
Maşini electrice

Introducere



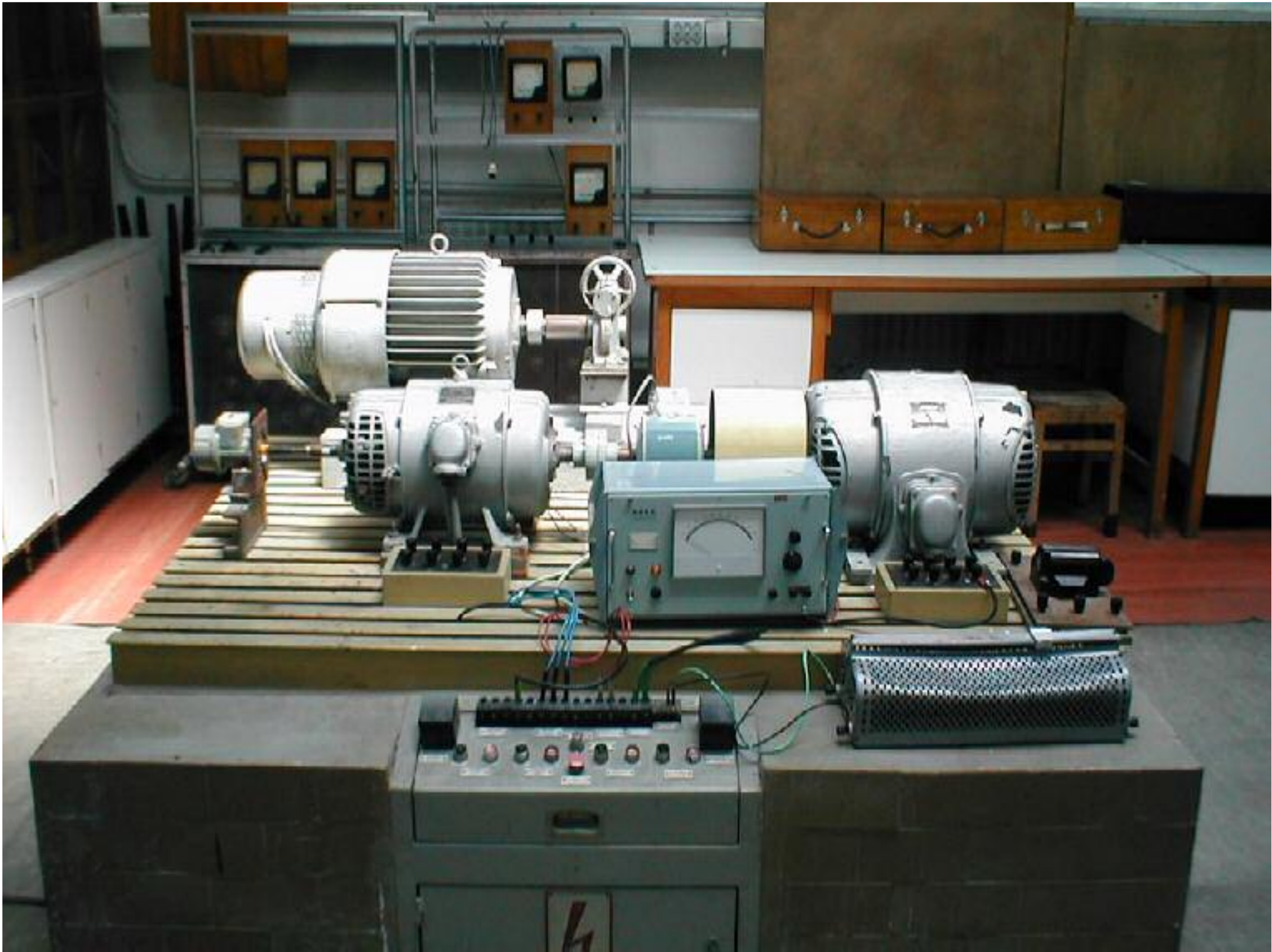












BIBLIOGRAFIE

1. Constantin **Bălă** – Mașini electrice- Ed.Didactică si Pedagogică, București 1982.
 2. Marius **Babescu** – Mașini electrice. Culegere de probleme rezolvate – Ed. Tehnică, Bucuresti 1996.
 3. Năstase **Bichir**, Constantin **Răduti**, Ana Sofia **Diculescu** – Mașini electrice - Ed. Didactică si Pedagogică, Bucuresti 1979.
 4. **Biró** Károly – Mașini și acționări electrice - Litografia IPC-N, Cluj 1987.
 5. **Biró** Károly- Mașini electrice. Culegere de probleme - Ed. Mediamira, Cluj-Napoca, 1999.
 6. Ioan **Boldea**– Transformatoare si mașini electrice - Ed.Didactică și Pedagogică, Bucuresti 1994.
 7. Ioan **Boldea**, Gheorghe **Atanasiu** – Analiza unitară a mașinilor electrice – Ed. Academiei RSR, București 1987
 8. Ion **Cioc**, Năstase **Bichir**, Nicolae **Cristea** – Mașini electrice. Indrumar de proiectare. Vol. I, II, III. - Ed. Scrisul Românesc , Craiova, 1981.
-

BIBLIOGRAFIE

9. Aurel **Câmpeanu** – Mașini electrice. Probleme fundamentale, speciale și de funcționare optimă – Ed. Scrisul Românesc , Craiova, 1988.
 10. Aurel **Câmpeanu**- Introducere în dinamica mașinilor electrice de curent alternativ - Ed. Academiei Române, 1999
 11. Aurel **Câmpeanu**, Vasile **Iancu**, Mircea M. **Rădulescu**- Mașini în acționări electrice - Ed. Scrisul Românesc , Craiova, 1996.
 12. A. **Crișan**, K. **Biró**, I.A. **Viorel** - Mașini electrice.vol I. Noțiuni de bază. Transformatorul - Litografia IPC-N, Cluj 1970.
 13. A. **Crișan**, K. **Biró**, I.A. **Viorel** - Mașini electrice.vol II. Mașini de curent alternativ - Litografia IPC-N, Cluj 1973.
 14. Toma **Dordea** - Mașini electrice- Ed.Didactică si Pedagogică, București 1970.
 15. Ovidiu **Drăgănescu** – Încercările mașinilor electrice rotative – Ed.Tehnică București 1987.
-

BIBLIOGRAFIE

16. Nicolae **Galan**, Constantin **Ghiță**, Mihai **Cistelecan**– Mașini electrice - Ed.Didactică si Pedagogică, Bucuresti 1981.
 17. I.S. **Gheorghiu.**, Alexandru **Fransua** – Tratat de mașini electrice – Ed. Academiei RSR , Vol I, Mașini de curent continuu, 1968; vol II Transformatoare,1970; vol III Mașini asincrone,1971; vol IV Mașini sincrone, 1972.
 18. I.S. **Gheorghiu** - Mașini electrice .Probleme si aplicatii industriale. vol I, și II– Ed. Tehnica, Bucuresti 1966.
 19. Alexandru **Fransua**, Răzvan **Măgureanu**, M. **Tocaci**– Mașini si actionari electrice. Culegere de probleme - Ed. Didactică și Pedagogică, București 1980.
 20. Al. **Fransua**, R. **Măgureanu**, A. **Câmpeanu**, M. **Codruc**, M. **Tocaci** – Mașini și sisteme de acționări electrice – Ed.Tehnică București 1987.
 21. **Kovacs K. Pal** - Analiza regimurilor tranzitorii ale mașinilor electrice - Ed. Tehnică. Bucuresti ,1980
-

BIBLIOGRAFIE

22. **C. Lazu, V. Corlățeanu** – Mașini electrice, vol I și II - Ed. Didactică și Pedagogică, București 1968.
 23. **Andrei Nicolaide** – Mașini electrice. Teorie. Proiectare, vol. I, II - Ed. Scrisul Românesc Craiova, 1975.
 24. **Rudolf Richter**– Masini electrice, Traducere din limba germană, - Ed. Tehnică, Bucuresti, vol. I, Elemente generale de calcul. Mașina de curent continuu, 1958; vol. II Mașina sincronă. Mașina comutatoare, 1960; vol. III Transformatoare, 1960; vol. IV Mașini de inducție, 1960; vol. V Mașini cu colector pentru curenți mono și polifazici, 1961.
 25. **Rudolf Richter** – Înfășurările mașinilor electrice - Ed. Tehnică, Bucuresti, 1965.
 26. **Ioan Adrian Viorel, Vasile Iancu** – Mașini și acționări electrice - Litografia IPC-N, Cluj 1990.
 27. **I.A. Viorel, R.C. Ciorbă** – Mașini electrice în sisteme de acționare – UT Press, Cluj, 2002
-

Activități

Semestrul 5

Curs 3 ore/săpt

Laborator 2 ore/săpt. - test

Examen test pe calculator
→ nota 7 {
- 15% prezența la curs
- 15 % activitate laborator
- 30 întrebări teoretice

→ nota 10 + 15 întrebări teoretice

Semestrul 6

Curs 3 ore/săpt.

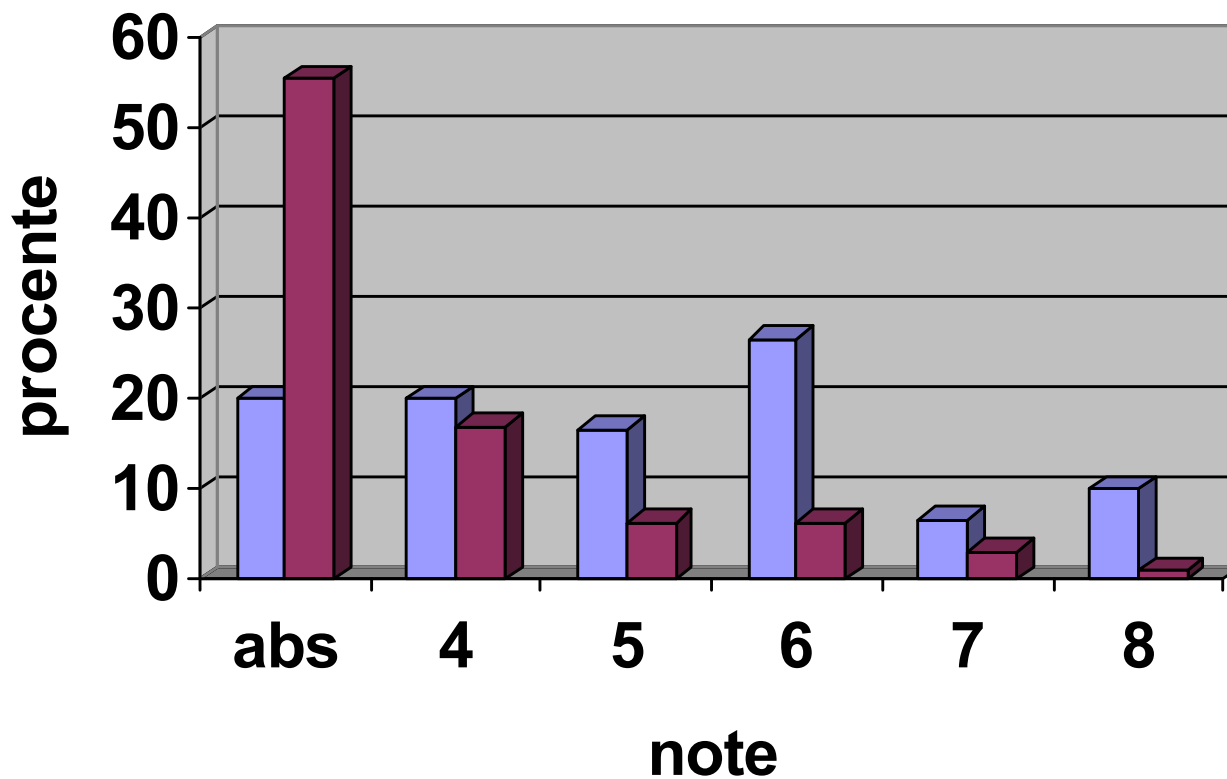
Laborator 1 oră/săpt.

Proiect 1 oră/săpt

Notă proiect ET, EN,EM,ACT

Examen oral
- rezolvarea unei probleme 45 %
- 2 subiecte teoretice 40 %
- prezență, laborator 15 %

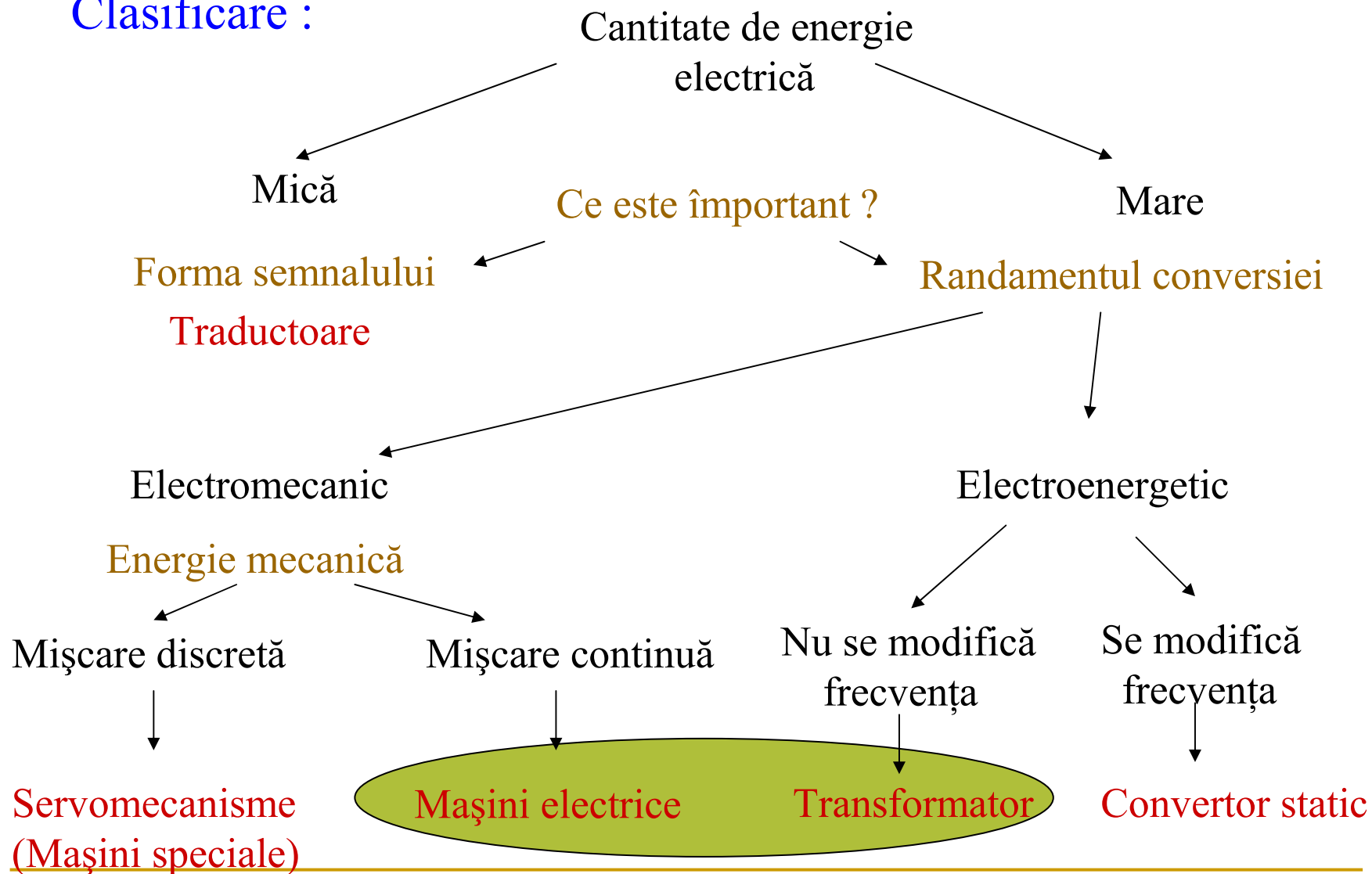
Influenta prezentei la curs asupra notelor 2005-2006



■ peste 6 prezențe ■ maximum 2 prezențe

Convertoare de energie

Clasificare :



Scurt istoric

Dezvoltarea construcției de mașini electrice este legată de:

- Progresul teoriei câmpului electromagnetic
- Progresul materialelor electrotehnice
- Progresul general al industriei.

1825 – realizarea electromagneților

1831 – formularea legii inducției electromagnetice - Faraday

1832 – primul generator de curent alternativ

1834 – formularea principiului reversibilității mașinilor electrice - Lenz

1856 – primul transformator cu circuit magnetic închis – S.A. Varley

1862 – mașina de curent continuu – Pacinotti și Gramme

1883 – mașina cu repulsie – E. Thomson

Scurt istoric

1885 – modelul mașinii de inducție - G. Ferraris

1887 – modelul mașinii sincrone

1891 – transformatorul sub forma actuală

1892 – mașina sincronă industrială

1911 – transpunerea conductoarelor - Roebel

1936 – teoria celor două axe - Park

Savanți români:

Cesar Parteni Antoni

Plauțius Andronescu

Remus Răduleți

A.Nicolau

I.S. Gheorghiu

Toma Dordea

.....

Definiții

O mașină electrică este un convertor electromecanic ce transformă energia electrică în energie mecanică când funcționează în regim de motor, sau invers energia mecanică în energie electrică când funcționează în regim de generator.

Transformarea energiei are loc prin intermediul câmpului magnetic.

Câmpul magnetic poate fi produs prin:

Magneți permanenți – mașini magnetoelectrice (excitație cu MP)

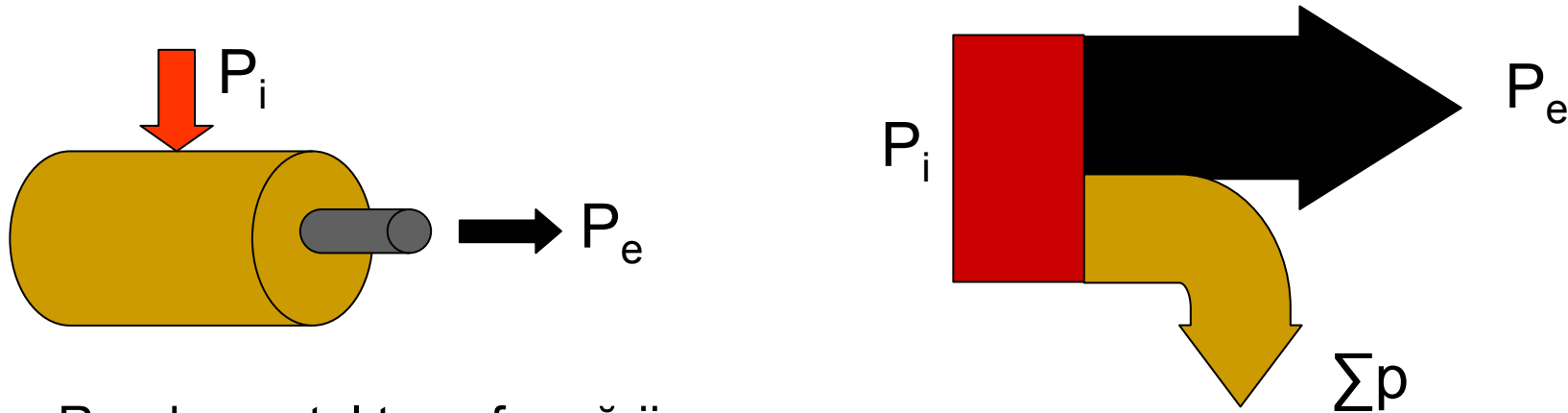
Electromagneți - curenți din **înfășurările** mașinii (excitație electromagnetică)

– cu **circuit de fier** -

- fără fier, (supraconductoare)

Pierderi de energie

Orice transformare de energie este însoțită de pierderi.



Randamentul transformării

$$\eta = \frac{P_e}{P_i} = 1 - \frac{\sum p}{P_i} = \frac{1}{1 + \frac{\sum p}{P_e}}$$

Categorii de **pierderi** în mașini electrice:

Pierderi electrice produse de curenți în conductoare,

Pierderi magnetice produse de variația câmpurilor în fierul mașinii,

Pierderi mecanice datorită deplasării unei părți din mașină.

Definiții

Pierderile se transformă în căldură în interiorul mașinii
este nevoie de un sistem de răcire pentru evacuarea căldurii.

Deci pentru realizarea transformării energiei electrice în energie mecanică –
Mașina electrică trebuie să aibă:

- sistem electric – înfășurări,
- sistem magnetic – circuit de fier,
- sistem mecanic și de răcire – elemente constructive.

Transformarea energiei trebuie să se realizeze cu **randament maxim**

Pentru a avea pierderi minime este necesar:

➤ Câmp magnetic de anumită valoare, formă de variație în timp și spațiu

Un circuit magnetic realizat din materiale de calitate,
de anumită formă și dimensiuni

➤ Tensiuni electromotoare induse maxime

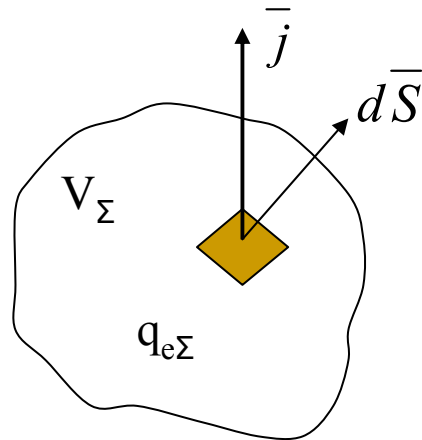
Un circuit electric de anumită formă și dimensiune

Inducții magnetice și densități de curenți limitați

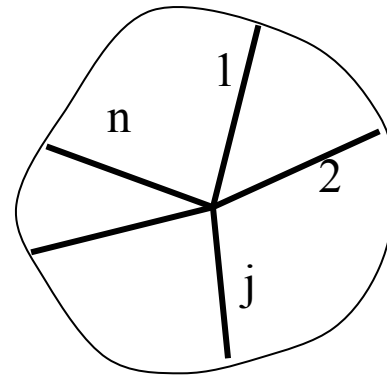
Legi și teoreme de bază

■ Legea conservării sarcinii

- Curentul total de conducție, care iese dintr-o suprafață închisă Σ este egal cu semn contrar cu viteza de variație în timp a sarcinii electrice $q_{e\Sigma}$.



$$i_{\Sigma} = -\frac{dq_{e\Sigma}}{dt}$$



$$\sum_{j=1}^n i_j = 0$$

Prima teoremă a lui Kirchhoff

Suma algebrică a curenților într-un nod este zero

$$\text{div } \underline{j} = 0$$

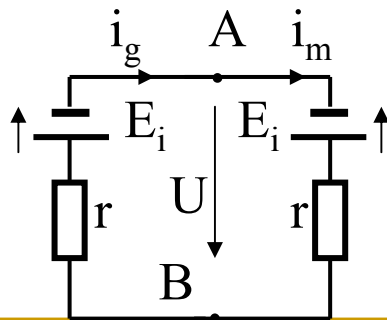
Legi și teoreme de bază

- Legea conducerii electrice
- Intensitatea propriu zisă a câmpului electric \bar{E} și câmpul electric imprimat \bar{E}_i este proporțională cu densitatea \bar{j} a curentului de conducție.

$$\bar{E} + \bar{E}_i = \rho \cdot \bar{j} \qquad \bar{j} = \sigma \cdot (\bar{E} + \bar{E}_i)$$

Pentru conductoare filiforme, liniare, izotrope prin integrare

$$\int_A^B \bar{E} \cdot d\bar{s} + \int_A^B \bar{E}_i \cdot d\bar{s} = \int_A^B \rho \cdot \bar{j} \cdot d\bar{s}$$

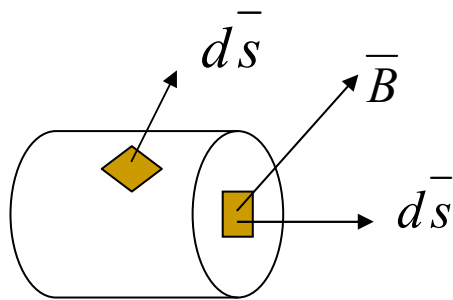


$$u + e_i = r \cdot i \qquad \text{Receptor-motor}$$

$$-u + e_i = r \cdot i \qquad \text{generator}$$

Legi și teoreme de bază

- Legea fluxului magnetic
- Fluxul magnetic pe orice suprafață închisă este nulă.



$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$

Forma locală

Teorema Gauss- Ostrogradski

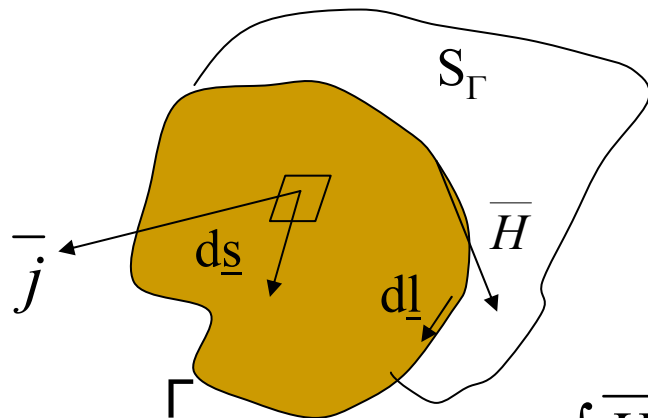
$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

Câmpul magnetic nu are surse, este un câmp cu linii închise.

Legi și teoreme de bază

- Legea circuitului magnetic
- Tensiunea magnetomotoare (t.m.m.) pe o curbă închisă Γ este egală cu suma dintre intensitatea curentului de conducție printr-o suprafață S_Γ ce se sprijină pe curba Γ și viteza de variație în timp a fluxului electric prin S_Γ .

$$U_{mm} = i_{S_\Gamma} + \frac{d\Psi_{S_\Gamma}}{dt}$$



Tensiunea magnetică = integrala de linie a intensității câmpului magnetic

$$F = \oint_{\Gamma} \bar{H} \cdot d\bar{l}$$

Solenația = intensitatea curentului de conducție printr-o suprafață

$$\oint_{\Gamma} \bar{H} \cdot d\bar{l} = \int_{S_\Gamma} \bar{j} \cdot d\bar{s} + \frac{d}{dt} \int_{S_\Gamma} \bar{D} \cdot d\bar{s} + \int_{S_\Gamma} \text{rot}(\bar{D} \times \bar{v}) \cdot d\bar{s}$$

solenația

Curentul de deplasare

Curentul Roentgen

Legi și teoreme de bază

Forma locală a legii

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \bar{j} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} + \operatorname{rot}(\bar{D} \times \bar{v})$$

- Legea legăturii dintre \bar{B} și \bar{H}

$$\bar{B} = \mu \cdot \bar{H} \quad \mu \text{ permeabilitate magnetică}$$

Pentru materiale izotrope și liniare

$$\bar{B} = \mu \cdot \bar{H} + \mu_0 \bar{M} \quad \mathbf{M} \text{ magnetizația}$$

μ_0 permeabilitatea vidului

$$\mu_0 = 1 + \chi_m$$

χ_m Susceptivitatea magnetică

Legi și teoreme de bază

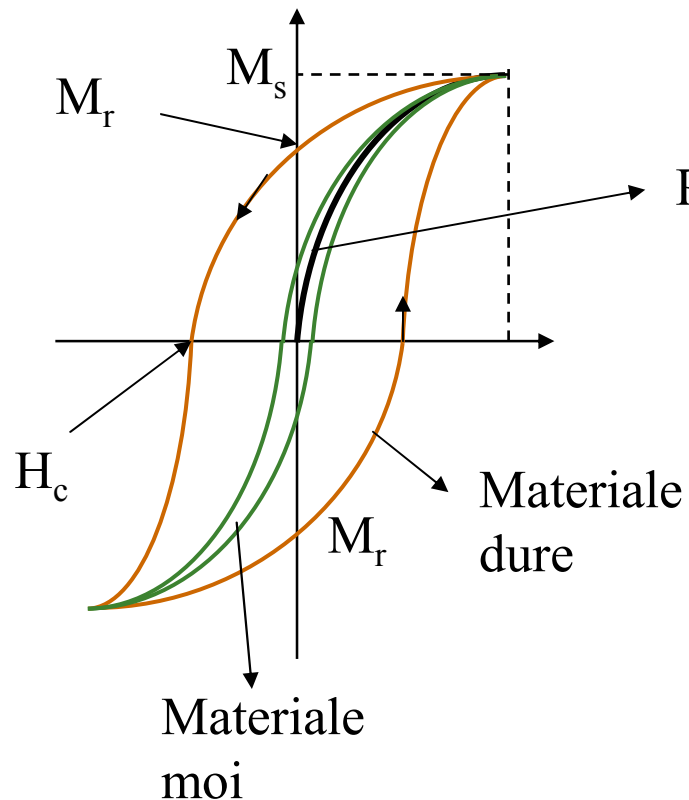
$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

μ Permeabilitatea relativă

Materiale magnetice neliniare

{
Materiale feromagnetice
Materiale antiferomagnetice
Materiale ferimagnetice

Magnetizația este ridicată și depinde de câmpul magnetic după o **curbă de histereză**.



Prima curba de magnetizare

H_c – câmpul magnetic coercitiv

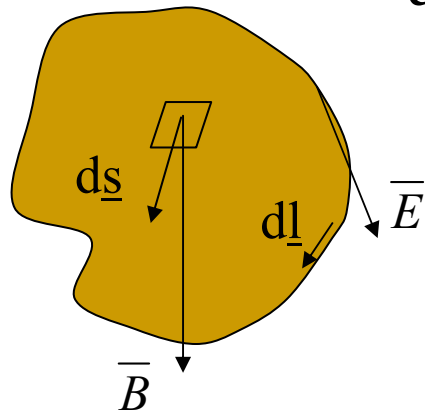
M_s – magnetizația de saturație

M_r – magnetizația remanentă

Legi și teoreme de bază

■ Legea inducției electromagnetice

- Tensiunea electromotoare indusă (t.e.m.) de-a lungul unei curbe închise este egală cu semn contrar cu viteza de variație în timp a fluxului magnetic printr-o suprafață care se sprijină pe contur.



$$e_{\Gamma} = - \frac{\partial \Psi_{S\Gamma}}{\partial t}$$

Tensiune electrică

$$e_{\Gamma} = \oint \bar{E} \cdot d\bar{l}$$

Flux magnetic

$$\Psi_{S\Gamma} = \int_S \bar{B} \cdot d\bar{s}$$

$$e_{\Gamma} = - \int_{S_{\Gamma}} \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} d\bar{s} + \oint_{\Gamma} (\bar{v} \times \bar{B}) d\bar{l}$$

t.e.m. transformatorică

t.e.m. de mișcare

$$\text{rot } \bar{E} = - \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} + \text{rot } (\bar{v} \times \bar{B})$$

Legi și teoreme de bază

Legile câmpului electromagnetic pentru mediile liniare și izotrope, în repaus

$$\operatorname{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \bar{j} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$$

$$\bar{j} = \sigma \cdot (\bar{E} + \bar{E}_i)$$

$$\bar{D} = \varepsilon \cdot \bar{E}$$

$$\bar{B} = \mu \cdot \bar{H}$$

Legi și teoreme de bază

- Densitate de volum a energiei electromagnetice

$$W_m = \frac{\overline{E} \cdot \overline{D}}{2} + \frac{\overline{H} \cdot \overline{B}}{2}$$

- Teorema transportului de putere la borne
- Puterea primită la borne de un multipol este egală cu suma produselor dintre intensitățile curenților la borne de acces și potențialele electrice ale acestora

$$P = \sum_{\lambda=1}^m u_{\lambda} \cdot i_{\lambda}$$

Legi și teoreme de bază

Legile mișcării corpului solid

În cazul mișcării de translație - toate punctele corpului se mișcă cu aceeași viteză și accelerație – se pot aplica legile dinamicii punctului material:

- orice punct material își păstrează starea de repaus sau de mișcare rectilinie uniformă atât timp cât asupra sa nu acționează alte corpuri.

- Accelerația \bar{a} a unui punct material este direct proporțională cu forța \bar{F} rezultantă care acționează asupra punctului și invers proporțională cu masa m a punctului material.

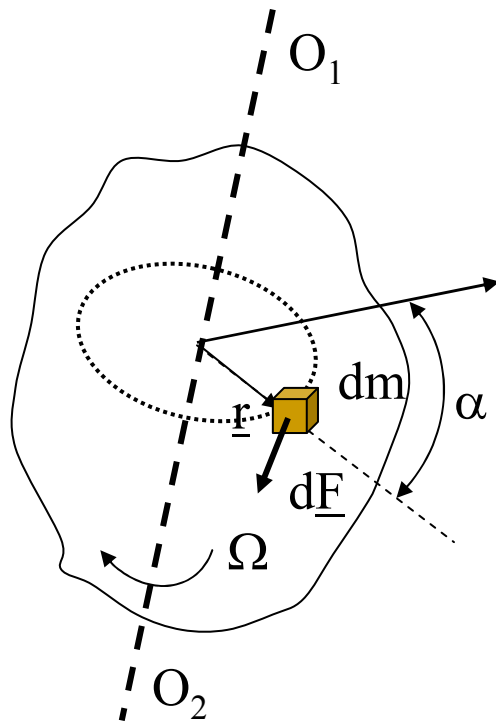
$$\bar{F} = m \cdot \bar{a}$$

- dacă corpul B acționează asupra corpului A cu forța \bar{F}_1 , atunci corpul A la rândul său acționează asupra corpului B cu o forță \bar{F}_2 egală în mărime și de orientare opusă.

$$\bar{F}_1 = -\bar{F}_2$$

Legi și teoreme de bază

În cazul mișcării de rotație



Momentul forțelor(cuplul)

$$C = \int_V [\underline{r} \times d\underline{F}]$$

Momentul de inerție al corpului în raport cu axa de rotație O_1O_2

$$J = \int_V r^2 \cdot dm \quad [kgm^2]$$

Pentru corpuri cilindrice

$$J = \frac{G \cdot D_G^2}{4 \cdot g}$$

Diametrul de girație

$$D_G = \frac{D}{\sqrt{2}}$$

$$\varepsilon = \frac{d\Omega}{dt} = \frac{d^2\alpha}{dt^2}$$

$$C = J \frac{d\Omega}{dt}$$

Accelerația unghiulară este direct proporțională cu momentul forțelor ce acționează asupra corpului și invers proporțională cu momentul de inerție.

Mărimi definitorii pentru mașini electrice

- Flux fascicular în circuit magnetic $\Phi = B \cdot A$ A aria secțiunii transversale a circuitului magnetic.

- Flux total o înfășurare $\Psi = \sum_{i=1}^w \Phi_i = w \cdot k_b \cdot \Phi$ w numărul de spire

- Tensiune magnetică K_b factorul de bobinaj

- Reluctanța $F = \int_A^B \overline{H} \cdot d\overline{l} = \frac{l}{\mu \cdot A} \Phi = \mathfrak{R} \cdot \Phi$

- Permeanța $\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu \cdot A}$

- Numar spire efective $\Lambda = \frac{1}{\mathfrak{R}} = \frac{\mu \cdot A}{l}$

$$w_{ef} = w \cdot k_b$$

Mărimi definitorii pentru mașini electrice

- Solenație $\theta = w_{ef} \cdot i = \mathfrak{R} \cdot \Phi$
- Inductivitate proprie $L_{\lambda\lambda} = \frac{\Psi_{\lambda\lambda}}{i_{\lambda}} = \frac{w_{\lambda ef}^2}{\mathfrak{R}} = w_{\lambda ef}^2 \cdot \Lambda$
- Inductivitate de cuplaj $M_{\lambda\nu} = \frac{\Psi_{\lambda\nu}}{i_{\nu}} = w_{\lambda ef} \cdot w_{\nu ef} \cdot \Lambda$
- Inductivitate de scăpări $L_{\sigma\lambda\nu} = \frac{\Psi_{\lambda\lambda} - \Psi_{\lambda\nu}}{i_{\lambda}}$
- Flux total înfășurare $\Psi_{\lambda} = \Psi_{\lambda\lambda} + \sum_{\substack{\nu=1 \\ \nu \neq \lambda}}^{\nu=m} \Psi_{\lambda\nu}$

Mărimi definitorii pentru mașini electrice

- Energia magnetică

$$W_m = \frac{1}{2} \sum_{\lambda=1}^m i_{\lambda} \cdot \Psi_{\lambda}$$

- Legea de conservare a energiei

- Energia dată de surse este egală cu suma pierderilor, a variației energiei magnetice și a lucrului mecanic efectuat de forțe de natură magnetică.

$$\sum_{\lambda=1}^m u_{\lambda} \cdot i_{\lambda} \cdot dt = \sum_{\lambda=1}^m r_{\lambda} \cdot i_{\lambda}^2 \cdot dt + dW_m + dL_{mec}$$

Energia dată de surse Pierderi Variația energiei magnetice Lucrul mecanic

Energia magnetică

Transformarea energiei **este posibilă** dacă **energia magnetică** **depinde de poziția relativă a armăturilor**.

Energia magnetică

$$W_m = \frac{1}{2} \sum_{\lambda=1}^m i_{\lambda} \cdot \Psi_{\lambda}$$

Fluxul magnetic total

$$\Psi_{\lambda} = \Psi_{\lambda\lambda} + \sum_{\substack{v=1 \\ v \neq \lambda}}^{v=m} \Psi_{\lambda v}$$

Fluxul magnetic propriu

$$\Psi_{\lambda\lambda} = L_{\lambda\lambda} \cdot i_{\lambda}$$

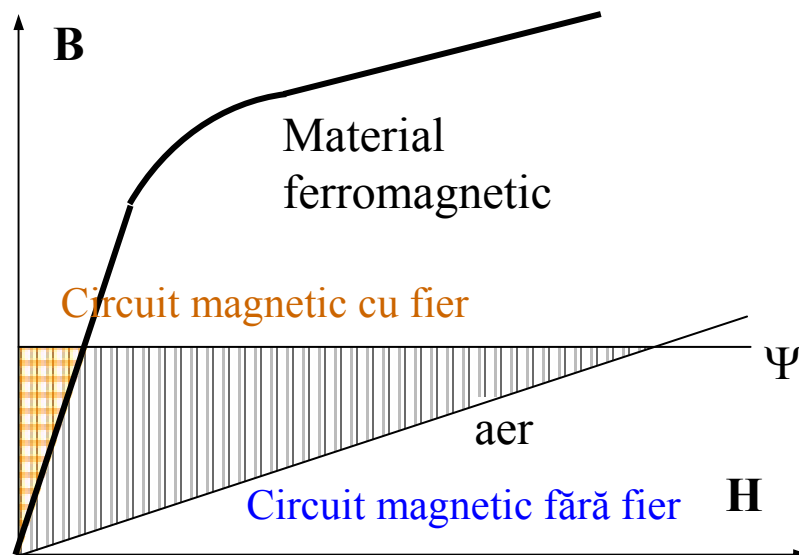
Fluxul magnetic de cuplaj

$$\Psi_{\lambda v} = M_{\lambda v} \cdot i_v$$

Crearea câmpului magnetic

Pentru a crea câmp magnetic este necesară o **energie**. Această energie se poate calcula pe baza relațiilor anterioare pentru circuit magnetic fără fier

$$W_m = \frac{1}{2} \frac{\Theta}{w} \Psi = \frac{1}{2} U_m \cdot \phi = \frac{1}{2} H \cdot l \cdot B \cdot A = \frac{1}{2} \cdot B \cdot H \cdot V$$



Unde volumul $V = l \cdot A$

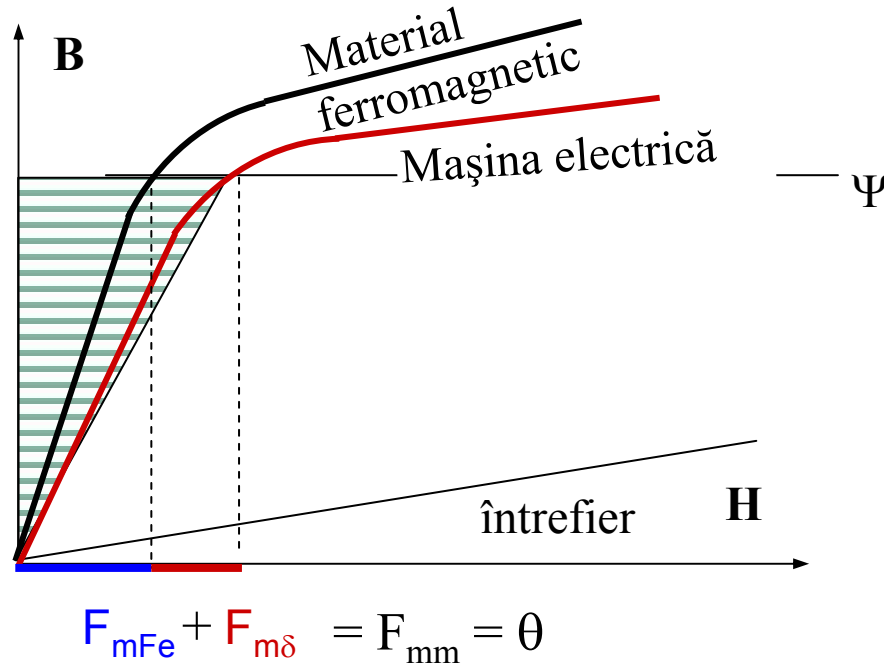
$B \cdot H / 2$ – suprafețele hașurate

Consecință :

Se limitează spațiile de aer în circuitele magnetice.

Crearea câmpului magnetic

Circuit magnetic cu întrefier



Solenția dată de magnet permanent

$$\theta = H_c \cdot l_{MP}$$

Solenția dată de o înfășurare

$$\theta = w \cdot k_w \cdot I$$

Unde

w- numărul de spire
 k_w – factorul de bobinaj

Puterea necesară

$$\Delta u \cdot I$$

În curent continuu

$$\Delta u = \dots \cdot I$$

În curent alternativ

$$\Delta u = \sqrt{r^2 + x^2} \cdot I$$

Cuplul electromagnetic

În funcție de rapiditatea mișcării cuplul se poate calcula cu una din relațiile:

$$C = \left. \frac{\partial W_m}{\partial \alpha} \right|_{i=ct.} \quad C = \left. \frac{\partial W_m}{\partial \alpha} \right|_{\Psi=ct.}$$

Transformarea energiei, producere cuplului este posibilă **dacă** energia magnetică depinde de poziția relativă a armăturilor.

Dacă fluxurile sunt produse de curenți, pentru o mașină cu câte o înfășurare pe fiecare armătură :

$$C = \frac{1}{2} \cdot i_1^2 \cdot \frac{dL_1}{d\alpha} + \frac{1}{2} \cdot i_2^2 \cdot \frac{dL_2}{d\alpha} + i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{dM_{12}}{d\alpha}$$

Mașina cu întrefier constant

Fluxul propriu al înfășurării statorice

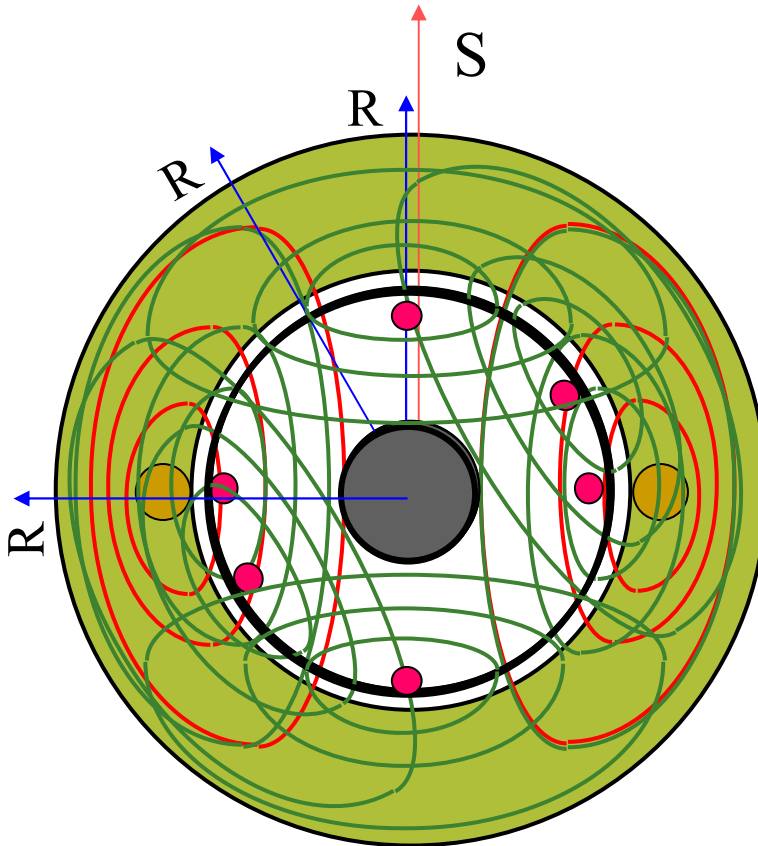
$$\Psi_{11} = L_1 \cdot i_1$$

Fluxul propriu al înfășurării rotorice

$$\Psi_{22} = L_2 \cdot i_2$$

Fluxul de cuplaj

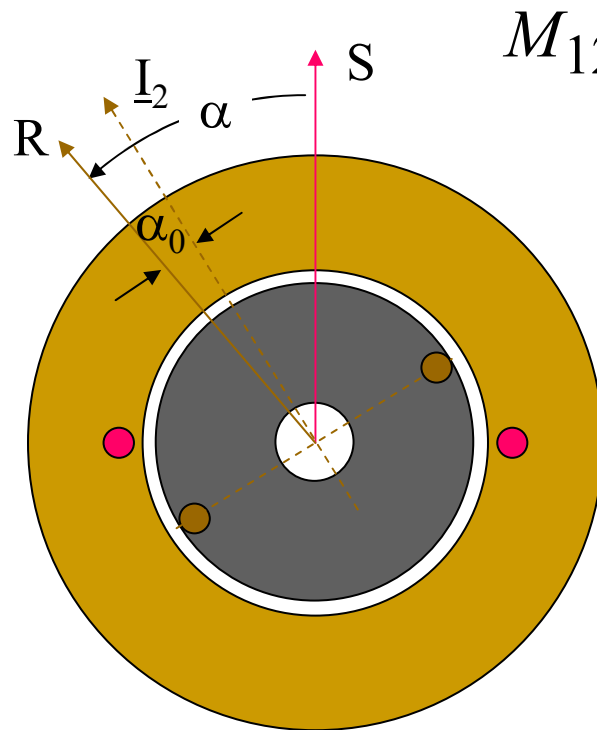
$$\Psi_{12} = M_{12} \cdot i_2$$



Mașina cu întrefier constant

Inductivitățile proprii $L_1 = \text{ct.}$ și $L_2 = \text{ct.}$

Presupunând o distribuție spațială sinusoidală a câmpului magnetic, inductivitatea de cuplaj dintre înfășurări variază cu mișcarea rotorului



$$M_{12} = M_{12m} \cdot \cos \alpha$$

unde

$$\alpha = \omega \cdot t + \alpha_0$$

α_0 este unghiul inițial, poziția rotorului în momentul când curenții coincid.

Cuplul

$$c = -i_1 \cdot i_2 \cdot M_{12m} \cdot \sin \alpha$$

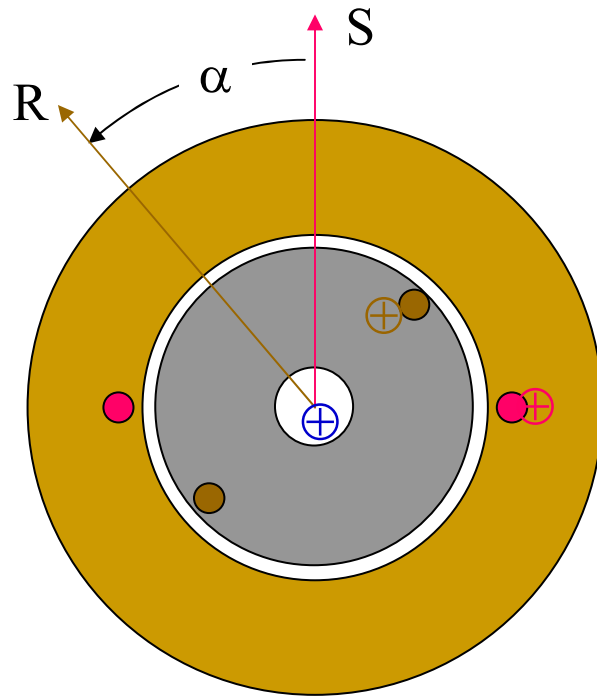
Cuplul electromagnetic mediu

Dacă se consideră solenațiile dirijate după axele armăturilor, atunci cuplul poate fi considerat produsul vectorial

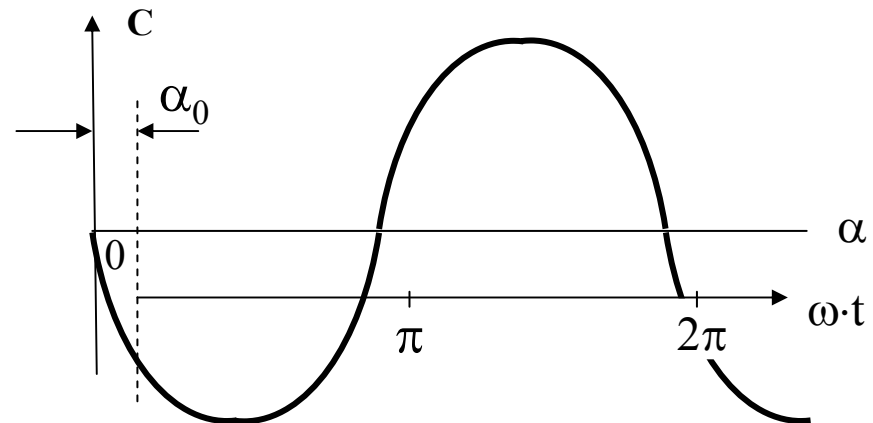
$$\underline{C} = M_{12} \cdot [\underline{i}_2 \times \underline{i}_1]$$

Deci un vector dirijat după axa de rotație

Dacă cei doi curenți sunt constanți



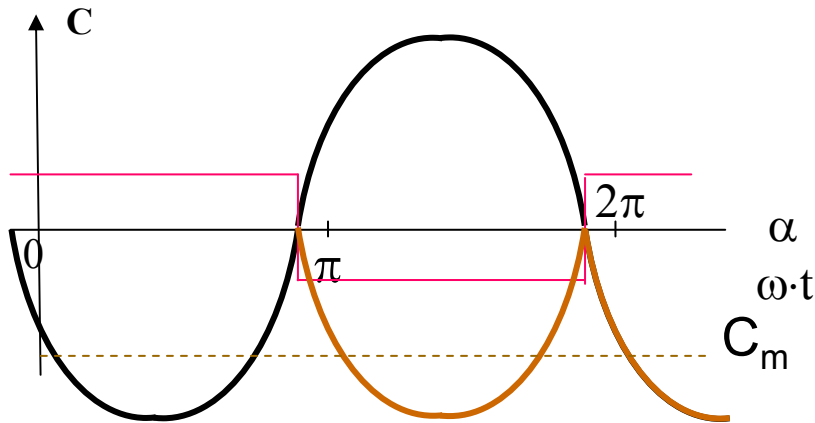
Cuplul mediu este nul.



Pulsația curenților

Cuplul este maxim la $\alpha = \frac{\pi}{2}$ $\omega \cdot t = \frac{\pi}{2} - \alpha_0$

Pentru cuplu mediu diferit de nul este necesar ca după $\alpha = \pi$ să se schimbe sensul curenților la una din înfășurări



Deci unul din curenți trebuie să fie alternativ.

Frecvența curenților alternativ este dată de frecvența de rotație

Dacă curenții din stator este continuu

frecvența curenților din rotor trebuie să fie :

$$\omega_2 = \omega$$

Dacă curenții din rotor este continuu
frecvența curenților din stator trebuie să fie :

$$\omega_1 = \omega$$

Condiția de frecvență

Valoarea medie a cuplului

$$C = -I_1 \cdot I_2 \cdot M_{12m} \cdot \sin \alpha_0$$

În cazul mașinilor cu mișcare și

$$\sin \alpha_0 \neq 0$$

Prin generalizarea relațiilor

$$\pm \omega_1 \pm \omega_2 = \pm \omega$$

Relația reprezintă formularea matematică a **condiției de frecvență** pentru transformarea energiei.

La mașini fără mișcare

$$\omega = 0$$

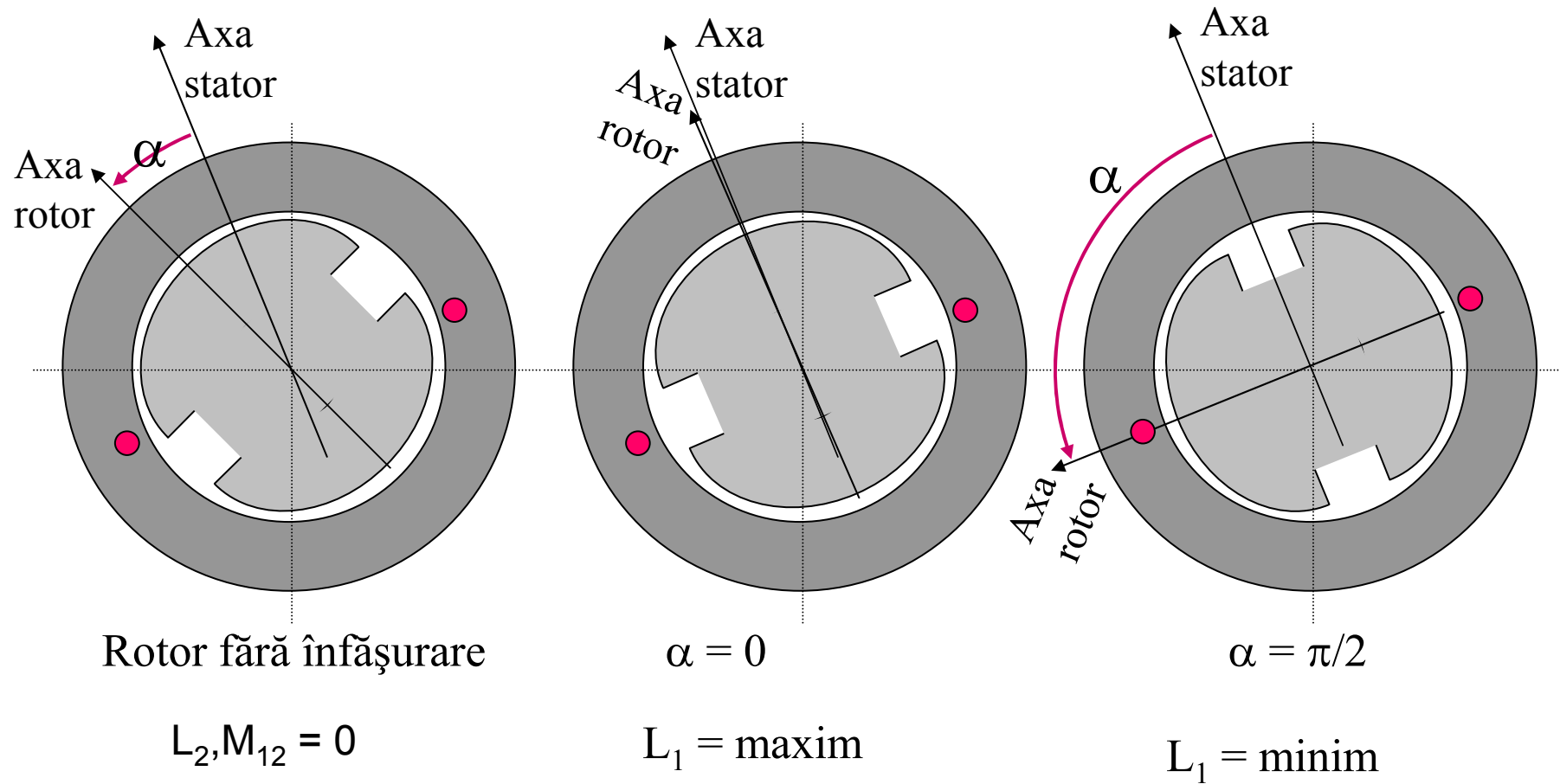
$$\omega_1 = \omega_2$$

transformator

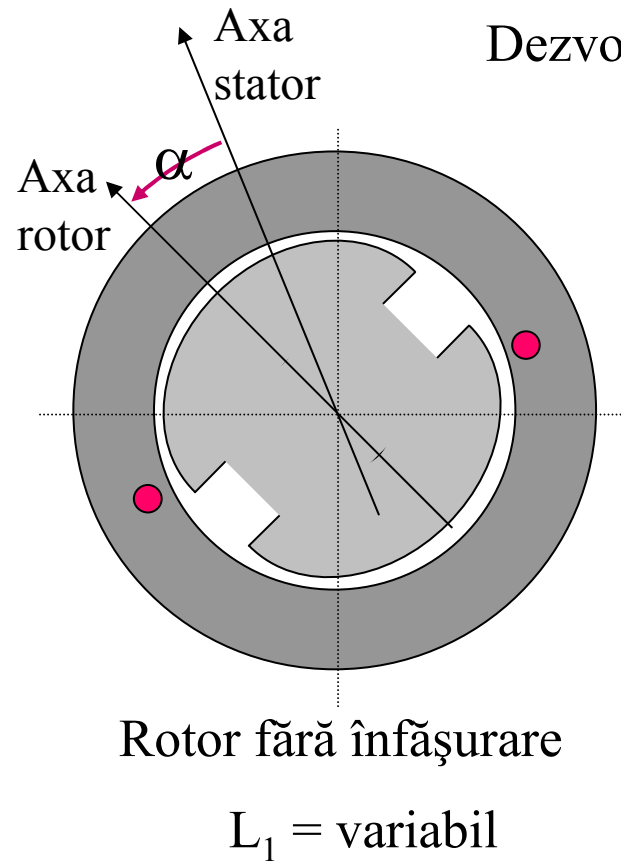
La mașini cu mișcare

$$\pm \omega_1 \pm \omega_2 = \pm \omega$$

Mașina cu întrefier variabil

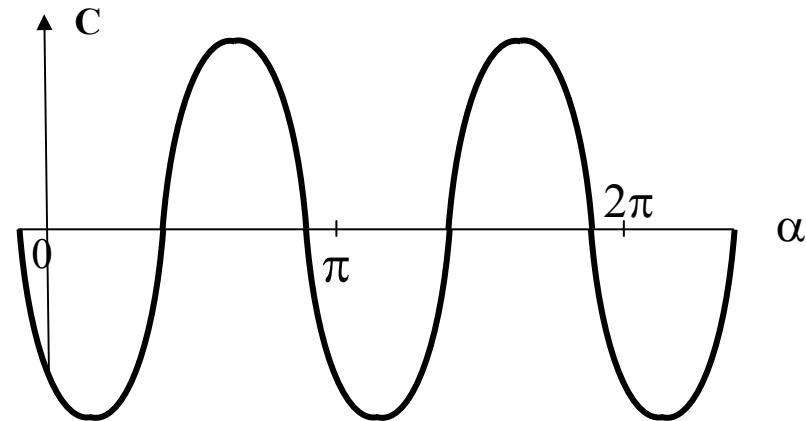


Cuplul de reluctanță



$$L_1(\alpha) = L_0 + \Delta L \cdot \cos(2 \cdot \alpha) + \dots$$

cuplul $c = -\frac{I_1^2 \cdot \Delta L}{4} \sin(2 \cdot \alpha)$



Cuplu de reluctanță

Nu este suficientă schimbarea polarității curentului

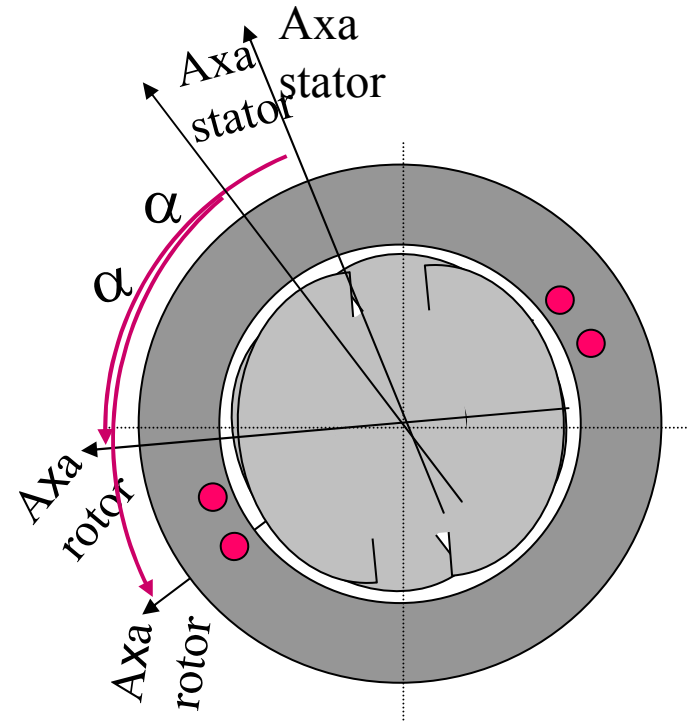
Cuplul de reluctanță

$$c = -\frac{I_1^2 \cdot \Delta L}{4} \sin(2 \cdot \alpha)$$

$$0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$$

$$\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$$

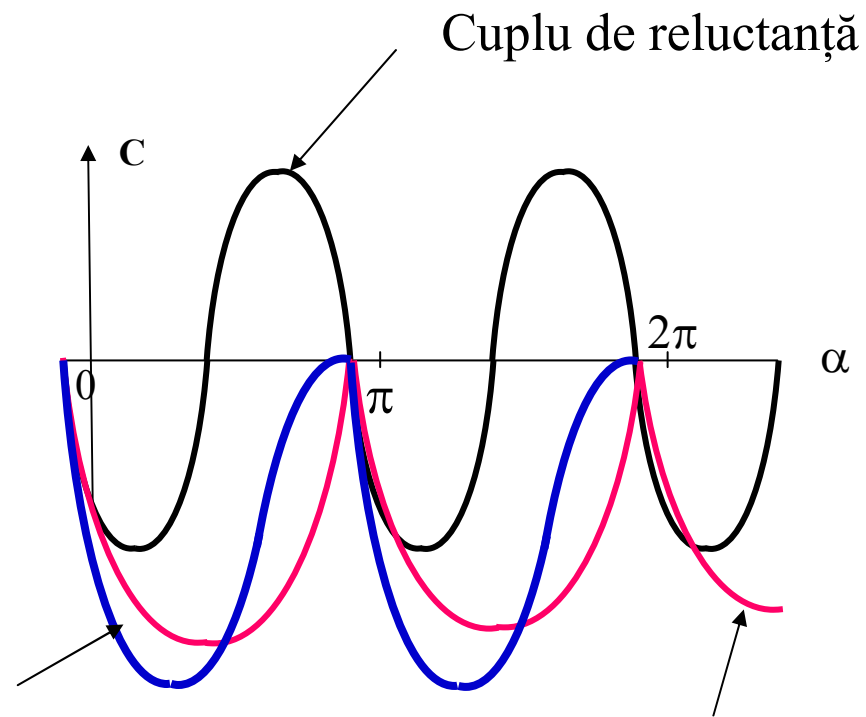
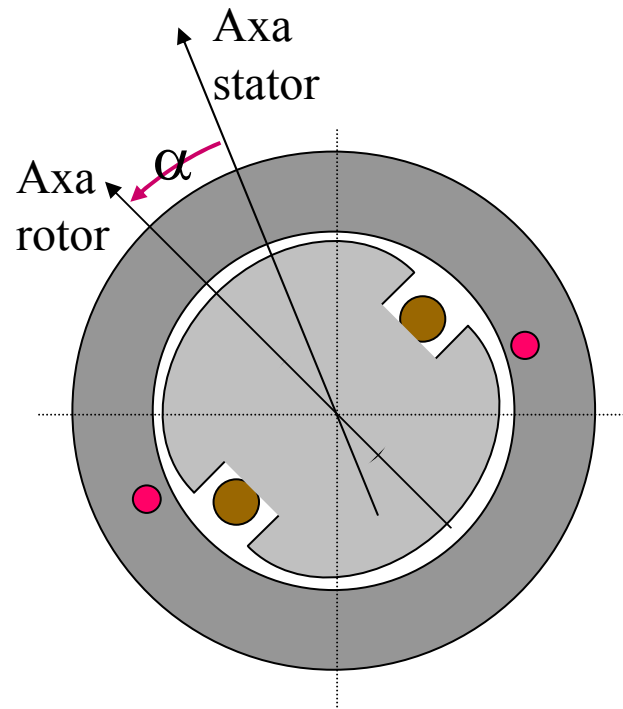
Câmpul statoric trebuie să se rotească



Deci trebuie să existe cel puțin două faze și frecvența curentului statoric egal cu frecvența de rotație.

$$\omega_1 = \omega$$

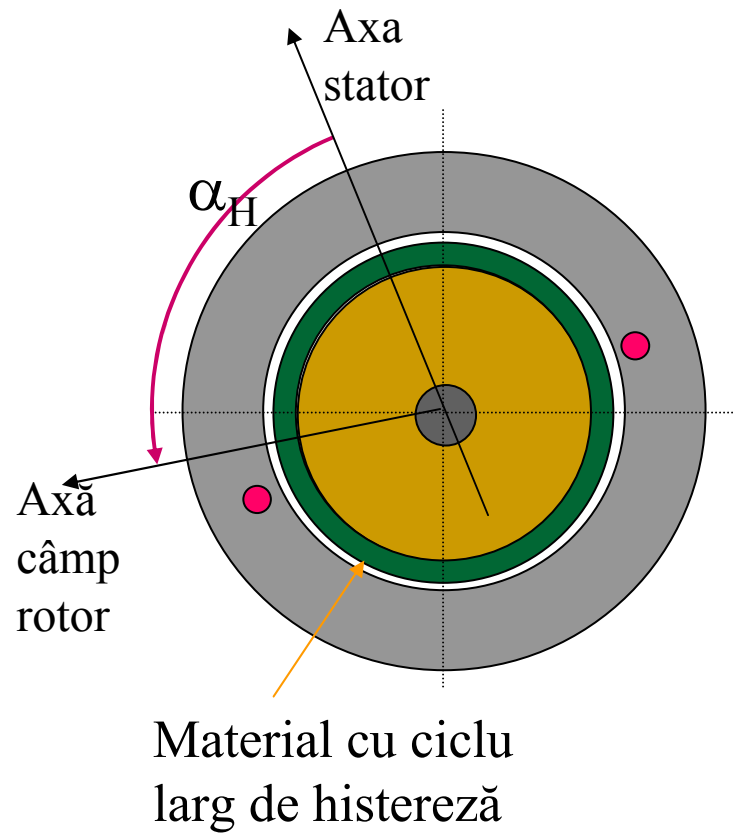
Cuplul rezultat



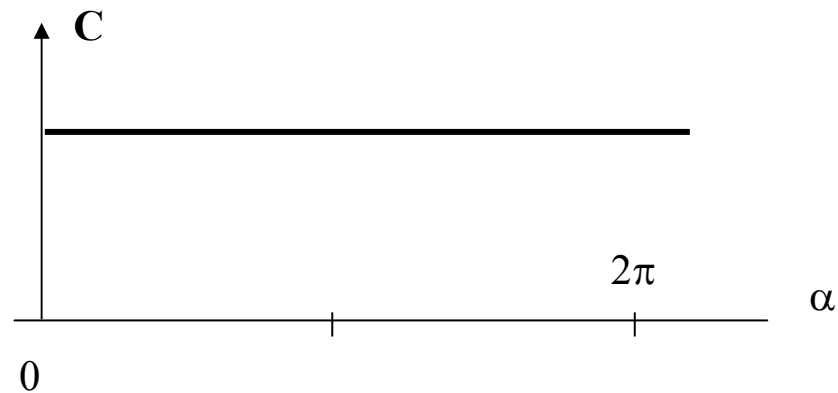
Cuplul rezultat

Cuplu electromagnetic

Cuplul de histerezis



$$c = -k \cdot B_1 \cdot H_2 \cdot \sin(\alpha_H)$$



Câmpul statoric trebuie să se rotească

Cuplul

Cuplul electromagnetic: rezultatul interacțiunii a două câmpuri magnetice, produse de curenți de frecvență diferite

$$\pm \omega_1 \pm \omega_2 = \pm \omega \quad C = -I_1 \cdot I_2 \cdot M_{12m} \cdot \sin \alpha_0$$

Cuplul de reluctanță: rezultatul deformării de către circuitul magnetic nesimetric rotorice a câmpului magnetic statoric

$$\omega_1 = \omega \quad c = -\frac{I_1^2 \cdot \Delta L}{4} \sin(2 \cdot \alpha)$$

Câmpul statoric trebuie să se rotească

Cuplul de histerezis: rezultatul defazării, de către materialul rotorice al câmpului rotorice față de solenația statorică

$$\omega_1 = \omega \quad c = -k \cdot B_1 \cdot H_2 \cdot \sin(\alpha_H)$$

Câmpul statoric trebuie să se rotească

Cuplul

Dacă se consideră solenațiile dirijate după axele armăturilor, atunci cuplul poate fi considerat **produsul vectorial**

$$\underline{C} = M_{12} \cdot [\underline{i}_2 \times \underline{i}_1]$$

Deci un vector dirijat după axa de rotație

Notând: $\underline{\psi}_{21} = M_{21} \cdot \underline{i}_1$ Fluxul produs **în rotor** de **curentul statoric**

$\underline{\psi}_{12} = M_{12} \cdot \underline{i}_2$ Fluxul produs **în stator** de **curentul rotoric**

$$\underline{C} = k_c \cdot M_{12} \cdot [\underline{i}_2 \times \underline{i}_1] = k_c [\underline{i}_2 \times \underline{\Psi}_{21}] = k_c [\underline{\Psi}_{12} \times \underline{i}_1]$$