenților sinusoidali din PMSM.**
4. **Complexitatea sistemului cu senzori de tip Hall este mai mică decât cea folosită pentru PMSM (de regulă cu encoder).**
5. **Pulsațiile de cuplu în BLDC, datorate comutației curenților, sunt mari în comparație cu PMSM.**



Motor cu
comutație
electronica.

Infasurari pe
dinte.

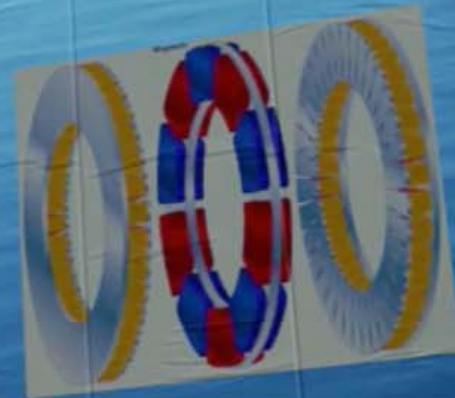
Curent
rectangular.

Back EMF
trapezoidal.

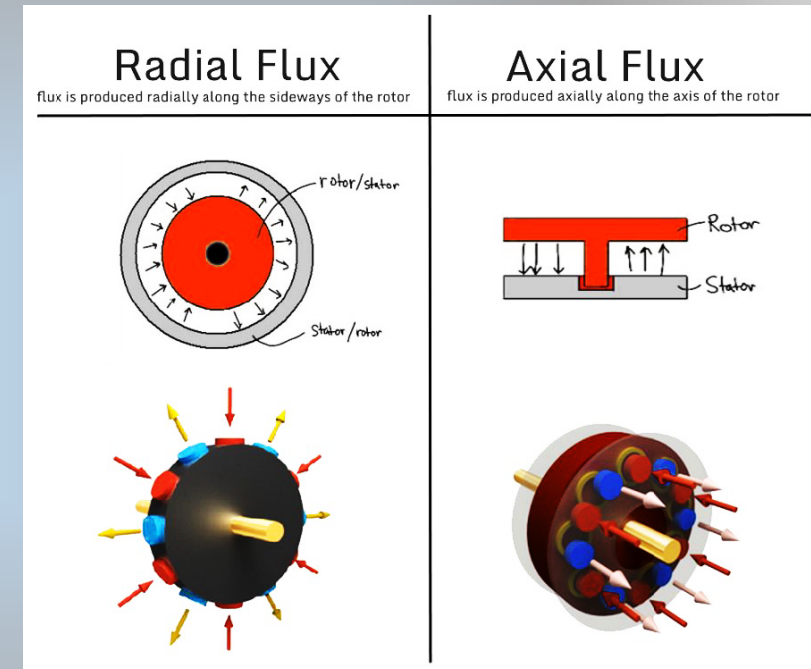
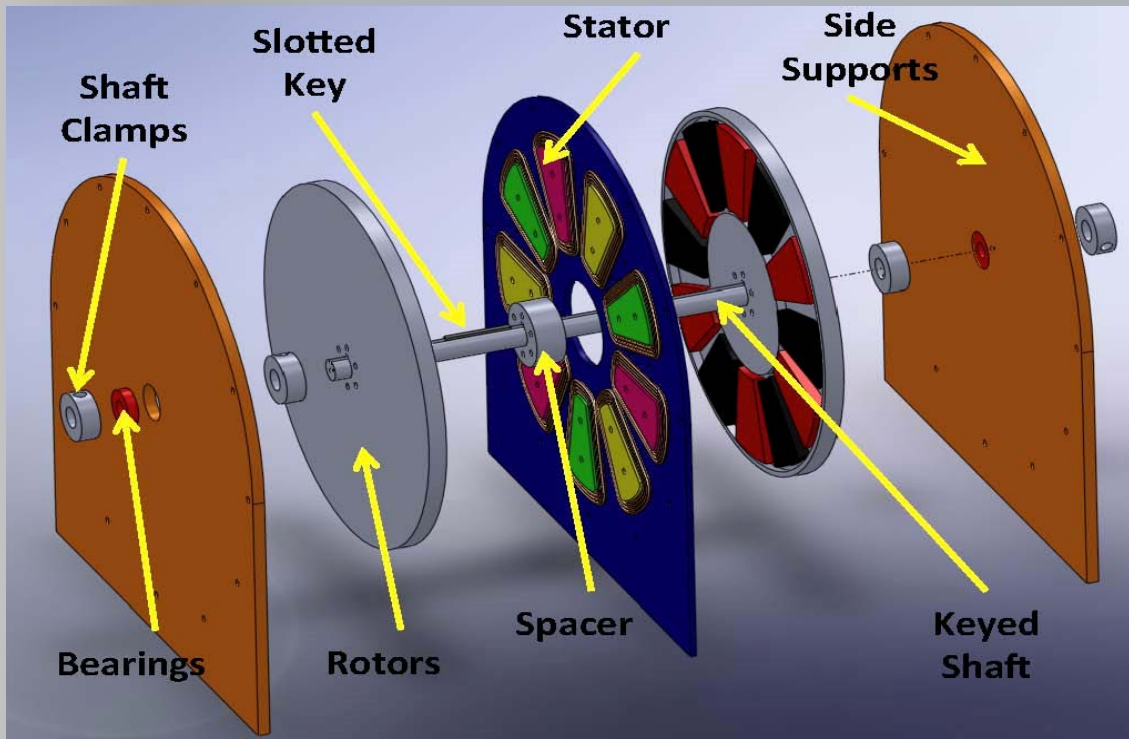
Comanda in 6
pasi.

Cuvinte cheie

**Masini cu flux axial
si magneti permanenti**

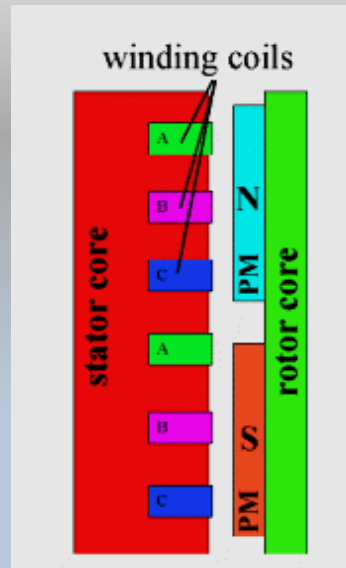
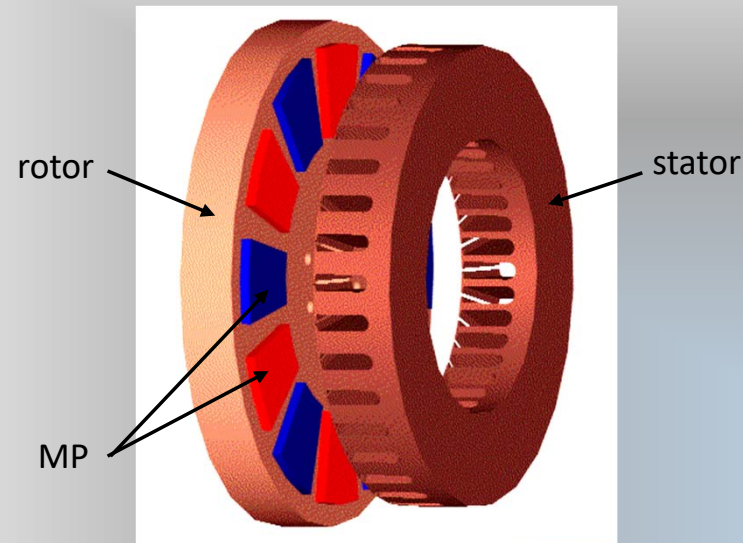


Axial Flux Permanent Magnet (AFPM)



- La mașinile cu flux axial, liniile de câmp magnetic se închid pe trasee paralele cu axul mașinii.
- Statorul și rotorul ocupă poziții „față în față”.





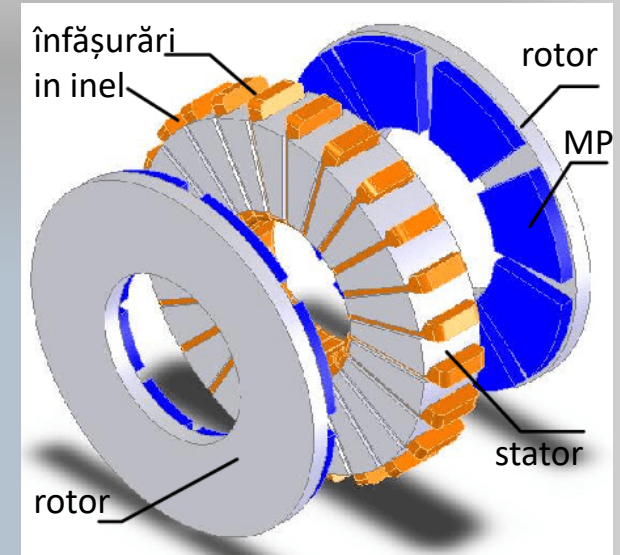
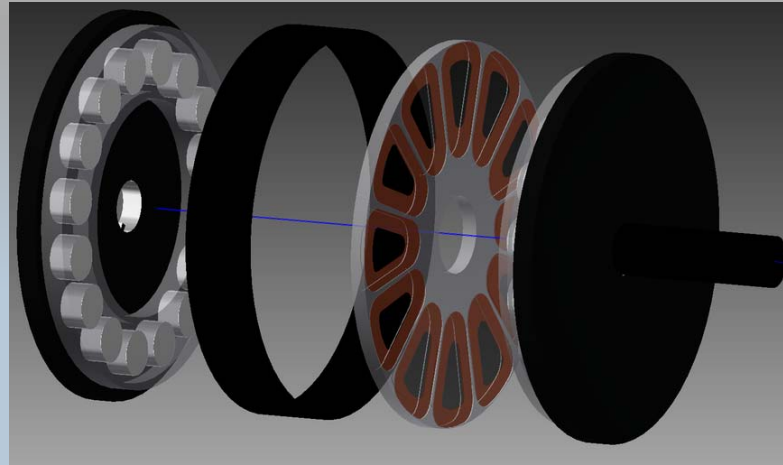
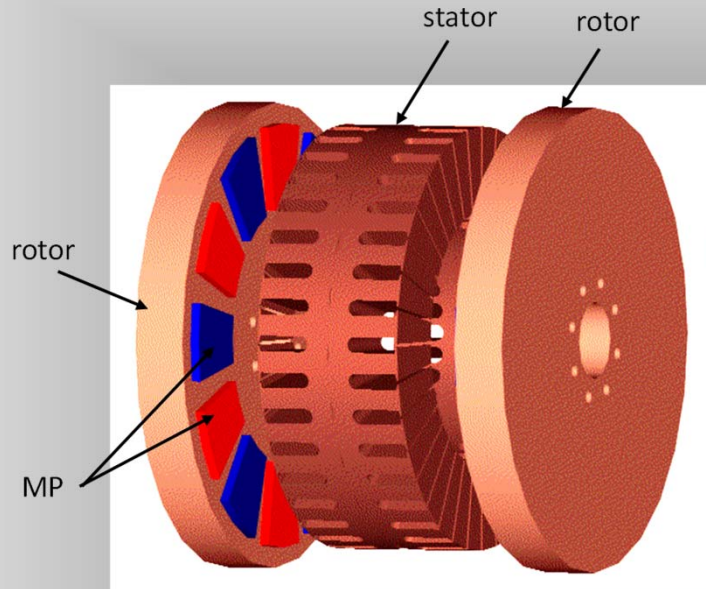
a.



b.

Structura cu un stator și un rotor

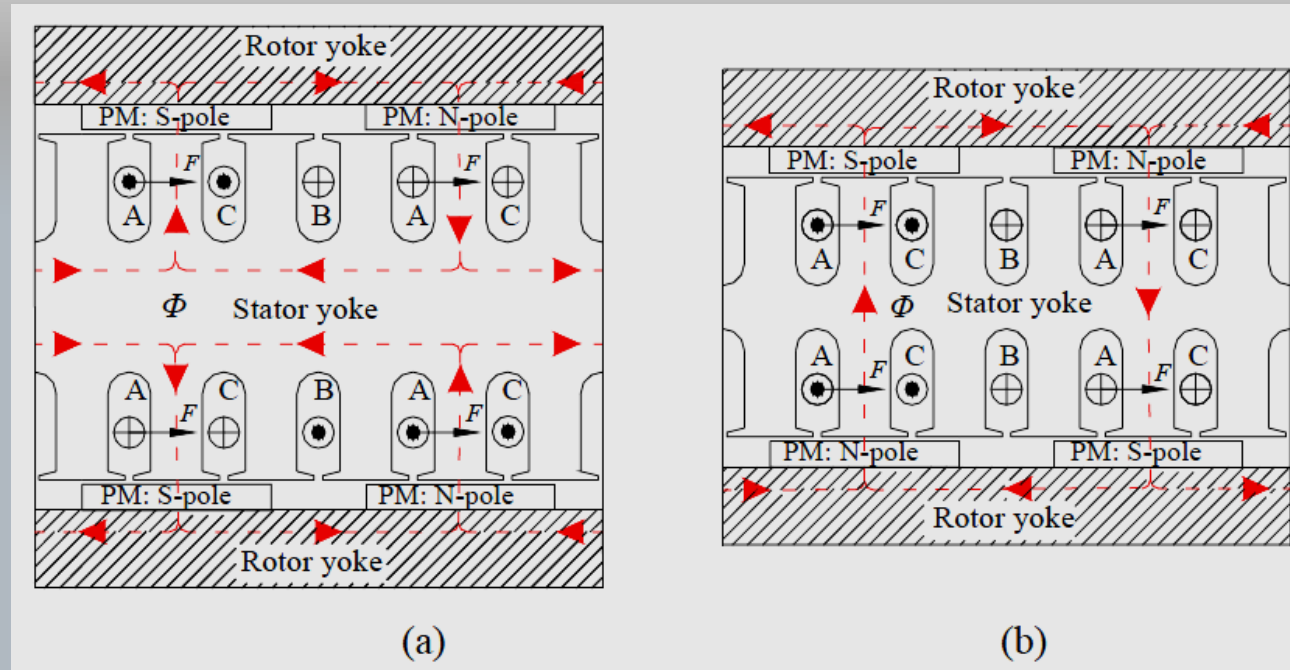
- este structura cea mai simplă de mașină cu flux axial și magneți permanenți;
- este o structură „dezechilibrată”. Datorită forțelor de atracție electromagnetică ce se manifestă pe direcție axială, este nevoie de un sistem de rulmenți mult mai complex și un rotor mai gros;
- Statorul poate avea creștături (ca în figura b) sau fără creștături (fig. a), caz în care bobinele sunt lipite (și înglobate) într-o rășină;
- În cazul magneților permanenți de pe rotor se poate folosi aranjamentul Halbach. Partea cu câmp amplificat este către stator iar atât statorul cât și rotorul pot fi din material neferomagnetic.



Structura cu un stator și două rotoare (structura tip TORUS)

- este o structură „echilibrată”. Forțele de atracție electromagnetică se manifestă pe direcție axială in mod egal dar in direcții opuse astfel încât rezultă un echilibru al acestora;
- Pe stator pot fi plasate înfășurări de tip repartizat (după regulile mașinilor cu flux radial) sau in inel (mănușchiul de ducere a fiecărei bobine într-o latură a statorului iar mănușchiul de întoarcere in creștătura vecină de pe latura opusă);

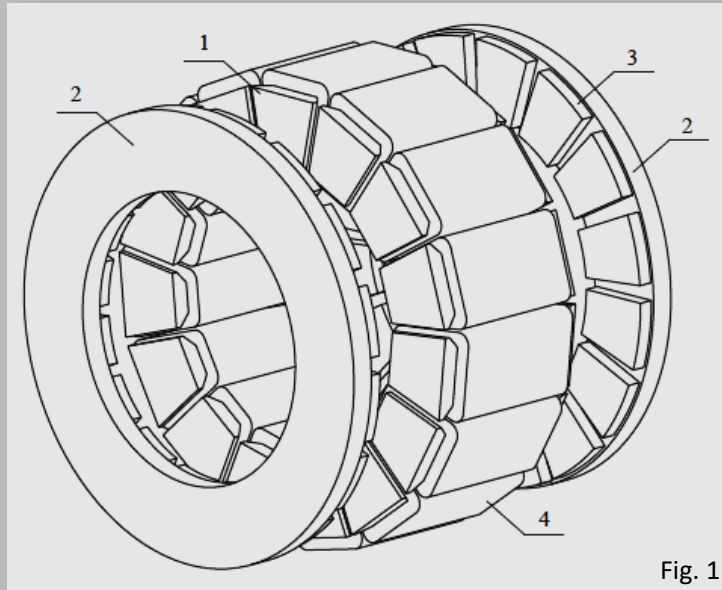
Structura cu un stator și două rotoare (structura tip TORUS)



Fixarea magnetilor pe cele două rotoare determină modul de închidere a liniilor de câmp:

- In figura (a), magnetii de aceeași polaritate sunt plasați față in față. In stator, liniile de câmp se închid pe circumferință. Lățimea statorului trebuie să fie mai mare astfel încât să nu apară saturație;
- In figura (b), sunt plasați față in față magnetii de polarități diferite. Liniile de câmp se închid axial prin stator. Lățimea statorului este mai mică decât in cazul precedent.
- In varianta (a), înfășurările statorului pot fi atât de tip repartizat cât și de tip toroidal. In varianta (b), înfășurările pot fi numai de tip repartizat.

Structură cu două rotoare și stator segmentat și fără jug (structura tip YASA - „Yokeless Axial Segmented Armature”)



1-element (dinte) statoric; 2-rotor; 3-MP; 4-bobina statorică.

Întrucât în varianta TORUS (b) jugul statoric nu este utilizat drept cale de închidere a liniilor de câmp, acesta poate fi eliminat complet.

Satorul are o construcție modulară (Fig. 2), din piese feromagnetice (2) independente, ce reprezintă dinții, pe care sunt plasate înfășurări de tip concentrat (3). Toate acestea sunt fixate pe suporti preformați (1).

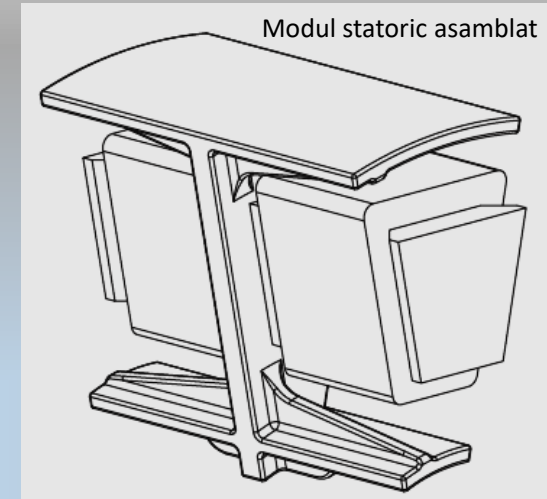
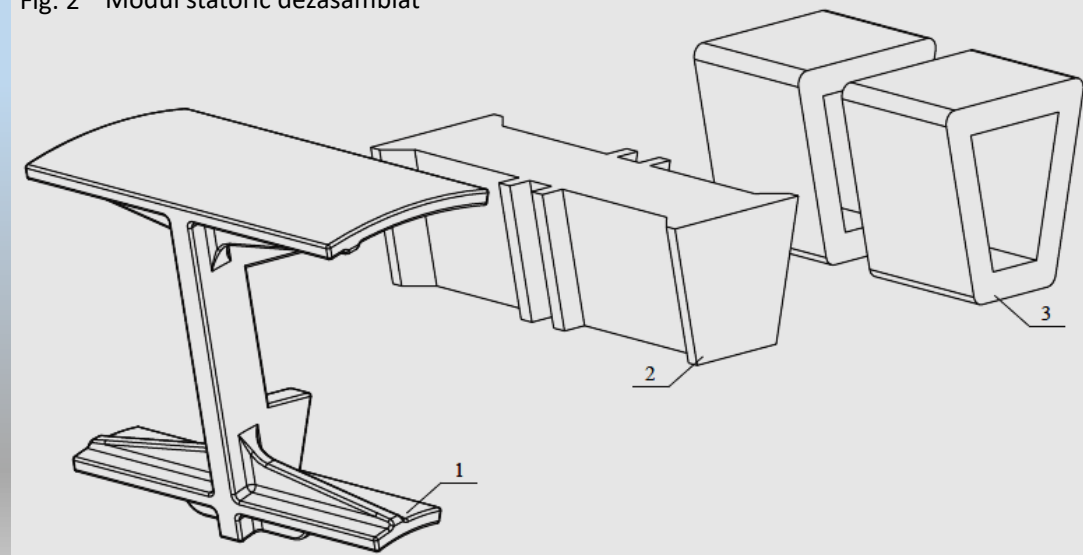
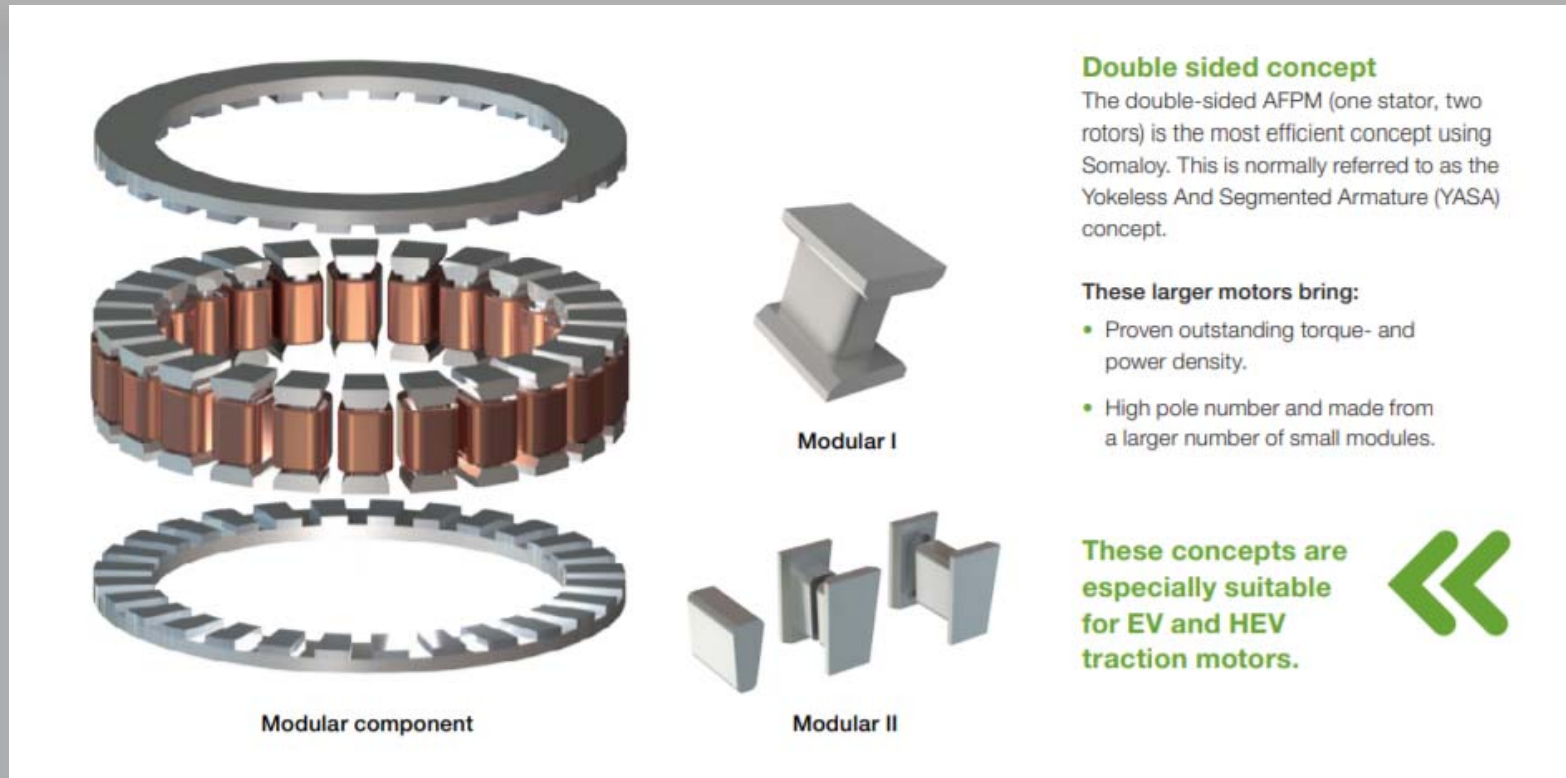


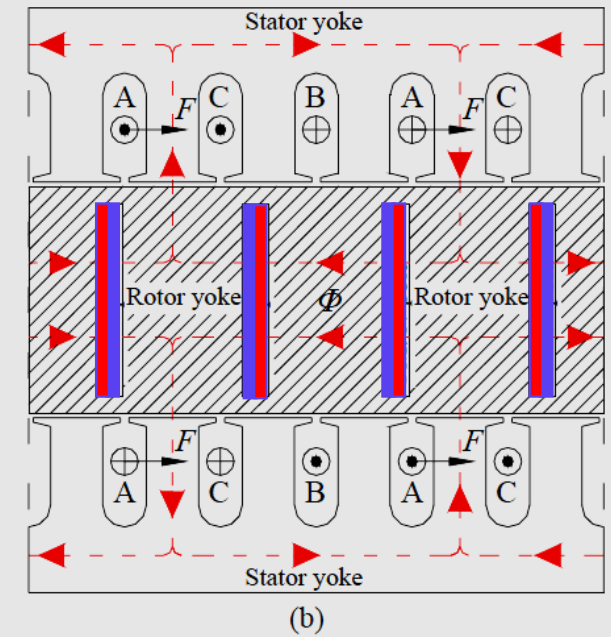
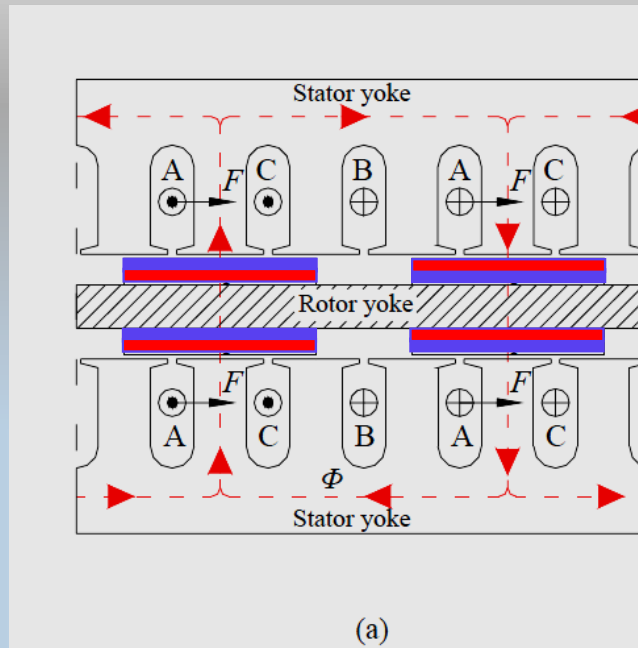
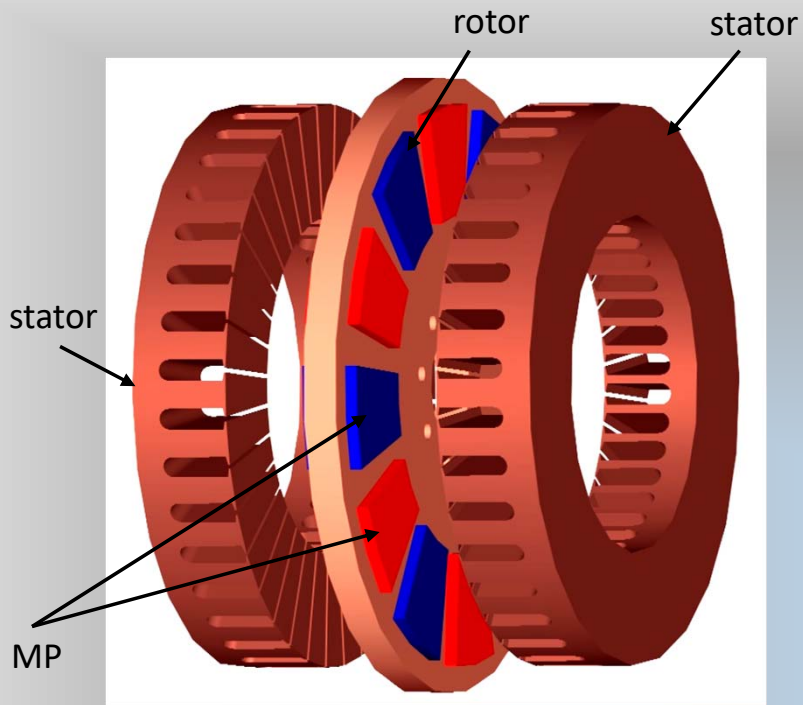
Fig. 2 Modul statoric dezasamblat



Structură cu două rotoare și stator segmentat și fără jug (structura tip YASA - „Yokeless Axial Segmented Armature”)

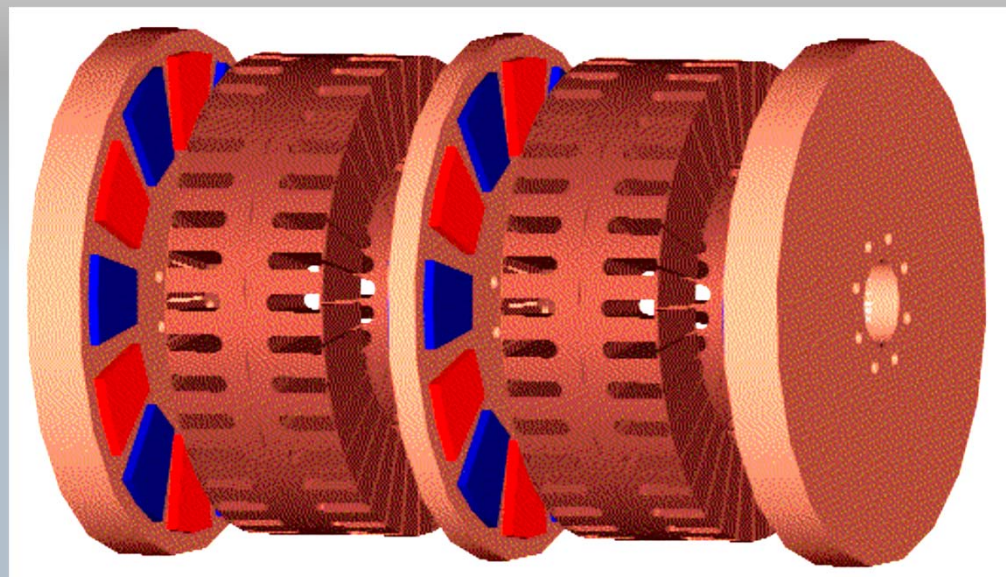


Construcția modulară oferă numeroase avantaje: versatilitate în construcția statorului (alegerea numărului de dinți și bobine pentru o mare varietate de structuri), simplificarea recondiționării înfășurării statorice prin înlocuirea doar a „modulului” defectat, simplitatea în realizarea bobinelor fiecărui modul, etc.



Structura cu un rotor și două statoare

- In figura (a) sunt magneți plasați pe ambele fete ale rotorului. Liniile de câmp se închid axial prin rotor care are o lățime mică. Este posibilă și o construcție cu un singur magnet permanent introdus în rotor. În acest caz rotorul poate fi realizat din material neferomagnetic.
- In figura (b) este o structură cu magneți interiori (favorabilă funcționării la turații mari). Prin rotor, liniile de câmp se închid pe circumferință, ceea ce duce la o grosime mai mare a acestuia.



Structură multiplă

- **Pe același ax sunt plasate mai multe mașini în vederea creșterii puterii întregului ansamblu;**
- **Acest tip de structură poate fi folosit pentru propulsia navelor, instalații de pompare sau generatoare de viteză ridicată.**

Tipuri de înfășurări în mașinile cu flux axial



Înfășurări in inel



Înfășurări concentrate pe dinte

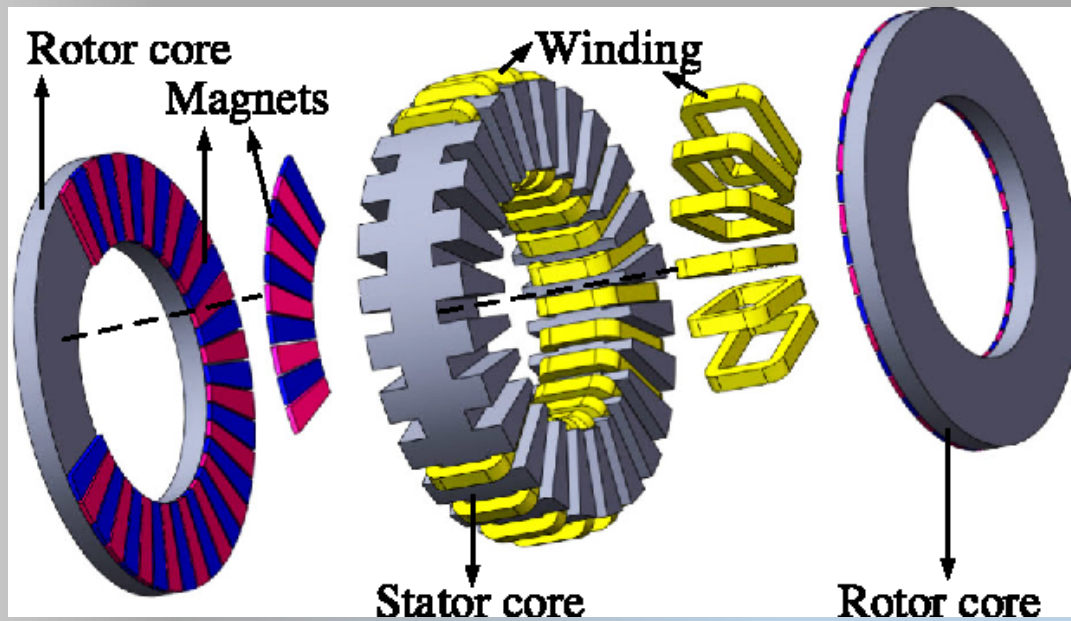


Înfășurări concentrate pe suprafață



Înfășurări repartizate in crestături

1. Înfășurări de tip inel



Se potrivesc, cel mai bine, la varianta cu stator plasat între rotoare și polarizare de tip NN a magneților permanenți aflați față în față pe cele două rotoare.

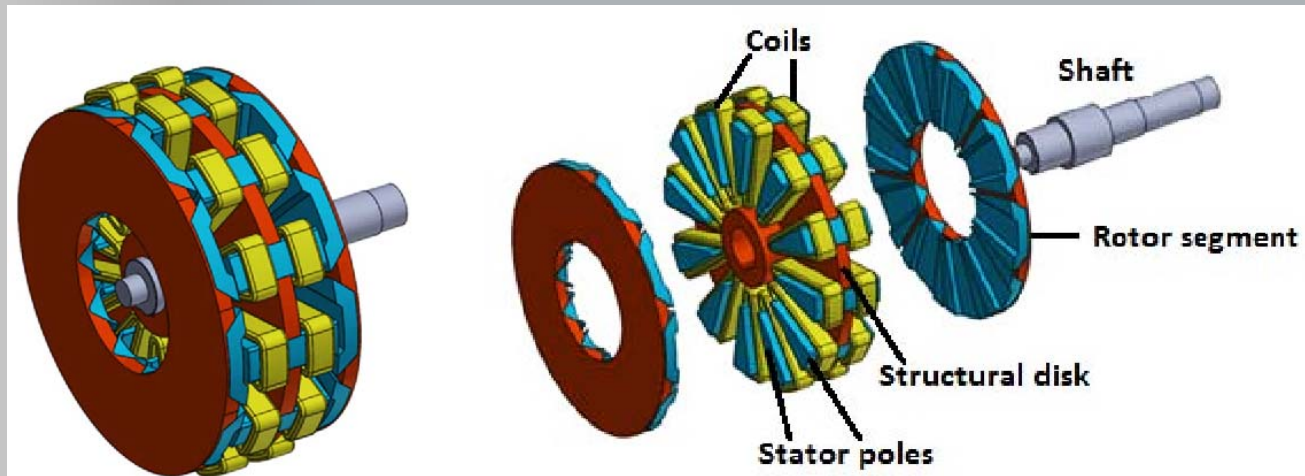
Părțile active ale bobinelor se găsesc de o parte și de alta a statorului iar părțile frontale corespund lățimii jugului statoric.

Înfășurările pot fi plasate în creștături sau direct pe suprafața netedă a statorului.

Părțile frontale ale bobinelor sunt mai mici decât la înfășurarea echivalentă în tobă.



2. Înfășurări de tip concentrat pe dinte



Se folosesc mai ales în cazul mașinilor tip BLDC și a mașinilor cu q fracționar subunitar.

Tehnologia realizării și montării acestor bobine este mult mai simplă decât în cazul înfășurărilor în tobă.

Înfășurările sunt plasate pe dinții aparenti ai statorului.



3. Înfășurări de tip concentrat



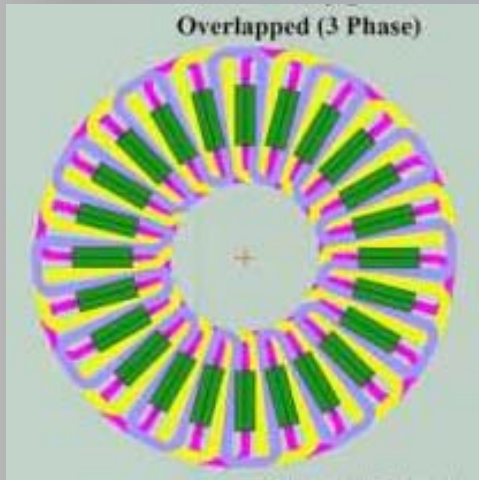
Se folosesc la statoarele la care sunt eliminați dinții și creștăturile.

Pentru fixare, înfășurările sunt înglobate în rășini.

Pentru aceste construcții, întrefierul mașinii se mărește și este necesară folosirea unor magneți permanenți mai puternici sau a unui volum mai mare de magnet.



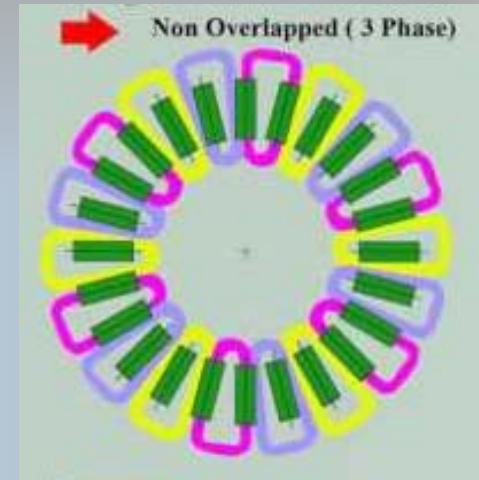
4. Înfășurări de tip repartizat in crestături



Înfășurare in tobă, de tip repartizat, plasată in crestături.



Înfășurare pe dinte, plasată in crestături sau fără crestături.



Se folosesc la statoarele prevăzute cu dinți și crestături.

Permit un număr mai mare de conductoare.

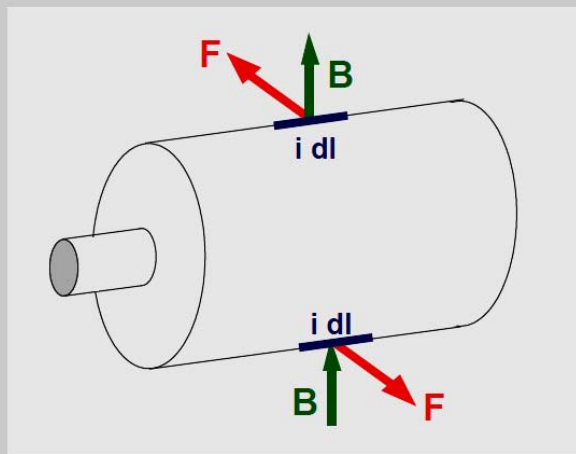
Întrefierul este dictat doar de considerente tehnologice (lățimea întrefierului este mai mică decât in cazul înfășurărilor lipite pe suprafață).



Studiu comparativ

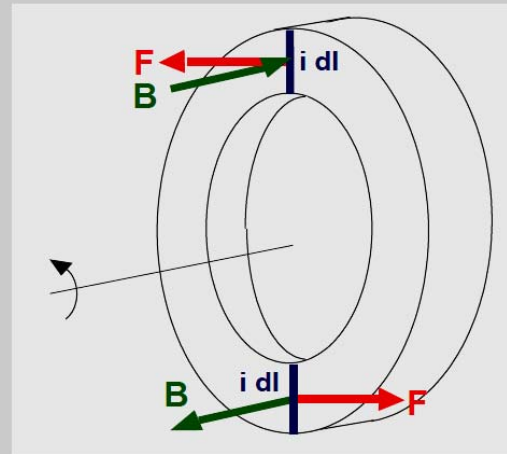
Mașina cu flux radial vs. Mașina cu flux axial

Radial-Flux Machine

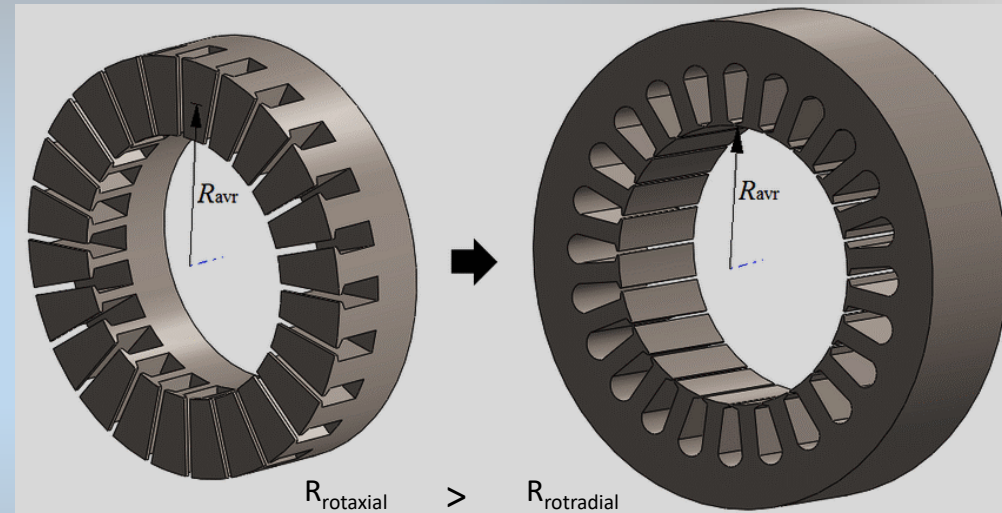


$$T = k_{rf} D^2 L$$

Axial-Flux Machine



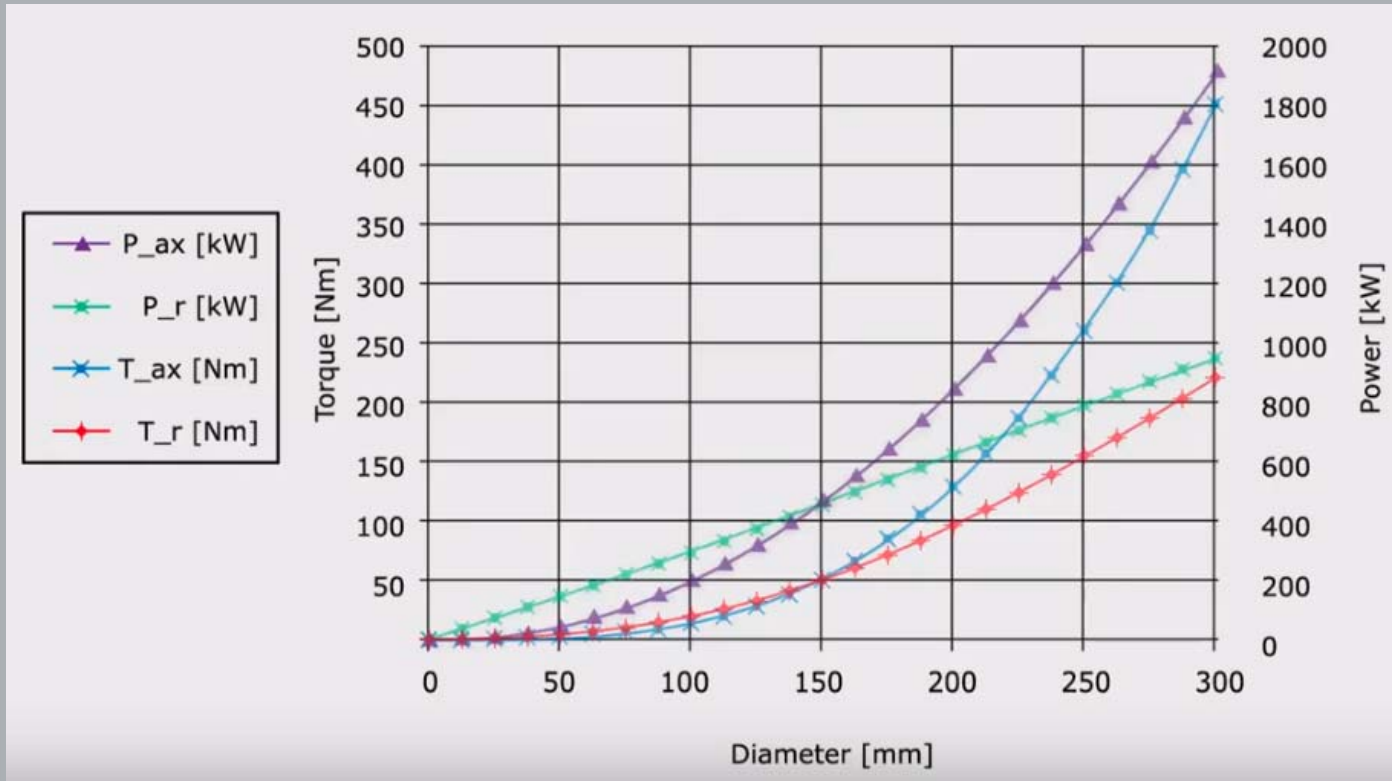
$$T = k_{af} D^3$$



Diametrul de calcul al cuplului electromagnetic dezvoltat este mai mare la mașina cu flux axial decât la mașina cu flux radial (pentru același diametru exterior).

Se poate aprecia că, la același diametru exterior, cuplul dezvoltat de mașina cu flux axial este mai mare decât cel al mașinii cu flux radial, însă sub rezerva că lungimea mașinii cu flux radial este mai mică decât diametrul D .

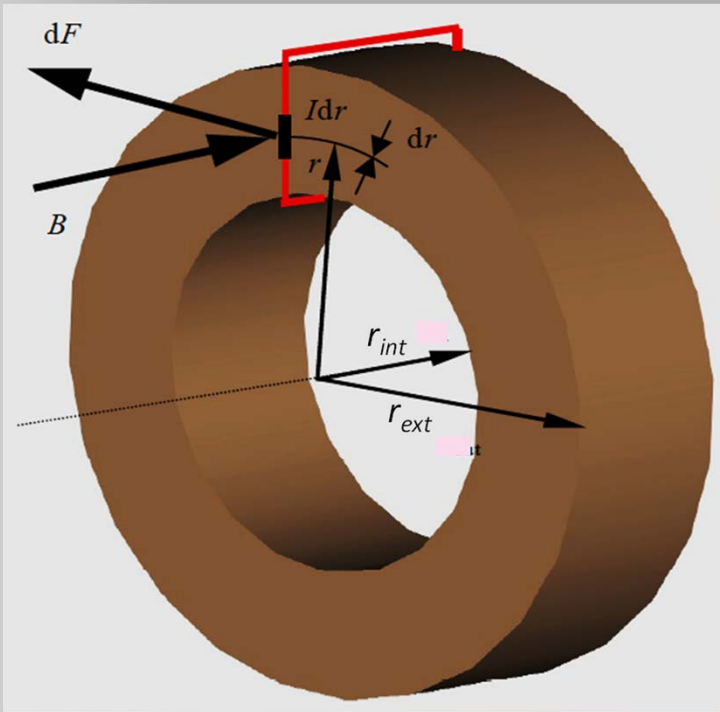
Pentru diametre peste 150 mm, puterea și cuplul dezvoltate de mașina cu flux axial cresc mult mai repede în comparație cu mașinile cu flux radial.



Caracteristicile de cuplu și putere pentru mașini cu flux axial respectiv radial.



Expresia cuplului electromagnetic



Expresia cuplului dedusă din apariția forței ce acționează la suprafața miezului statoric este:

$$dM_{em} = 2\pi \cdot r_{int} \cdot A_{int} \cdot B_{max} \cdot r \cdot dr$$

unde: A_{int} – pătura de curent (densitatea liniara de curent); B_{max} – valoarea maxima a inducției în întrefier datorită câmpului magneților permanenți.

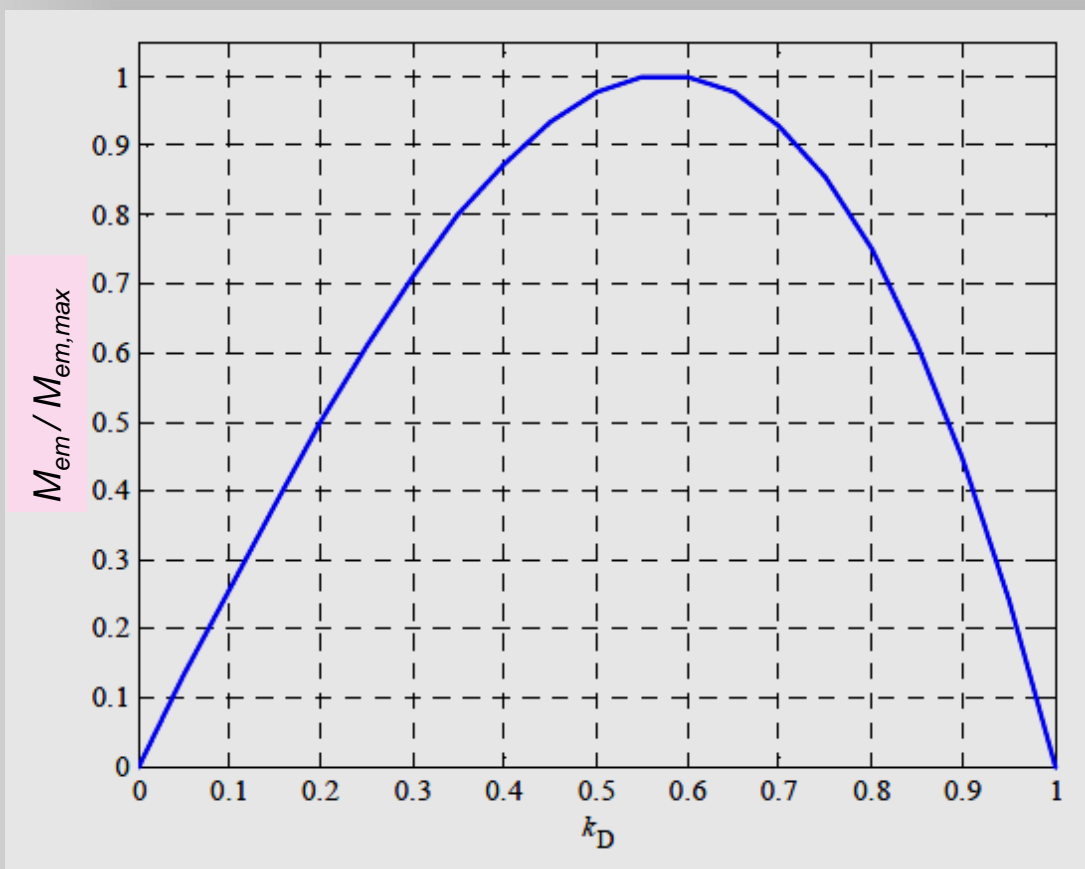
$$A_{int} = \frac{m \cdot N_f \cdot I}{\pi \cdot r_{int}} \quad , \quad N_f - \text{numărul de conductoare pe fază}$$

Prin integrare de-a lungul razei r , se obține expresia cuplului electromagnetic:

$$M_{em} = 2\pi \cdot B_{max} \cdot A_{int} \cdot 2 \int_{r_{ext}}^{r_{int}} r_{int} \cdot r dr = 2\pi \cdot B_{max} \cdot A_{int} \cdot r_{ext}^3 \cdot k_D (1 - k_D^2)$$

unde: $k_D = \frac{r_{int}}{r_{ext}}$

Variația cuplului electromagnetic în funcție de RAPORTUL DIAMETRELOR



$$k_{D,optim} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,58$$

Pentru o mașină cu flux axial, raportul diametrelor (exterior și interior) statorului influențează semnificativ valoarea cuplului electromagnetic dezvoltat.

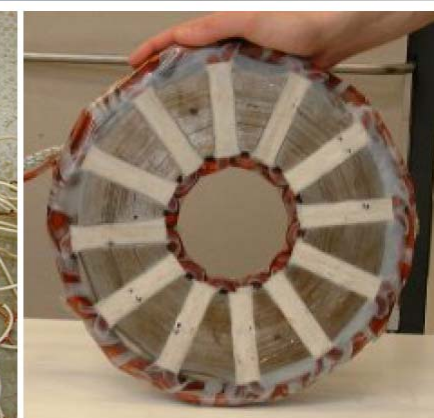
Valoarea optimă, în cazul ideal, este de 0,58.

În cazurile practice, acest raport ia valori în intervalul **0,6-0,7**.

Dificultăți în practicarea unui raport al diametrelor mic (diametru interior mic): dificultăți de realizare a înfășurării (a), saturație a dinților în partea dinspre ax (b).



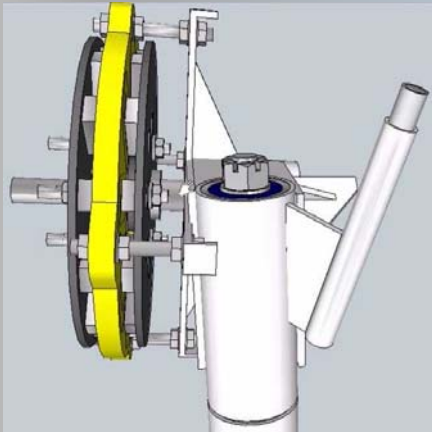
(a)



(b)

Aplicații

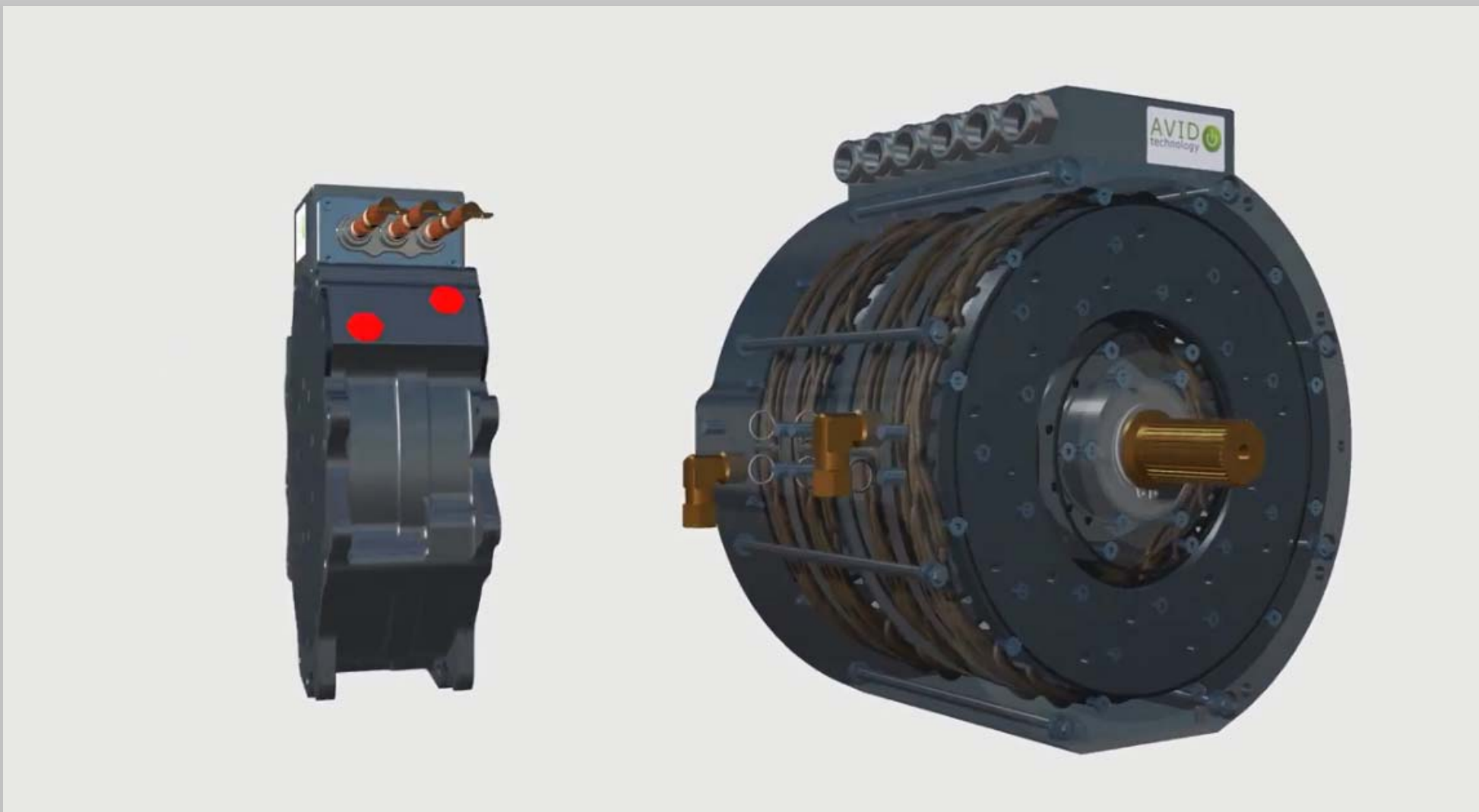
- **Generatoare plasate pe eoliene:** sunt preferate pentru aplicațiile de viteză redusă unde se folosește tehnica „direct drive” eliminând-se reductorul de viteză mecanic.
- **Scutere, biciclete electrice (motoarele cu flux axial sunt plasate direct in roată).**



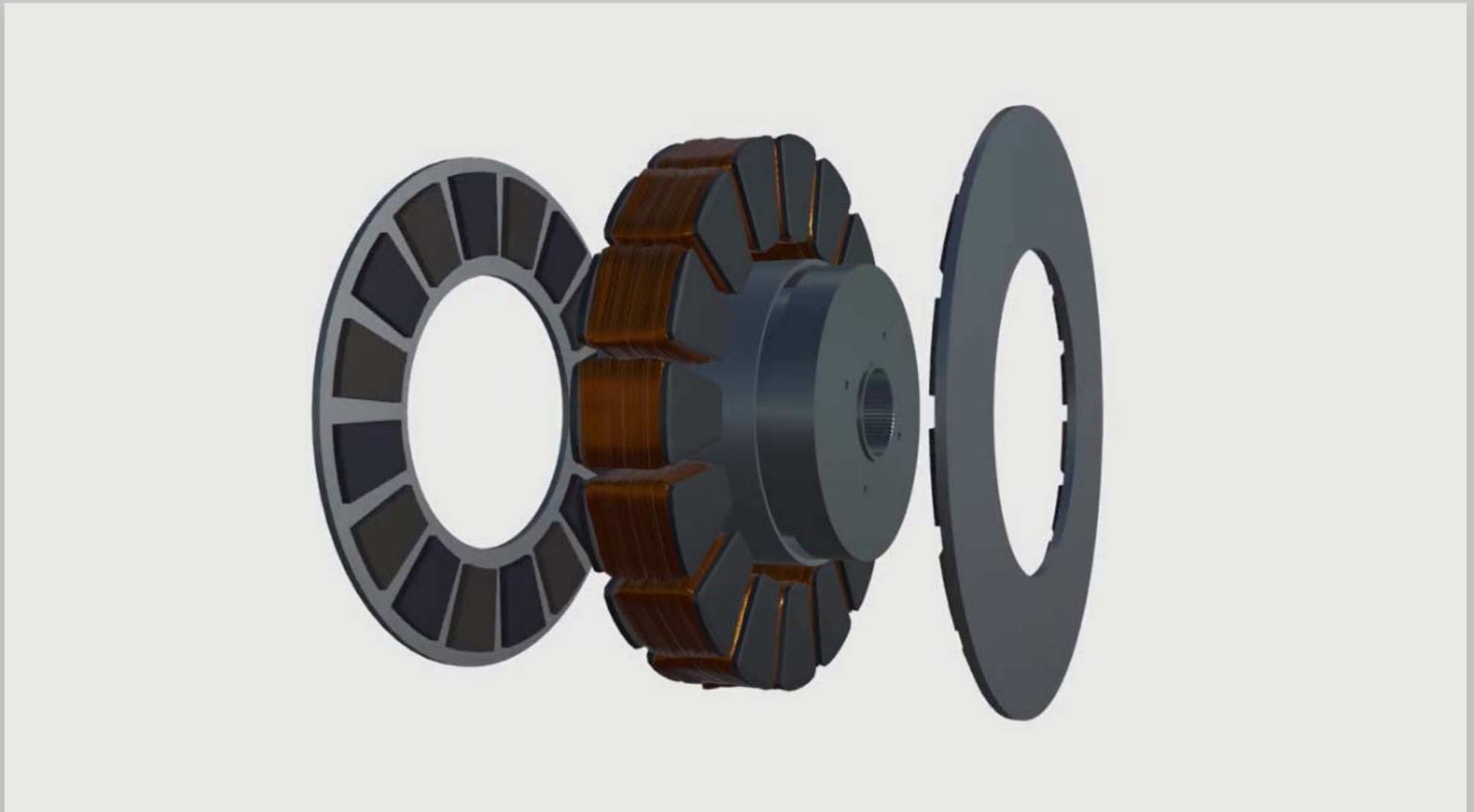


Mașini cu flux axial vs. Mașini cu flux radial

- Liniile de câmp se închid în direcție axială iar conductoarele (și curenții ce le străbat) sunt plasate radial.
- Statorul și rotorul sunt de tip „disc”.
- Părțile active ale bobinelor (părțile ce participă la realizarea cuplului electromagnetic) reprezintă un procent mai mare din întreaga bobină. Acest lucru se datorează faptului că părțile frontale sunt mult mai mici (fie că este vorba despre bobine în inel sau bobine de tip concentrat pe dinți).
- Rotorul acționează ca un ventilator natural ceea ce permite evacuarea mult mai eficientă a căldurii din mașina electrică.
- Se pot elimina (pentru anumite structuri) părți importante din fierul statorului sau rotorului, acestea fiind înlocuite cu materiale mai ușoare, neferomagnetice. Se pot obține rapoarte Cuplu/Greutate mult mai mari.
- Lungimea axială este mult mai mică. Întrucât cuplul dezvoltat depinde de diametru (la puterea a treia), mașinile axiale au diametru mare și lungime mică.
- Necesitatea unui diametru mare determină dificultăți tehnologice în menținerea unui întrefier constant (mai ales în cazul mașinilor cu un stator și un rotor).
- Diametrul mare permite cu ușurință plasarea unui număr mare de poli. Acest lucru face mașinile axiale drept candidate pentru acționări directe la turație joasă sau funcționarea la frecvențe mari.
- Se pretează la construcții modulare (mașini cu mai multe rotoare și statoare) pentru obținerea facilă a unei puteri mai mari.



Film demonstrativ – construcția și principiul de funcționare la motorul cu flux axial (tip AVID)

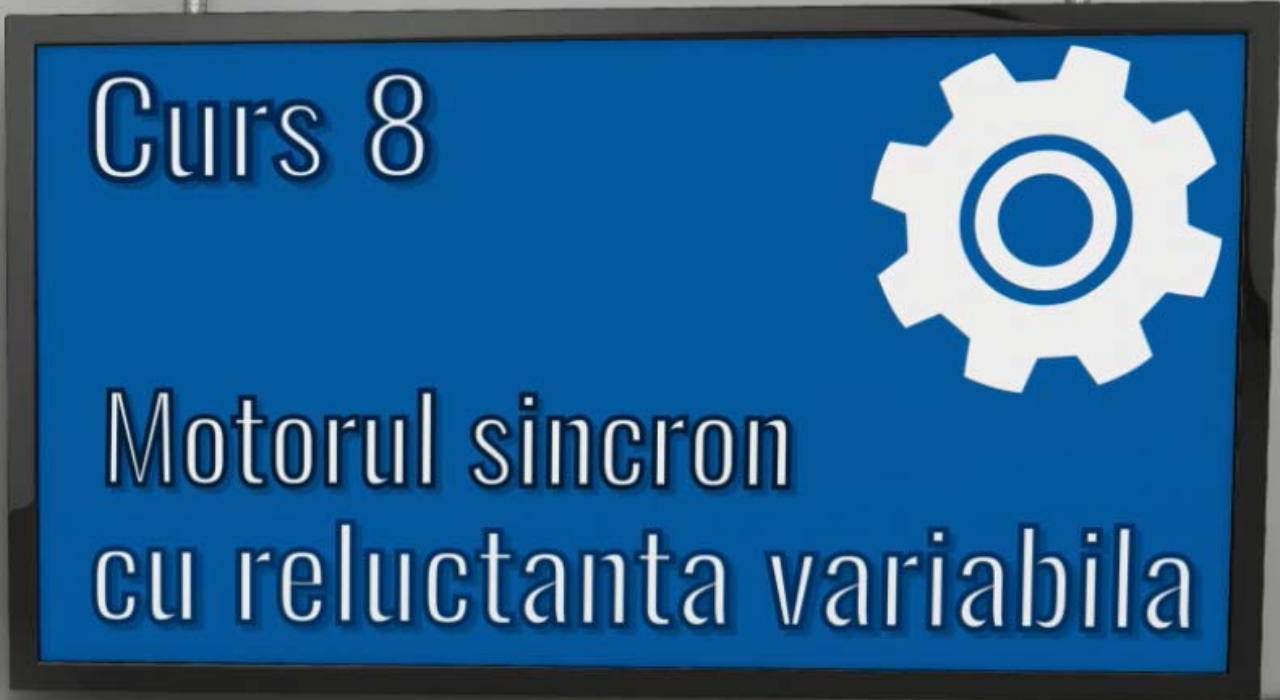


Film demonstrativ – tipuri de motoare cu flux axial




CUVINTE CHEIE





Curs 8



Motorul sincron
cu reluctanta variabila





Motorul cu reluctanță variabilă este o mașină sincronă la care lipsește înfășurarea de excitație iar funcționarea este bazată pe principiul anizotropiei de formă (a rotorului).



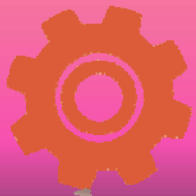
Expresia generala a cuplului unei mașini electrice este:

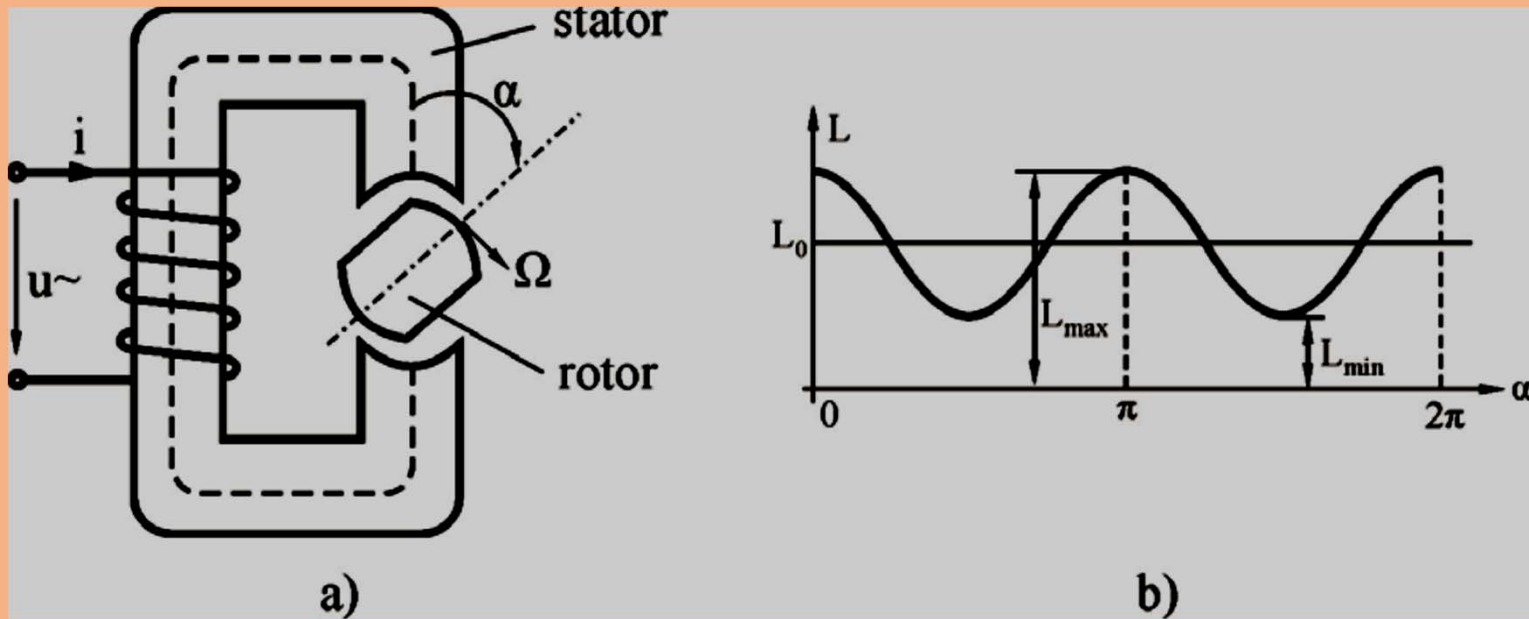
$$M_e = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1}{d\theta} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_2}{d\theta} + i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{d\theta}$$

unde: i_1, i_2 sunt curenții prin înfășurarea statorică respectiv rotorică; L_1, L_2 , inductanțele proprii ale celor două înfășurări; L_{12} – inductanța mutuală, θ - coordonata unghiulară.

Primele două componente reprezintă cupluri de reluctanța (datorate anizotropiei de forma a rotorului, primul termen, respectiv statorului, al doilea termen) iar ultima componentă este cuplu de atracție mutuală.

In cazul in care mașina are doar înfășurare statorică iar rotorul este o piesă feromagnetică fără înfășurare și fără magneți permanenți, atunci componentele doi și trei din expresia cuplului NU EXISTA, iar mașina poate dezvolta doar cuplu de reluctanță, dacă rotorul are anizotropie de formă.



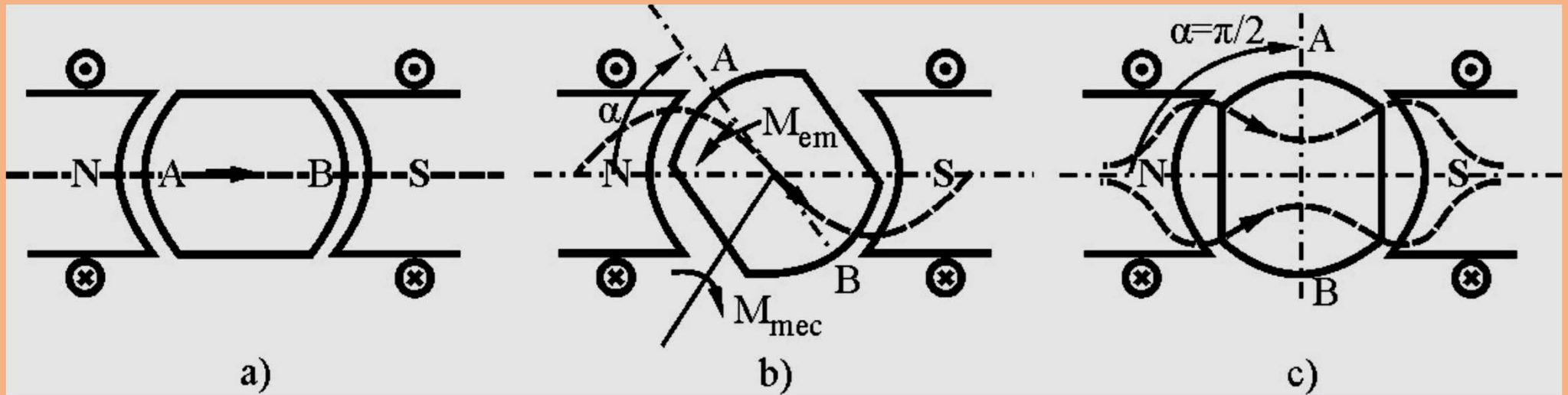


Structura din fig a) are un rotor cu anizotropie de formă: există două axe de simetrie diferite – axa polilor (axa longitudinală, axa d) și axa transversală (axa q).

Modificarea poziției rotorului duce la variația inductanței statorului. Forma de variație este prezentată în fig. b)

$$L = L_0(1 + m \cos 2\alpha) \quad \text{unde:} \quad m = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}} \quad L_0 = \frac{L_{\max} + L_{\min}}{2}$$

m se mai numește și „factorul de modulație” al inductanței.



In mod natural, rotorul ocupă poziția de reluctanță minimă (poziția în care liniile de câmp se închid „cel mai ușor”), fig a).

Dacă asupra rotorului acționează un cuplu mecanic exterior (fig b), M_{mec} , va apărea un cuplu electromagnetic ce tinde să readucă rotorul în poziția din fig a).

Energia magnetică a sistemului, respectiv cuplul electromagnetic au expresiile:

$$W_m = \frac{1}{2} Li^2 \qquad M_e = \frac{dW_m}{d\alpha}$$





Dacă $i = \text{ct.}$ atunci:

$$M_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\alpha} = -m \cdot L_0 \cdot i^2 \cdot \sin 2\alpha = -M_{e_{\max}} \cdot \sin 2\alpha$$

Cuplul electromagnetic depinde de:

- Gradul de modulație al inductanței statorice;
- Poziția axei longitudinale rotorice față de axa câmpului statoric (prin unghiul α);
- Pătratul curentului statoric.

Când unghiul între axele longitudinale ale celor două armături este de 90° (fig. c), atunci rotorul rămâne într-o poziție de echilibru instabil. Orice perturbație exterioară îl scoate din această poziție și îl trimite în poziția de echilibru stabil.



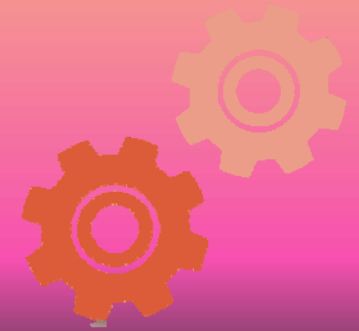
Dacă $i = I_{0m} \cos \omega t$ atunci:

$$M_{e \text{ med}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} M_e d\alpha = -\frac{mL_0 I_{0m}^2}{4} \sin 2\alpha_0$$

unde: α_0 este unghiul de sarcină

Cuplul electromagnetic depinde de:

- **Gradul de modulație al inductanței statorice, $m = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} = \frac{X_d - X_q}{X_d + X_q}$, adică de diferența dintre reactanța sincronă longitudinală și reactanța sincronă transversală.**
- **Pătratul curentului statoric;**
- **Cuplul variază armonic funcție de $2\alpha_0$.**



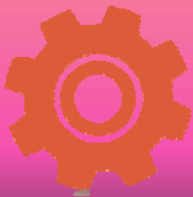
Statorul este identic cu cel al mașinilor de c.a. de construcție clasică (de ex. mașina asincronă): miez feromagnetic lamelat prevăzut cu creștături uniform distribuite în care este plasată o înfășurare, de regulă trifazată.

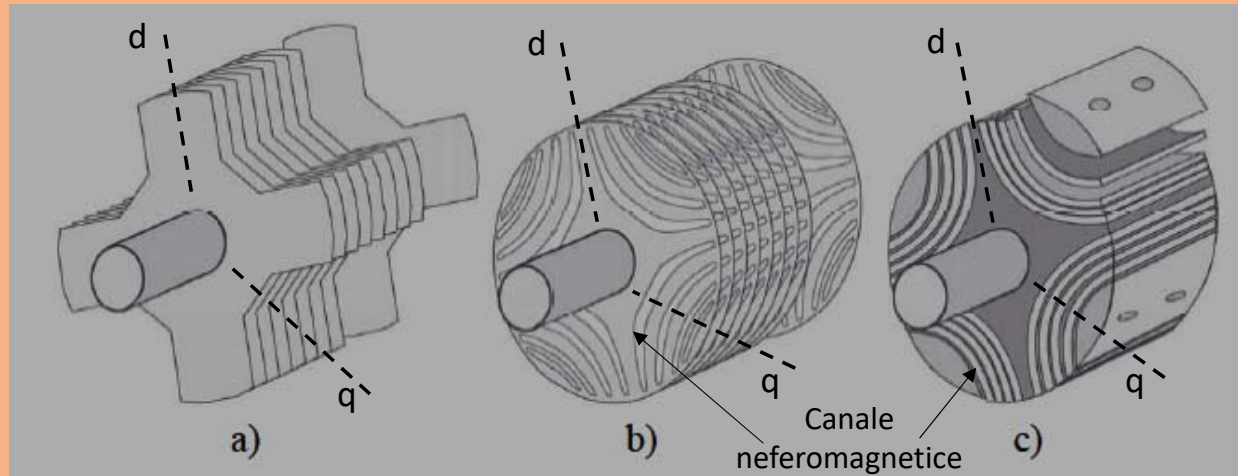
Rotorul este doar o piesă feromagnetică ce prezintă anizotropie de formă. **NU EXISTA** înfășurare rotorică.

Construcția rotorului urmărește obținerea unui grad de modulație a inductanței înfășurării statorice cât mai mare, adică un raport cât mai mare X_d/X_q . Mărirea raportului presupune crearea, de-a lungul axei q , a unui traseu de închidere a liniilor de câmp având reluctanță cât mai mare.



Motor cu reluctanță variabilă industrial
Structura ABB Comp.





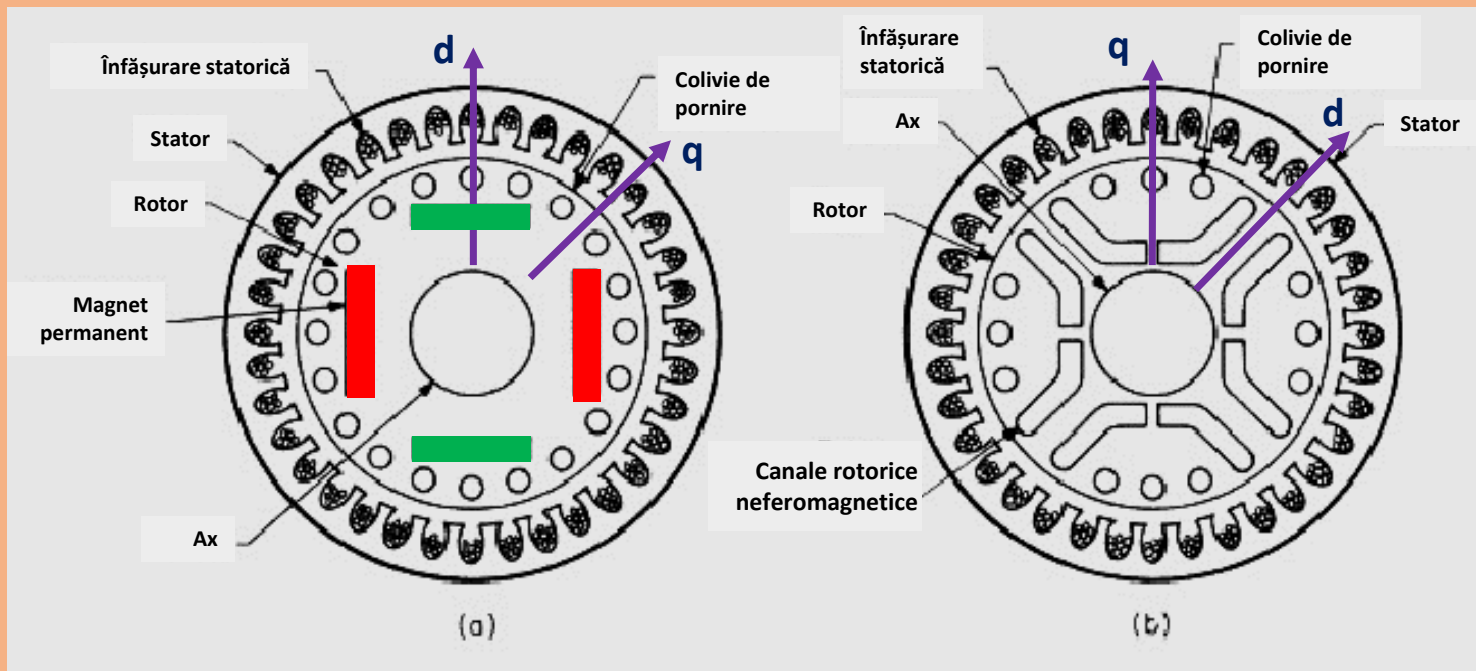
Structura din fig. a – rotor cu poli aparenti - este cea mai simplă si robustă construcție.

In fig. b sunt practicate canale neferomagnetice pentru creșterea reluctanței de-a lungul axei q.

In fig. c, rotorul este realizat din mai multe segmente ce sunt asamblate cu ajutorul unor bolțuri. Intre segmente există material neferomagnetic.



Construcția rotorului urmărește obținerea unui raport X_d/X_q cât mai mare fără însă a afecta considerabil performanțele mașinii.

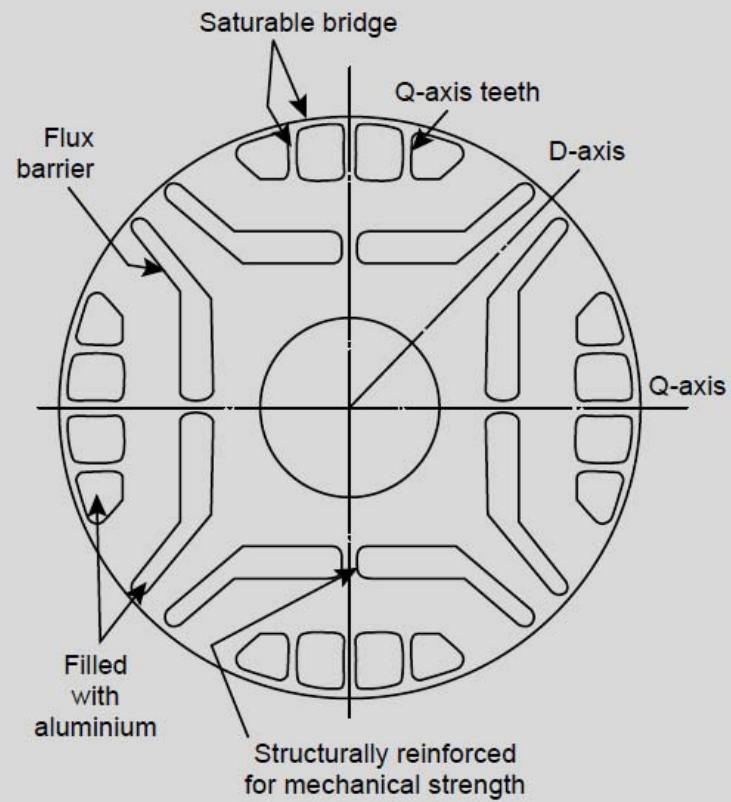


Secțiune transversale: a) motor cu magneți permanenți tip ac; b) motor reactiv cu canale interne (bariere de flux).

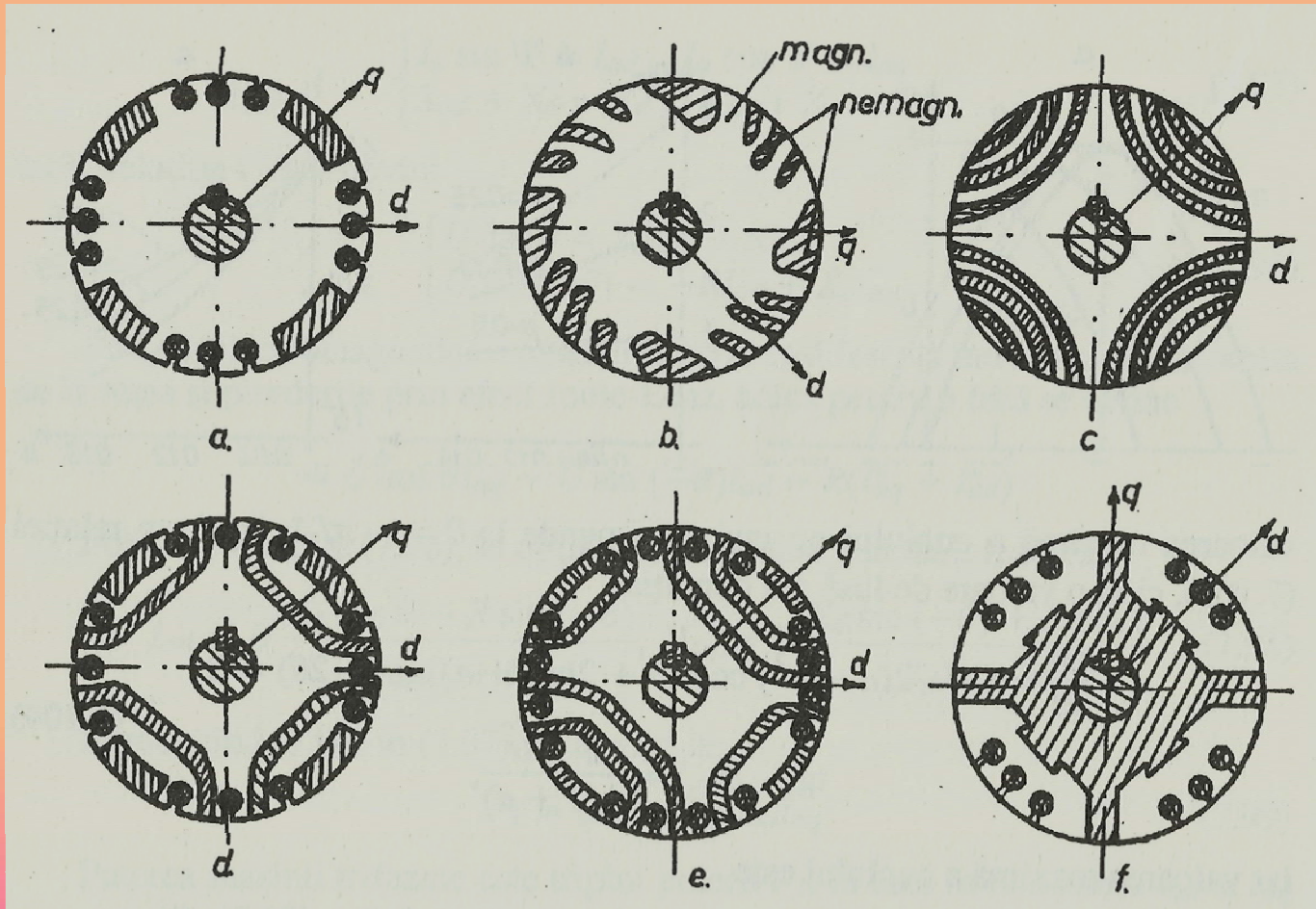


Motorul cu reluctanță variabilă este o mașină sincronă ce NU are cuplu de pornire.





Pentru a elimina acest inconvenient, se pot introduce în rotor bare din Al care să formeze o colivie de pornire. Mașina pornește ca una asincronă după care, datorită cuplului de reluctanță, intră în sincronism.

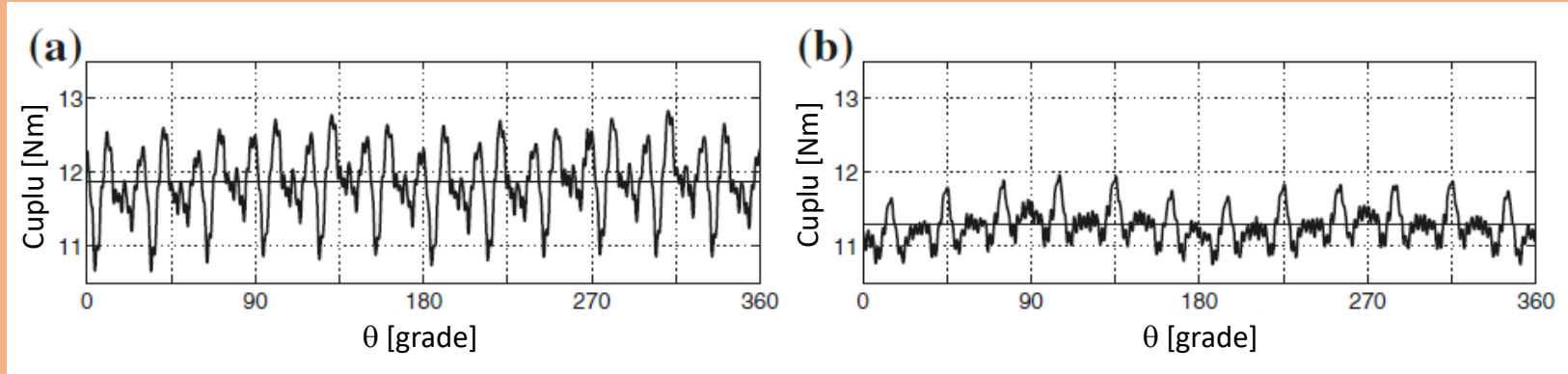


Varianta de rotor cu bariere interne de flux si bare din Al ce joaca rol de colivie de pornire si bariere de flux.



Variante de rotoare: a. rotor cu poli aparenti; b. rotor cu bariere de flux inclinate; c. rotor sectionat; d. rotor cu un singur rand de bariere; e. rotor cu doua randuri de bariere in constructie asimetrica; f. rotor segmentat.

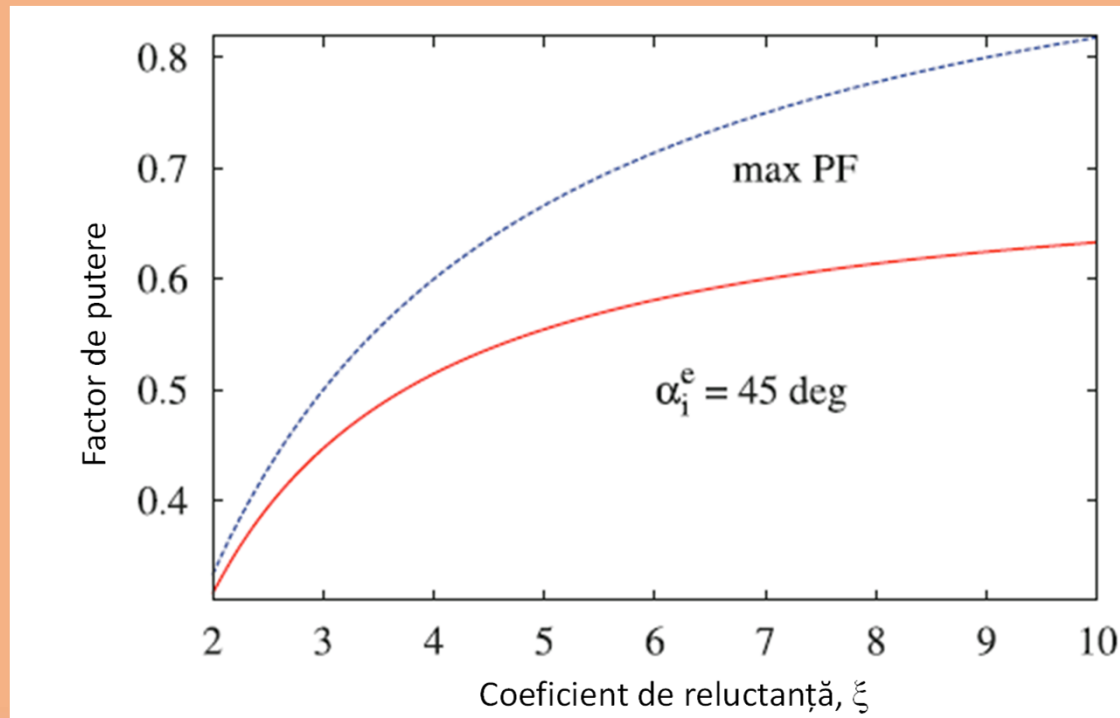
-  **Înfășurarea statorică polifazăată (trifazăată) creează un câmp învârtitor. Polii rotorici tind să se alinieze cu polii statorici (conform principiului reluctanței variabile), rezultând o mișcare de rotație sincronă cu „viteza de sincronism”.**
-  **Mașina sincronă reactivă dezvoltă cuplu electromagnetic numai la sincronism.**
-  **Caracteristicile mecanice sunt cele ale unei mașini sincrone: turația rămâne constantă la variația cuplului de sarcină. Peste valoarea maximă a cuplului, mașina decroșează.**
-  **Întrucât nu dezvoltă cuplu la pornire, este necesară o înfășurare de pornire în scurtcircuit plasată pe rotor.**



Funcționarea mașinii reactive este caracterizată de prezența pulsațiilor de cuplu datorate interacțiunii dintre armonicile superioare din curba inducției în întrefier și anizotropia de formă a rotorului.

Amplitudinea pulsațiilor poate fi diminuată prin tehnica înclinării creștăturilor statorice (pe direcție axială) sau, în cazul rotoarelor de construcție simplă (fără canale „bariere de flux”), prin înclinarea polilor rotorici în direcție axială.

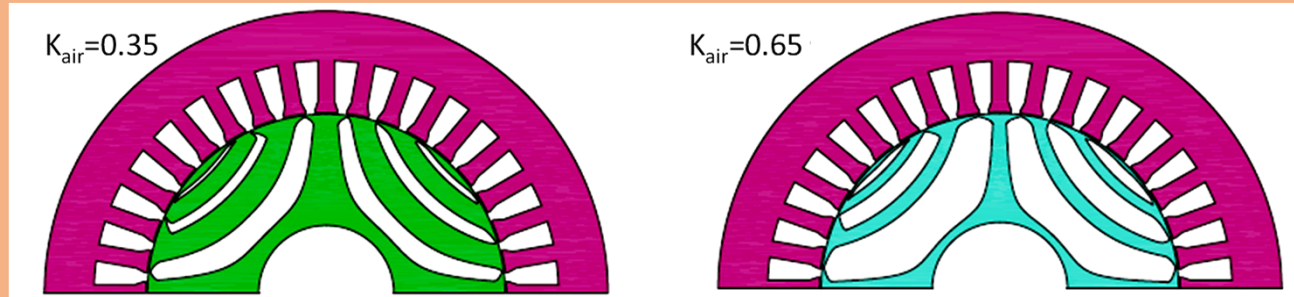
În exemplul din figură se obține o reducere a pulsațiilor de cuplu de la 17% (fig a) la 9% (fig b) prin înclinarea polilor rotorici. Această tehnică duce însă și la diminuarea valorii medii a cuplului dezvoltat de mașină.



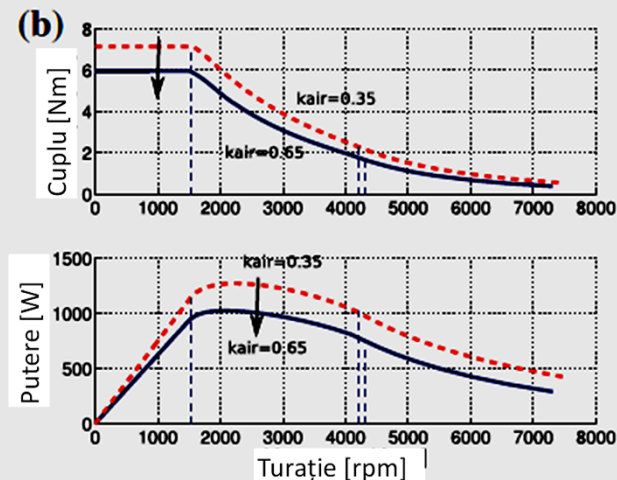
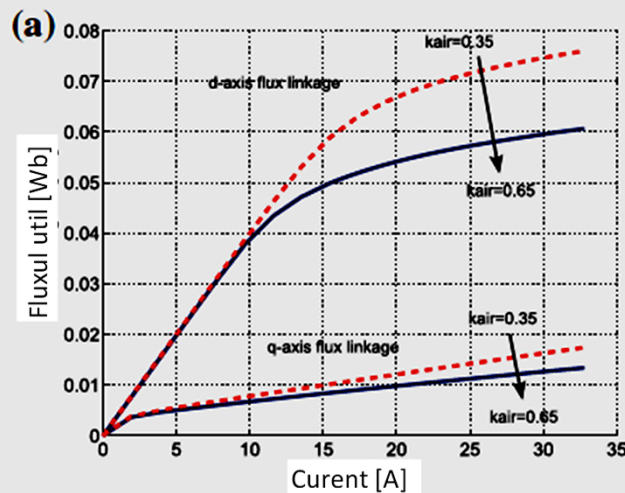
Factorul de putere al motorului cu reluctanță variabilă (curba roșie) are valori scăzute și depinde de coeficientul de reluctanță, ξ . Cu cât acest coeficient este mai mare cu atât se obține un factor de putere mai bun.

Creșterea factorului de putere (curba albastră) se obține impunând pentru unghiul de defazaj dintre curentul prin înfășurarea statorică (I_a) și componenta acestuia de pe axa longitudinală (I_{ad}) valoarea:

$$\tan \alpha_i^e = \sqrt{\xi}$$



Structuri rotorice cu bariere de flux de lățimi diferite

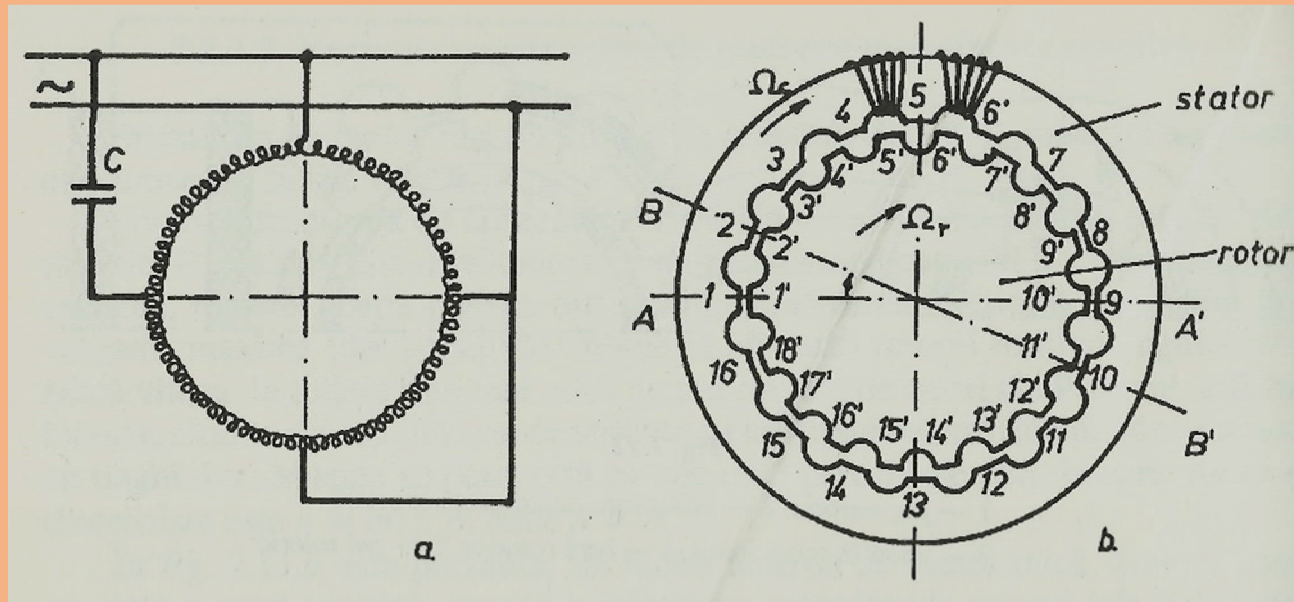


Lățimea barierelor de flux, ce este cuantificată prin procentul de material neferomagnetic prezent în structura rotorului (K_{air}), are o influență semnificativă asupra cuplului și puterii dezvoltate de motorul cu reluctanță variabilă.

Trebuie realizat un echilibru între tendința de a crește raportul X_d/X_q prin mărirea reluctanței de-a lungul axei q (adică mărirea zonelor cu material neferomagnetic) și posibila apariție a fenomenului de saturație.

Odată cu creșterea saturației în circuitul magnetic rotoric ($K_{air}=0.65$), are loc o descreștere pronunțată a fluxului util pe axa d. Aceasta duce la scăderea cuplului și puterii dezvoltate de motor.

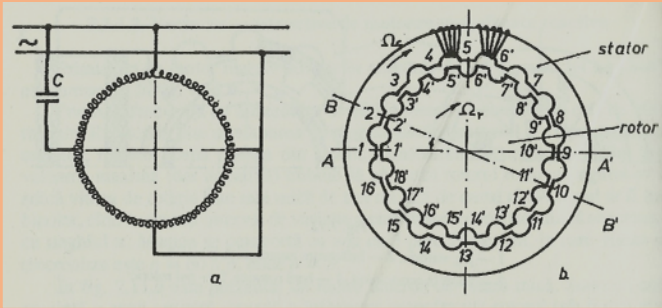




Permite obținerea unor viteze reduse fără utilizarea unui reductor mecanic.

Pe statorul mașinii poate fi plasată o înfășurare de tip toroidal. Ea se poate alimenta în 4 puncte decalate la 90° de la o rețea monofazată. Condensatorul C poate realiza un defazaj de aproximativ 90° , astfel încât mașina devine una bifazată ce poate produce un câmp învârtitor.

Numărul de dinți statorici, Z_s și poli aparenti rotorici, Z_r este ÎNTOTDEAUNA diferit ($Z_s \neq Z_r$). Reducerea maximă a turației se obține când diferența $Z_r - Z_s = 2$



Presupunem că la momentul $t=0$, câmpul magnetic produs de înfășurarea statorică este maxim pe direcția axei A-A', iar rotorul se orientează pe direcția de reluctanță minimă: dinții 1-1' și 9-10' sunt față în față.

Câmpul statoric, ce se rotește cu viteza $\Omega_s=2\pi f$ va ajunge maxim pe direcția B-B' după timpul:

$$t = \frac{\alpha_s}{\Omega_s} = \frac{2\pi/Z_s}{\Omega_s}$$

Rotorul va ocupa poziția de reluctanță minimă, 2-2' și 10-11' rotindu-se cu un unghi: $\Delta\alpha = \frac{2\pi}{Z_s} - \frac{2\pi}{Z_r}$

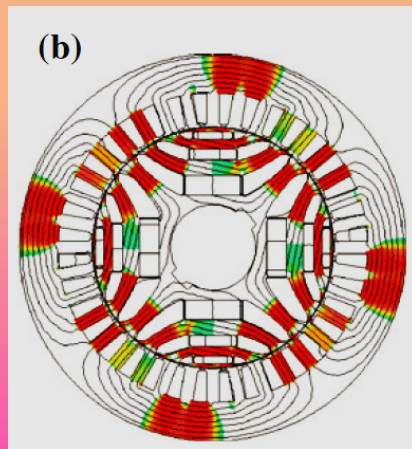
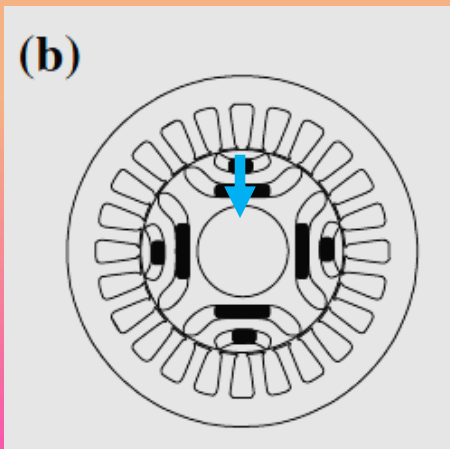
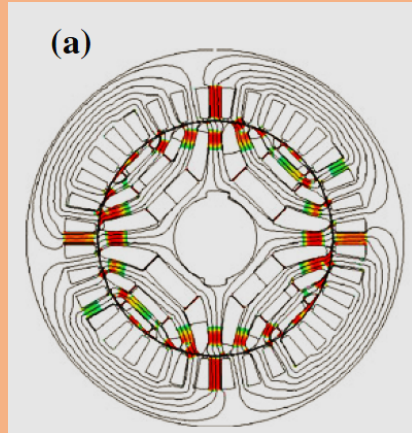
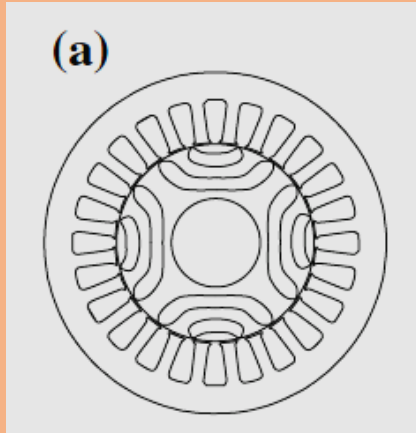
Deci viteza de rotire a rotorului rezulta: $\Omega_r = \frac{\Delta\alpha}{t} = Z_s \cdot \Omega_s \cdot \frac{Z_r - Z_s}{Z_r Z_s} = 2\pi f \cdot \frac{Z_r - Z_s}{Z_r}$

Pentru o structură având $Z_r=500$ și $Z_s=498$, la o frecvență de 50Hz, rezulta:

$$n = \frac{\Omega_r}{2\pi} = 50 \cdot \frac{500 - 498}{500} = \frac{1}{5} \left[\frac{rot}{s} \right] = 12 \left[\frac{rot}{min} \right]$$

Motor sincron reactiv cu magneți permanenți auxiliari

„Permanent Magnet Assisted Reluctance Motor”, PMAREL



Sunt mașini la care, în canalele ce servesc drept bariere de flux sunt introduși magneți permanenți.

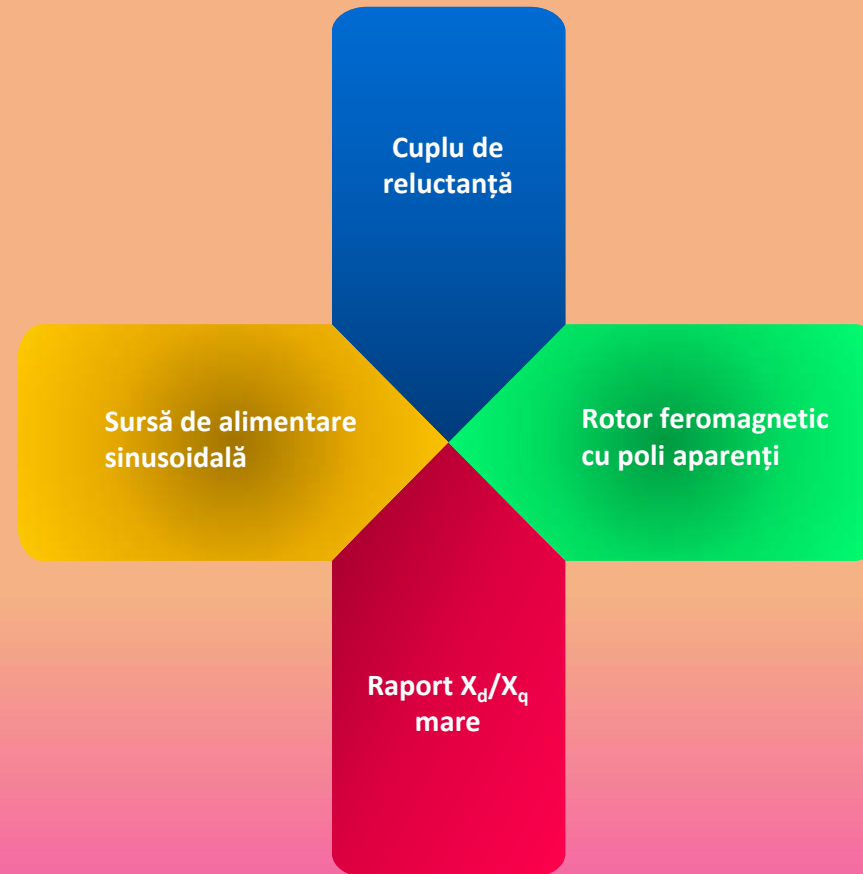
De regulă se folosesc magneți ceramici (tip ferită).

Magneții permanenți adaugă o componentă de cuplu de atracție mutuală.

Introducerea magneților permanenți duce la creșterea factorului de putere și a cuplului mașinii reactive.

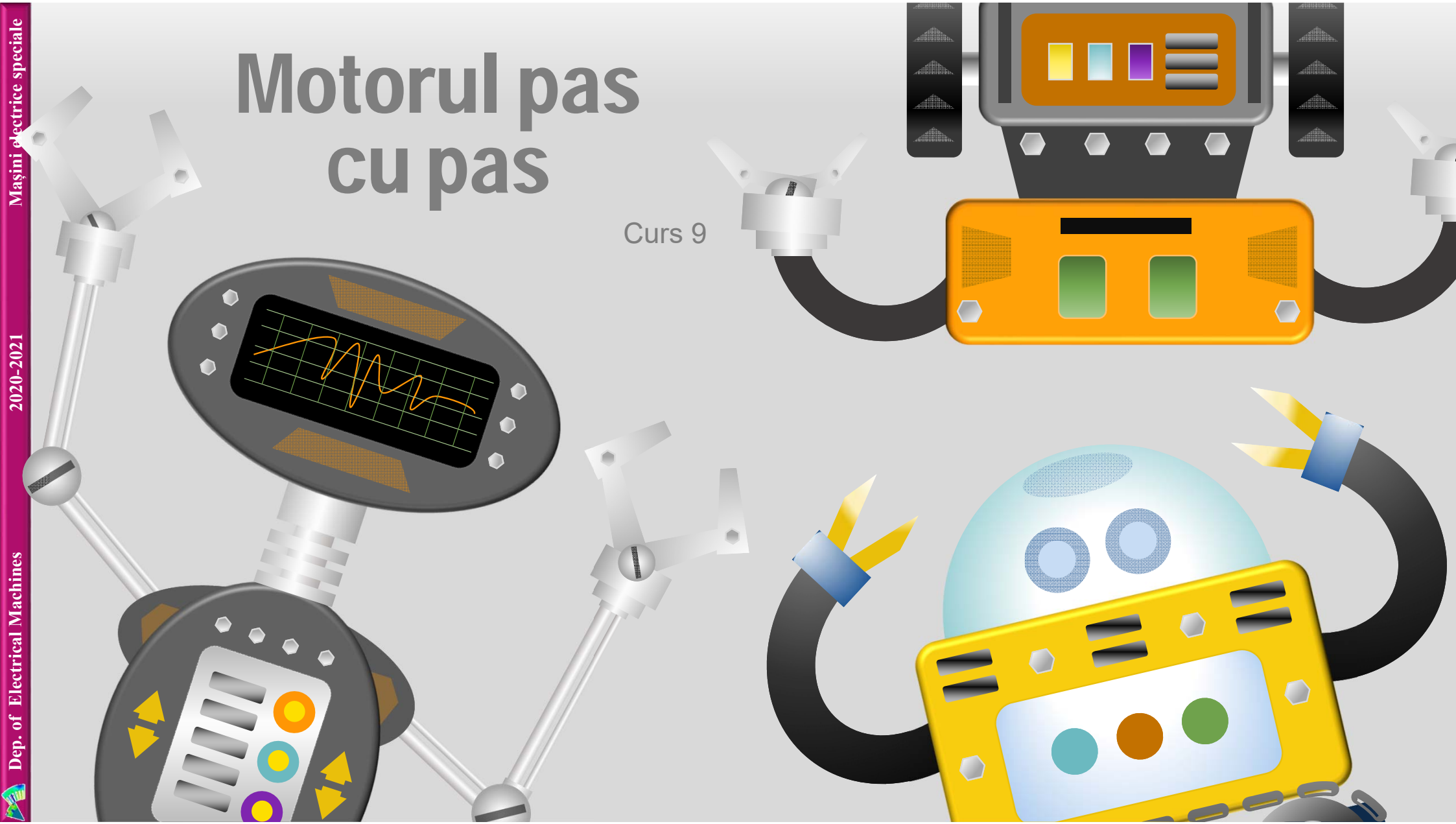


Cuvinte cheie



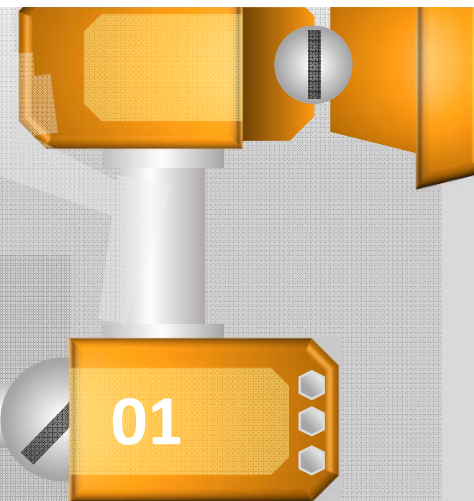
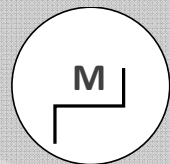
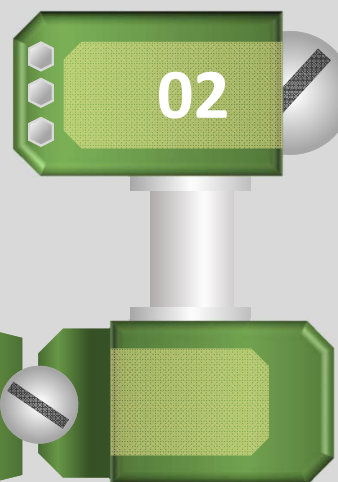
Motorul pas cu pas

Curs 9



Definitie

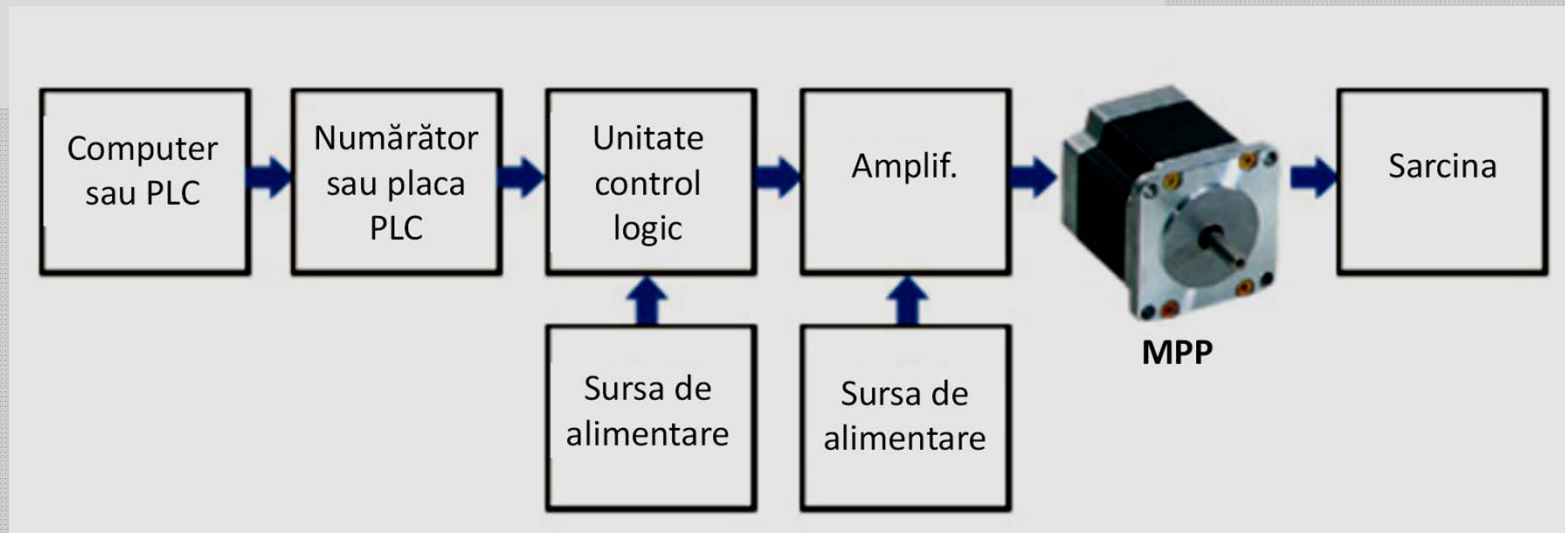
Motorul pas cu pas (MPP) este un convertor electromecanic ce transformă impulsuri electrice de comandă (tensiuni sau curenți) în mișcări unghiulare de rotație (sau deplasări liniare) numite „pași”.



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 scadară și apare ca o deplasare continuă.
- Valoarea pașilor unghiulari, pentru motoarelor 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).
- Întrucât motorul păstrează o relație strictă de egalitate între impulsurile de comandă și pașii efectuați, MPP este candidatul ideal pentru aplicații unde se cer poziționări precise.

Structura unui sistem cu MPP



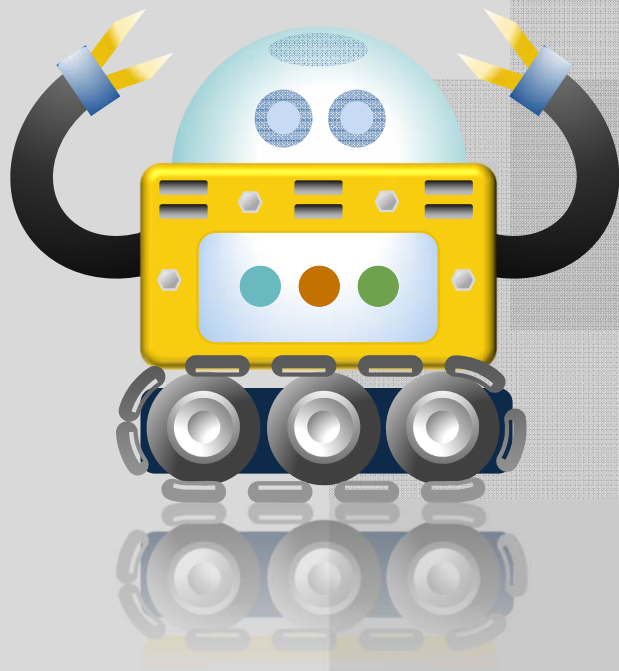
Schema bloc a unei acționări electrice cu MPP

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

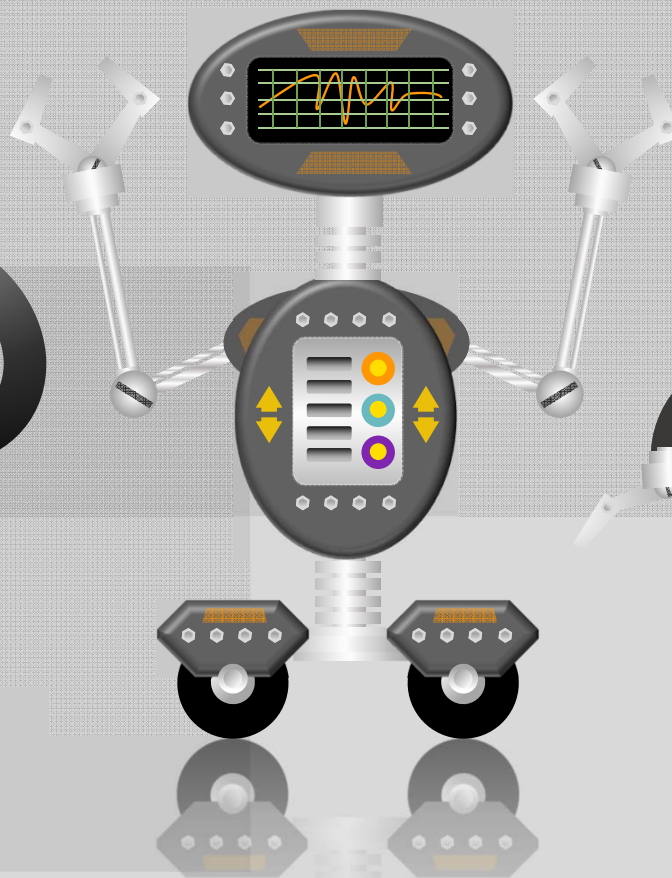
001

Motoare pas cu pas
cu reluctanță
variabilă



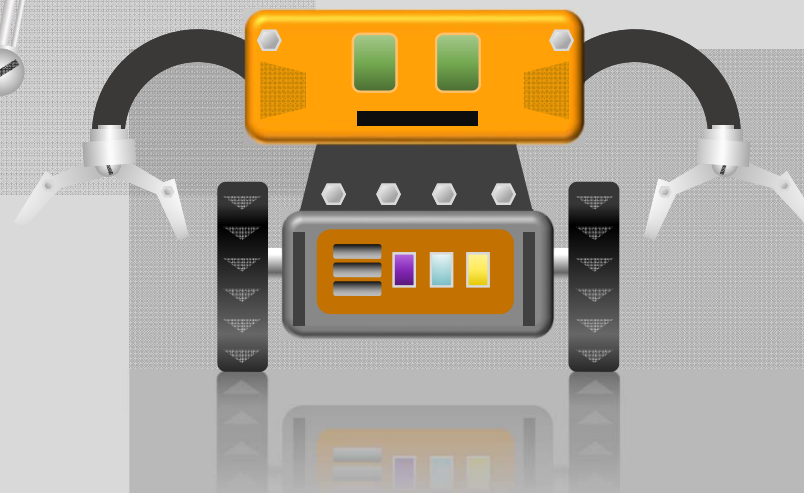
002

Motoare pas cu pas
cu magneți
permanenți

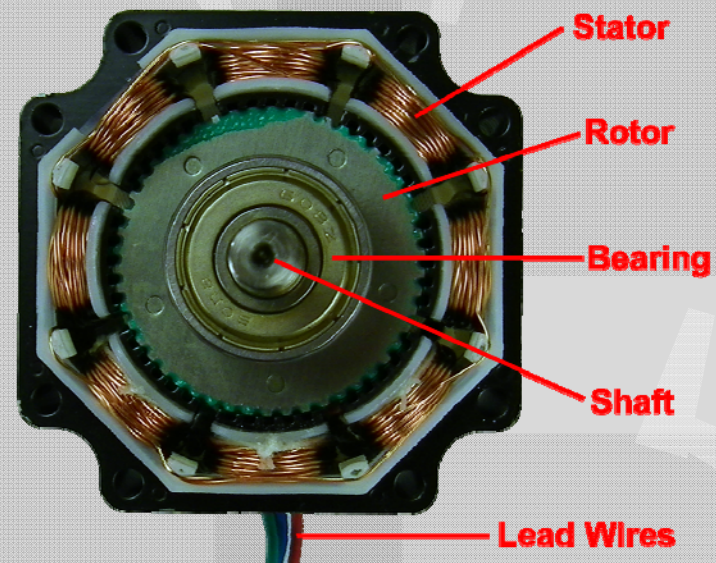
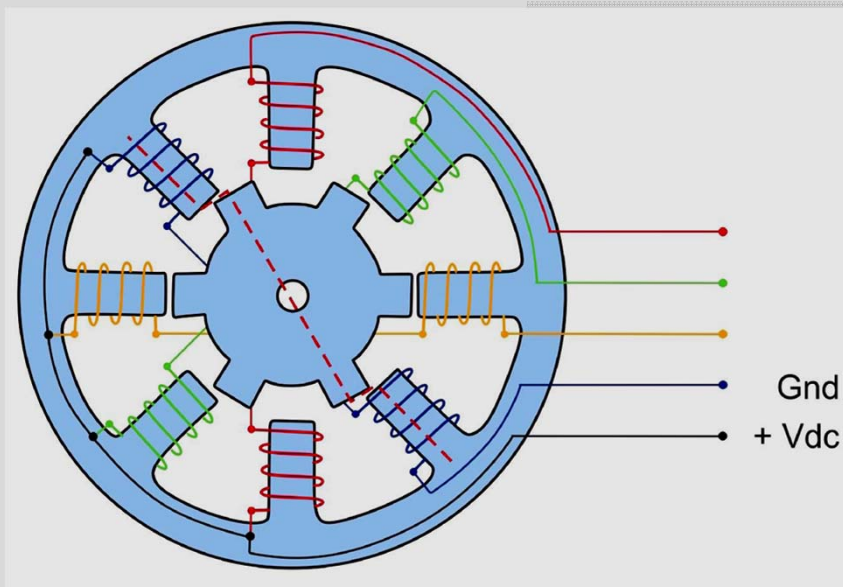


003

Motoare pas cu pas
hibride

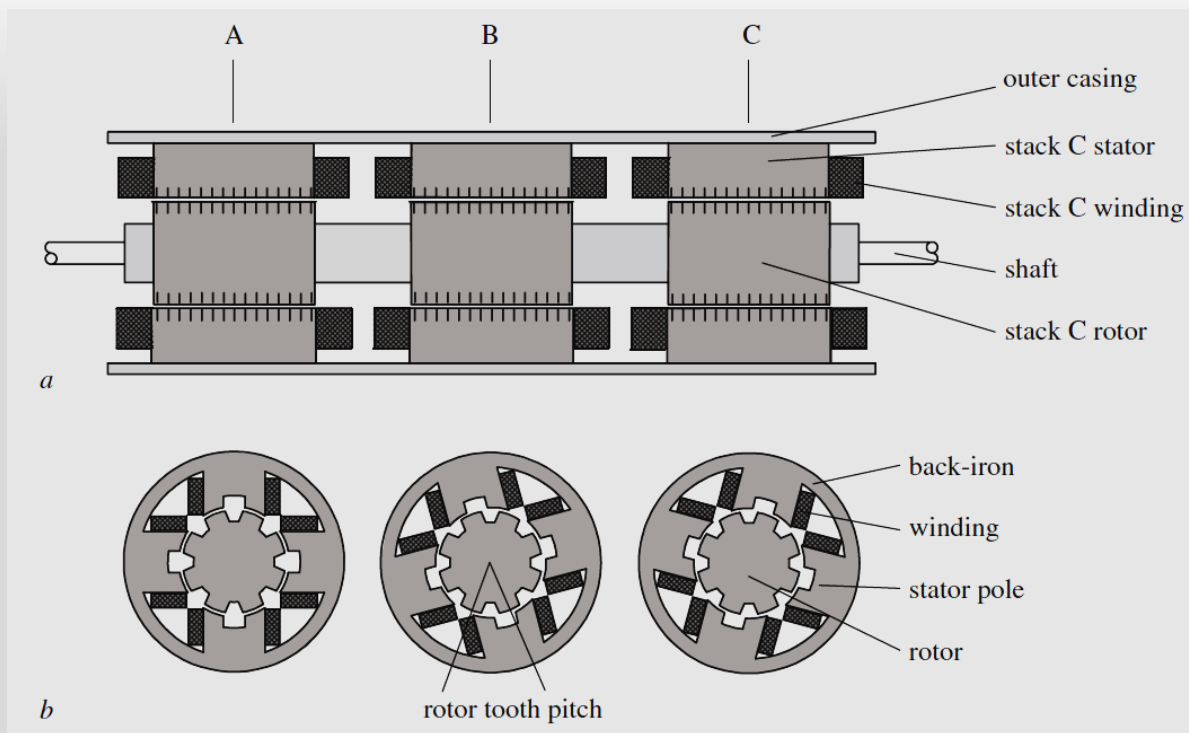


Motorul pas cu pas cu reluctanță variabilă



Statorul are poli aparenti pe care sunt prevăzute înfășurări de tip concentrat. Eventual, către întrefier, pe poli pot exista dinți.

Rotorul este din material feromagnetic cu anizotropie de formă. Pe rotor NU exista nici înfășurare nici magneți permanenți.



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: $360/3 \times 8 = 15^\circ$

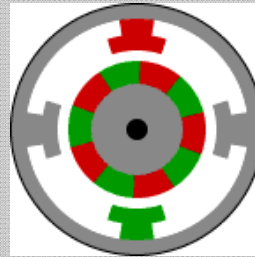
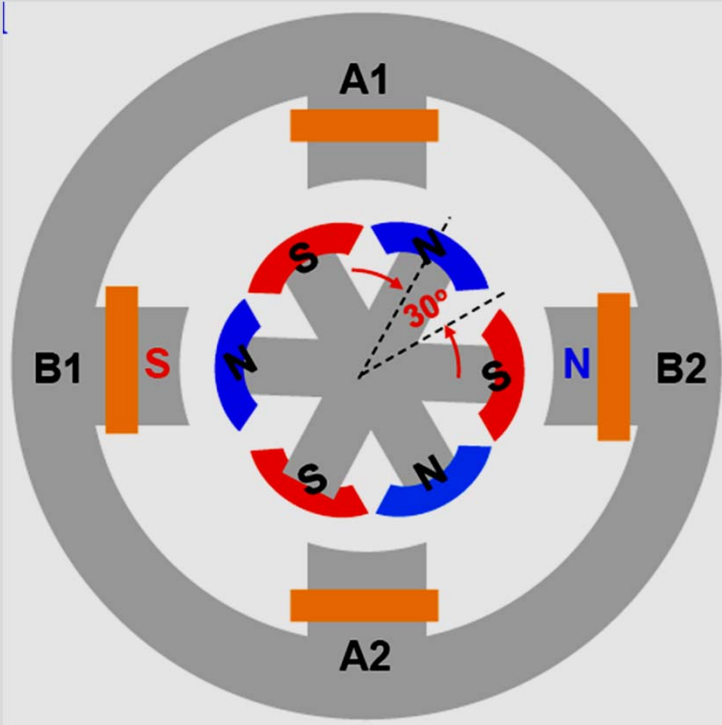
Această soluție permite obținerea unui cuplu mai mare întrucât cuplul de reluctanță acționează asupra tuturor celor 8 dinți ai unui rotor



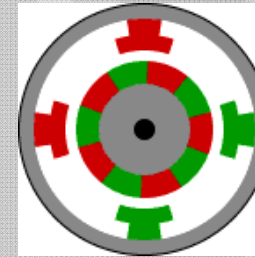
Calculul unghiului de pas

$$\text{Unghiul de pas} = \frac{360^\circ}{(\text{Numarul de dinti rotorici}) \times (\text{Numarul de faze statorice})}$$

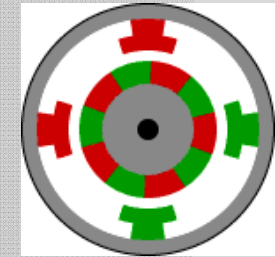
Motorul pas cu pas cu magneți permanenți



Motor bifazat
Comanda pe o faza
(Pas întreg)

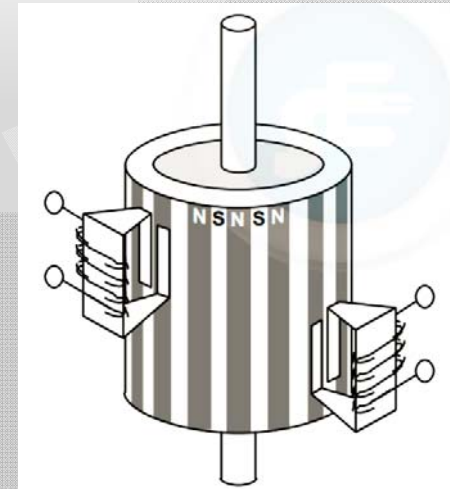
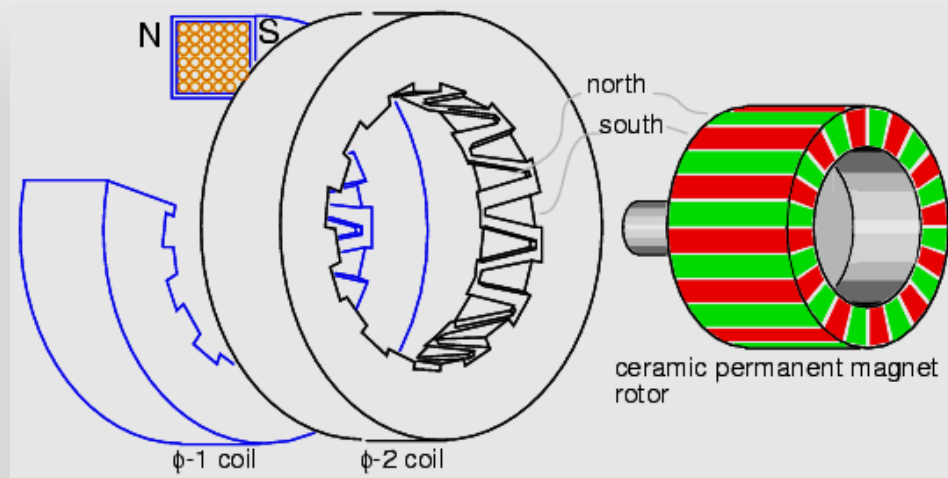


Motor bifazat
Comanda pe
ambele faze
(Pas întreg)



Motor bifazat
Comanda combinata
(Pas pe jumătate)

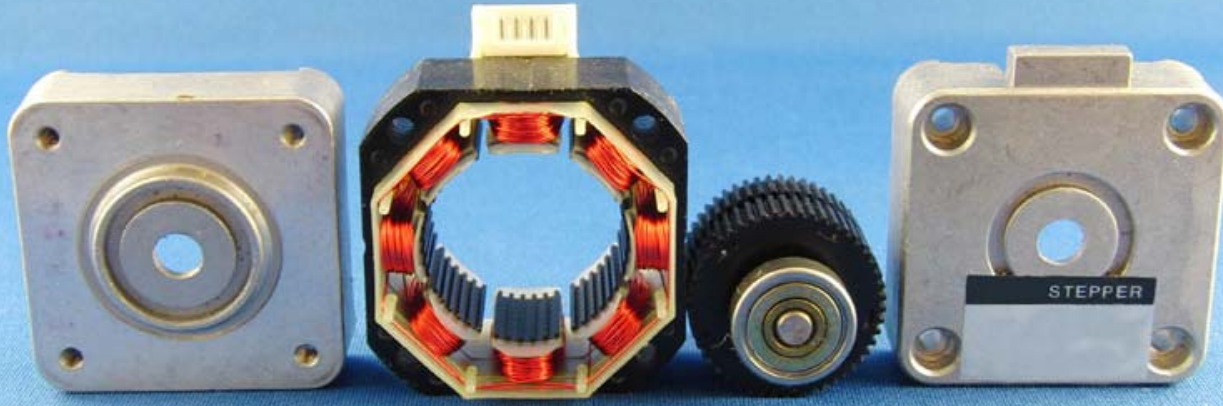
- Polii aparenti rotorici sunt echipați cu magneți permanenți pentru întărirea cuplului dezvoltat de motor (cuplul de reluctanță este înlocuit de cuplul de atracție mutuală).
- Unghiul de rotație este mai mare decât la motoarele de reluctanță sau hibride (precizie mai mică și viteză mai mare).
- In mod 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

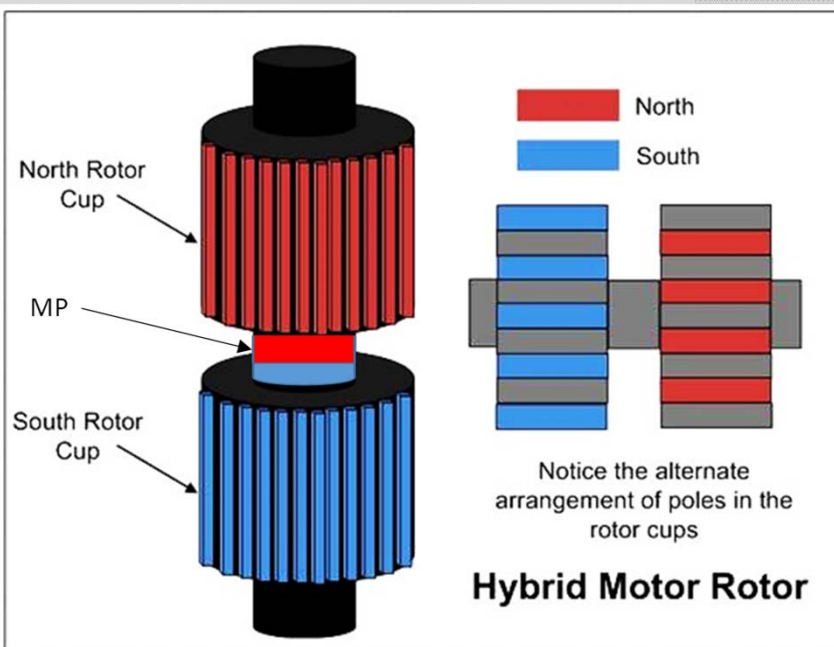


Motorul pas cu pas hibrid



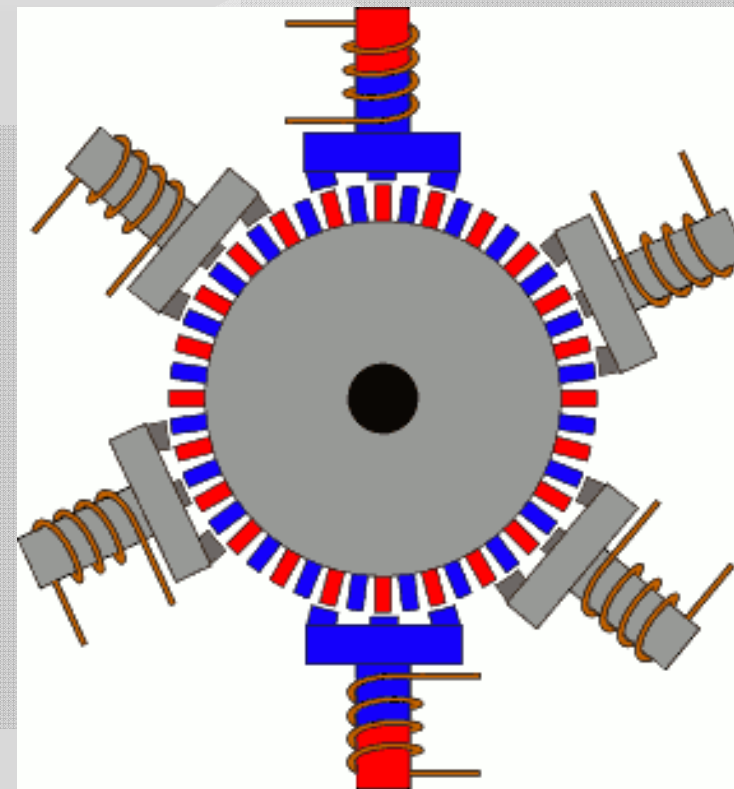
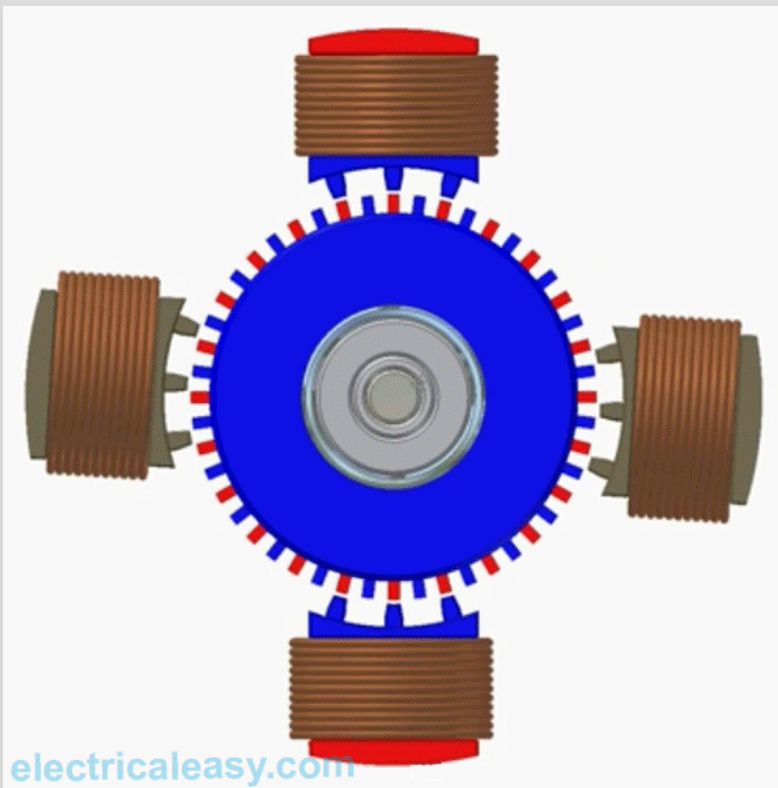
Mașina hibridă folosește atât principiul construcției cu reluctanță variabilă cât și prezența magneților permanenți.

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.

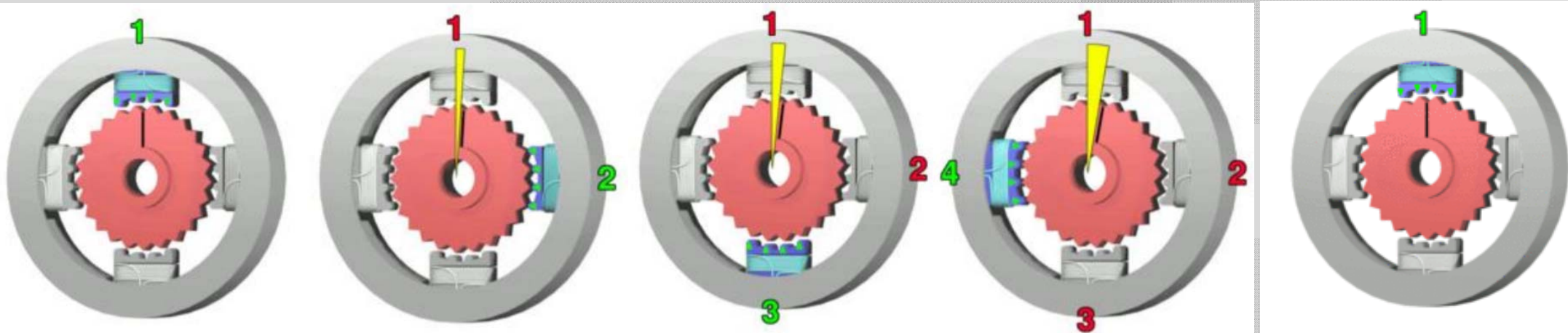


MPP cu excitație hibrida si rotor dublu

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 minimă. 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

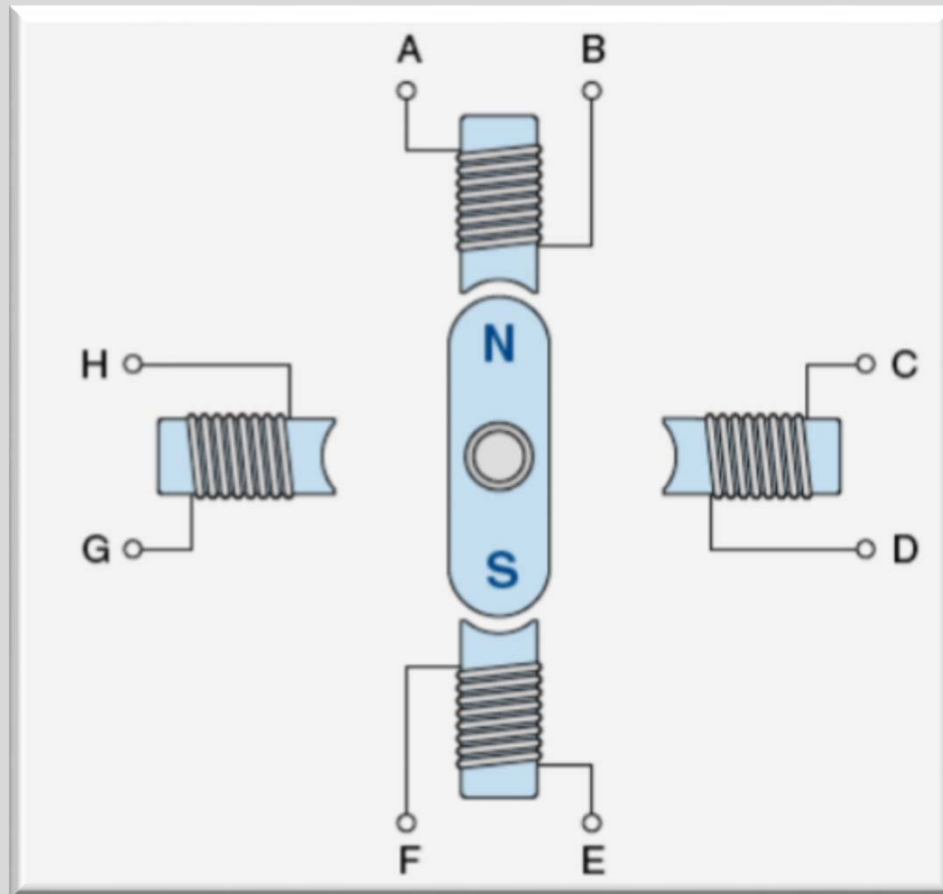
- Unipolară
- Bipolară

După sensul
curentului prin
bobine

- Comandă pe o singură bobină („wave drive”)
- Comandă pe două bobine („Full step drive”)
- Comandă combinată („Half step drive”)
- Comandă prin micropăsire („microstepping drive”)

După numărul
de bobine
alimentate

A. Comanda unipolară: înfășurările sunt parcurse de curent totdeauna in același sens.



Sucesiune alimentare înfășurări

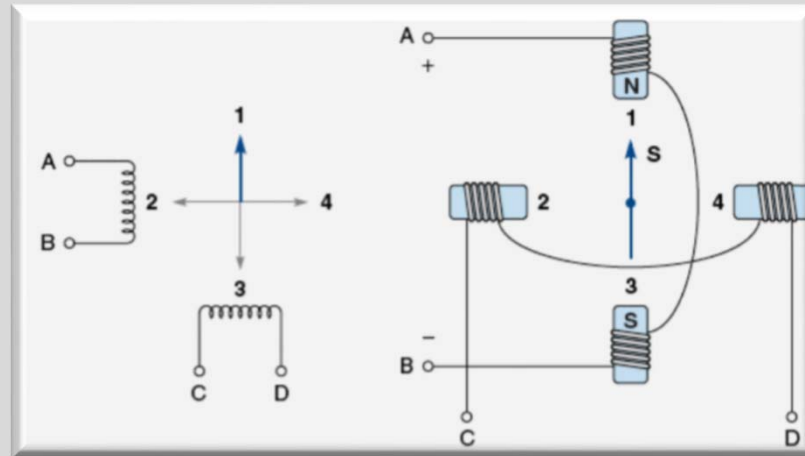
A-B

C-D

E-F

G-H

B. Comanda bipolară: sensul curenților de comandă prin fiecare înfășurare se modifică în funcție de logica de comandă.



Alimentare succesivă a celor două faze

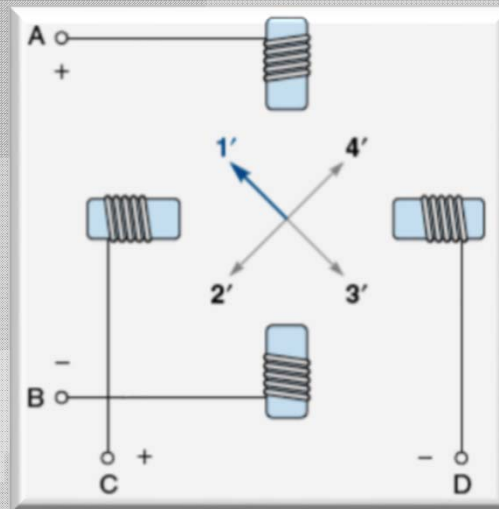
Sucesiune alimentare înfășurări

A+B- (1)

C+D- (2)

A-B+ (3)

C-D+ (4)



Alimentare simultană a celor două faze

Sucesiune alimentare înfășurări

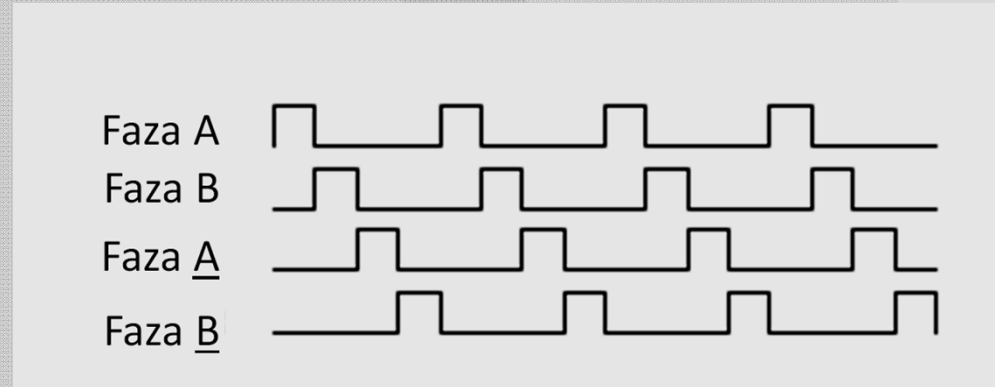
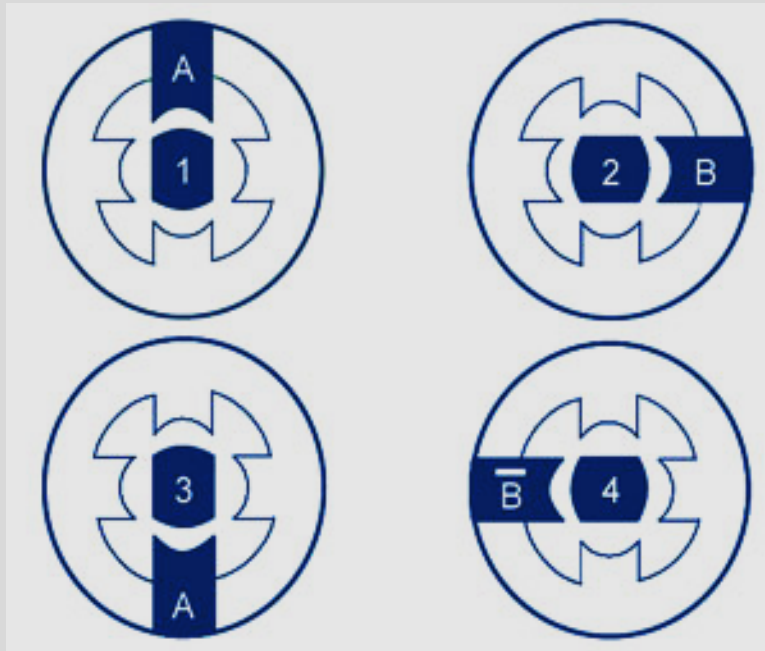
A+B- si C+D- (1')

A-B+ si C+D- (2')

A-B+ si C-D+ (3')

A+B- si C-D+ (4')

I. Comanda pe o singură bobină („Wave drive”)

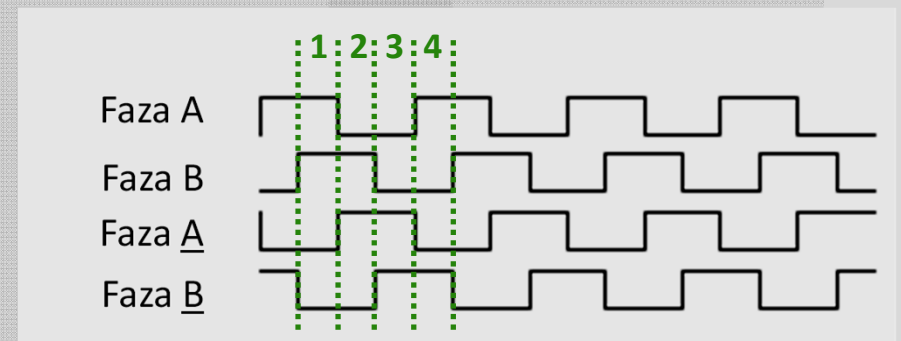
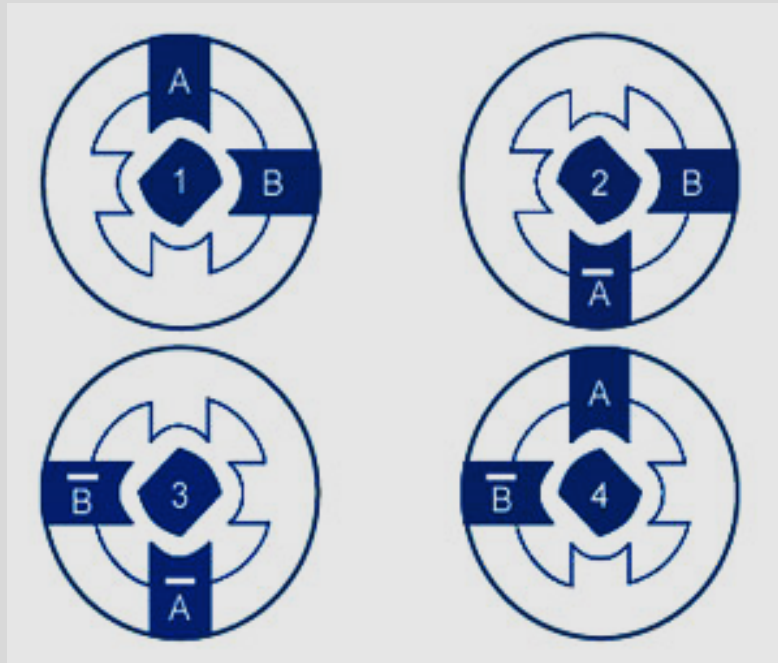


Sucesiunea semnalelor de comanda pe fiecare faza in parte

Fiecare bobină este alimentată individual, succesiv. Succesiunea alimentării este dictată de sensul de rotație dorit.

Cuplul dezvoltat de motor este relativ redus (in comparație cu celelalte metode de comandă).

II. Comanda pe două bobine („Full step” drive)

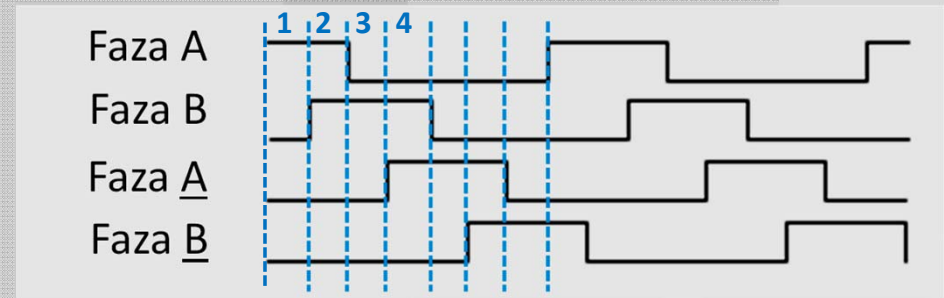
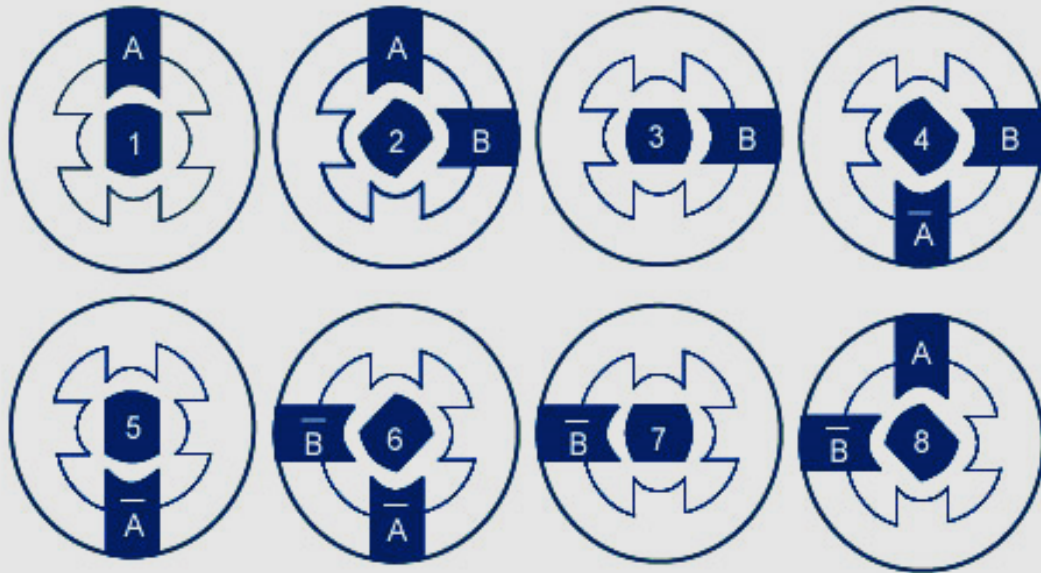


Sucesiunea semnalelor de comanda pe fiecare faza in parte

Simultan sunt alimentate câte două 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)

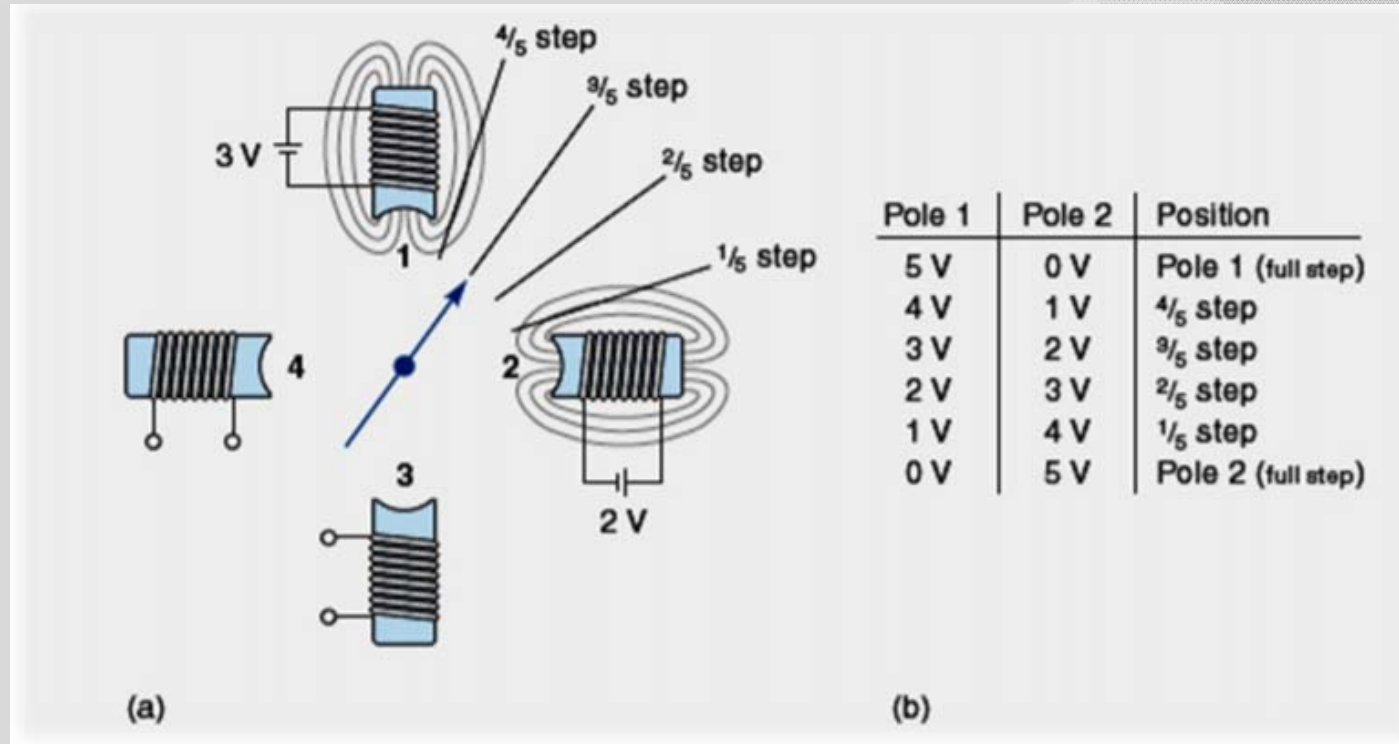


Sunt combinate comanda pe o bobină cu comanda pe două bobine.

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.

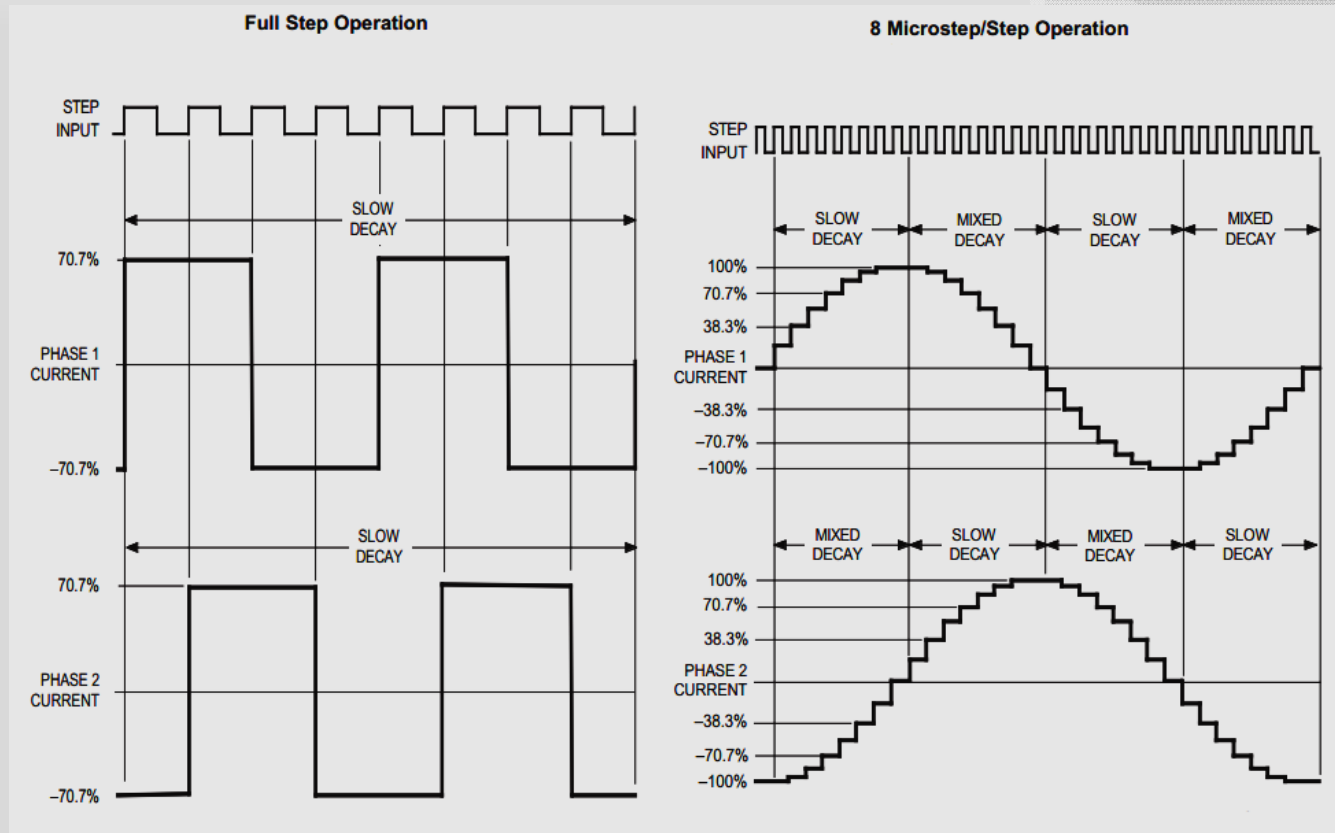
IV. Comanda pentru micropășire („Microstepping” drive)



Presupune alimentarea cu impulsuri de tensiune diferită a bobinelor de comandă.

Fluxul rezultat creșterea și modifică direcția, în funcție de ponderea celor doi curenți de comandă, cu unghiuri mici, ce determină rotirea rotorului, în același fel.

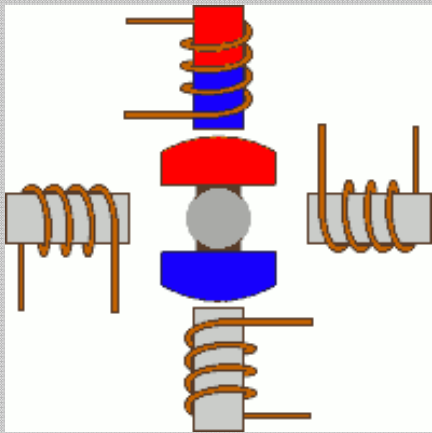
IV. Comanda pentru micropășire („Microstepping” drive)



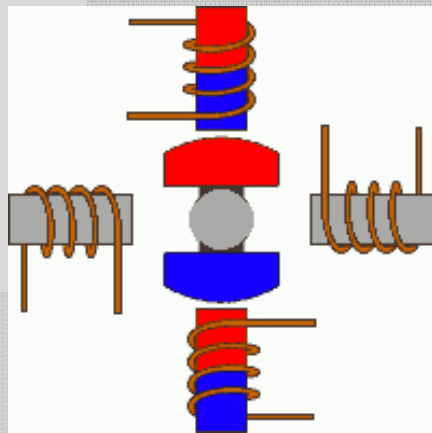
Tehnicile utilizate in prezent presupun micropași in rapoartele 1/5, 1/10, 1/16, 1/32, 1/125 si 1/250 dintr-un pas întreg.

Acest tip de comanda elimină vibrațiile (șocurile) caracteristice comenzii cu pas întreg.

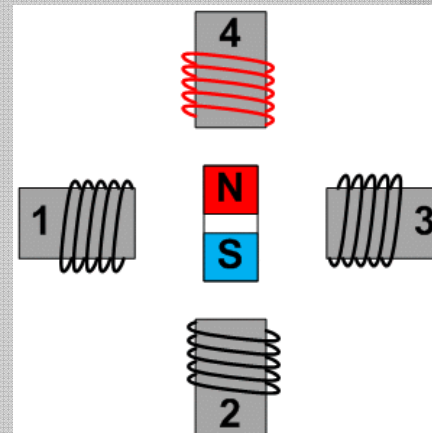
Tehnici de comanda



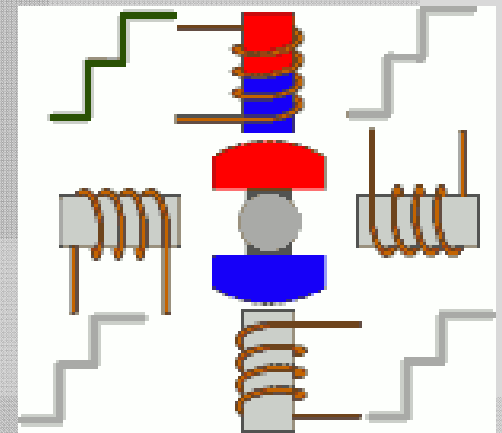
Wave drive



Full step

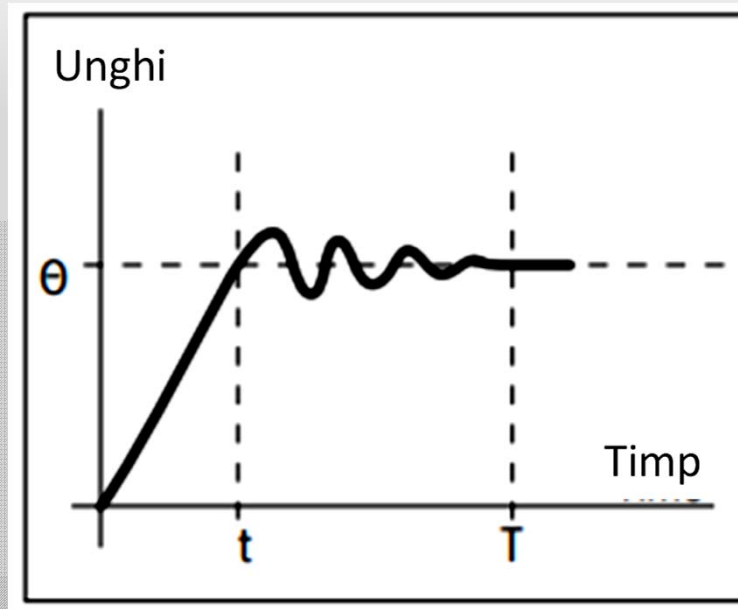


Half step



Microstepping drive

Răspunsul unghiular la impuls de comandă



Aplicarea unui impuls de comandă individual are drept efect realizarea unui pas (definit de timpul t) dar și apariția unor oscilații. Stabilizarea mișcării de rotație se face după timpul T .

Timpul de stabilizare a oscilațiilor (care în anumite aplicații poate fi un fenomen supărător – de ex. în orologerie) depinde de momentul de inerție a sarcinii și de tipul de driver folosit.

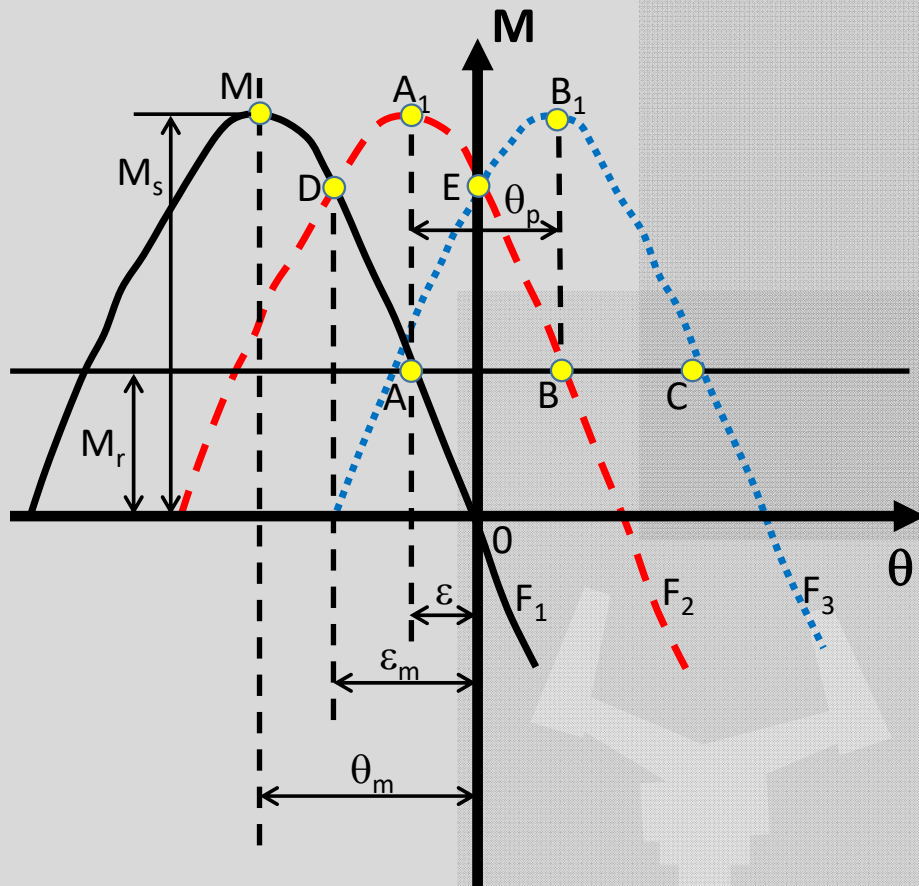
Fenomenul este mai pregnant atunci când unghiul de pas este mare.

Atenuarea sau eliminarea oscilațiilor se poate face folosind tehnica de comandă de micropășire.

Eroarea de realizare a unghiului de pas este de 3-5%. Precizia depinde de acuratețea în realizarea ansamblului mecanic. Eroarea de unghi NU este cumulativă de la un pas la altul.

Funcționarea MPP in regim static. Parametri de funcționare

Caracteristica $M=f(\theta)$ corespunzătoare fiecărei secvențe de comanda este similara celei a unei mașini sincrone pentru regimul de motor.



- θ_p – unghiul de pas. Este unghiul de rotație pe care îl execută rotorul la aplicarea unui impuls de comandă.
- ε – unghiul static de sarcină. Este unghiul ce definește deplasarea punctului de echilibru stabil datorită cuplului de sarcină.
- unghiul dinamic de sarcină. Este unghiul de deviere a rotorului față de punctul de echilibru stabil, după aplicarea ultimului impuls de comandă.
- M_s – cuplul sincronizant maxim (sau cuplul maxim de pornire). Este valoarea maximă a cuplului de sarcină aplicat la axul mașinii, când o fază este alimentată, și care nu produce o rotire continuă a rotorului.

Funcționarea MPP in regim static. Parametri de funcționare

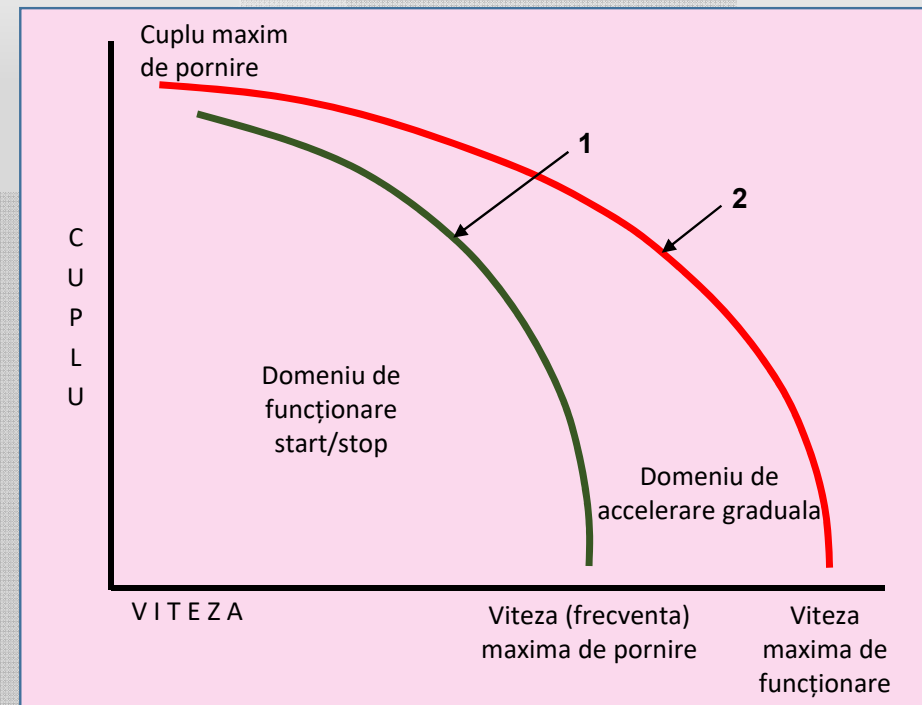
- Când faza F_1 este alimentată, punctul de echilibru stabil corespunde lui $\theta=0$, dacă cuplul de sarcină este nul (funcționare la gol). Pentru un cuplu de sarcină M_r , apare o deviație a rotorului, exprimată de unghiul ε , adică poziția de echilibru nu mai corespunde unui unghi $\theta=0$ ci unei poziții decalate unghiular, ce corespunde punctului de funcționare A (intersecția dintre dreapta cuplului de sarcina și curba cuplului dezvoltat de faza F_1).
- Dacă s-ar aplica rotorului un cuplu de sarcină crescător, punctul de funcționare s-ar deplasa înspre punctul M, punct ce reprezintă valoarea maximă de cuplu pe care MPP poate să-l dezvolte și mașina să funcționeze la sincronism (fără pierdere de pași). Dincolo de punctul M, de exemplu, în regim static, mașina nu mai poate păstra poziția și funcționarea devine instabilă.
- În punctul A are loc comutarea fazei comandate (se alimentează faza F_2). Punctul de funcționare sare din A în A_1 și se deplasează spre B, adică poziția de echilibru corespunzătoare cuplului de sarcina M_r .
- Urmează trecerea din B în B1 s.a.m.d. Funcționarea descrisă poate fi considerată o pornire cu frecvență redusă pe caracteristici de tip static.
- Pornirea poate avea loc dacă valoarea cuplului de sarcină, M_r , este sub valoarea cuplului corespunzătoare punctului D (ceea ce este echivalent cu $\varepsilon < \varepsilon_m$). În realitate, întrucât punctul D se află pe porțiunea instabilă de funcționare a fazei F_2 , punctul de funcționare sare din D în E.

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. Motorul nu poate porni la viteze peste aceasta curbă. De asemenea, 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.

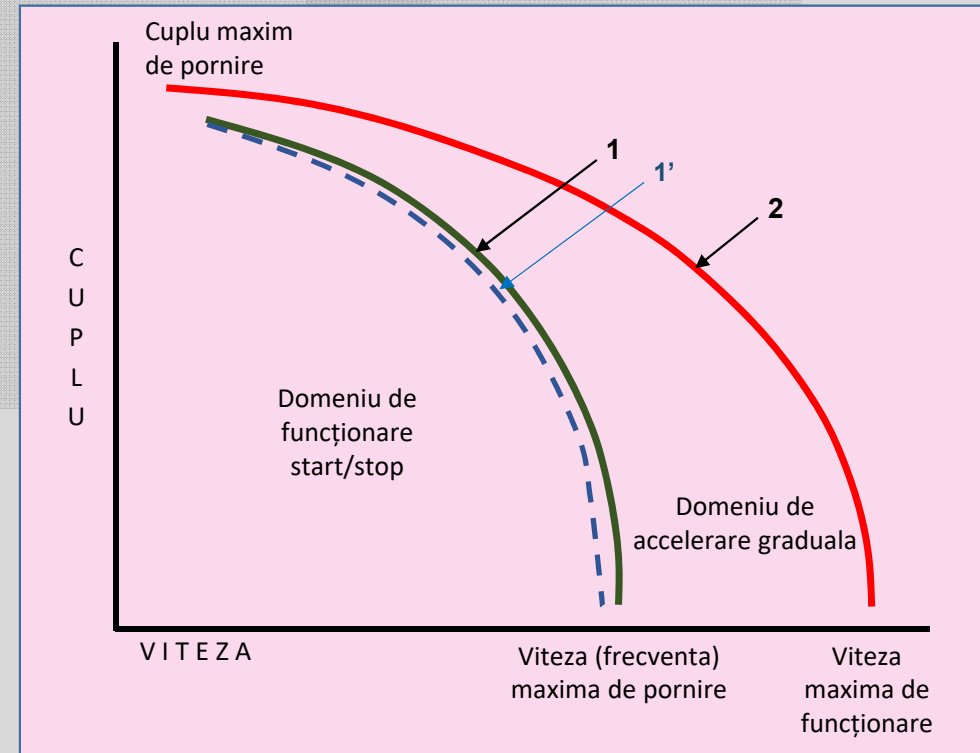
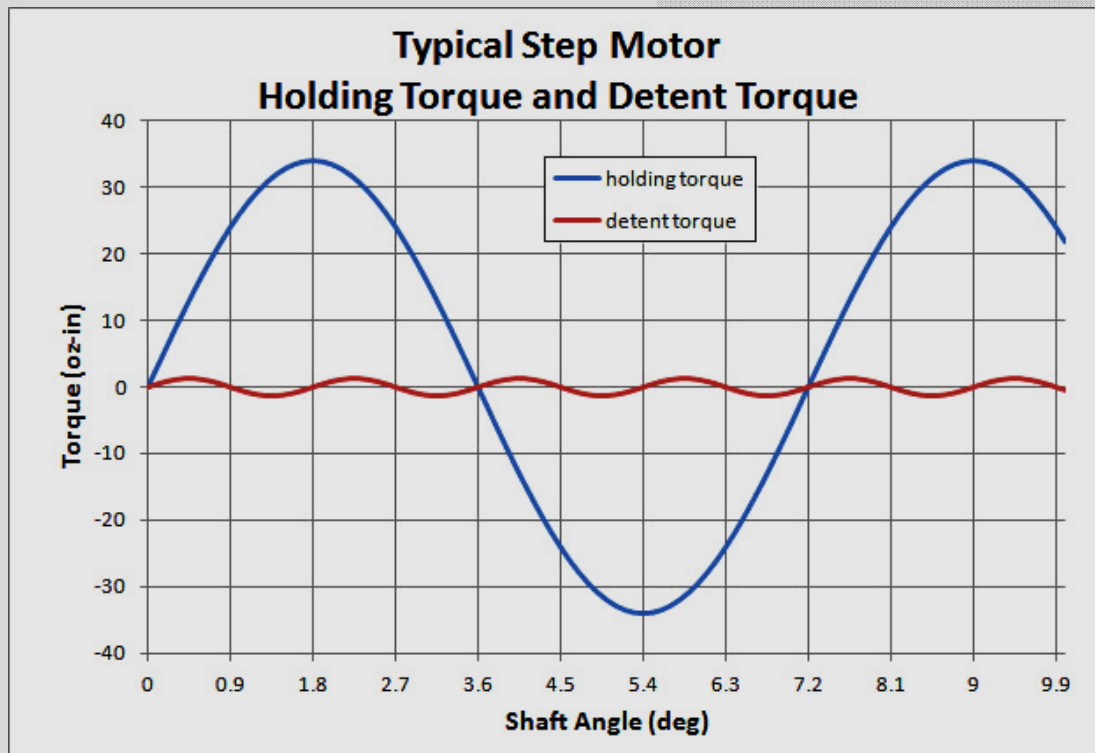
Domeniul de accelerare graduală („slew range”) – este regiunea dintre curbele 1 și 2 unde, pentru a se menține sincronismul, modificarea vitezei trebuie făcută gradual.

Valori specifice de cuplu

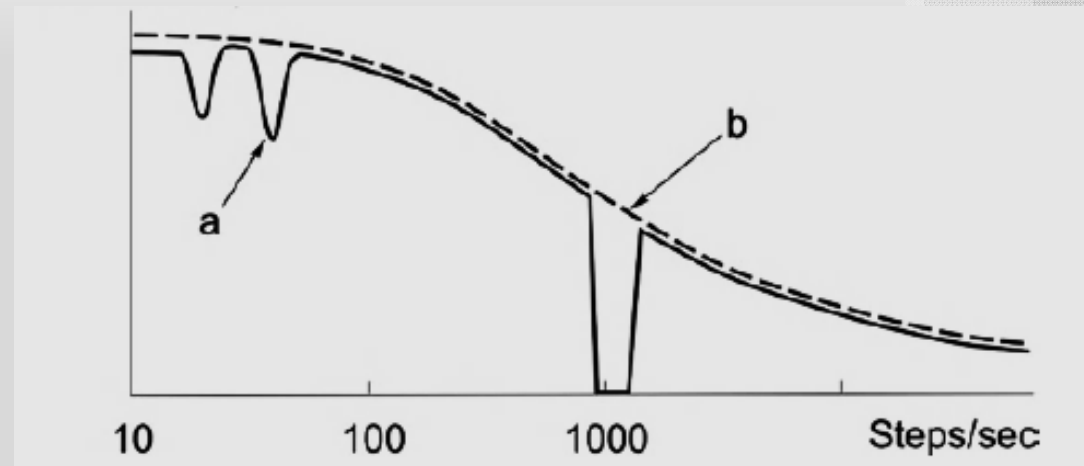
Cuplul maxim de pornire („holding torque”) – cuplul dezvoltat de motor atunci când rotorul stă și curentul de comandă are valoarea nominală.

Cuplul de detentă („detent torque”) – cuplul dezvoltat de motor când nici un curent nu străbate înfășurările de comandă (MPP cu reluctanță variabilă NU au cuplul de detentă).

Cuplul de detentă determină o ușoară micșorare a cuplului motorului pas cu pas (curba 1'). Pe de altă parte, oscilațiile specifice fiecărui pas sunt atenuate de cuplul de detentă.



Pierderea de pași la MPP



Fenomene de rezonanță și instabilitate manifestate la frecvențe foarte joase sau frecvențe înalte

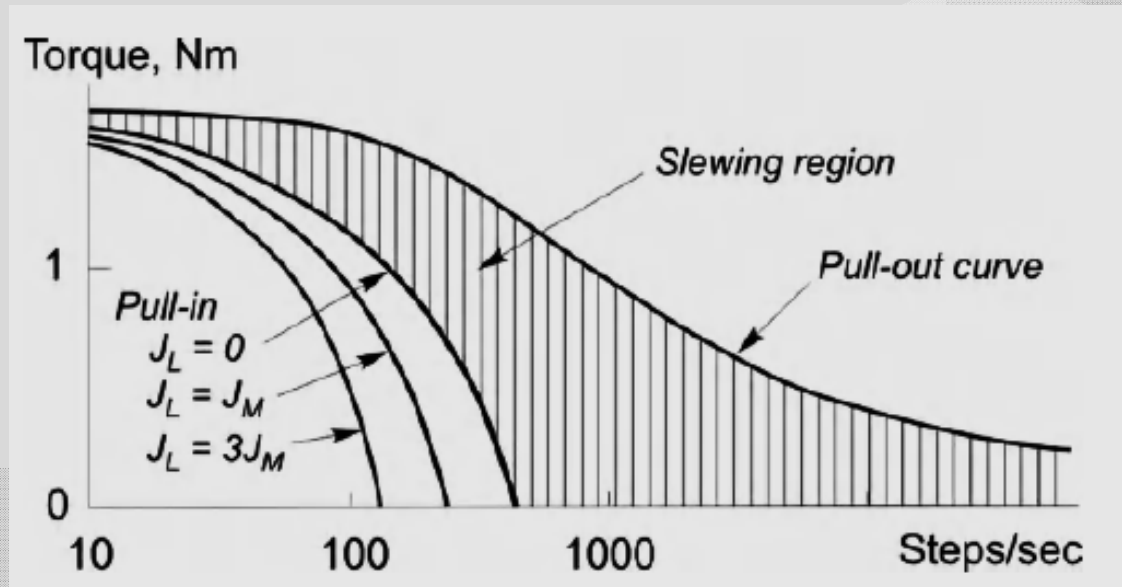
a) La frecvențe foarte joase, apare un fenomen de rezonanță între frecvența de comandă și frecvența de oscilație naturală a rotorului. Drept urmare, apar pierderi de pași (ieșire din sincronism).

b) La frecvențe înalte, apare un fenomen de „positive feedback” (reacție a sistemului ce amplifică mici perturbații) ce determină fenomene accentuate de ieșire din sincronism. Frecările vâscoase din rulmenți reprezintă o sursă extrem de frecventă a acestui fenomen.

Apariția celor două fenomene este mult mai probabilă la funcționarea în regim stabilizat decât în regimuri tranzitorii.

Pentru atenuarea sau eliminarea lor (curba b), se plasează un amortizor pe axul mașinii sau se folosesc tehnici de comandă modulate a frecvenței semnalelor de alimentare.

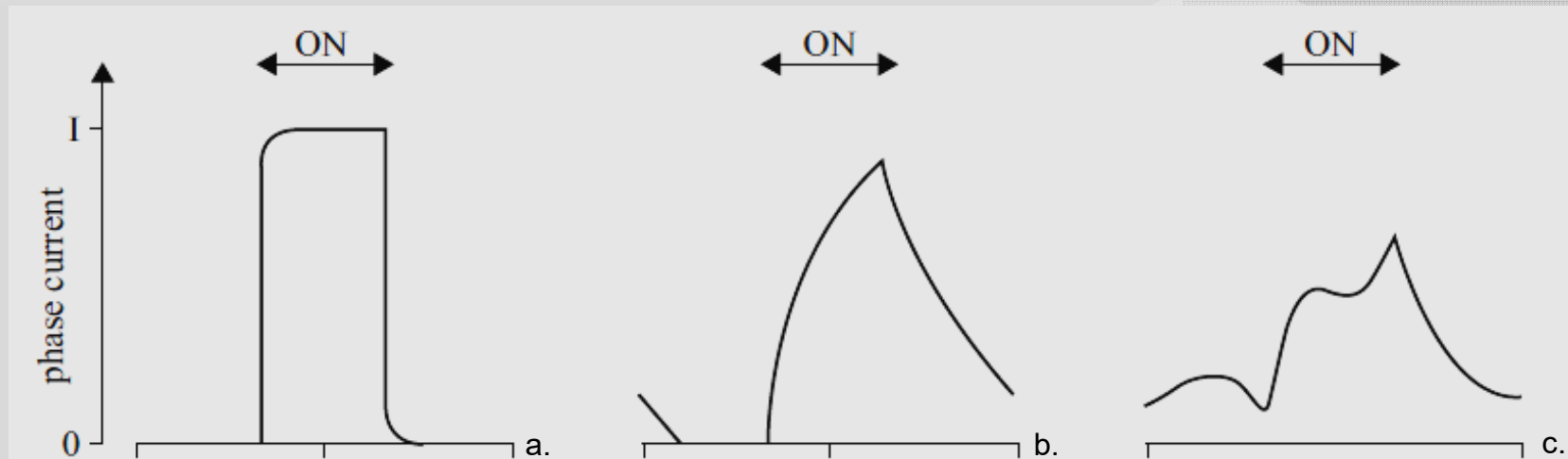
Influența sarcinii asupra caracteristicii de funcționare a MPP



Influența momentului de inerție a sarcinii asupra caracteristicii limita de pornire
 J_L – momentul de inerție a sarcinii; J_M – momentul de inerție al MPP

Domeniul de funcționare start/stop este puternic influențat de tipul acționării și parametrii sarcinii. Odată cu creșterea momentului de inerție a sarcinii, *caracteristica limita de pornire* („Pull-in torque curve”) se deplasează spre axa ordonatelor, respectiv domeniul de funcționare start/stop se îngustează.

Influența frecvenței de comutație asupra curentului de comandă a MPP

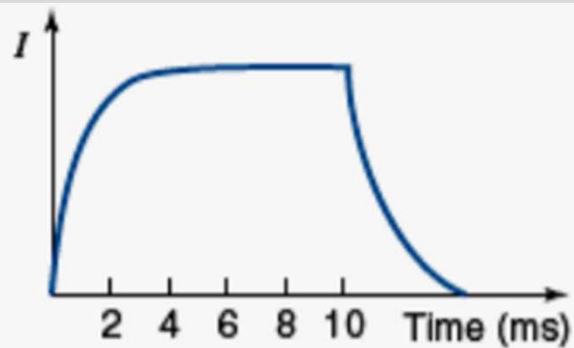


Forma de unda a curentului de comandă pentru: a. frecvență scăzută; b. frecvență medie; c. frecvență ridicată.

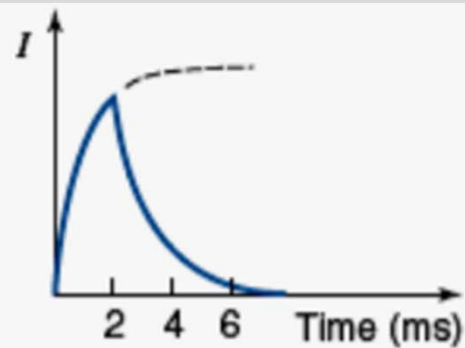
Ideal, forma curentului de comanda prin înfășurările MPP este dreptunghiulară. In practică, niciodată nu se stabilește un curent dreptunghiular.

Forma curentului este dictată de constanta de timp electrică, $\tau = L/R$.

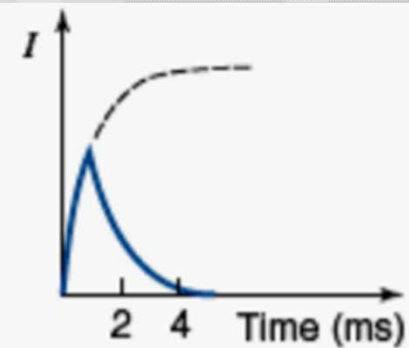
Cu cât frecvența pulsurilor de curent este mai mare, cu atât forma de undă este mai deformată. In fapt, cu creșterea frecvenței scade valoarea efectiva a curentului, ceea ce duce la scăderea cuplului electromagnetic dezvoltat de MPP.



a) 100 pași/sec.



b) 500 pași/sec.



a) 1000 pași/sec.

Odată cu creșterea frecvenței de comandă (pentru mărirea vitezei), stabilirea curentului prin înfășurări devine din ce în ce mai dificilă. Are loc o micșorare a valorii efective a curentului ce determină diminuarea cuplului dezvoltat de motor.

*Metode de creștere a
cuplului la turații mari*

1.

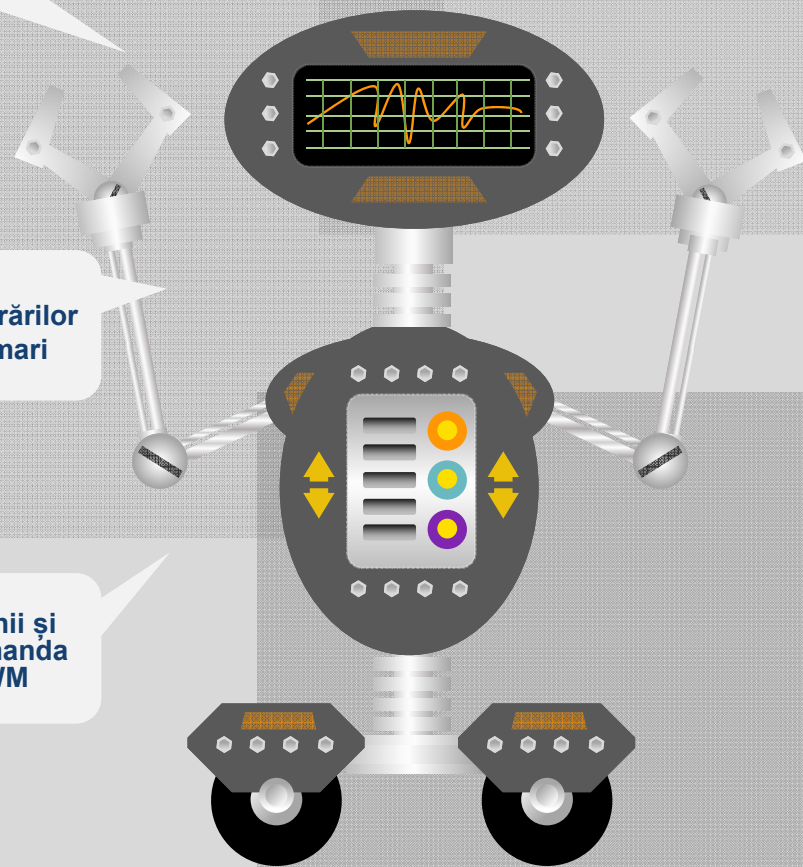
Reducerea constantei
de timp a înfășurărilor

2.

Alimentarea înfășurărilor
cu tensiuni mai mari

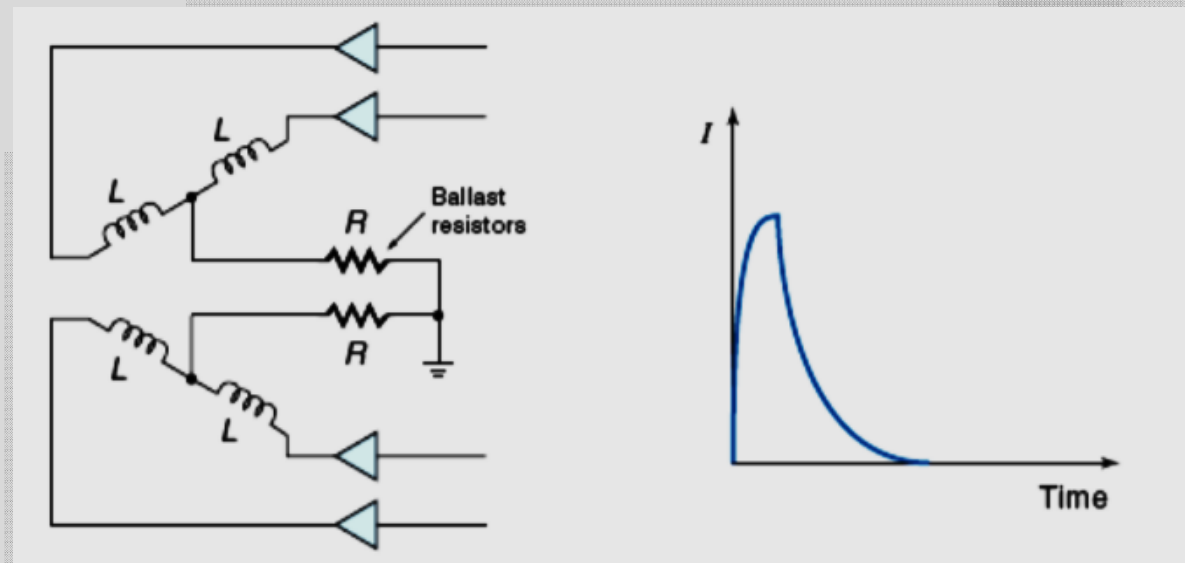
3.

Creșterea tensiunii și
curentului de comanda
prin tehnici PWM



1. Adăugarea unor rezistențe de balast conectate la înfășurările motorului pentru reducerea

constantei de timp: $\tau = \frac{L}{R}$

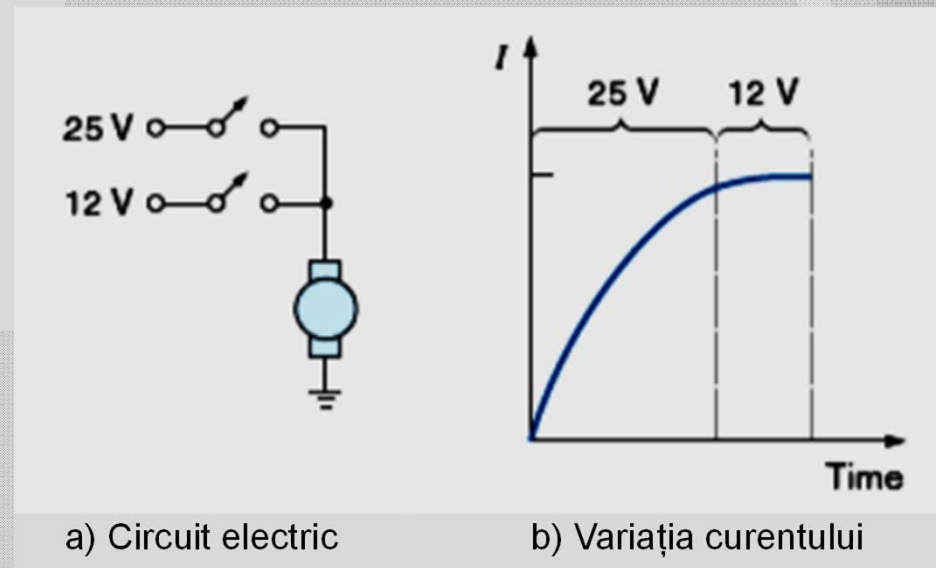


Adăugarea unei rezistențe de balast

1000 pași/sec.

Metode de creștere a cuplului la turații mari

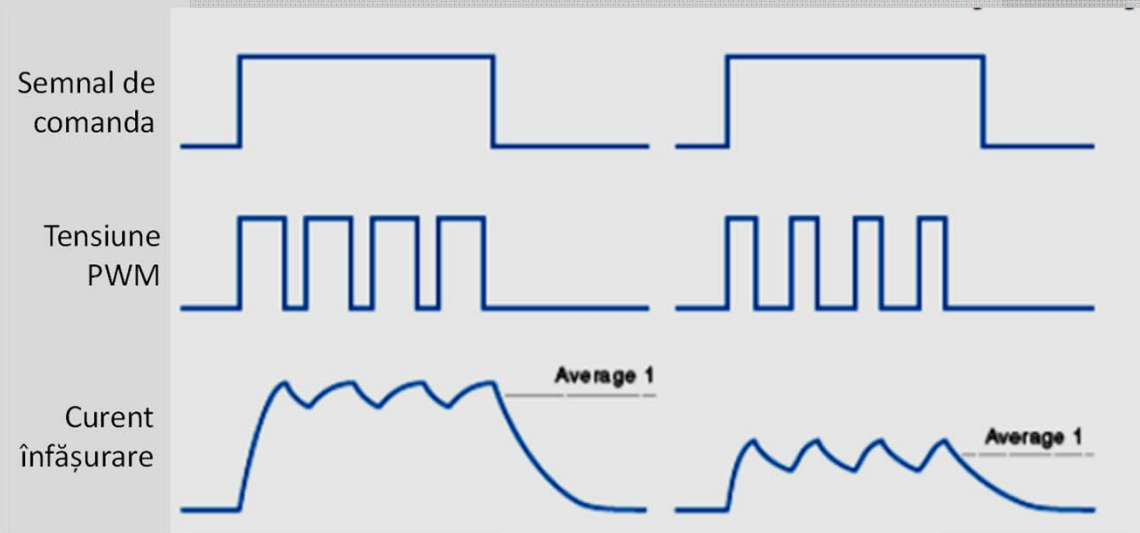
2. Alimentarea înfășurărilor cu nivel dublu de tensiune:



Inițial se aplica o tensiune mai mare (25 V în exemplul din figura), forțându-se astfel creșterea curentului.

În faza a doua, se întrerupe tensiunea de 25 V și se conectează sursa de 12 V pentru menținerea valorii curentului până la sfârșitul perioadei de comandă.

3. Modificarea nivelului de tensiune prin utilizarea tehnicii PWM:



Se modifică durata de conducție medie ceea ce duce la modificarea valorii medii a curentului prin înfășurările comandate.

Pentru ce sunt MPP potrivite?

1. **Poziționare** – Întrucât mișcarea MPP reprezintă un număr precis cunoscut de pași, ele sunt potrivite pentru aplicațiile ce necesită o poziționare precisă (printere 3D, mașini cu comandă numerică, plotere, roboți, etc).
2. **Control al vitezei** – Relația directă între frecvența impulsurilor de comandă și turație le recomandă pentru procese automate și robotică.
3. **Cuplu la viteze reduse** – MPP dezvoltă cuplu maxim la viteze reduse.

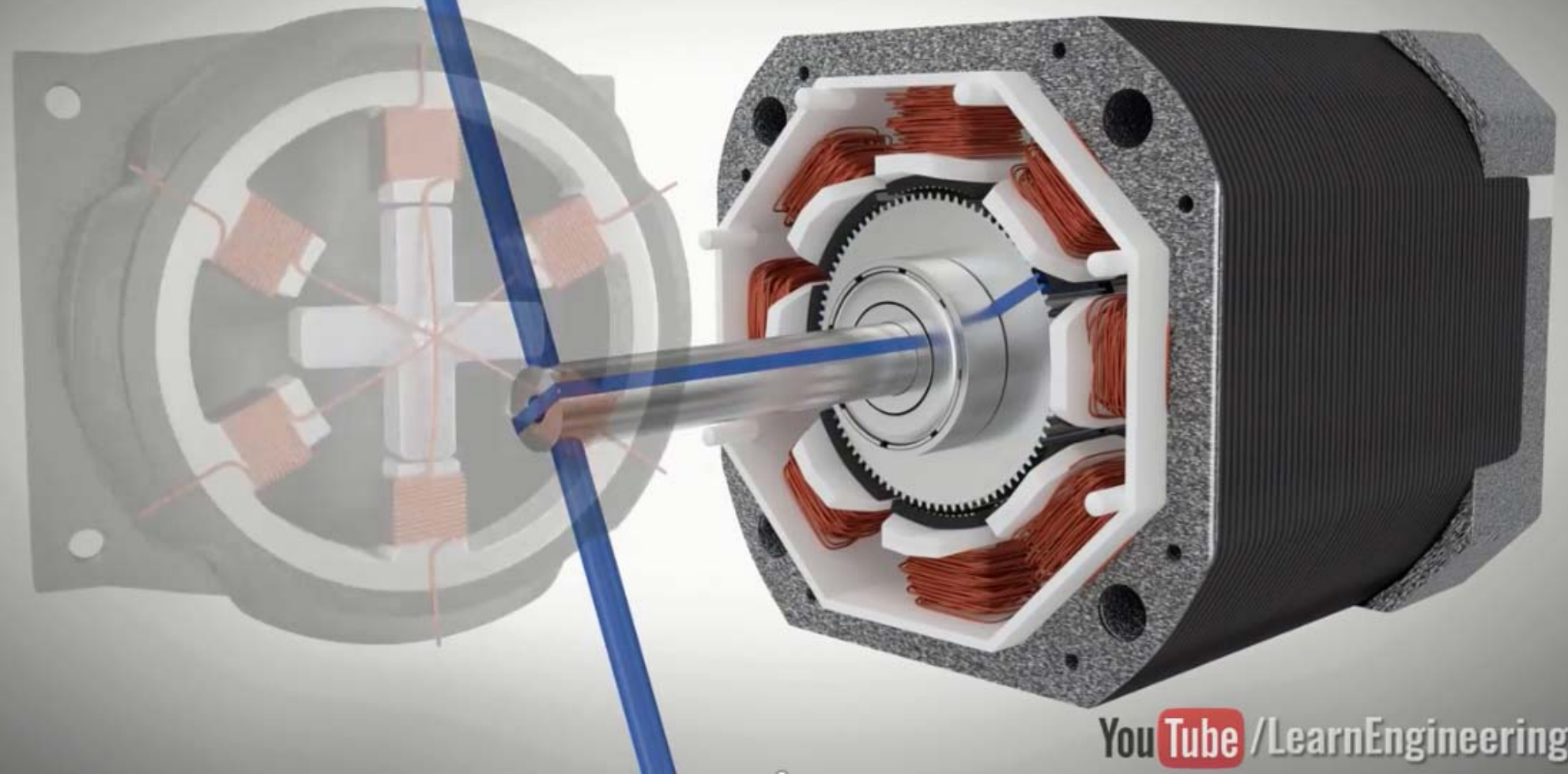
Care sunt limitările MPP?

1. **Randament scăzut** – Curentul prin înfășurări este independent de valoarea sarcinii. MPP consumă putere (are curenți prin înfășurări) și când nu se rotește.
2. **Cuplu redus la viteze mari** – Cuplul dezvoltat la viteze mari (frecvențe mari de comutație) este limitat de valoarea medie a curentului ce se stabilește prin înfășurări.
3. **Fără buclă de reacție** – Spre deosebire de servomotoare, cele mai multe MPP funcționează în buclă deschisă. Pierdere sincronismului nu este sesizată și corectată automat. Acest lucru s-ar putea face, dar necesită o schemă de control mai complexă și traductor de poziție.

MP vs. RV vs. Hibrid

	MP	Rel. var.	Hibrid
Cost	Cel mai ieftin	Moderat	Cel mai scump
Design	Moderat	Simplu	Complicat
Rezoluție	3° - 30°/pas	1,8°/pas si chiar mai mic	
Cuplu = f(viteza)		Căderea de cuplu la creșterea vitezei este mai puțin pronunțată	
Zgomot	Silențios	Zgomotos	Silențios
Tip de comandă	Pas întreg; ½ pas; micropășire	De obicei, pas întreg	Pas întreg; ½ pas; micropășire

VARIABLE RELUCTANCE STEPPER MOTOR



YouTube / LearnEngineering

How Stepper Motor Works?



Open Loop Control System

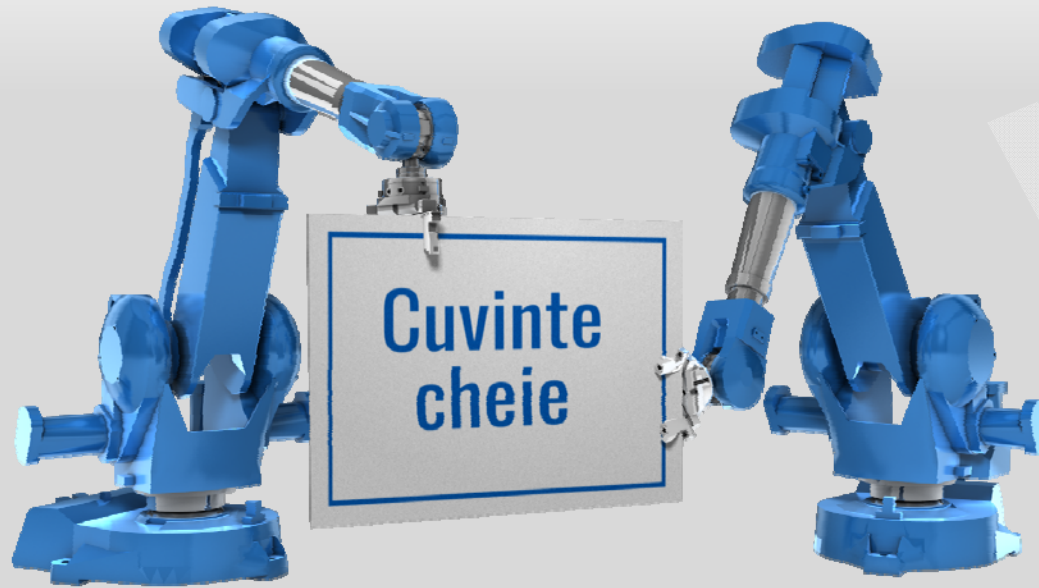
Input



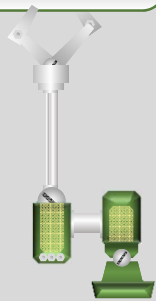
Process



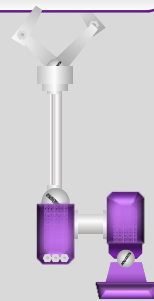
Output



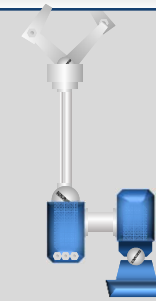
Comanda
electronica



Unghi de
pas



Poziționare
precisa

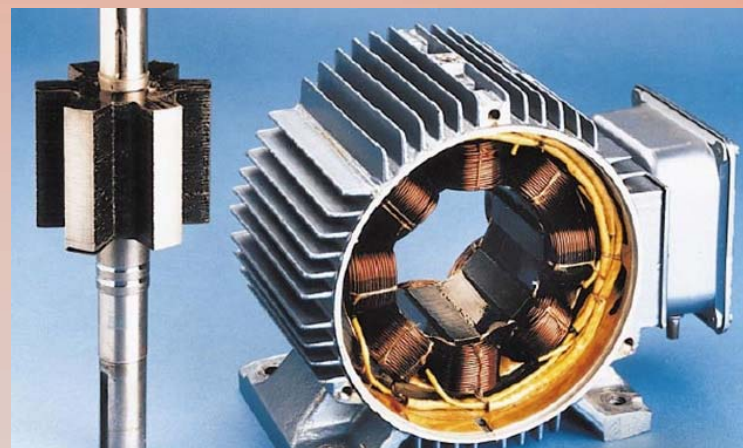


C U R S 10

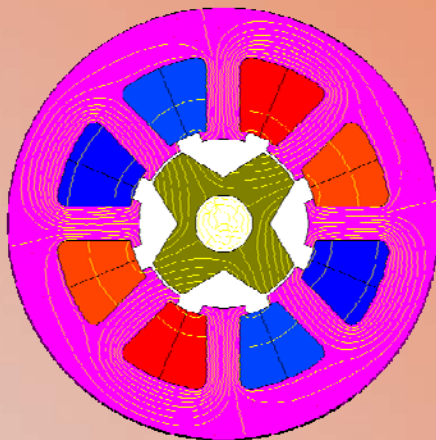
Switched reluctance motors

Motoare
cu reluctanta
comutata

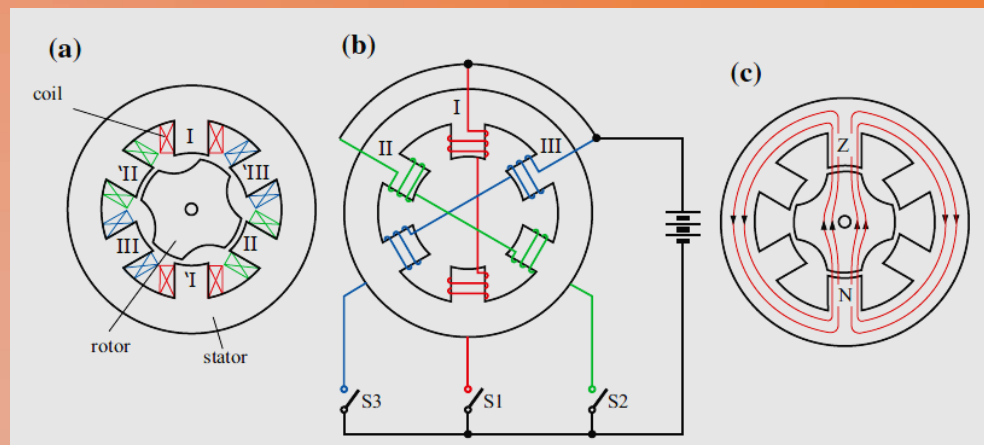




SRM: rotor + stator



Analiza MEF - linii de câmp.



a. structura; b. înfășurări statorice + circuit de alimentare; c. linii de câmp.



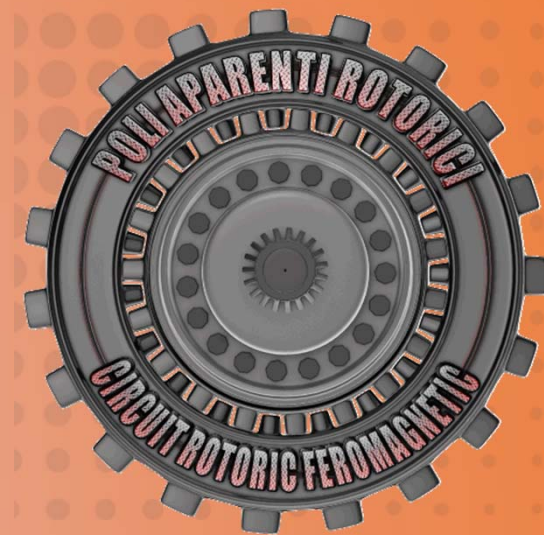
Definiție

Mașina cu reluctanță variabilă comutată („Switched Reluctance Motor” sau SRM) este o mașină cu comutație electronică, ce funcționează pe baza cuplului de reluctanță ce tinde să poziționeze polii pe trasee de reluctanță minimă.

SRM este mașina la care atât statorul cât și rotorul sunt prevăzute cu poli aparenti.

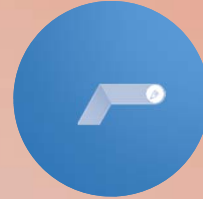
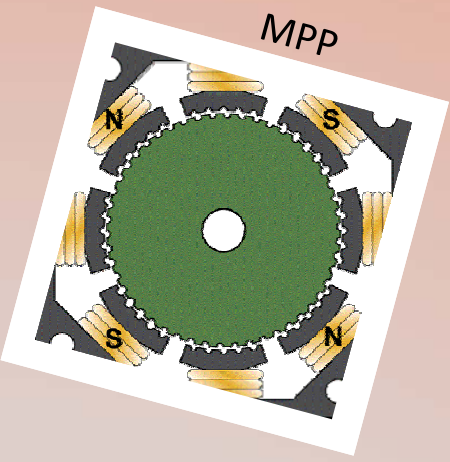
Pe polii statorici sunt prevăzute înfășurări de tip concentrat.

Rotorul este o piesă feromagnetică (fără înfășurări, fără magneți permanenți).



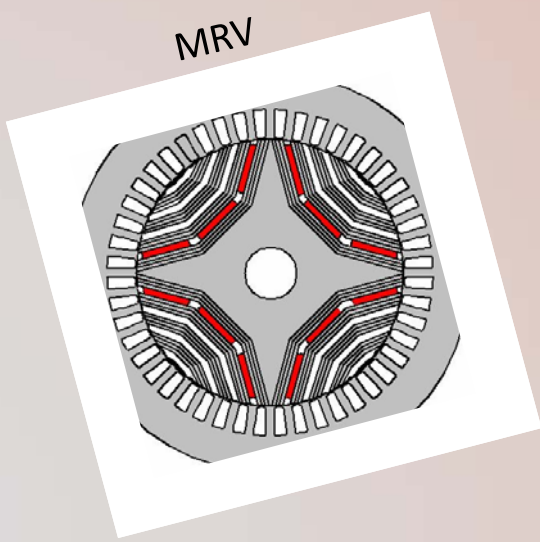
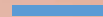
Caracteristici generale





Constructiv, SRM este un motor pas cu pas cu reluctanță variabilă dar care are următoarele diferențe fundamentale:

- pașii efectuați de SRM sunt mult mai mari (numărul de poli sau de dinți este mult mai mic)
- SRM are sistem de control cu buclă închisă pe când MPP funcționează în buclă deschisă.

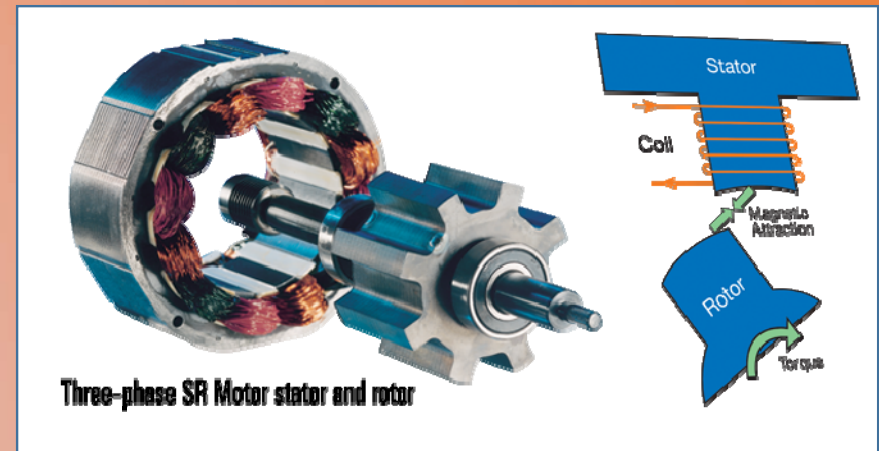
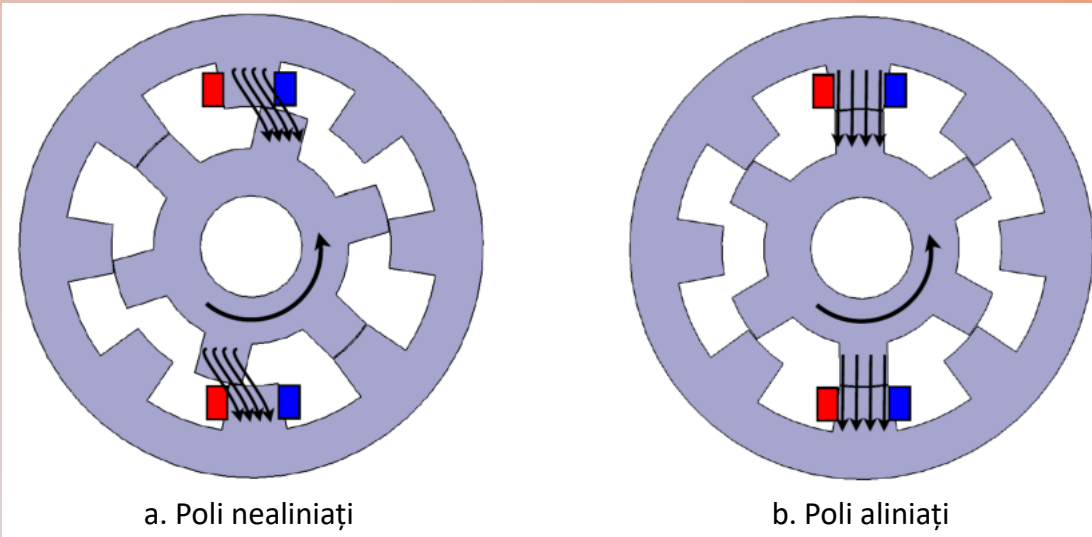


Principiul de funcționare este identic cu cel al motorului cu reluctanță variabilă, MRV. Există însă câteva deosebiri:

- statorul MRV nu are poli aparenti ci crestături uniform distribuite;
- înfășurarea MRV este de tip repartizat și poate fi conectată direct la rețea sau alimentată prin convertor.
- variația inductanței statorice, odată cu poziția rotorului, este sinusoidală la MRV și trapezoidală (sau triunghiulară) la SRM.



Principiul de funcționare a SRM



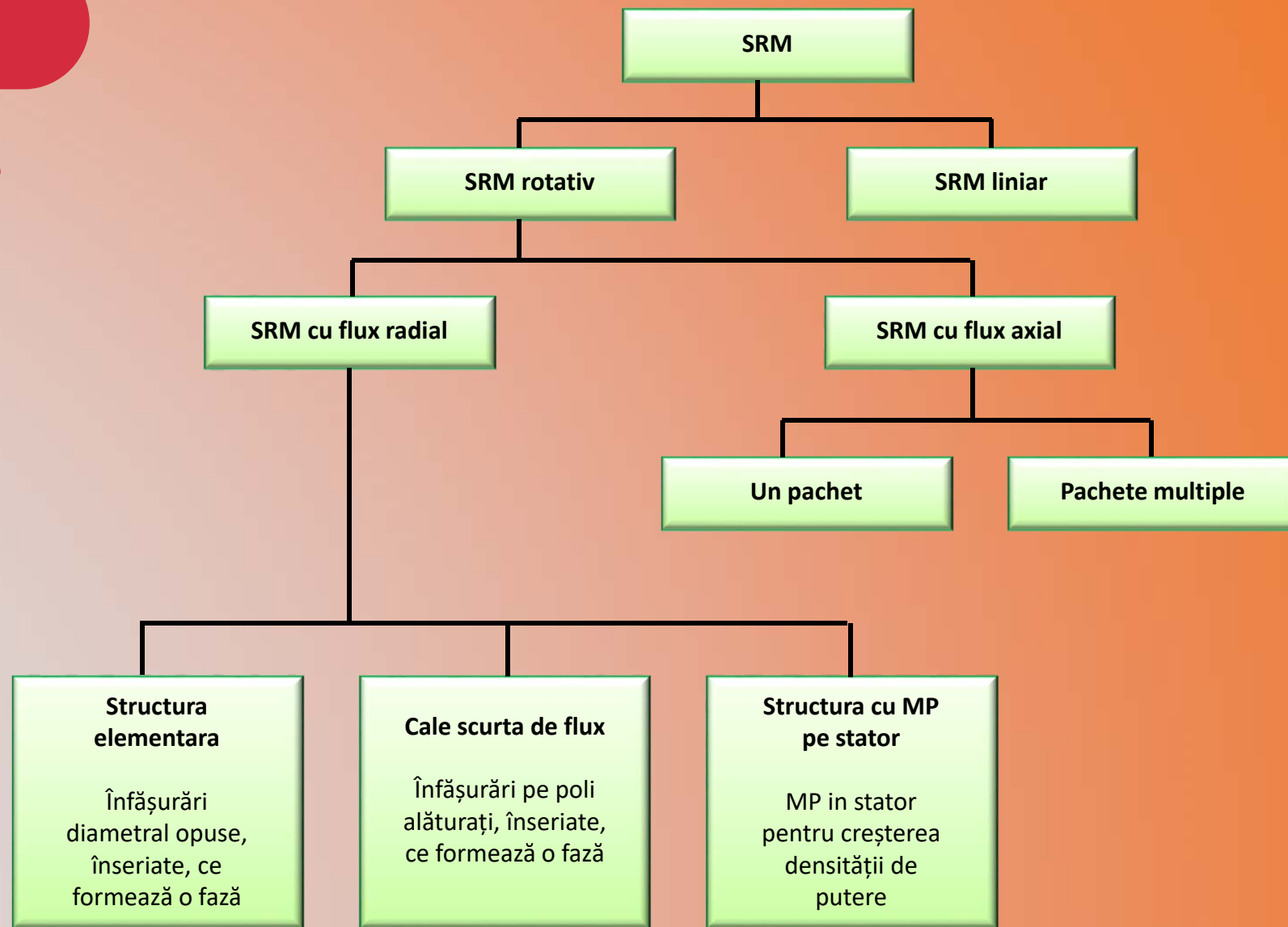
De regulă, se alimentează câte două înfășurări aflate pe poli diametral opuși.

Conform principiului reluctanței variabile, rotorul tinde să se alinieze cu polii alimentați datorită apariției cuplului de reluctanță.

În momentul alinierii, cuplul dezvoltat devine zero. Pentru rotirea rotorului este necesară întreruperea alimentării fazei deja energizate și alimentarea perechii de bobine următoare în secvența de comandă.

Întreruperea și stabilirea succesivă a curenților reprezintă „comutația electronică” a mașinii.

Clasificare



Configurații posibile – poli statorici / poli rotorici



Numărul de poli pe stator:

$$N_s = 2 \times m \times q$$

Numărul de poli pe rotor:

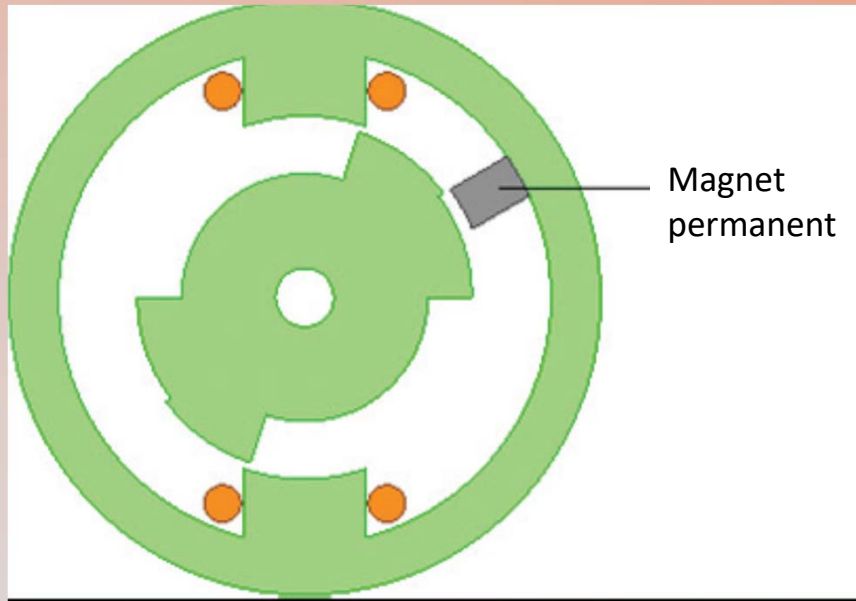


- a) $N_r = 2 \times q \times (m - 1)$ și rezultă: $N_r < N_s$
- b) $N_r = 2 \times q \times (m + 1)$ și rezultă: $N_r > N_s$
- c) $N_r = 2 \times q$ pentru $m = 1$

unde: m – numărul de faze; q – număr întreg ($q = 1, 2, 3\dots$)

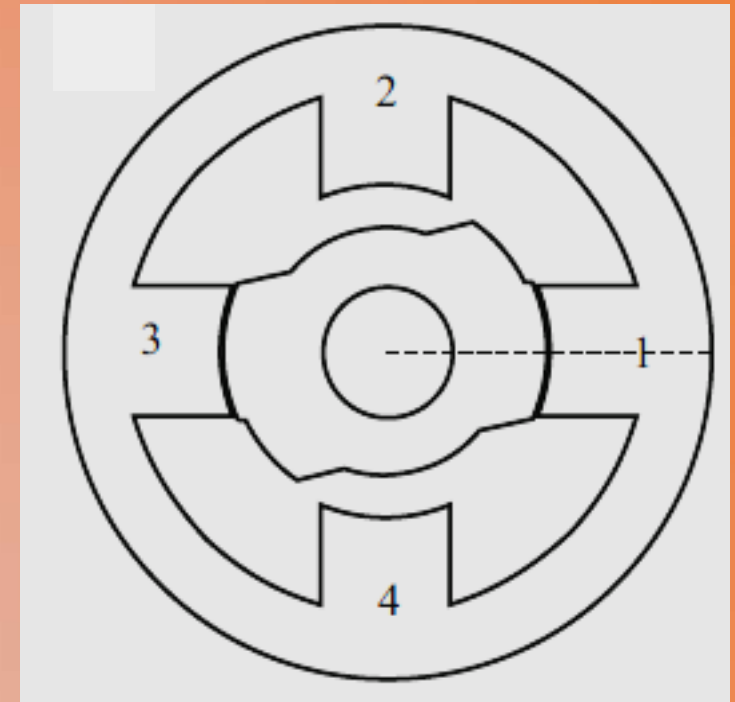
Număr faze, m	1		2		3			4		5	
Număr poli statorici, N_s	2	4	4	8	6	12	18	8	16	10	20
Număr poli rotorici, N_r	2	4	2	4	4	8	12	6	12	8	16
q	1	2	1	2	1	2	3	1	2	1	2

Configurație monofazată



Configurație 2/2 ($m=1$; $q=1$)

Configurație bifazată



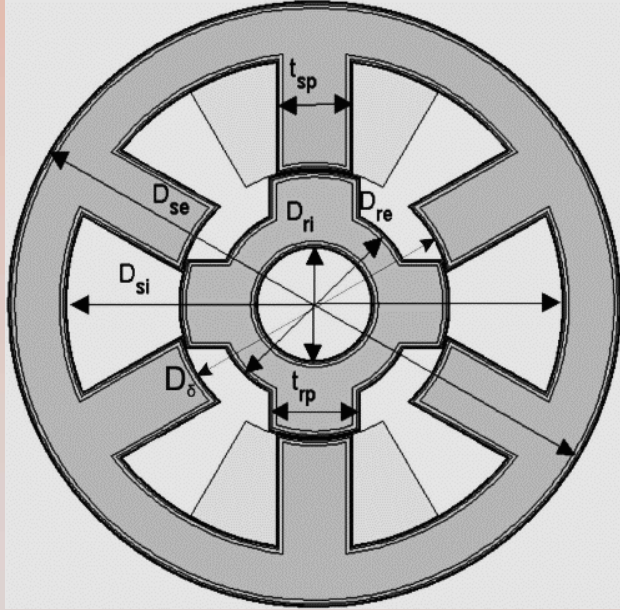
Configurație 4/2 ($m=2$; $q=1$)

La mașinile monofazate și bifazate, polii rotorici au întrefier variabil în trepte. În acest fel, la aplicarea primului impuls de comandă (pornire), se elimină ambiguitățile în alegerea sensului de rotație (în cazul din figură, rotorul se va roti în sens antiorar).

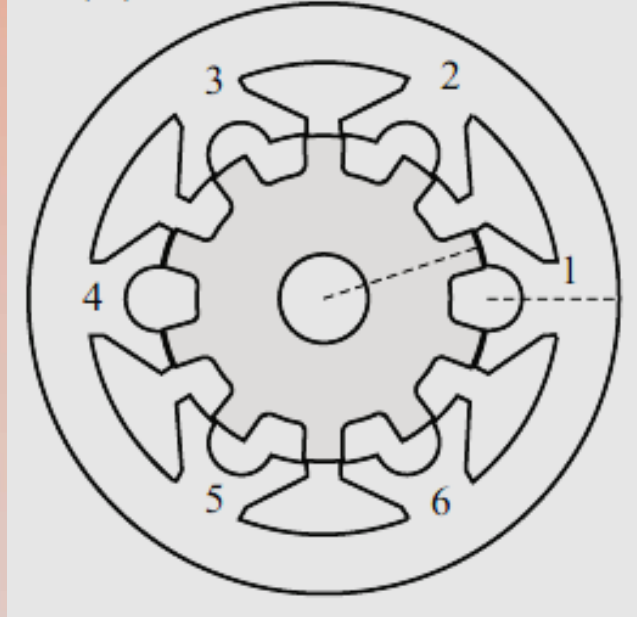
Pentru evitarea pozițiilor de aliniere a polilor statorici și rotorici în repaus, uneori se plasează pe jugul statoric un magnet permanent ce scoate rotorul din poziția de aliniere a polilor.



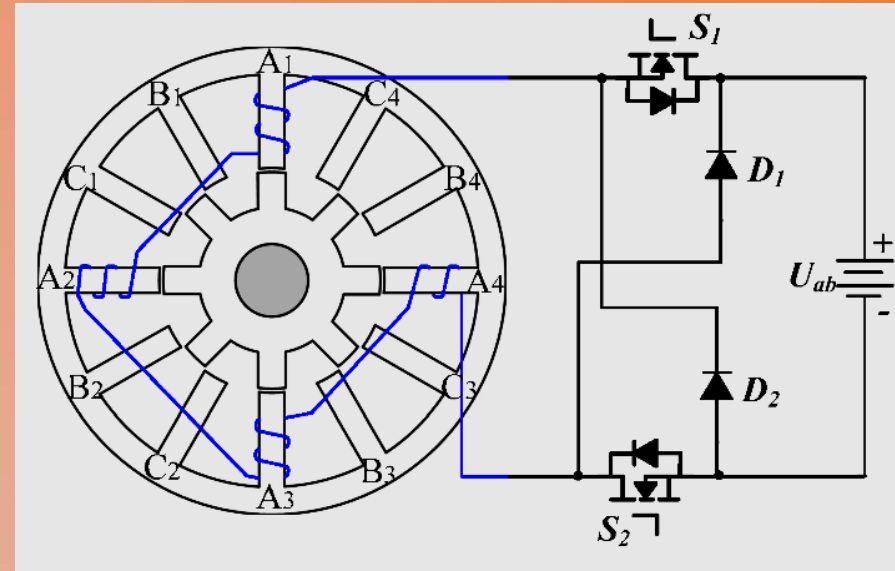
Configurație trifazată



Configurație 6/4 ($m=3$; $q=1$)



Configurație 12/10 ($m=3$; $q=2$) – structura „atipică”



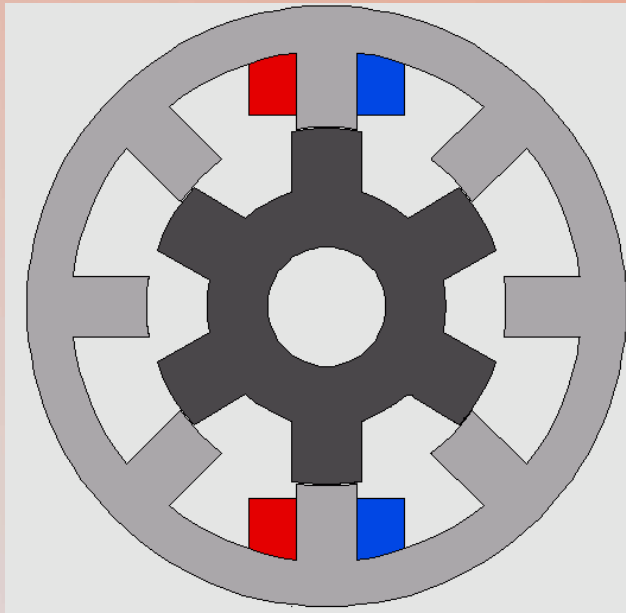
Configurație 12/8 ($m=3$; $q=2$)

Configurațiile trifazate sunt cele mai des utilizate întrucât asigură un raport bun preț / performanțe.

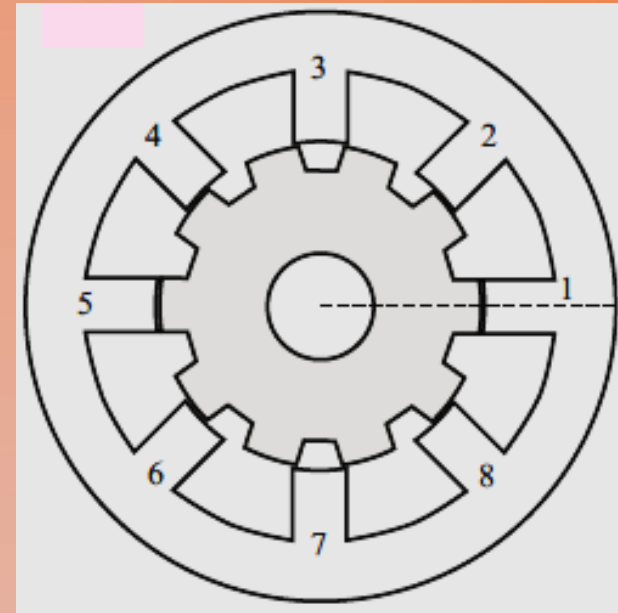
Configurația 6/4 este utilizată îndeosebi pentru aplicații cu viteză mare. Cu cât crește numărul de poli, cu atât viteza este mai mică la o frecvență dată.



Configurație cu patru faze



Configurație 8/6 ($m=4$; $q=1$)

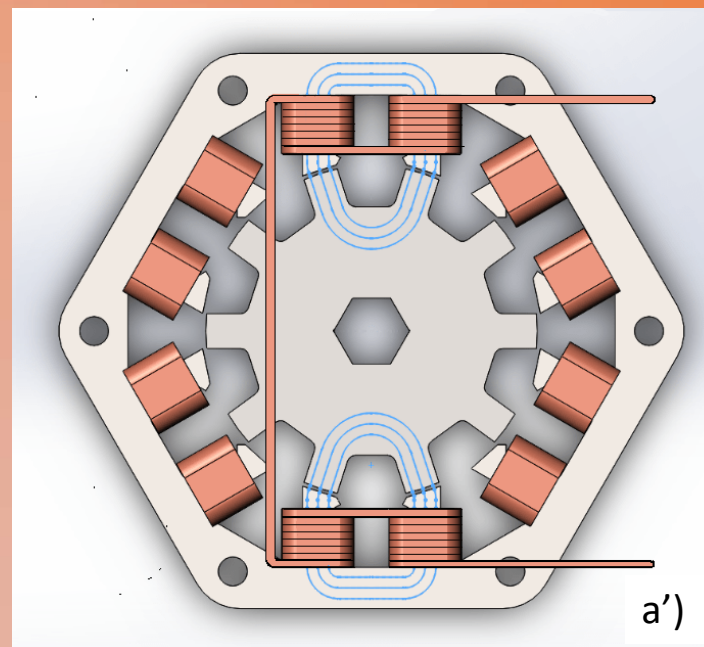
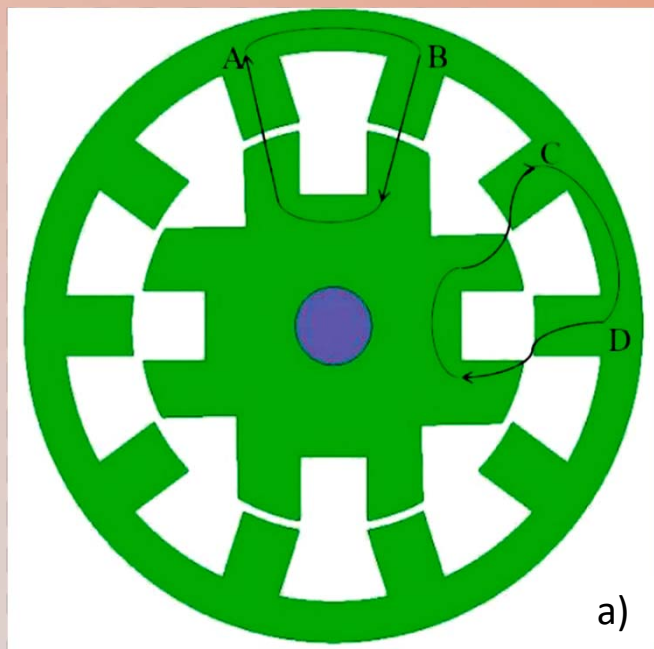


Configurație 8/10 ($m=4$; $q=1$)

Începând cu mașinile cu patru faze, motoarele prezintă „toleranță la defect”, adică pot funcționa chiar dacă una dintre faze este ieșită din uz.



Configurație cu cale scurta de flux

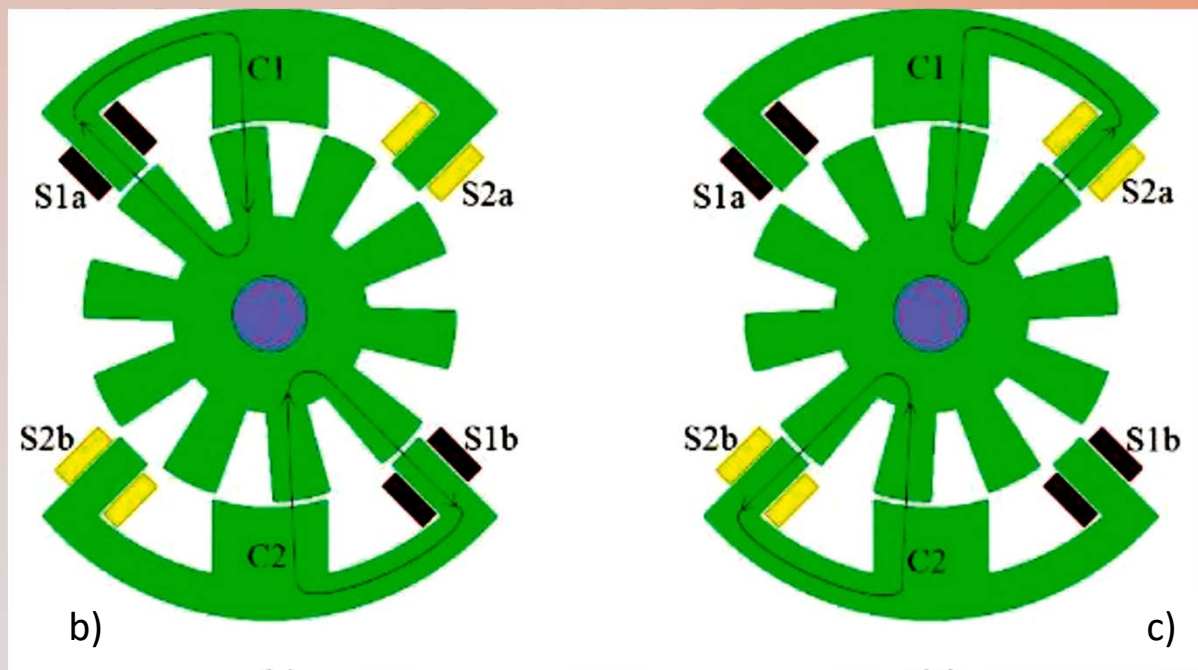


In acest tip de configurație (fig. a), înfășurările comandate sunt plasate pe poli alăturați (și nu poli opuși). Pe figură sunt alimentate bobinele polilor A și B (ce a dus la alinierea polilor) urmând ca pentru rotire să fie alimentate bobinele polilor C și D.

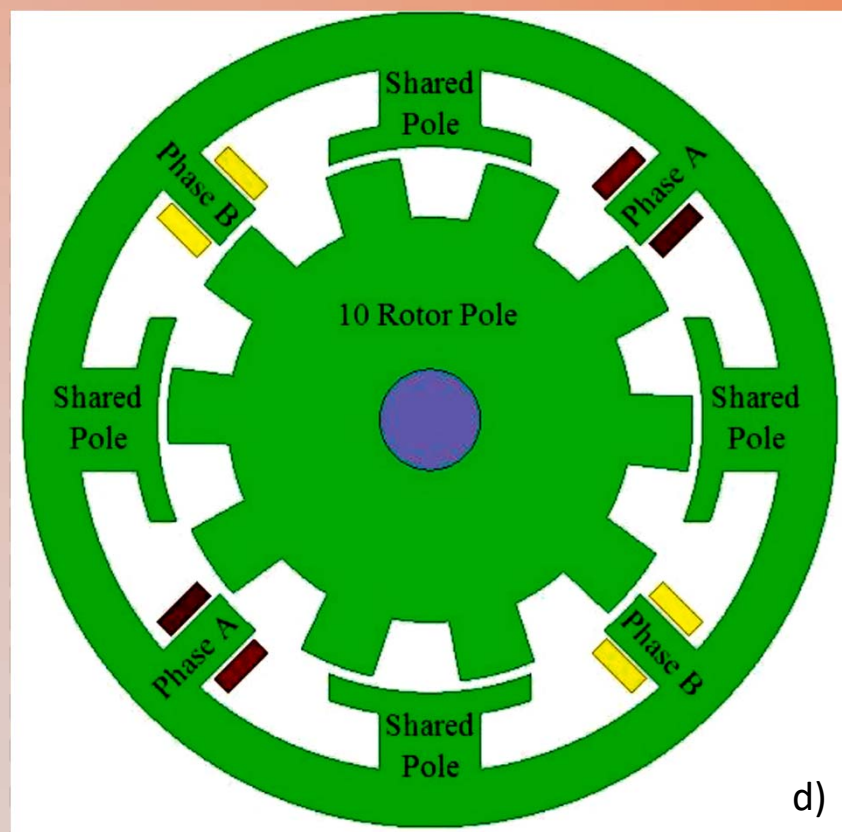
In această structură, forțele de atracție ce determină cuplul de reluctanță au o acțiune unilaterală. Structura este dezechilibrată. Pentru echilibrare se poate adopta structura din figura a' unde bobinele polilor A și B sunt înseriate și conectate și cu bobinele de pe polii diametral opuși.



Configurație cu cale scurta de flux și miez statoric în E

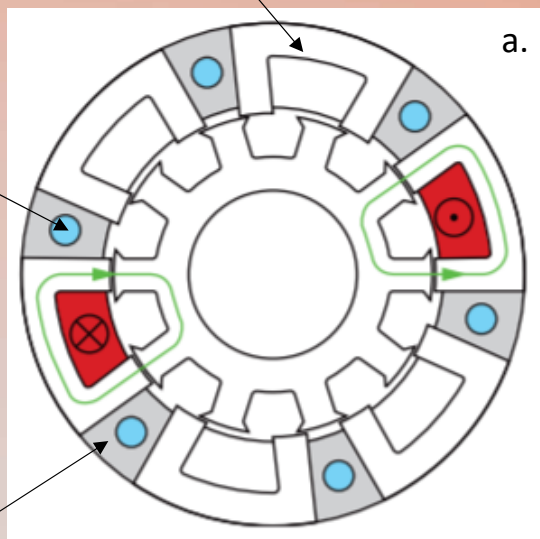


Structurile din fig. b și c au sectoare de miez feromagnetic statoric în forma de E, unde polul central nu are înfășurare de comandă și este folosit doar pentru închiderea liniilor de câmp și întărirea cuplului de reluctanță. Alimentarea se face succesiv pe perechile de bobine S1a-S1b respectiv S2a-S2b.



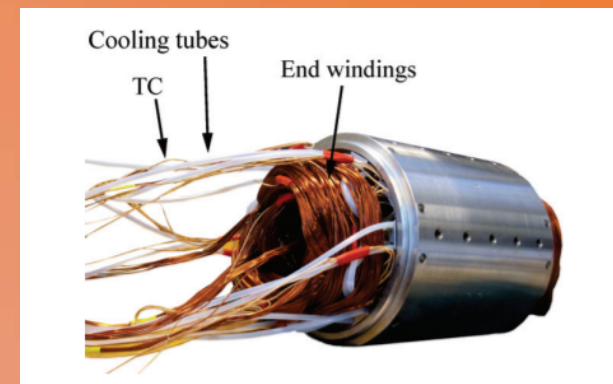
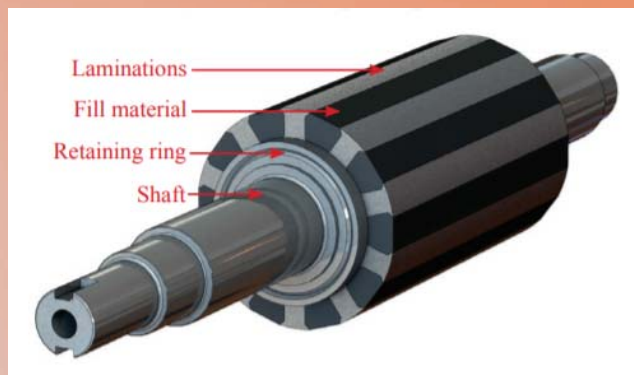
Pe varianta cu miez in forma de E se pot adăuga porțiuni de circuit magnetic cu poli fără înfășurări care să întărească cuplul de reluctanță (câmpul creat de faza B, de ex., se închide prin polii adiacenți fără înfășurări) .

Piesa feromagnetică în formă de U

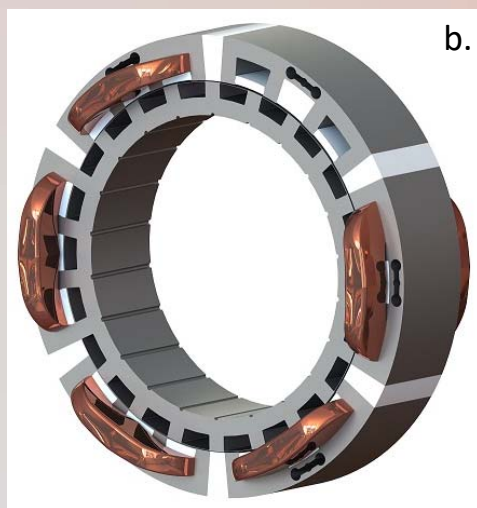


Canal de răcire

Sector neferomagnetic



Configurație cu cale scurta de flux și miez statoric în U

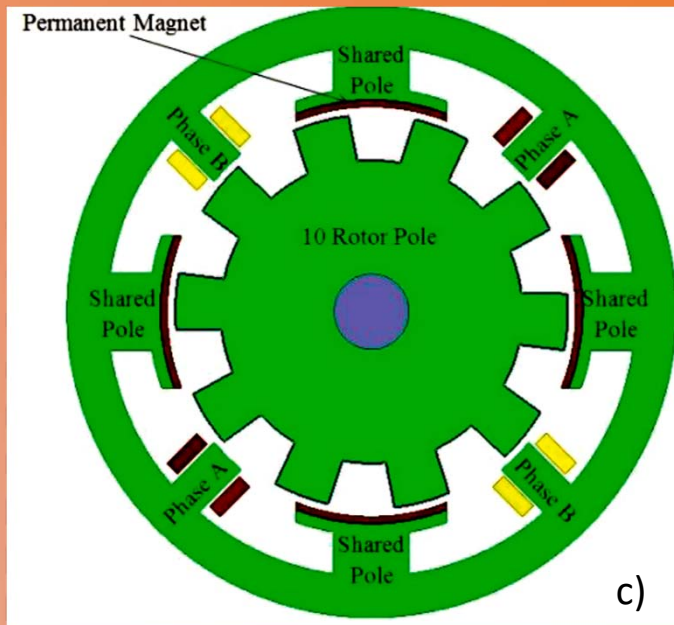
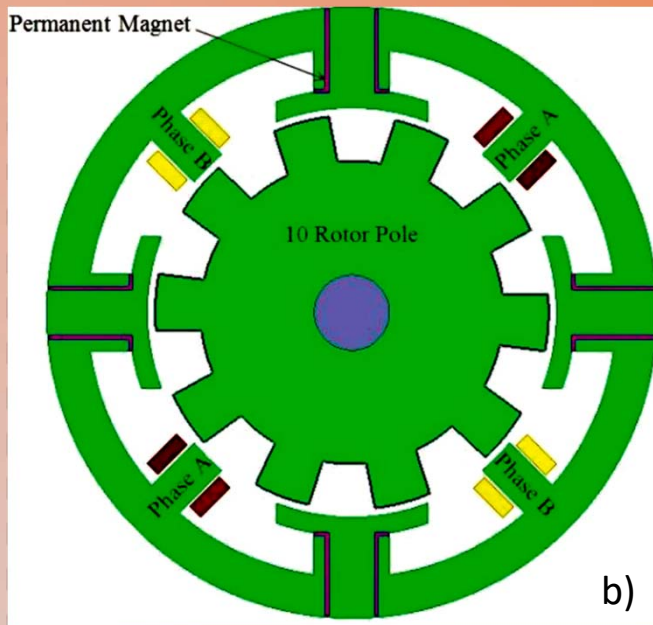
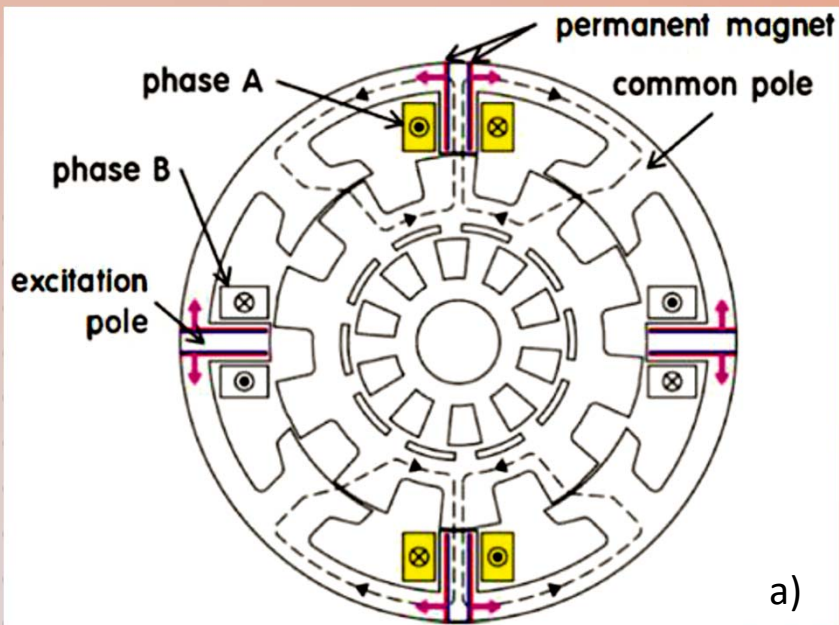


Statorul are piese feromagnetice în formă de U și sectoare neferomagnetice (colorate cu albastru). Acestea conțin canale de răcire a miezului.

Fiecare fază are o singură bobină (colorată cu roșu) ce seamănă cu construcția înfășurărilor de tip repartizat.

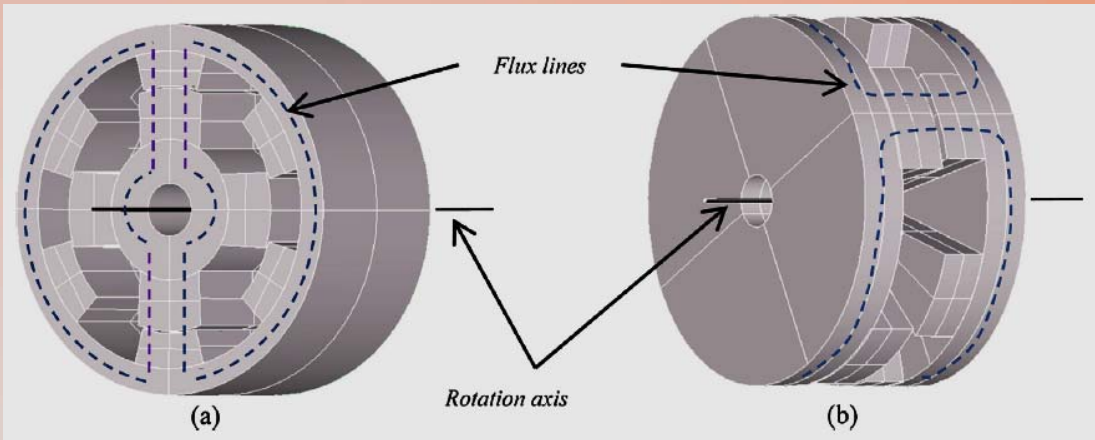
În figura b se folosesc câte două sectoare în formă de U, ceea ce duce la creșterea cuplului dezvoltat de motor. Înfășurările statorului sunt de tip concentrat.



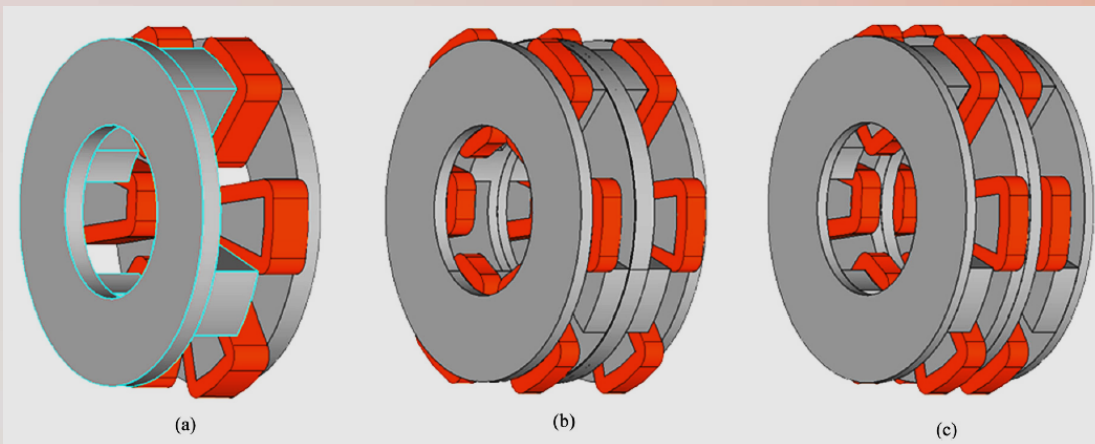


Configurație cu magneți permanenți în stator

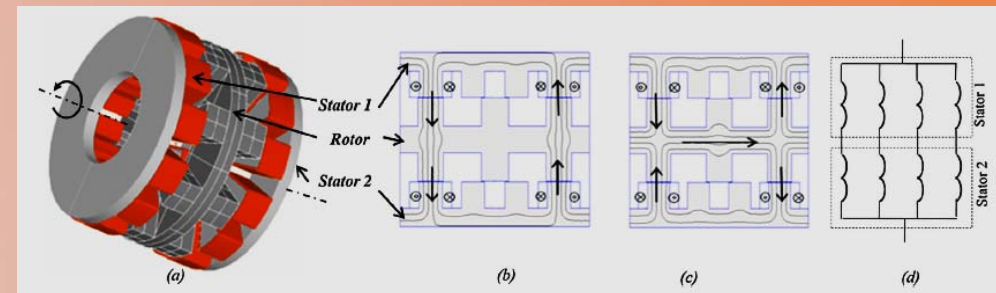
- a) Magneții permanenți sunt introduși în miezul magnetic al polilor statorici cu înfășurări. Are loc o intensificare a fluxului magnetic, deci a cuplului dezvoltat de motor.
- b) Magneții permanenți sunt plasați în polii fără înfășurări. Deoarece aceștia sunt mai lași, structura este mai puțin complicată tehnologic.
- c) Structura statorului este mai simplă întrucât magneții permanenți sunt doar lipiți pe piesele polare. Prezența magnetului duce însă la mărirea întrefierului astfel încât cuplul de reluctanță scade.

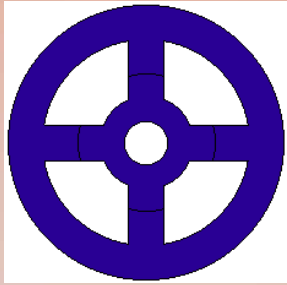


Structuri SRM: a) in construcție radială; b) in construcție axială.



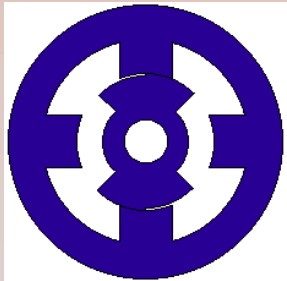
Variante constructive de SRM cu flux axial: a) un stator și un rotor; b) două statoare și un rotor central; c) două rotoare și un stator central.





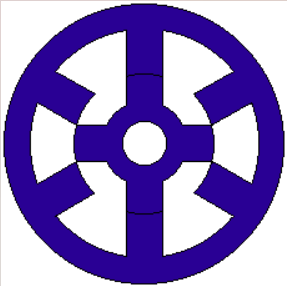
Motor monofazat

Este structura SRM cea mai simplă și cu numărul de tranzistoare de putere cel mai mic. Dezavantajul acestei structuri constă în pulsațiile de cuplu („torque ripple”) foarte mari și în incapacitatea de a porni, dacă rotorul este într-o anumită poziție dezavantajoasă. Sunt atractive pentru aplicațiile de viteză mare.



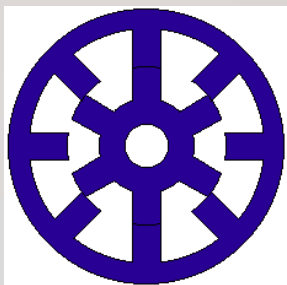
Motor bifazat

Problemele de pornire pot fi depășite prin construcția polilor rotorici cu întrefier variabil. Se caracterizează, de asemenea, prin pulsații de cuplu mari.



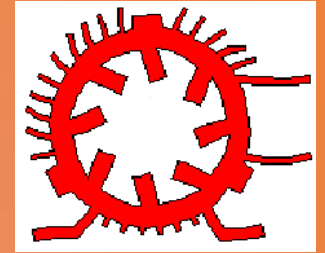
Motor trifazat

Oferă cele mai mari avantaje legate de pornire și pulsațiile de cuplu în raport cu numărul de tranzistoare folosit. Este foarte popular în structura 6/4. Prin dublarea sau triplarea numerelor de dinți se obțin structuri favorabile acționării cu viteza redusă.

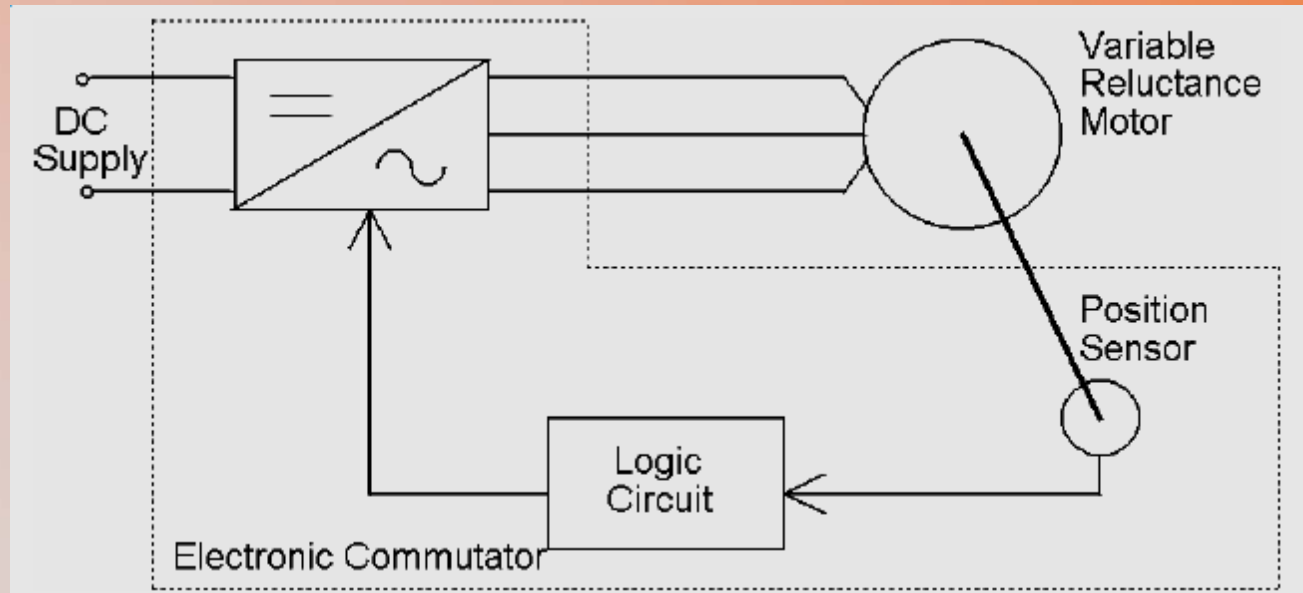


Motor cu patru faze

Reduce pulsațiile de cuplu dar majorează numărul de tranzistoare de putere. Creșterea în continuare a numărului de faze (cinci sau șase) determină o reducere și mai mare a pulsațiilor de cuplu.



Structura acționărilor cu SRM

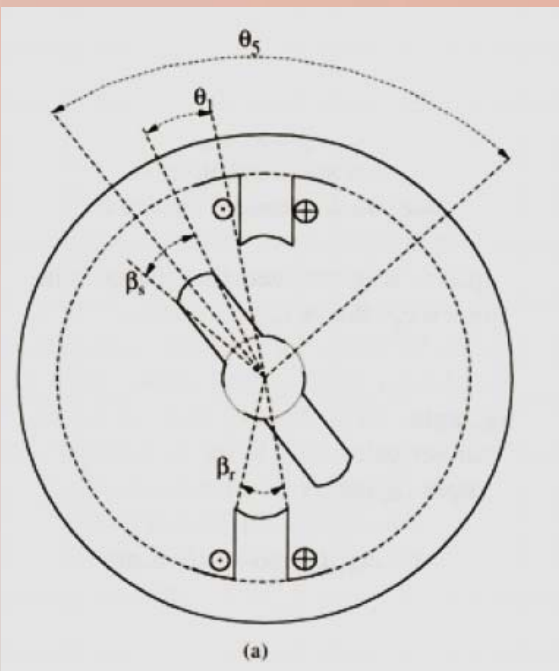


Funcționarea SRM este posibilă numai însoțită de un sistem electronic de control și comandă întrucât:

- Funcționarea se bazează pe alimentarea succesivă cu impulsuri de tensiune a înfășurărilor statorice
- Este necesară prezența unui senzor de poziție pentru determinarea precisă a poziției polilor rotorici față de polii statorici ce urmează a fi alimentați;



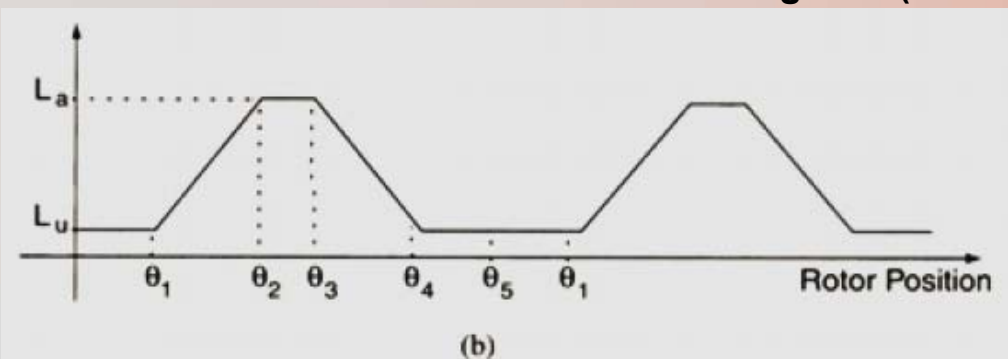
Variația inductanței înfășurărilor statorice în funcție de poziția rotorului



1. $0-\theta_1$ și $\theta_4 - \theta_5$: polii rotorici NU se suprapun deloc peste polii statorici. Inductanța statorică are valoare minimă și constantă. Pe aceste intervale mașina „nu produce” cuplu.

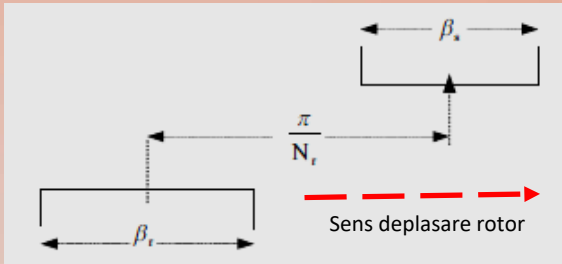
2. $\theta_1 - \theta_2$: interval în care polii încep să se suprapună (la momentul θ_1) până la suprapunere completă (momentul θ_2). Are loc o creștere a inductanței înfășurării statorice (pantă de variație pozitivă). Dacă se aplică, pe acest interval, un impuls de curent în înfășurare, mașina dezvoltă un cuplu pozitiv (cuplu motor).

3. $\theta_2 - \theta_3$: întrucât deschiderea polului statoric este diferită de cea a polului rotoric, pe acest interval se menține o suprapunere completă a polilor astfel încât valoarea inductanței rămâne constantă la nivel maxim. Deoarece nu are loc o variație a inductanței, cuplul dezvoltat este zero. Această regiune este utilă întrucât dă timp curentului statoric, care a fost întrerupt la momentul θ_2 , să ajungă la zero sau la o valoare cât mai scăzută. În felul acesta este preîntâmpinată situația producerii unui cuplu negativ (de frânare) începând cu momentul θ_3 când panta inductanței devine negativă (dar variabilă).

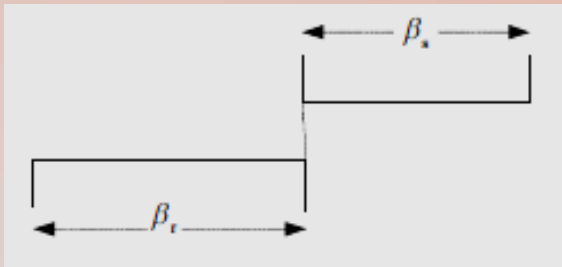


4. $\theta_3 - \theta_4$: polii rotorici se îndepărtează de sub polii statorici. Inductanța descrește către valoarea sa minimă (panta de variație negativă). Pe acest interval, mașina poate dezvolta cuplu negativ dacă înfășurarea statorică este parcursă de curent.

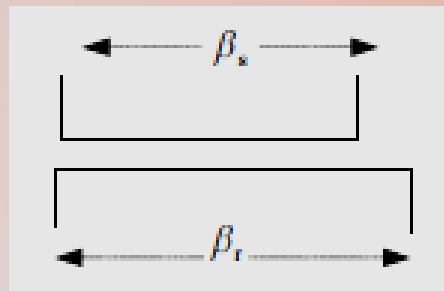
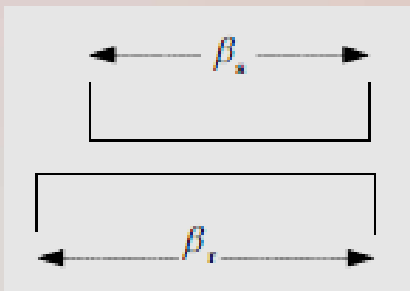




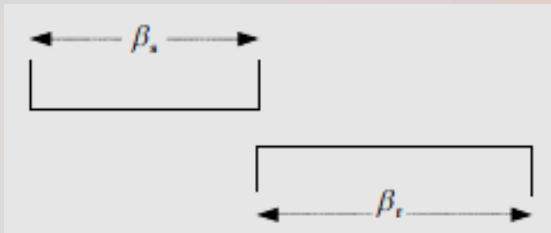
1. $0 - \theta_1$ și $\theta_4 - \theta_5$: polii rotorici nu se suprapun deloc peste polii statorici.



2. $\theta_1 - \theta_2$: polii rotorici încep să se suprapună peste cei statorici.



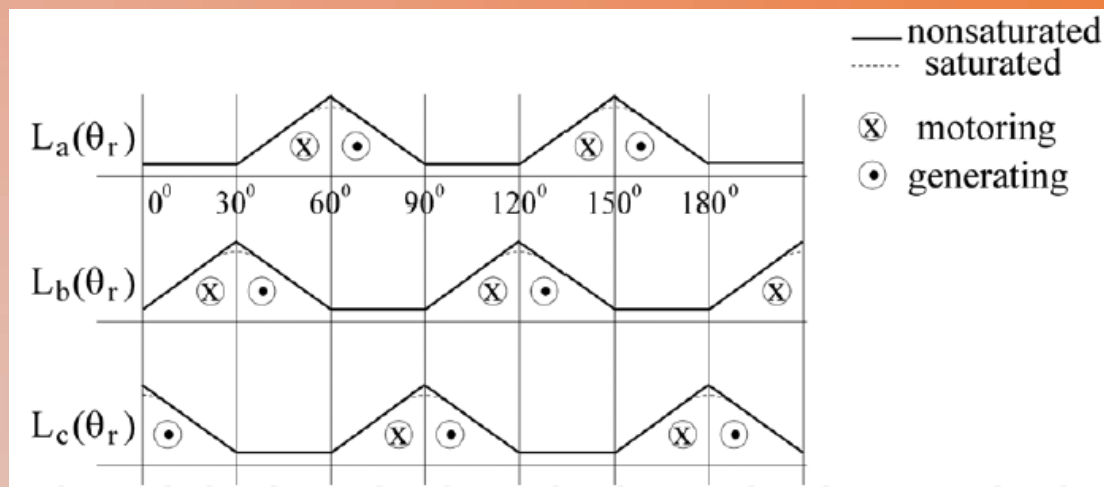
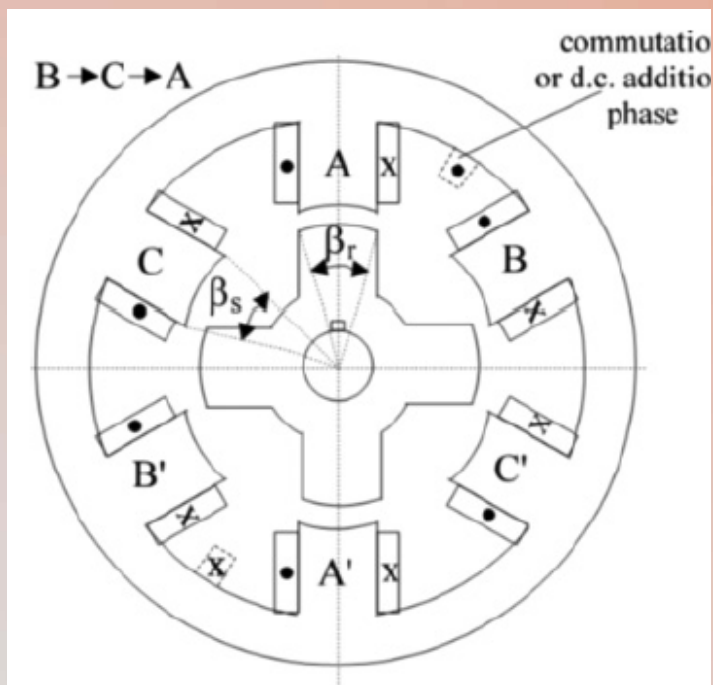
3. $\theta_2 - \theta_3$: interval de suprapunere a polilor.



4. $\theta_3 - \theta_4$: polii rotorici ies de sub polii statorici.



Particularități constructive



De regulă, $\beta_s < \beta_r$ și rezultă o formă trapezoidală a variației inductanței fazei statorice.

Dacă unghiurile $\beta_s = \beta_r$ atunci modul de variație a inductanței înfășurării statorice este triunghiular.

Lipsa palierului orizontal elimină zona $(\theta_2 - \theta_3)$ unde mașina NU dezvoltă cuplu.

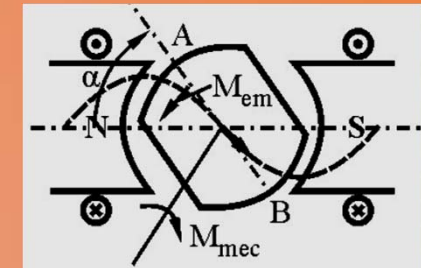
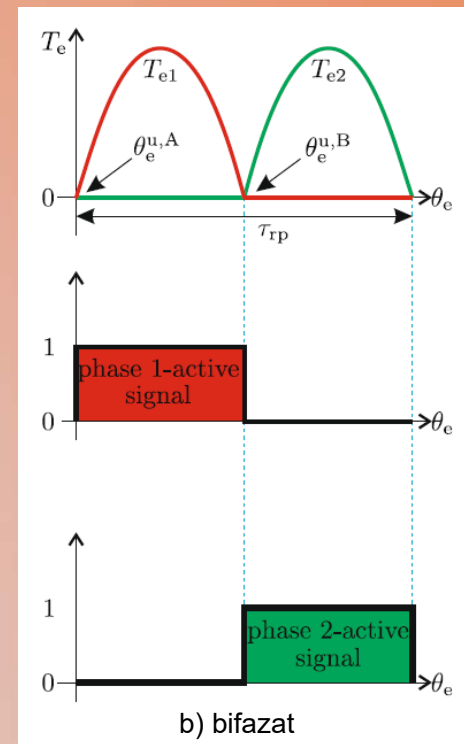
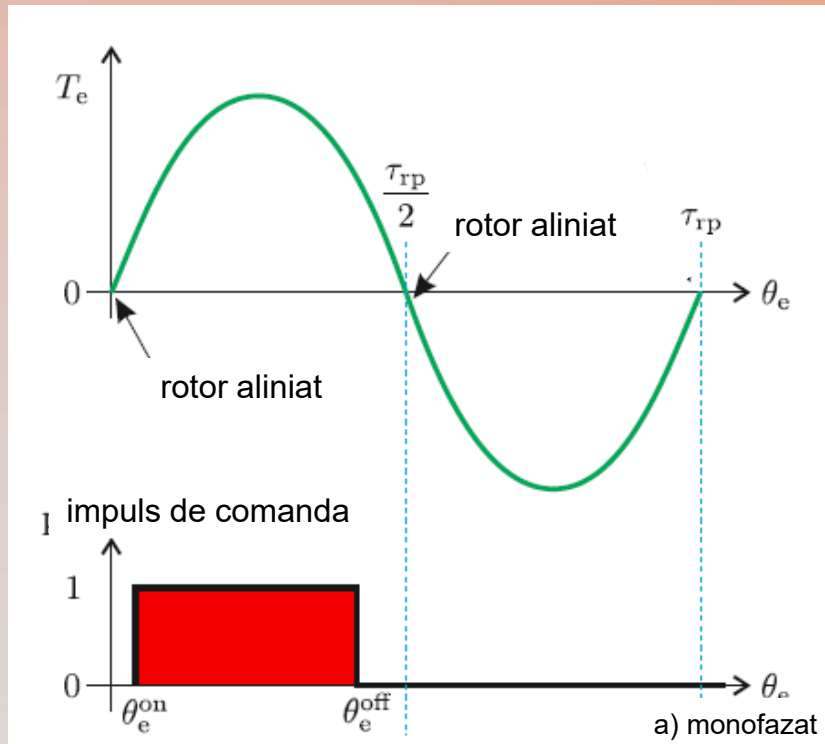
Expresia cuplului electromagnetic



$$M_e = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1}{d\theta}$$

- **Cuplul produs de SRM este proporțional cu pătratul curentului de comanda și variația inductanței cu poziția rotorului.**
- **Întrucât curentul intervine prin valoarea sa la pătrat, curentul poate fi unipolar (același sens prin înfășurare). Drept urmare poate fi folosit doar un singur tranzistor de putere in schema de comandă a fiecărei faze, ceea ce reprezintă o simplificare a schemei de comandă (plus economie).**
- **Proportionalitatea cu pătratul curentului face ca motorul să dezvolte cuplu mare la pornire.**
- **Pe panta negativă a variației inductanței, mașina poate funcționa în regim de generator. Rezultă capacitatea mașinii de a funcționa cu convertor in patru cadrane.**
- **Întrucât este o mașină cu comutație electronică, deci dependentă de existența unui convertor, acest motor este foarte potrivit pentru acționări cu viteză variabilă.**

Cuplul dezvoltat de SRM

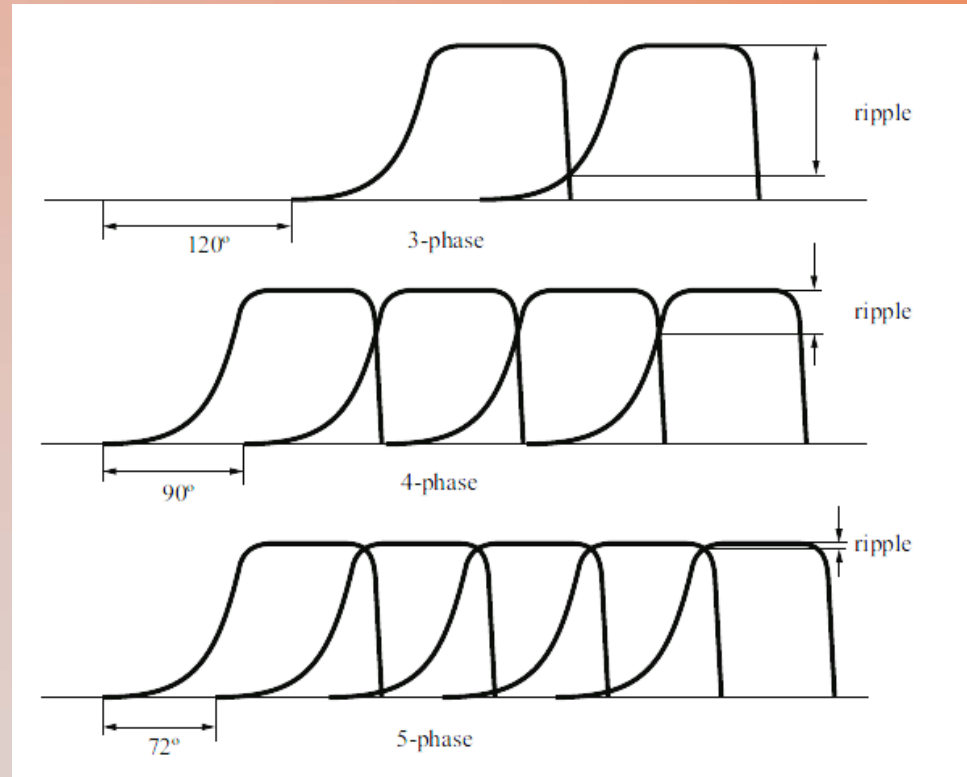


Ca și în cazul mașinii sincrone reactive, forma ideală a caracteristicii cuplului electromagnetic este sinusoidală.

Pentru pozițiile în care rotorul este perfect aliniat cu poli statorici respectiv axele polilor celor două armături sunt coliniare, SRM NU dezvoltă cuplu electromagnetic.

Pentru SRM monofazat și bifazat există poziții ale rotorului în care nu se dezvoltă cuplu electromagnetic. Acest lucru poate reprezenta o dificultate în ceea ce privește pornirea (dacă rotorul staționar se află într-o astfel de poziție).

Cuplul dezvoltat de SRM – pulsații de cuplu

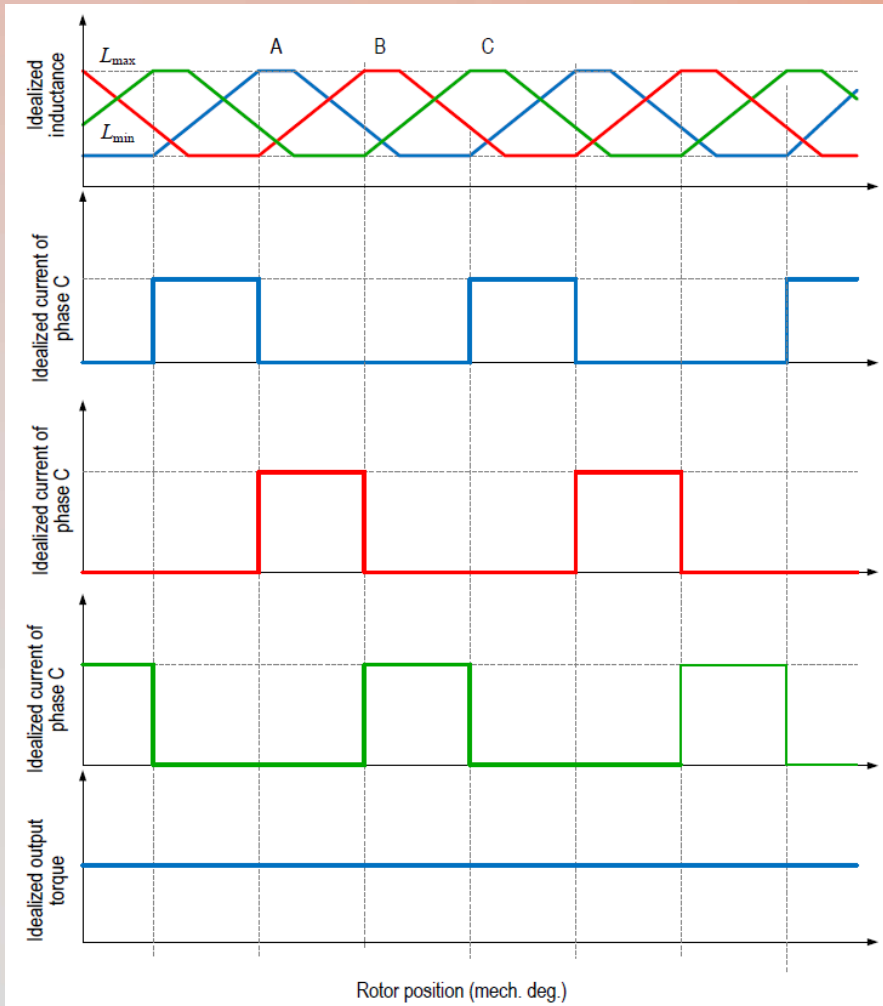


Cu cât numărul de faze este mai mare cu atât pulsațiile de cuplu („torque ripple”) sunt mai mici.

Dezavantajul numărului mare de faze constă în existența unui număr mare de tranzistoare de putere pentru alimentarea fiecărei faze în parte.



Comanda SRM



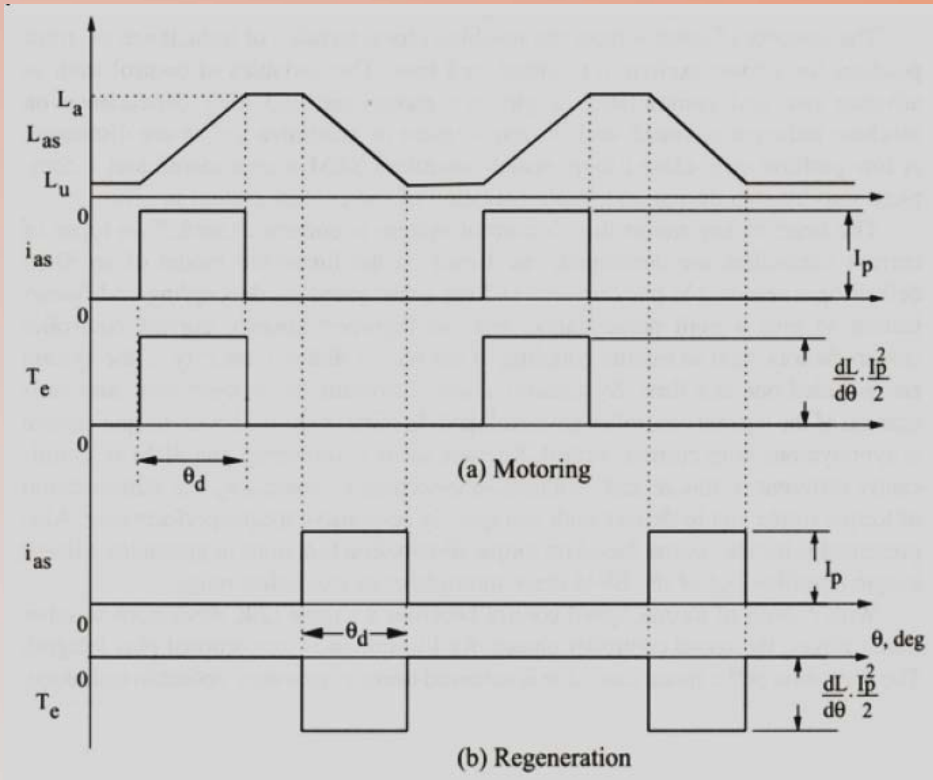
Comanda unui SRM presupune aplicarea **SUCCESIVĂ** a unor impulsuri de tensiune (curent) pe fazele statorului.

Funcționarea optimă a SRM se obține atunci când impulsurile de comandă coincid cu perioada de creștere a valorii inductanței fazei comandate.

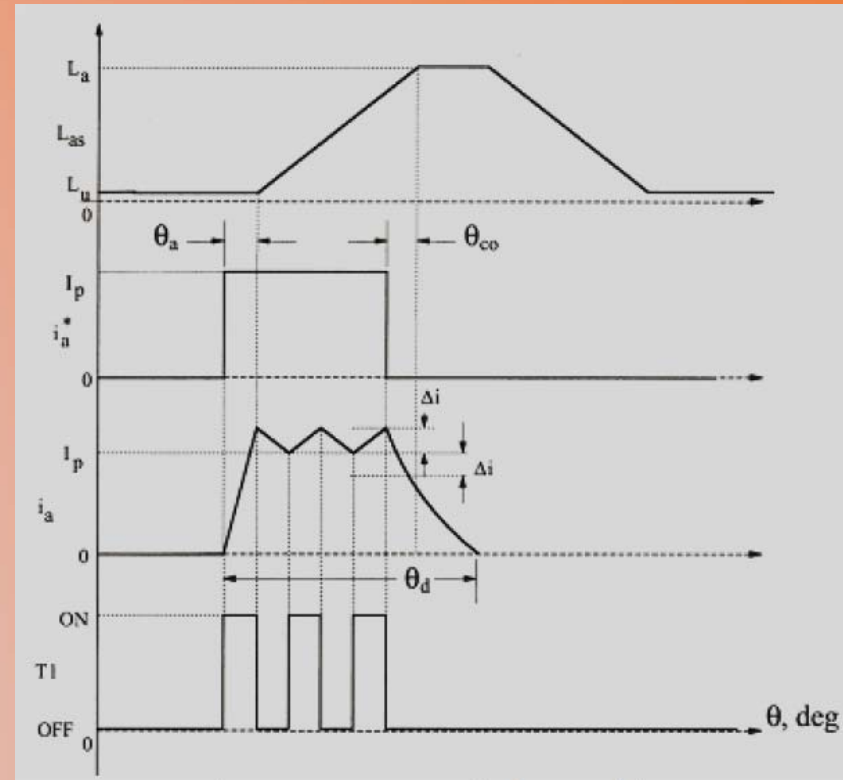
Pe timpul funcționării, doar o singură fază este alimentată.

Variația **ideală** a mărimilor unui SRM trifazat: inductanțele fazelor, curenții de comandă, cuplul electromagnetic rezultat.

Comanda SRM



Alimentare „ideala”

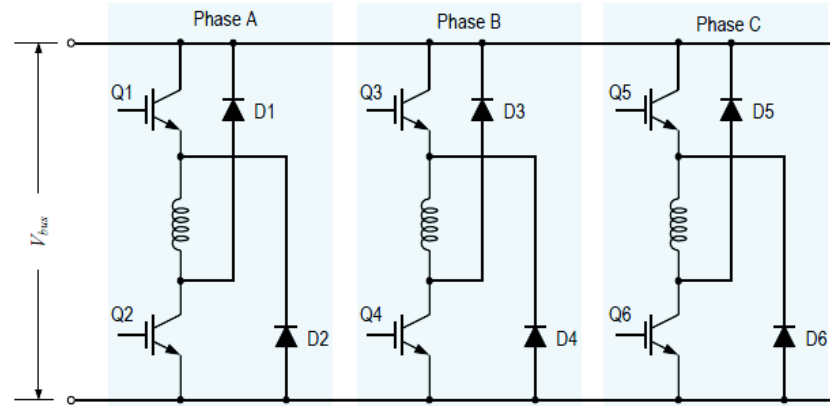
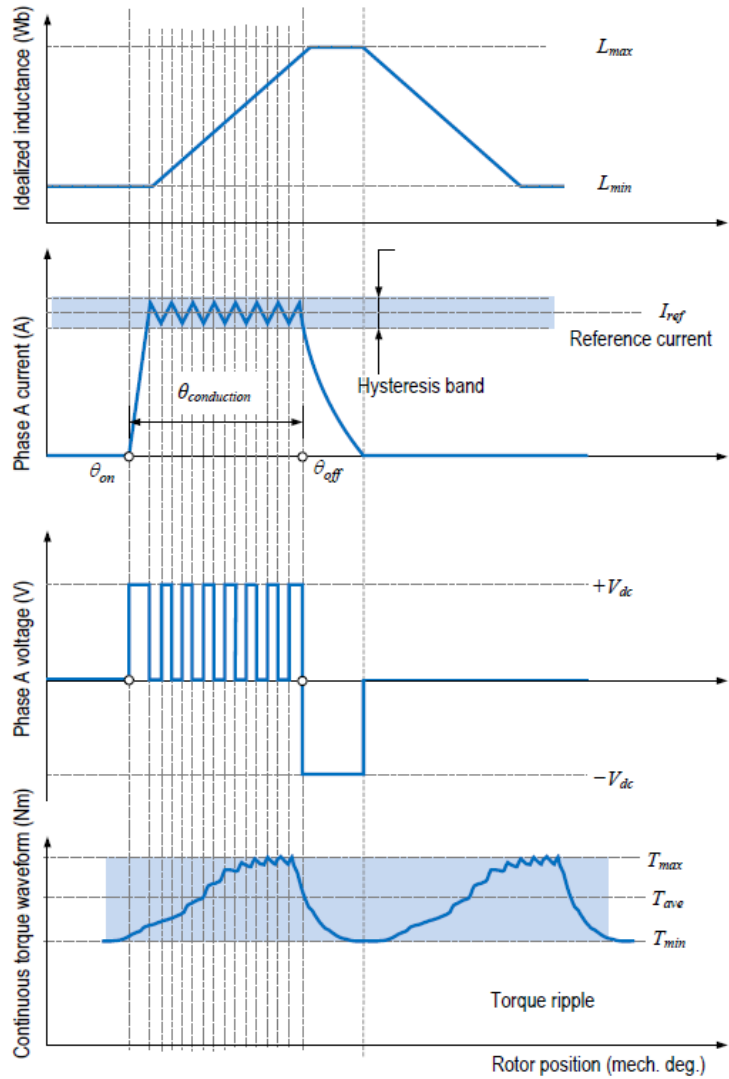


Alimentare „in avans”

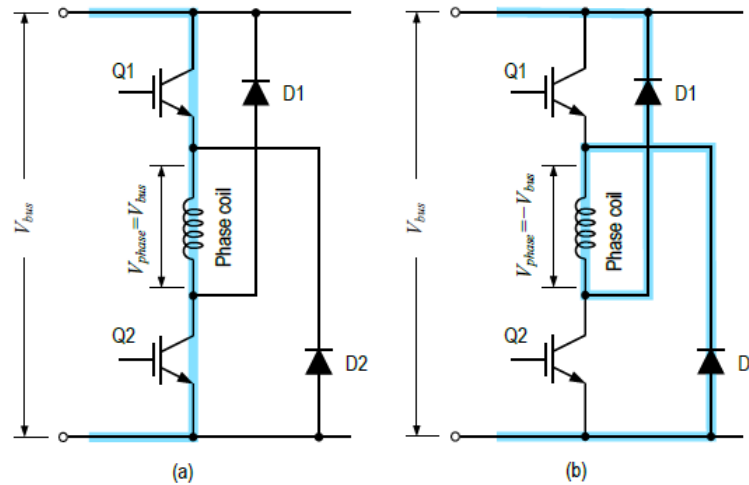
Comanda alimentării unei faze statorice se face pe intervalul de creștere a valorii inductanței acesteia, θ_d (este momentul în care polii statorici și rotorici încep alinierea).

Întrucât curentul nu se poate stabili instantaneu la valoarea maximă prin înfășurarea comandată, sistemele moderne de comandă aplică impulsul de curent in avans (cu unghiul θ_a) astfel încât, la momentul creșterii inductanței, curentul să fie deja la valoarea sa maximă. Analog se petrec lucrurile și la întreruperea alimentării.

Comanda SRM



SRM trifazat – schema de comanda



a) Perioada de conducție directă; b) perioada de aplicare a unei tensiuni inverse



Explicatii

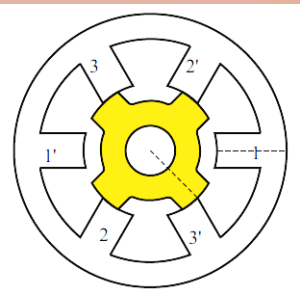


La momentul θ_{on} , anterior începerii alinierii polilor statorici cu polii rotorici, se comandă tranzistoarele Q_1 , Q_2 ce permit alimentarea fazei statorice (figura a). Comanda este dată puțin înaintea alinierii polilor pentru a permite curentului să crească la valoarea sa de referință.

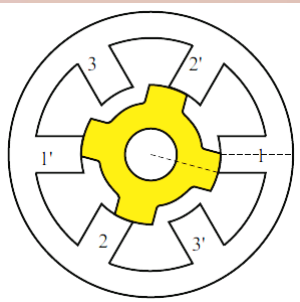
Alimentarea se păstrează pe toată perioada alinierii polilor (perioada de creștere a valorii inductanței statorice).

Când polii sunt complet aliniați și variația inductanței devine zero (valoarea ei rămâne constantă), se întrerupe comanda celor două tranzistoare și se conectează faza statorică la tensiunea inversă prin intermediul circuitului cu diode D_1 , D_2 . Pe această perioadă (cât inductanța rămâne constantă) tensiunea negativă aplicată fazei garantează scăderea fluxului.

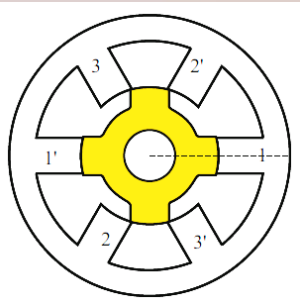
Alimentarea cu semnal PWM a înfășurării, necesară menținerii unui curent cvasi-constant și apropiat de valoarea de referință, determină existența unor pulsații de cuplu. Acestea sunt DIFERITE de pulsațiile de cuplu caracteristice motorului SRM.



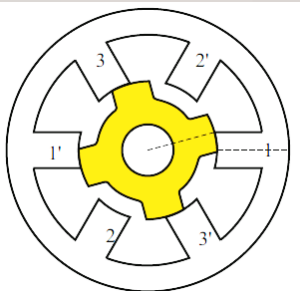
Presupunând rotirea rotorului în sens trigonometric, polii rotorului urmează să se alinieze cu polii statorici 1-1'. Este momentul de alimentare a înfășurărilor acestora (alimentare în avans astfel încât, atunci când începe suprapunerea polilor rotorici peste cei statorici, curentul să aibă deja valoarea de referință).



Pe intervalul suprapunerii polilor rotorici peste cei statorici, SRM dezvoltă cuplu electromagnetic pozitiv (care acționează rotorul în sensul lui de mișcare).

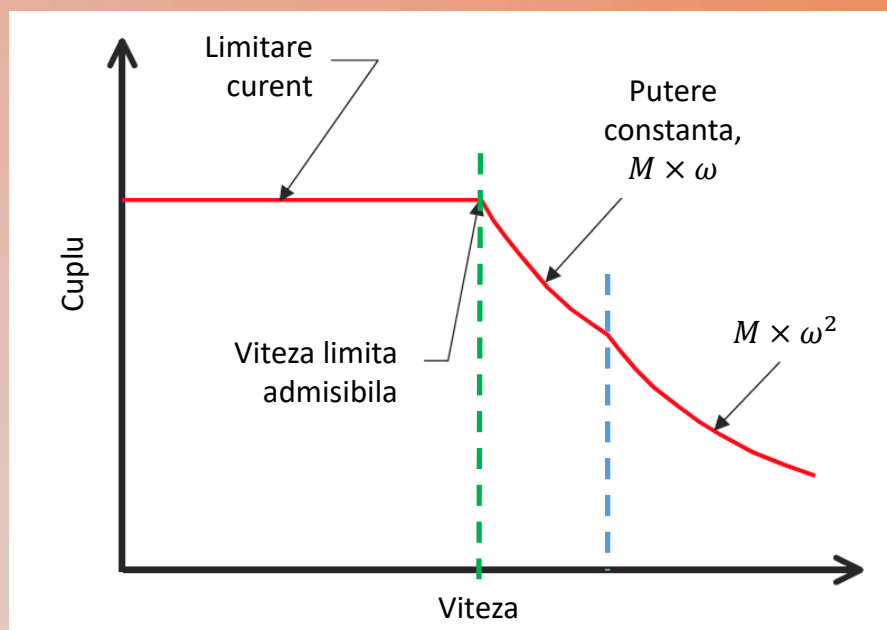


Odată cu alinierea polilor statorici cu cei rotorici, SRM nu mai dezvoltă cuplu electromagnetic. Este momentul întreruperii alimentării fazei 1-1'.



Părăsirea polilor statorici 1-1' de către polii rotorici anterior aliniați coincide cu existența unui cuplu negativ dezvoltat de SRM. Pe această perioadă, o parte din energia acumulată în câmpul magnetic al fazei statorice este returnată sursei de alimentare. SRM funcționează într-un regim de generator.

Caracteristica mecanică a SRM – domeniu de funcționare



Punctul de funcționare pe caracteristica $M=f(n)$ este esențialmente programabil din schema de control. Funcționarea este limitată de constrângeri fizice ca nivelul tensiunii de alimentare sau temperatura maximă admisibilă.

Cuplul dezvoltat de SRM este limitat de valoarea curentului maxim și frecvența de comutație. Odată cu creșterea frecvenței (deci a vitezei motorului), crește tensiunea indusă în înfășurarea comandată, ceea ce determină scăderea valorii curentului stabilit prin înfășurare. Viteza limită admisibilă de pe grafic indică punctul până la care SRM poate dezvolta cuplu constant. La turații mai mari, mașina poate funcționa la putere constantă, respectiv este necesară o scădere a cuplului de sarcină după relația $M \times \omega$ respectiv $M \times \omega^2$



Viteza și frecvența de alimentare a SRM



Viteza SRM este dată de frecvența impulsurilor de alimentare și numărul de poli rotorici:

$$n = \frac{f}{N_r}$$

	6/4	12/8	12/10	8/6	8/10	4/2
Viteza [rot/sec]	100	100	100	100	100	100
Frecvența [Hz]	400	800	1000	600	1000	200



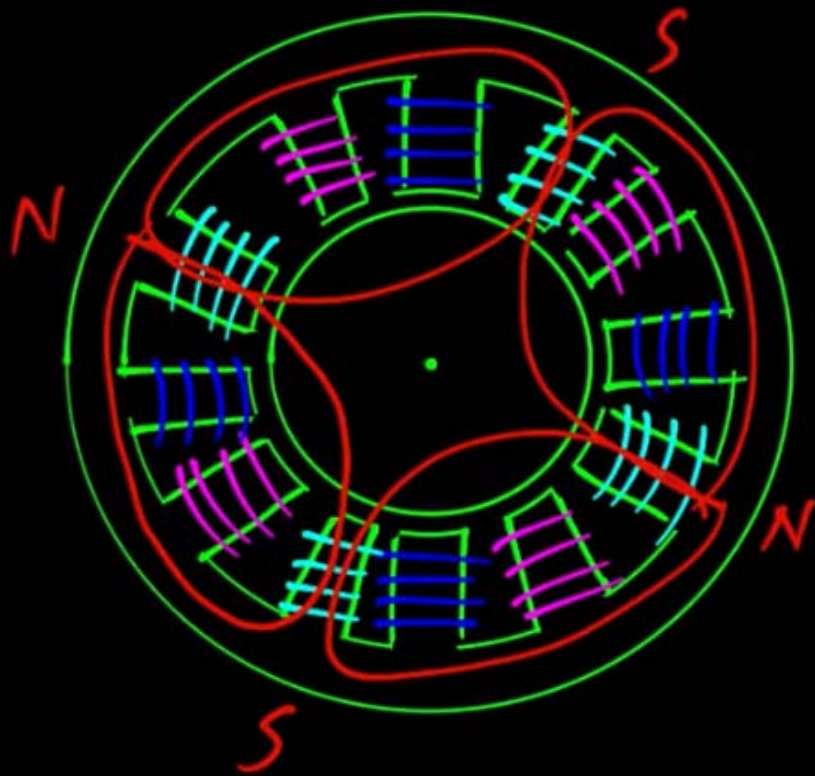


- ❑ **Construcție simplă și robustă. Rotorul este complet lipsit de înfășurări sau magneți permanenți;**
- ❑ **Înfășurările statorului sunt de tip concentrat, pe pol. Părțile frontale (inactive) sunt reduse în comparație cu înfășurările distribuite în creștături.**
- ❑ **Rotorul are dimensiunile și greutatea cele mai mici (față de toate mașinile cu rotor feromagnetic). Drept urmare, inerția și constantele mecanice sunt reduse.**
- ❑ **Sursa principală de căldură (înfășurările) este plasată pe stator. Deci răcirea se face mai ușor.**
- ❑ **Întrucât înfășurările statorului sunt independente și au un cuplaj mutual foarte redus, orice defect electric ce apare într-o fază nu influențează și celelalte faze.**
- ❑ **Libertatea de a alege orice număr de faze. Cu cât numărul de faze este mai mare, cu atât „toleranța la defect,” este mai evidentă.**





- ❖ **Necesită sistem electronic de comandă;**
- ❖ **Pulsații de cuplu mari. Cu cât crește numărul de faze, aceste pulsații au amplitudine mai mică dar crește numărul de tranzistoare de putere;**
- ❖ **Sunt mașini zgomotoase;**
- ❖ **Are nevoie de traductoare de poziție.**



4 pole 3 phase
Stator with
Salient poles



Cuvinte cheie

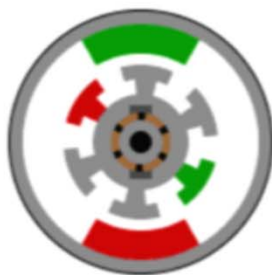
Comutatie
electronica

Comanda sincronizata
cu pozitia rotorului

Stator
cu poli aparenti

Rotor
anizotrop

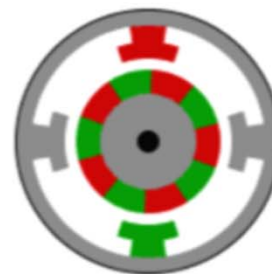
So many different motor types ...



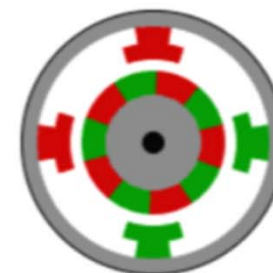
DC motor



Brushless DC motor



Stepper motor (full step)



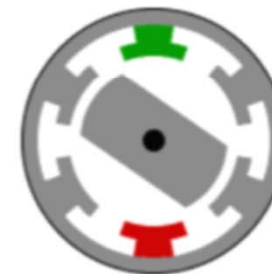
Stepper motor (half step)



AC induction motor



Permanent magnet synchronous motor (PMSM)



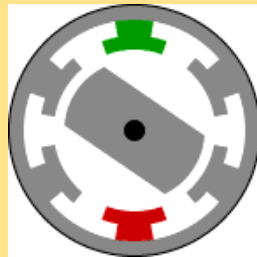
Switched reluctance motor

Curs 11

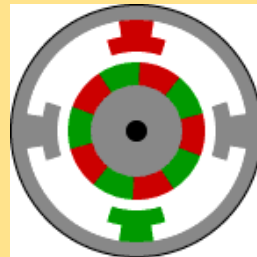


ALL MOTORS

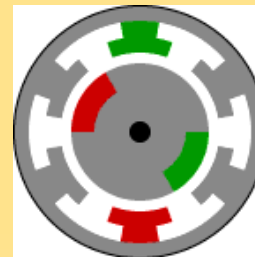
SRM



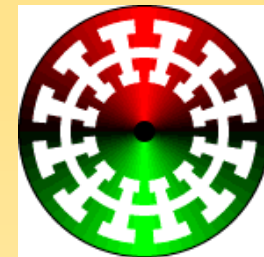
Stepper



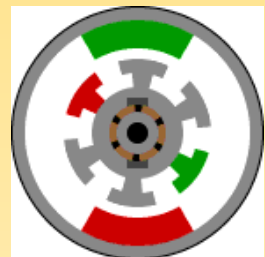
BLDC



AC motor

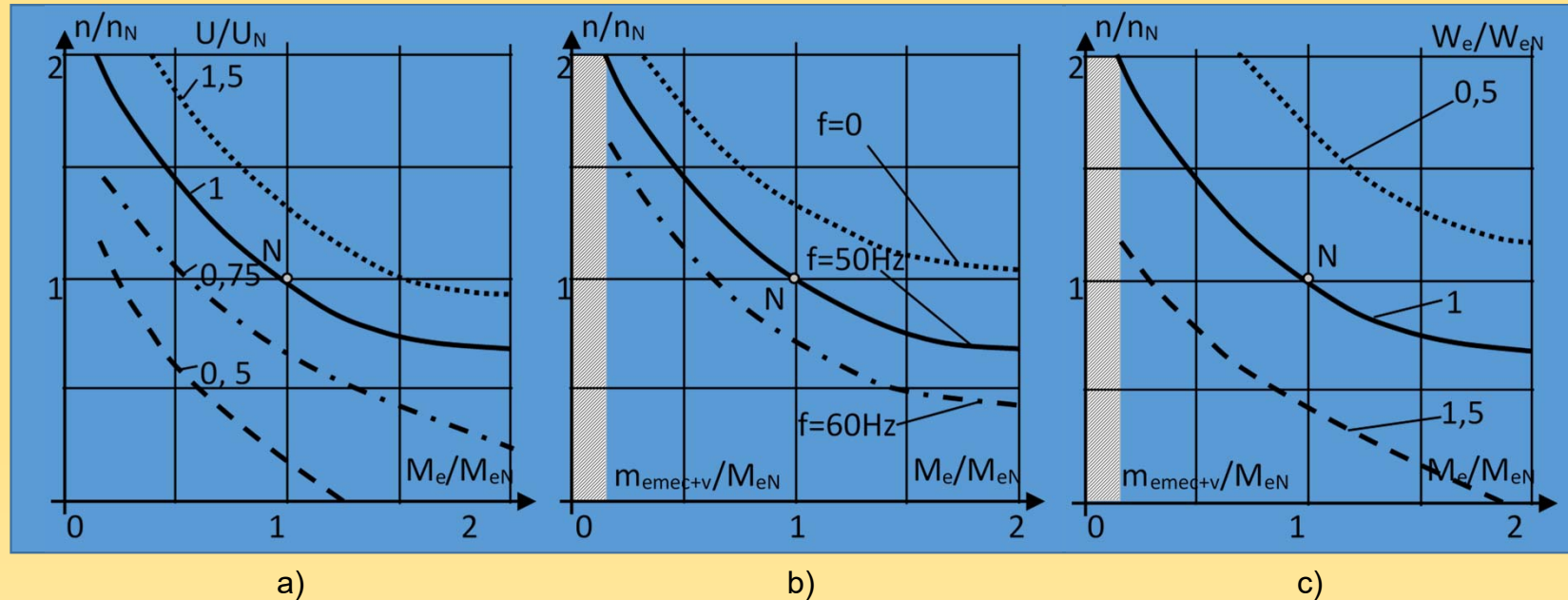
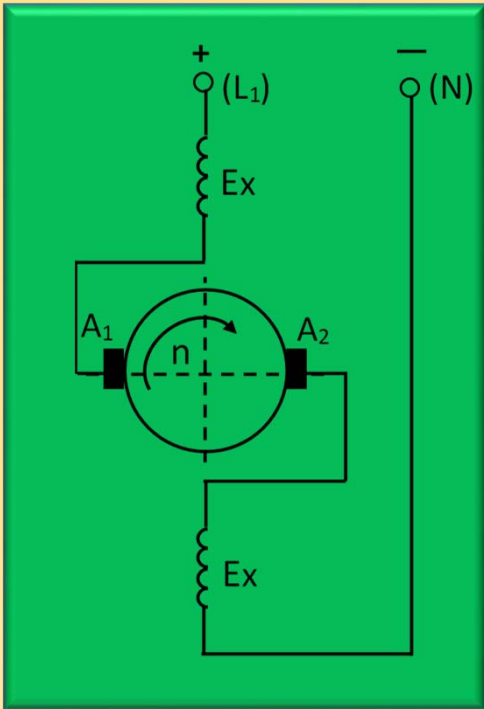


DC brushed motor



Motorul universal

Mașina 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.

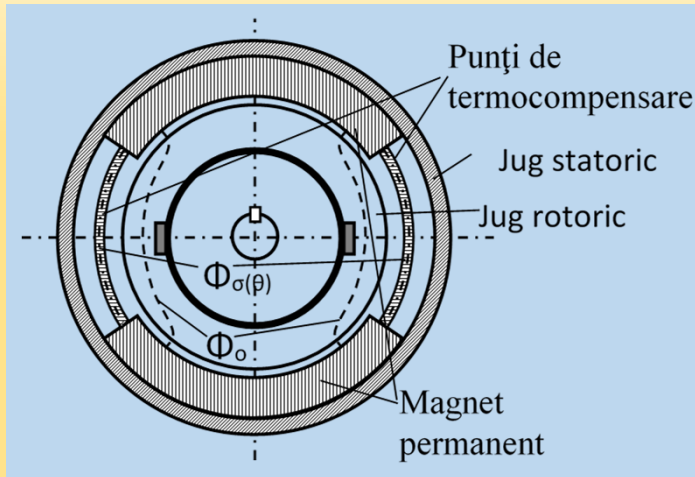


Reglajul vitezei prin: a) modificarea tensiunii de alimentare, b) modificarea frecvenței tensiunii de alimentare, c) modificarea fluxului de excitație

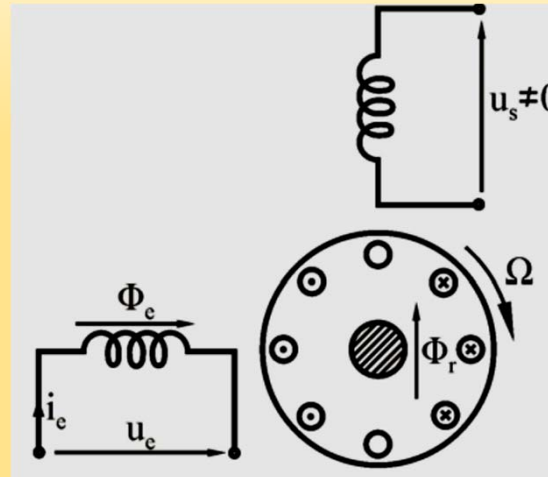
Funcționarea motorului universal este mai avantajoasă în c.c. decât în c.a. (performanțe mai bune).

Tahogeneratoare

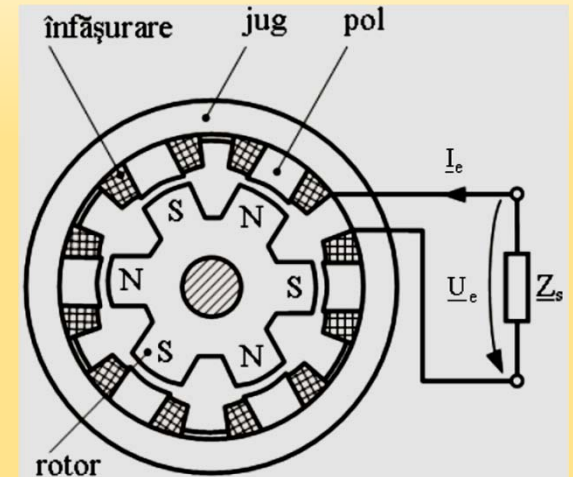
Sunt mașini electrice destinate măsurării vitezei de rotație a unui ax (arbore) pe care sunt montate.



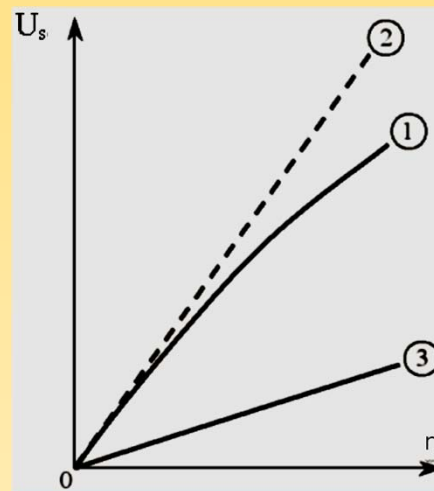
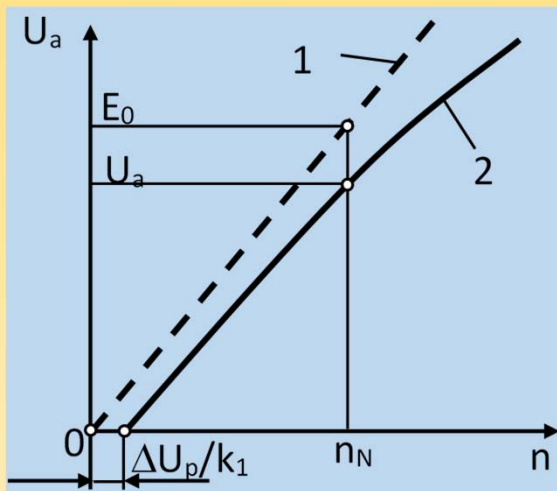
Tahogeneratorul de c.c.



Tahogeneratorul asincron bifazat

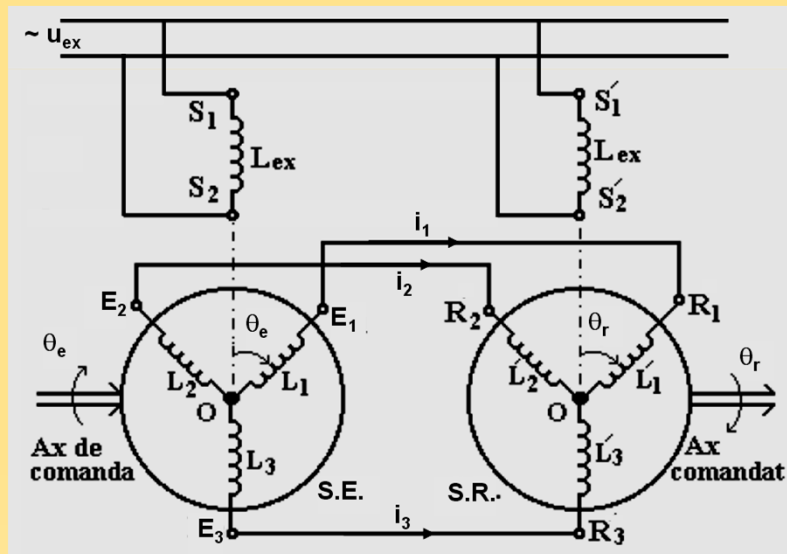


Tahogeneratorul sincron

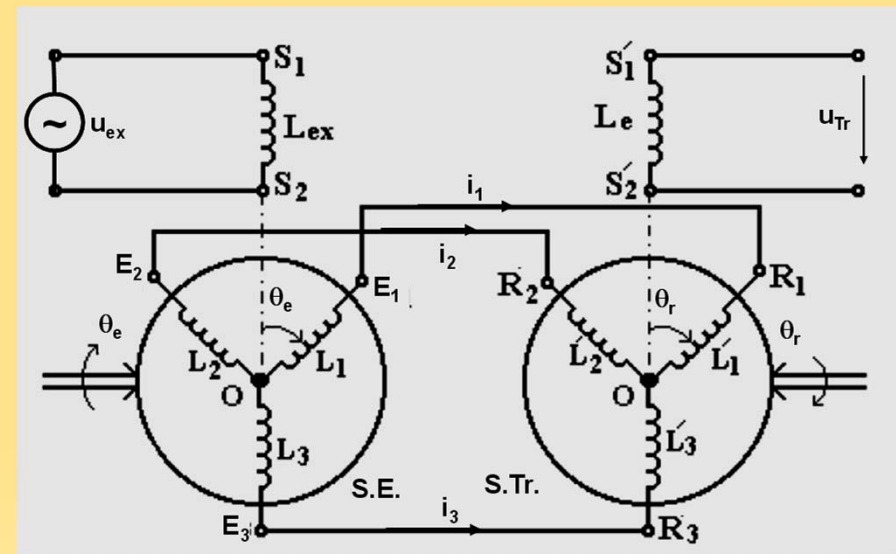


Selsine

Sunt mașini electrice de construcție specială destinate transmisiei sincrone a mișcărilor unor elemente mobile între care **NU EXISTA** legătură mecanică.

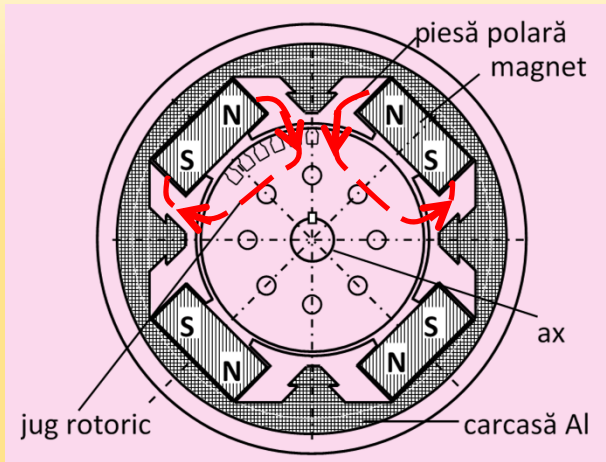


Regim indicator

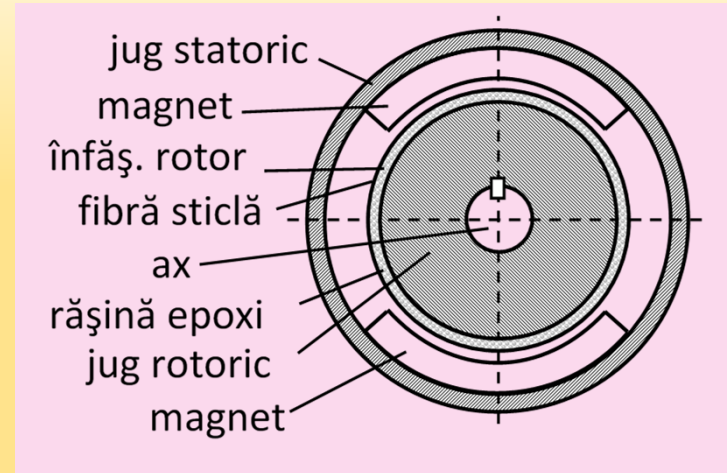


Regim transformator

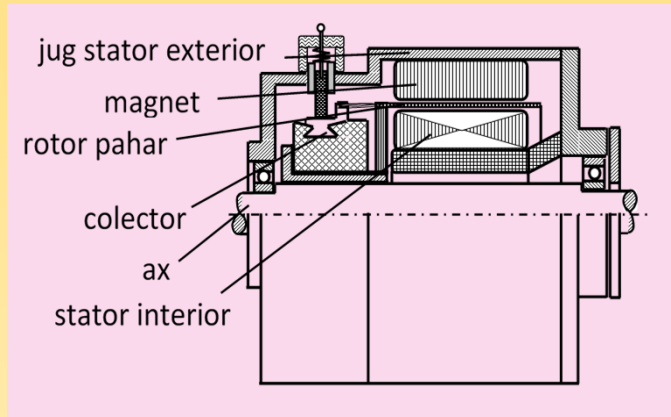
Servomotoare de c.c.



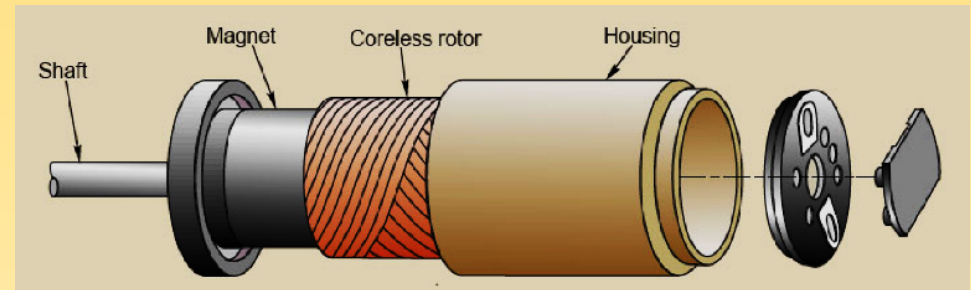
Servomotor cu rotor cilindric



Servomotor cu rotor cilindric fără crestături

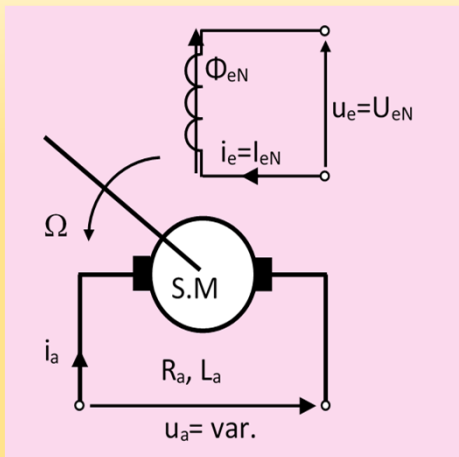


Servomotor cu rotor pahar

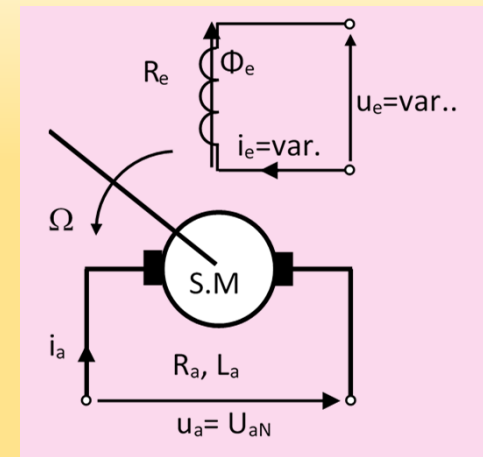


Servomotor cu rotor fără miez

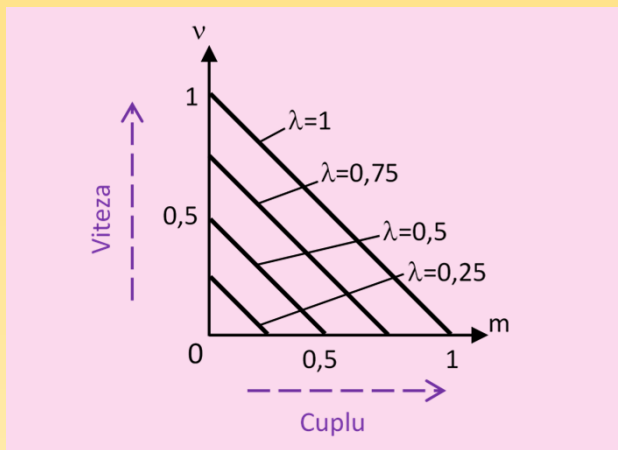
Servomotoare de c.c.



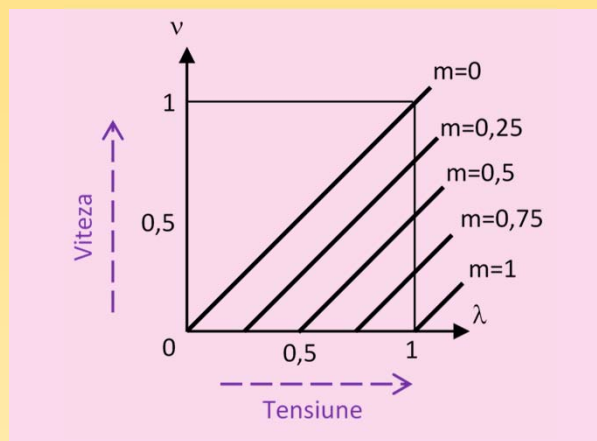
Comanda prin indus



Comanda prin excitație



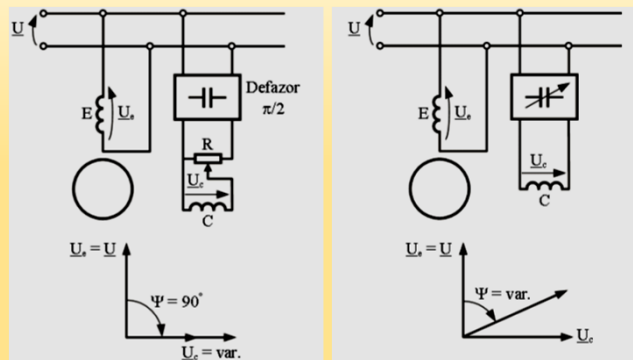
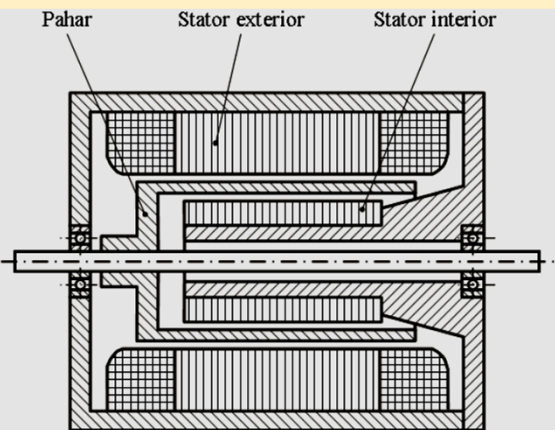
Caracteristicile mecanice



Caracteristicile de reglaj

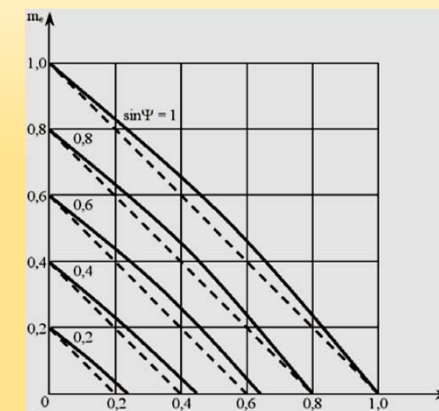
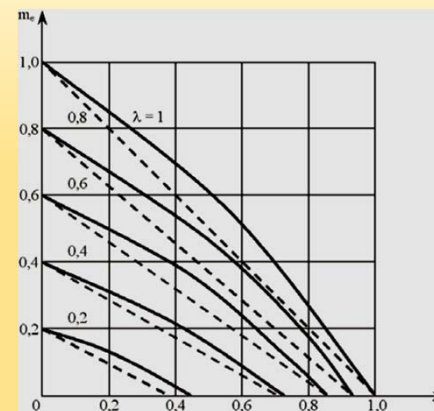
NERECOMANDATA

Servomotoare de c.a. asincrone (bifazate)

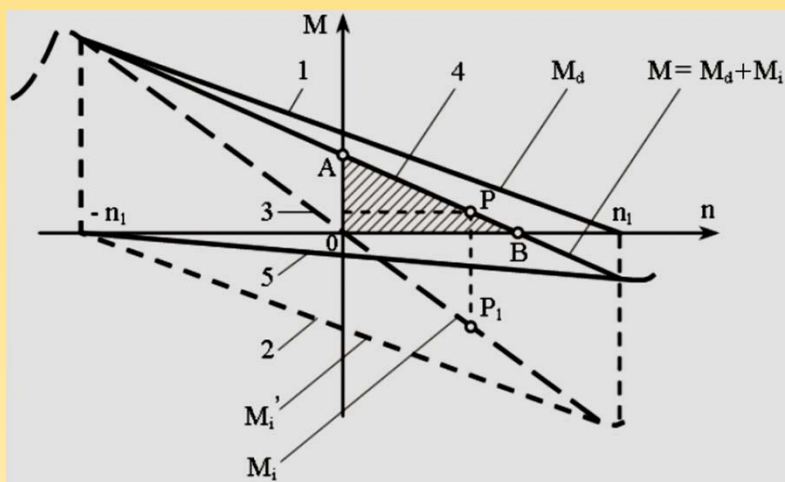


Comanda servomotorului bifazat

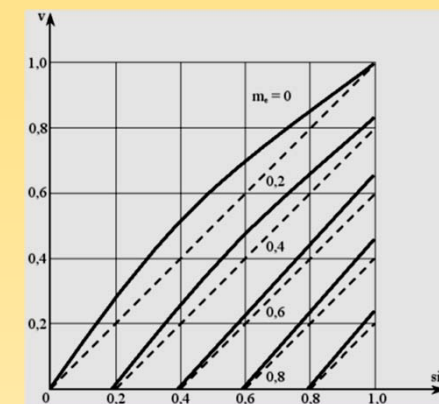
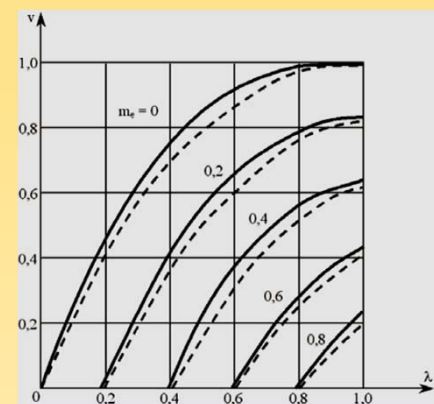
Servomotor bifazat cu rotor pahar



Caracteristici mecanice

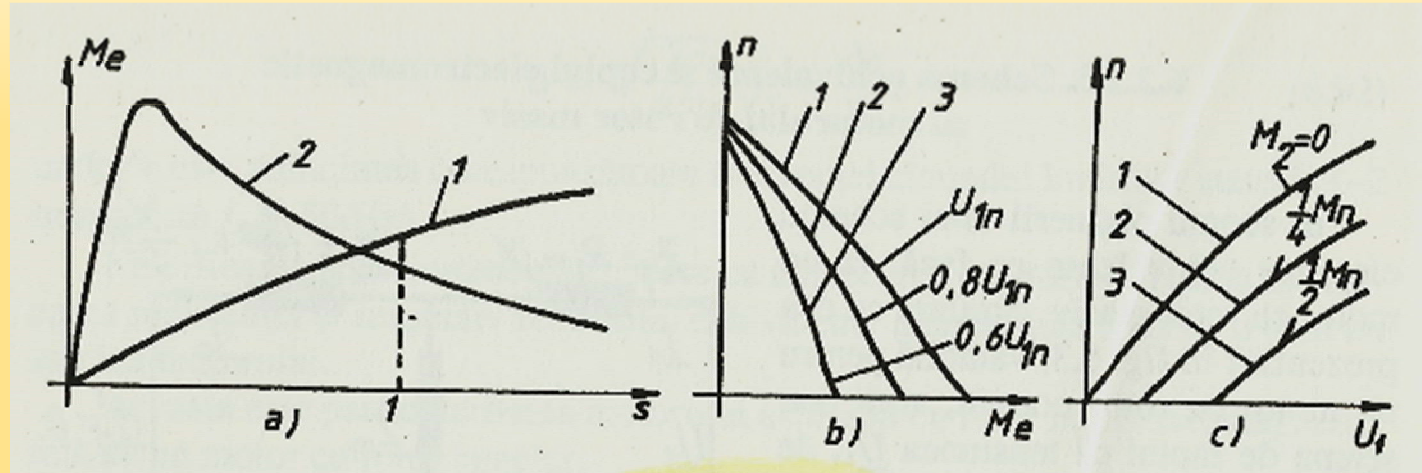


Autofrânare



Caracteristici de reglaj

Servomotoare de c.a. asincrone (cu rotor masiv)



Adâncime de pătrundere:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega \cdot \mu}}$$

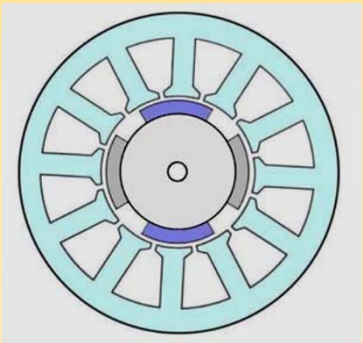
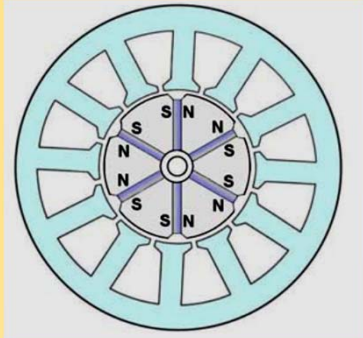
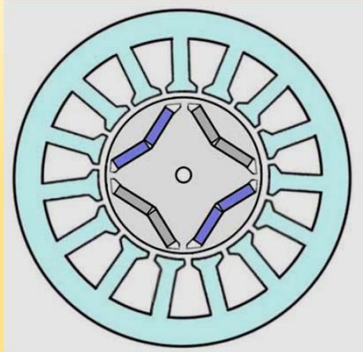
a) Caracteristica $M=f(s)$; b) caracteristica mecanica; c) caracteristica de reglaj

- Rezistivitatea electrică cât mai mică;
- Valoarea inducției de saturație cât mai mare;
- Valoarea permeabilității magnetice relative peste 2000.

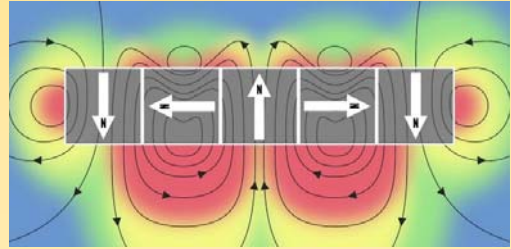
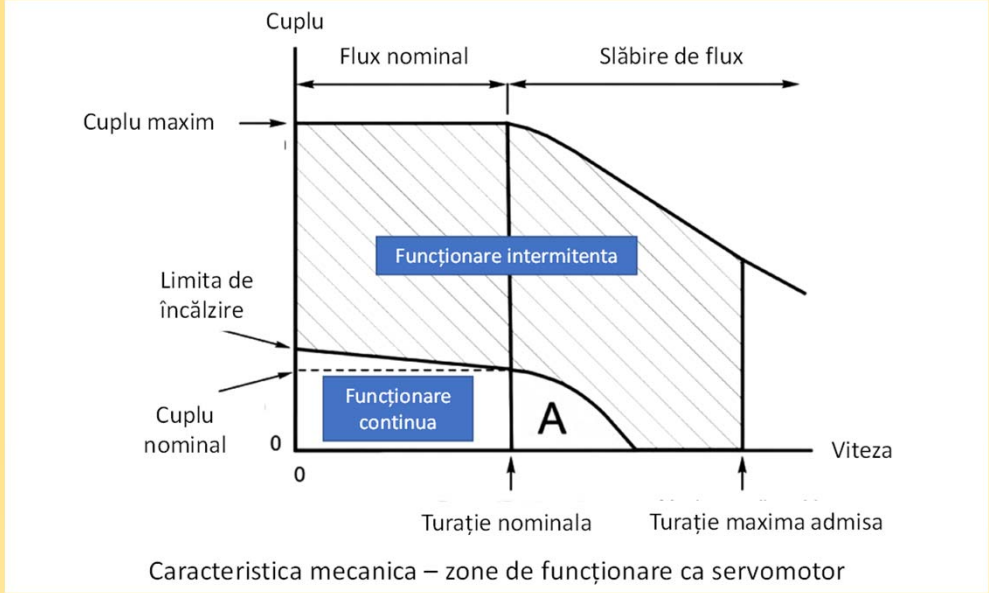
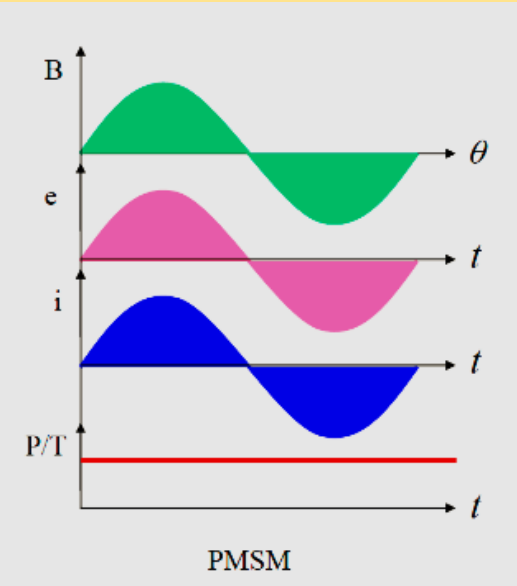
- Construcție simplă, cost scăzut; Robustețe mare; Nivel scăzut de vibrații, stabilitate mecanică mare;
- Curent de pornire mai mic decât la varianta cu înfășurare rotorica
- Cuplu mai mare de pornire.

Motorul sincron cu magneți permanenți

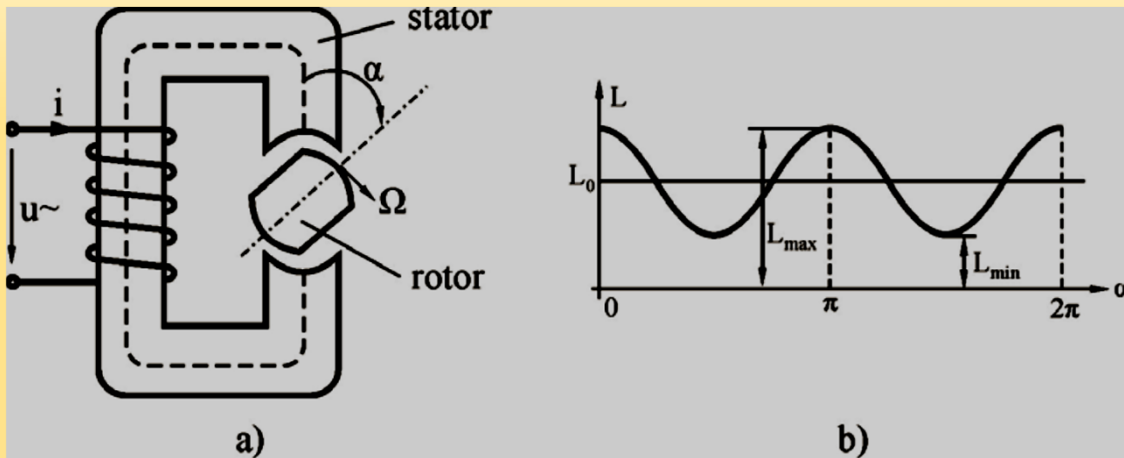
- Curba inducției în întrefier - sinusoidală
- Tensiunea indusă – back EMF - sinusoidală
- Curentul statoric - sinusoidal



$$M_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} + \frac{1}{2} \phi^2 \frac{dR}{d\theta} + Ni \frac{d\phi}{d\theta}$$

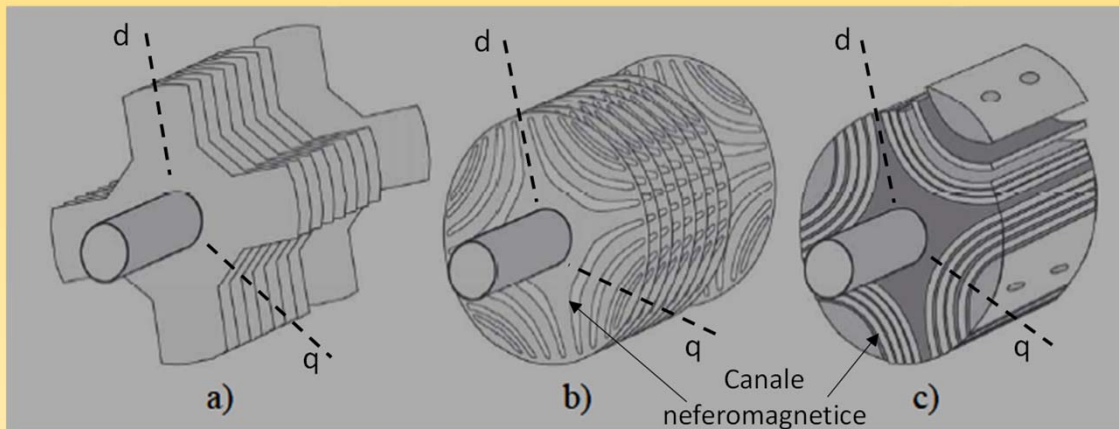


Motorul sincron reactiv



$$M_e = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1}{d\theta}$$

Rotorul este doar o piesa feromagnetică ce prezintă anizotropie de formă. **NU EXISTĂ** înfășurare rotorică sau magneți permanenți.



Construcția rotorului urmărește obținerea unui grad de modulație a înfășurării statorice cât mai mare, adică un raport cât mai mare X_d/X_q . Mărirea raportului presupune crearea, de-a lungul axei q , a unui traseu de închidere a liniilor de câmp având reluctanță cât mai mare.

Motoare cu comutație electronică

BLDC – BrushLess DC – sunt motoare cu magneți permanenți și comutație electronică

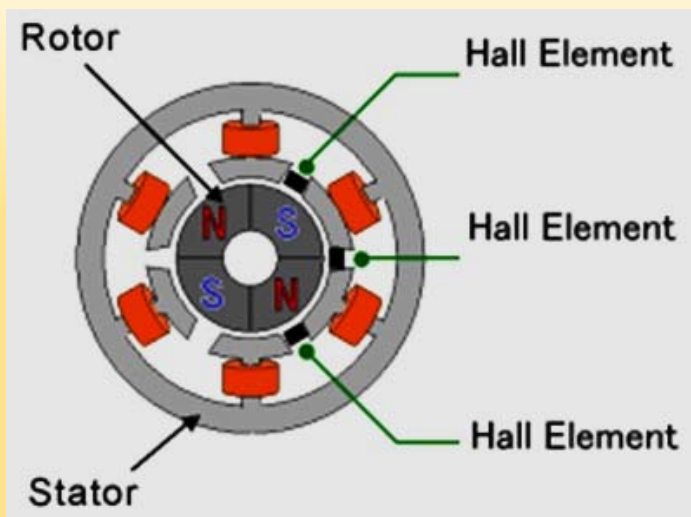
Motorul pas cu pas (MPP) este un convertor electromecanic ce transformă impulsuri electrice de comandă (tensiuni sau curenți) în mișcări unghiulare de rotație (sau deplasări liniare) numite „pași”.

Mișcarea de rotație sau liniară este o succesiune de pași.

Numărul de pași este egal cu numărul de impulsuri electrice de comandă primite.

Mașina cu reluctanță variabilă comutată („Switched Reluctance Motor” sau SRM) este o mașină cu comutație electronică, ce funcționează pe baza cuplului de reluctanță ce tinde să poziționeze polii pe trasee de reluctanță minimă.

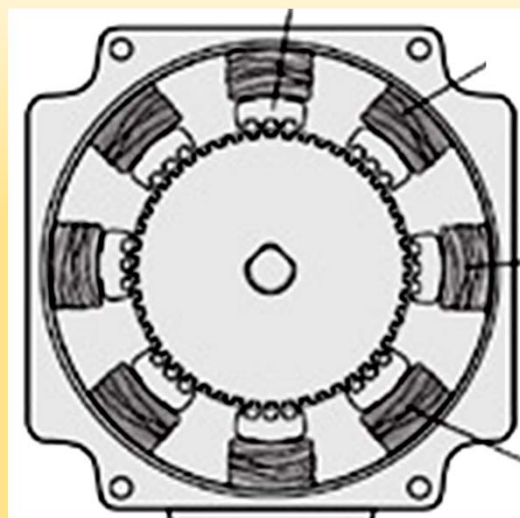
Construcție



BLDC

Satorul are poli aparenti pe care sunt prevazute infasurari de tip concentrat.

Rotorul este din material feromagnetic iar polii masinii sunt magneti permanenti plasați pe suprafata sau in interior. Numarul de poli este par.

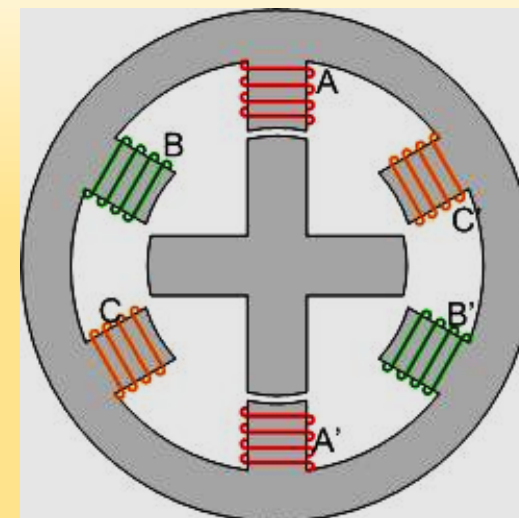


Motor pas cu pas

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 infasurari dar pot exista magneti permanenti la unele variante constructive.

Numarul de poli statorici este intotdeauna diferit de cel ai rotorului.



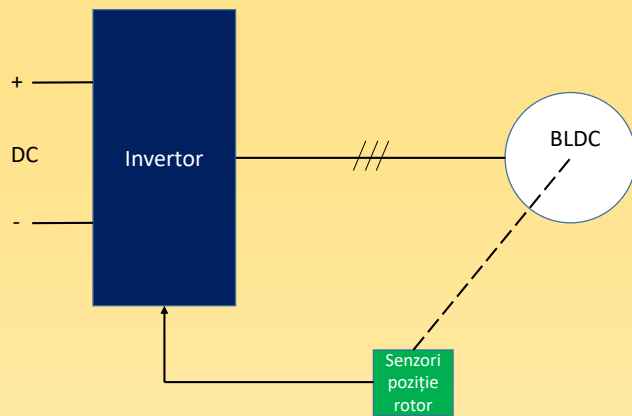
SRM

Satorul are poli aparenti pe care sunt prevazute infasurari de tip concentrat.

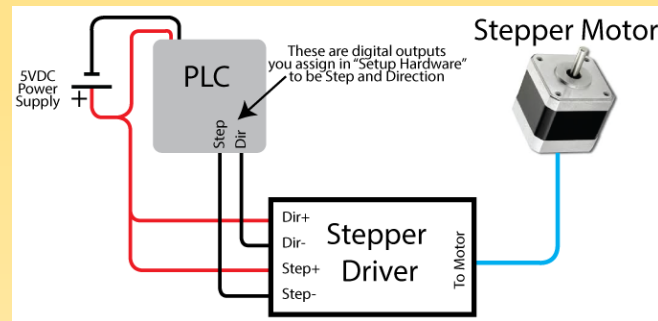
Rotorul este din material feromagnetic cu anizotropie de forma.

Numarul de poli statorici este intotdeauna diferit de cel ai rotorului (cu exceptia motoarelor monofazate).

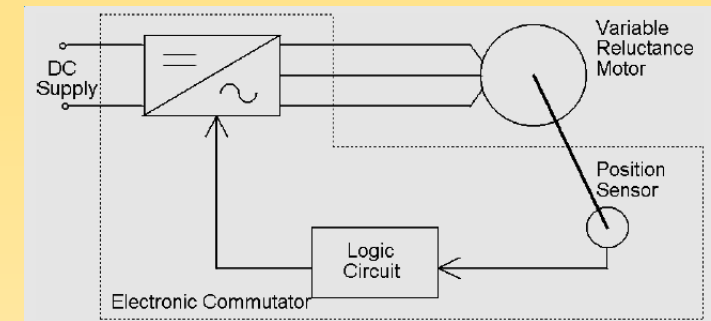
Sistem de acționare



Bucă închisă; senzori de poziție

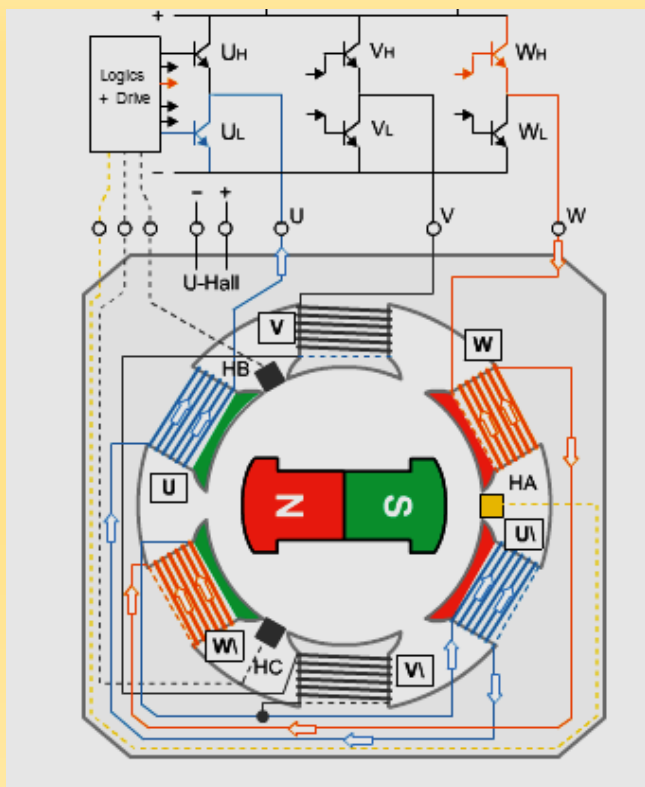


Bucă deschisă

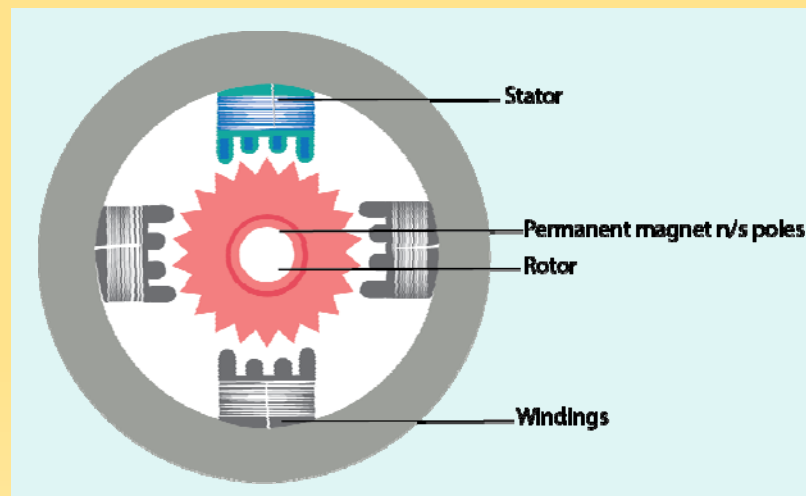


Bucă închisă; senzori de poziție

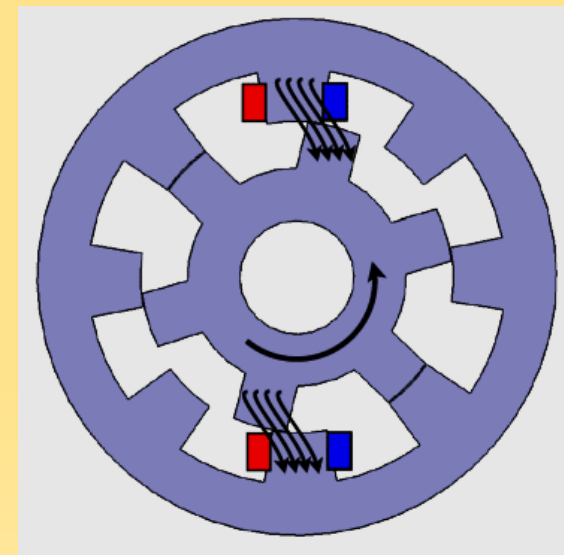
Principiu de funcționare



Alimentarea simultană a câte două faze

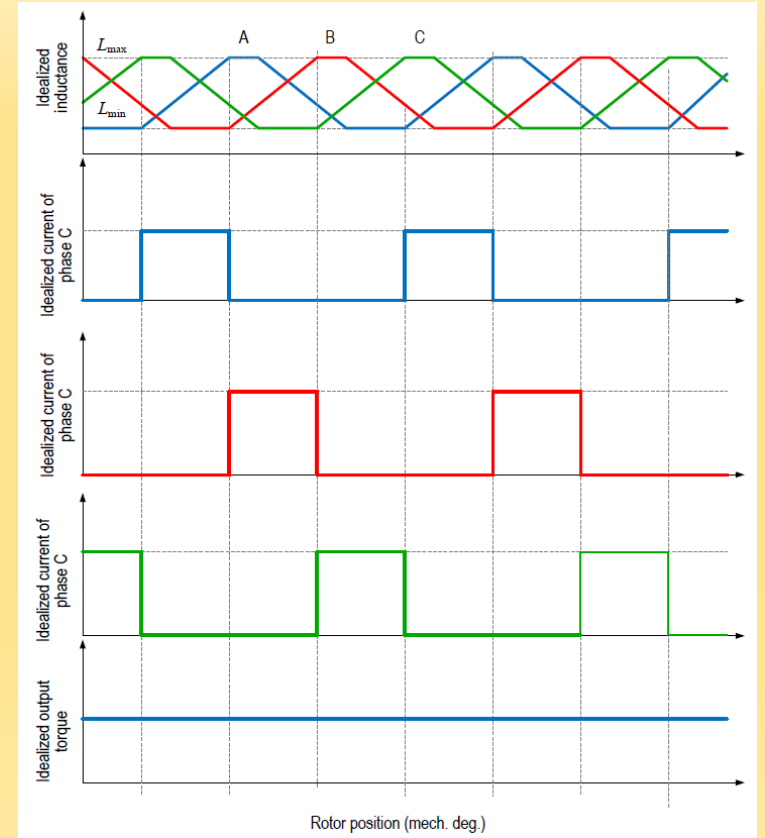
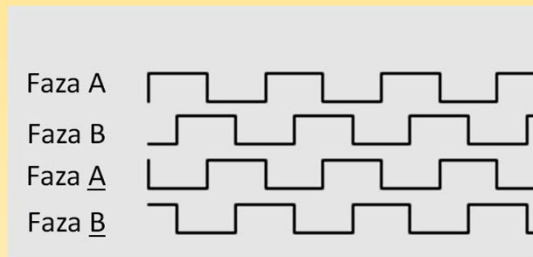
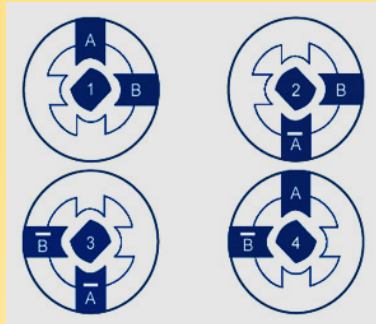
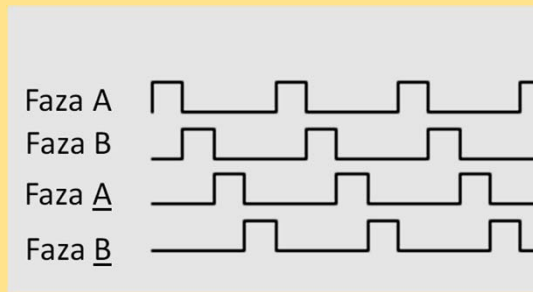
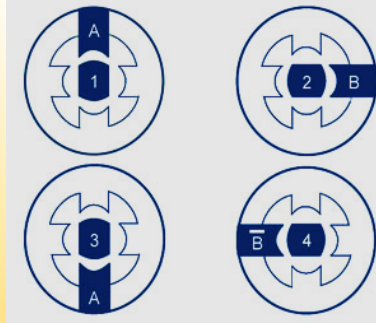
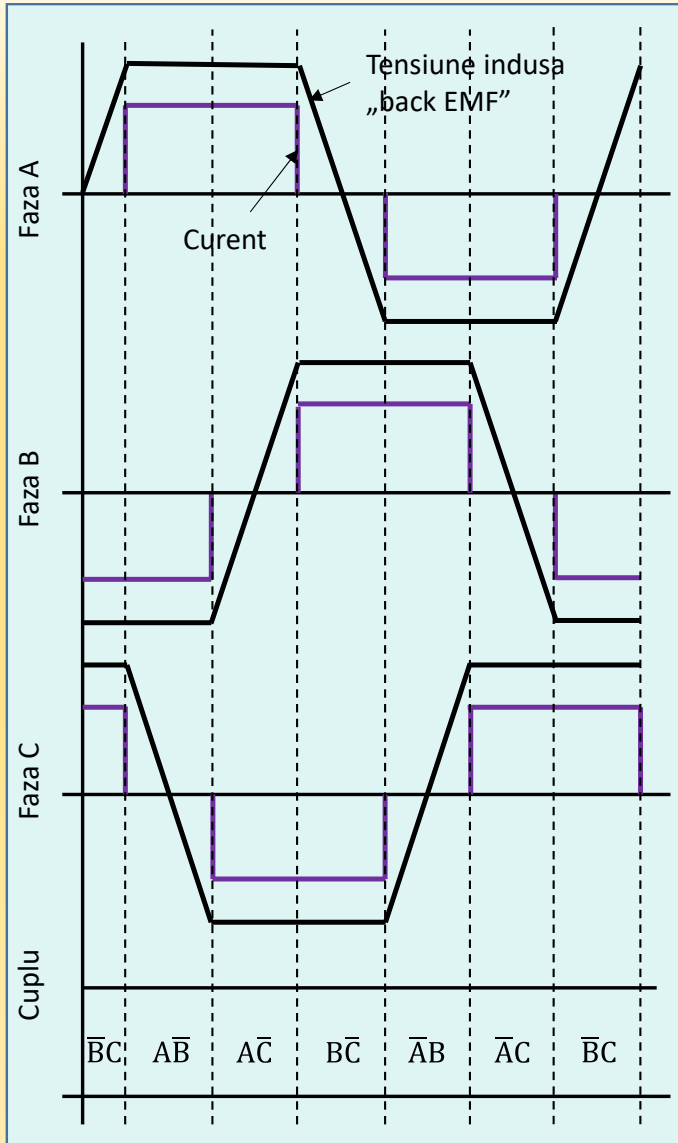


Alimentarea succesivă a câte unui pol



Alimentarea succesivă a câte unei faze (formată din două bobine opuse)

Comanda



Comanda

Pentru mașinile trifazate, un ciclu complet de comanda (o rotire completa a rotorului) presupune 6 pași.

In orice moment sunt alimentate doar doua din cele trei faze: una cu un curent pozitiv iar cealaltă cu un curent negativ.

Sucesiunea alimentarii fazelor determina un câmp „învârtitor”.

Aplicarea impulsului de comanda se face pe perioada cat tensiunea indusa in faza alimentata este MAXIMA.

Se alimentează succesiv înfășurările statorice.

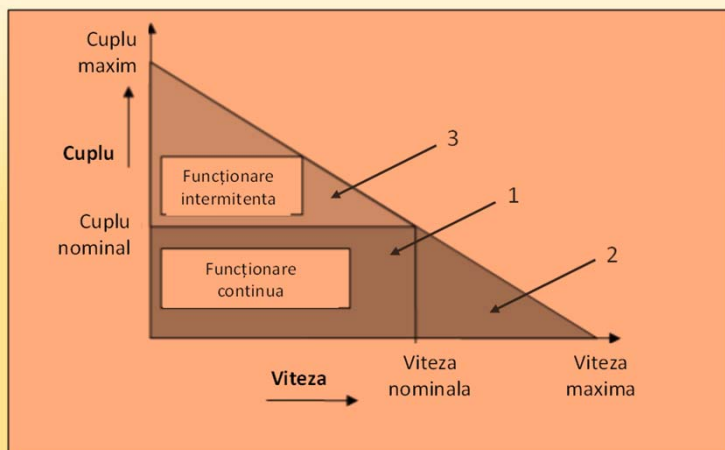
Pentru fiecare impuls de comanda, rotorul executa un pas unghiular.

De regulă, se alimentează câte doua înfășurări (ce constituie o faza) aflate pe poli diametral opuși.

In momentul alinierii, cuplul dezvoltat devine zero. Pentru rotirea rotorului este necesară întreruperea alimentarii fazei deja energizate si alimentarea cuplului de bobine următor in secvența de comandă.

Aplicarea impulsului de comanda se face pe perioada creșterii inductanței înfășurării alimentate.

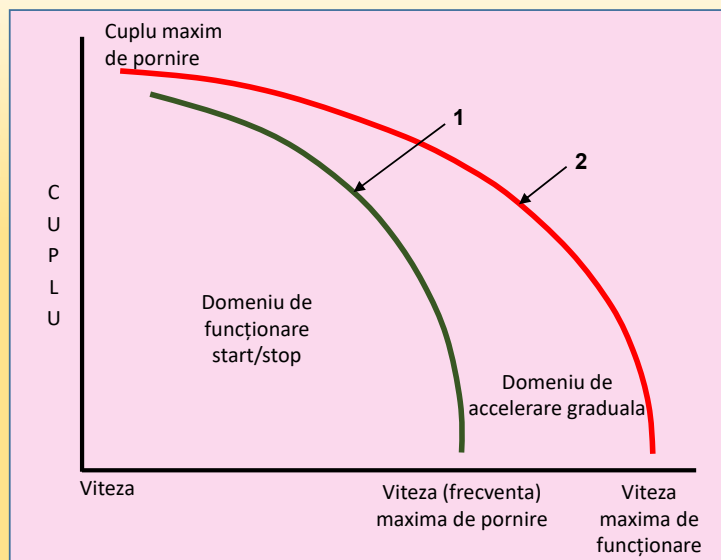
Caracteristica mecanica



Funcționarea BLDC permite menținerea constantă a cuplului dezvoltat pentru întreaga plajă de variație a vitezei în limitele $0-n_{nom}$. 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.

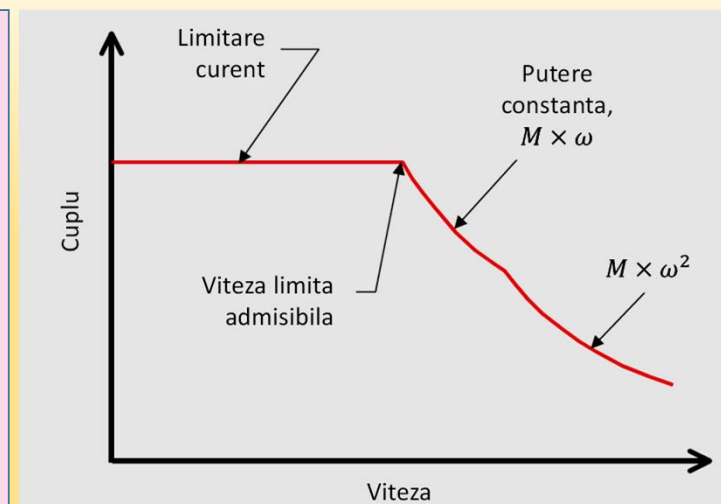
La valori mai mari ale cuplului (peste valoarea nominală), funcționarea este de tip intermitent și presupune scăderea turației sub valoarea sa nominală.



Domeniul de funcționare start/stop este zona de funcționare pentru care MPP poate accelera, frâna și schimba sensul de rotație fără pierdere de pași.

În zona de accelerare graduală, frânarea, accelerarea și inversarea sensului de rotație se fac gradual, altminteri apar pierderi de pași.

La valori peste curba 2, MPP nu funcționează.



Cuplul dezvoltat de SRM este limitat de valoarea curentului maxim și frecvența de comutație. Odată cu creșterea frecvenței (deci a vitezei motorului), crește tensiunea indusă în înfășurarea comandată ceea ce determină scăderea valorii curentului stabilit prin înfășurare. Viteza limită admisibilă de pe grafic indică punctul până la care SRM poate dezvolta cuplu constant. La turații mai mari, mașina poate funcționa la putere constantă, respectiv este necesară o scădere a cuplului de sarcină după relația $M \times \omega$ respectiv $M \times \omega^2$.

Avantaje

Raport CUPLU/VOLUM mare (densitate mare de cuplu)

Randament ridicat

Gamă largă de viteze

Întreținere simplă

Răspuns dinamic foarte bun

Funcționare silențioasă

Caracteristici mecanice si de reglaj paralele

Dezavantaje

Existența unei scheme de comandă si control electronice complexe fără care mașina NU poate funcționa

Pentru ce sunt MPP potrivite?

1. *Poziționare*

2. *Control al vitezei*

3. *Cuplu la viteze reduse*

Care sunt limitările MPP?

1. *Randament scăzut*

2. *Cuplu redus la viteze mari*

3. *Fără buclă de reacție* – Pierdere sincronismului nu este sesizată si corectată automat.

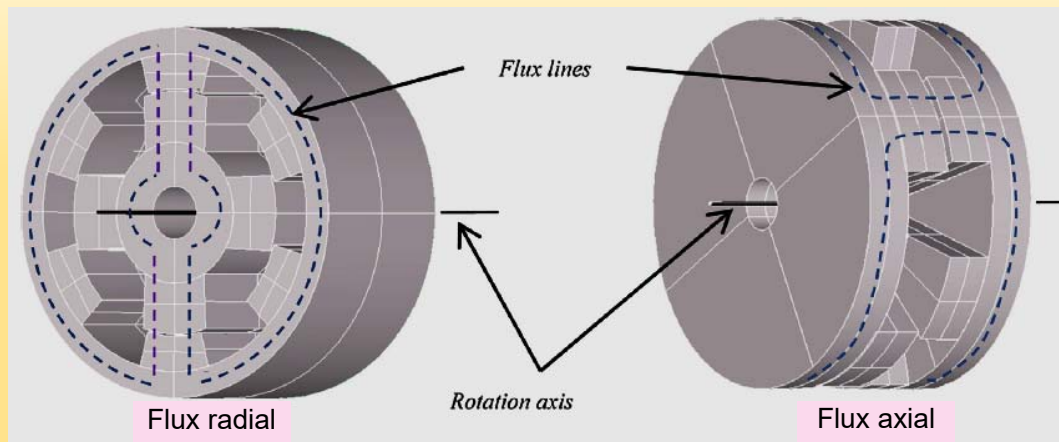
Avantaje SRM

- ❑ Construcție simplă si robustă.
- ❑ Înfășurările statorului sunt de tip concentrat, pe pol. Părțile frontale (inactive) sunt reduse.
- ❑ Rotorul are dimensiunile si greutatea cea mai mică (față de toate mașinile cu rotor feromagnetic). Inerție si constante mecanice reduse.
- ❑ Sursa principală de căldură (înfășurările) este plasată pe stator. Deci răcirea se face mai ușor.
- ❑ Întrucât înfășurările statorului sunt independente si au un cuplaj mutual foarte redus, orice defect electric ce apare într-o fază nu influențează si celelalte faze.

Dezavantaje SRM

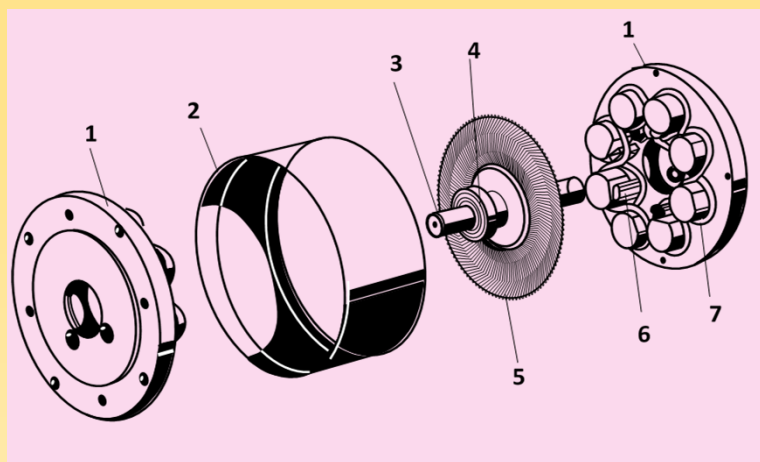
- ❖ Necesită sistem electronic de comandă.
- ❖ Pulsații de cuplu mari.
- ❖ Sunt mașini zgomotoase.
- ❖ Are nevoie de traductoare de poziție.

Mașini cu flux axial

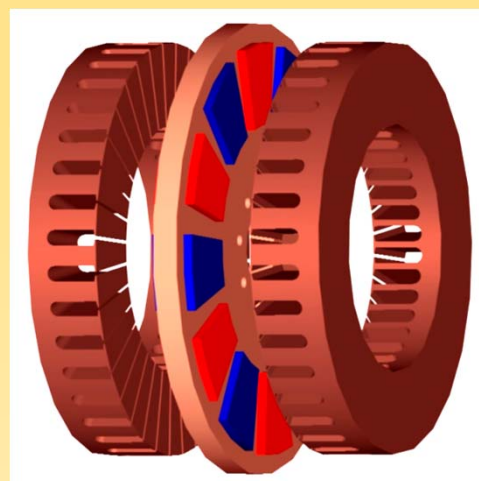


Linii de câmp magnetic se închid pe trasee paralele cu axul mașinii.

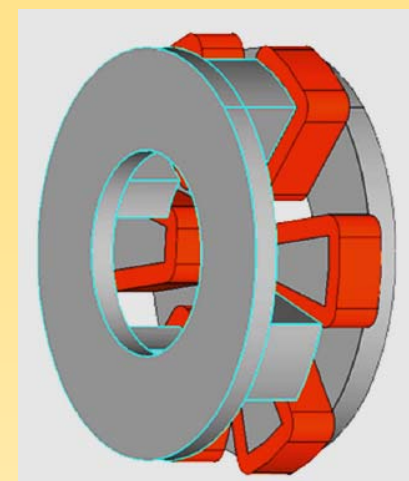
Statorul și rotorul ocupa poziții „fața în față”.



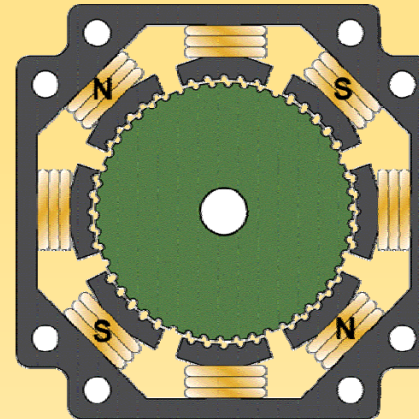
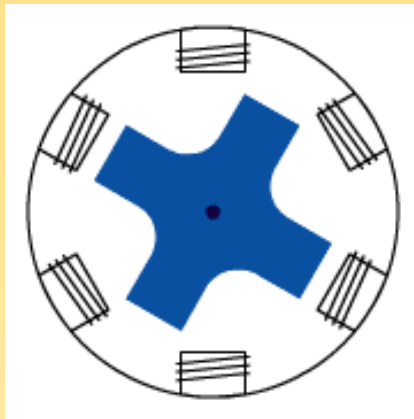
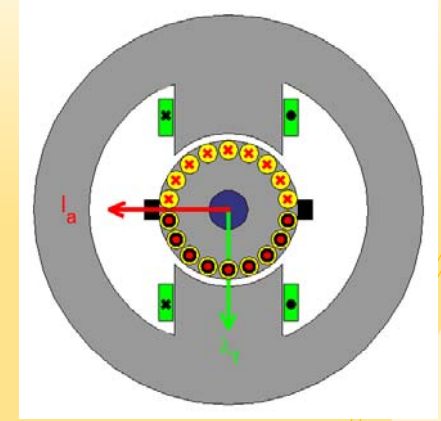
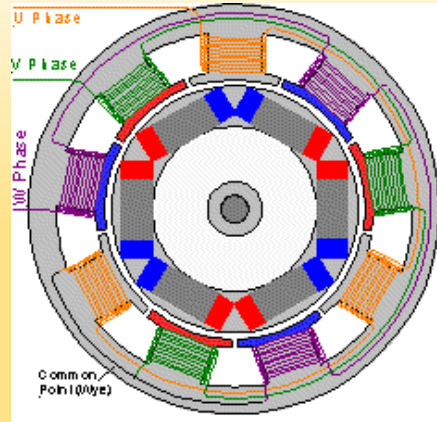
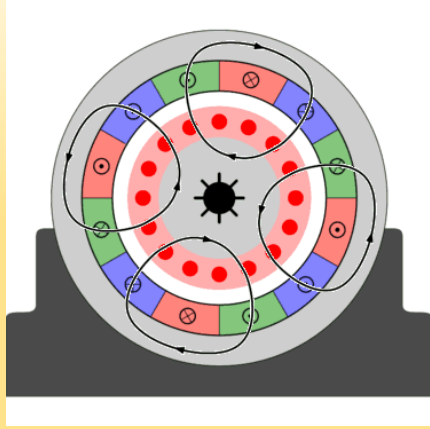
Motor de c.c. cu rotor disc

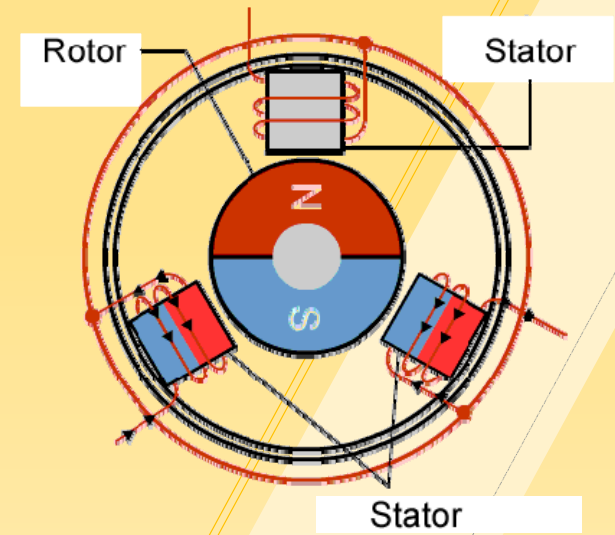
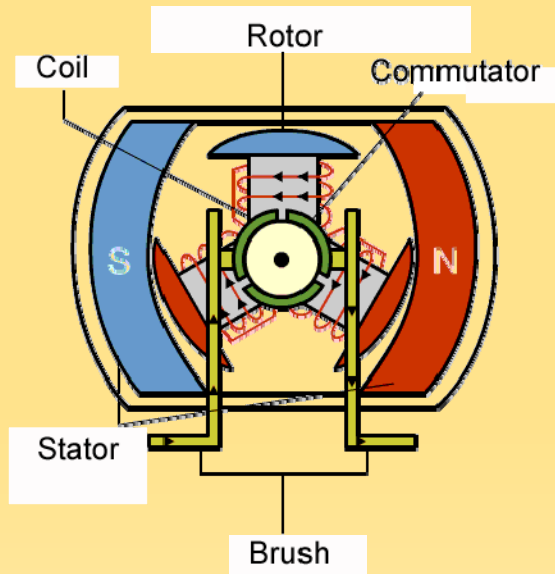
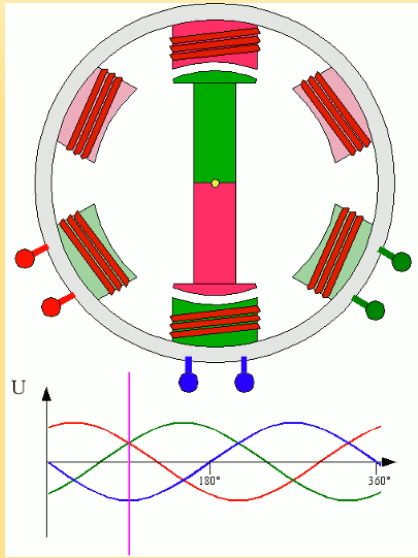


PMSM sau BLDC



SRM





PROIUS SI PREZENTAT DE

