

---

# Mașini sincrone speciale

---

Utilizarea magneților permanenți

Mașina sincronă cu magneți permanenți

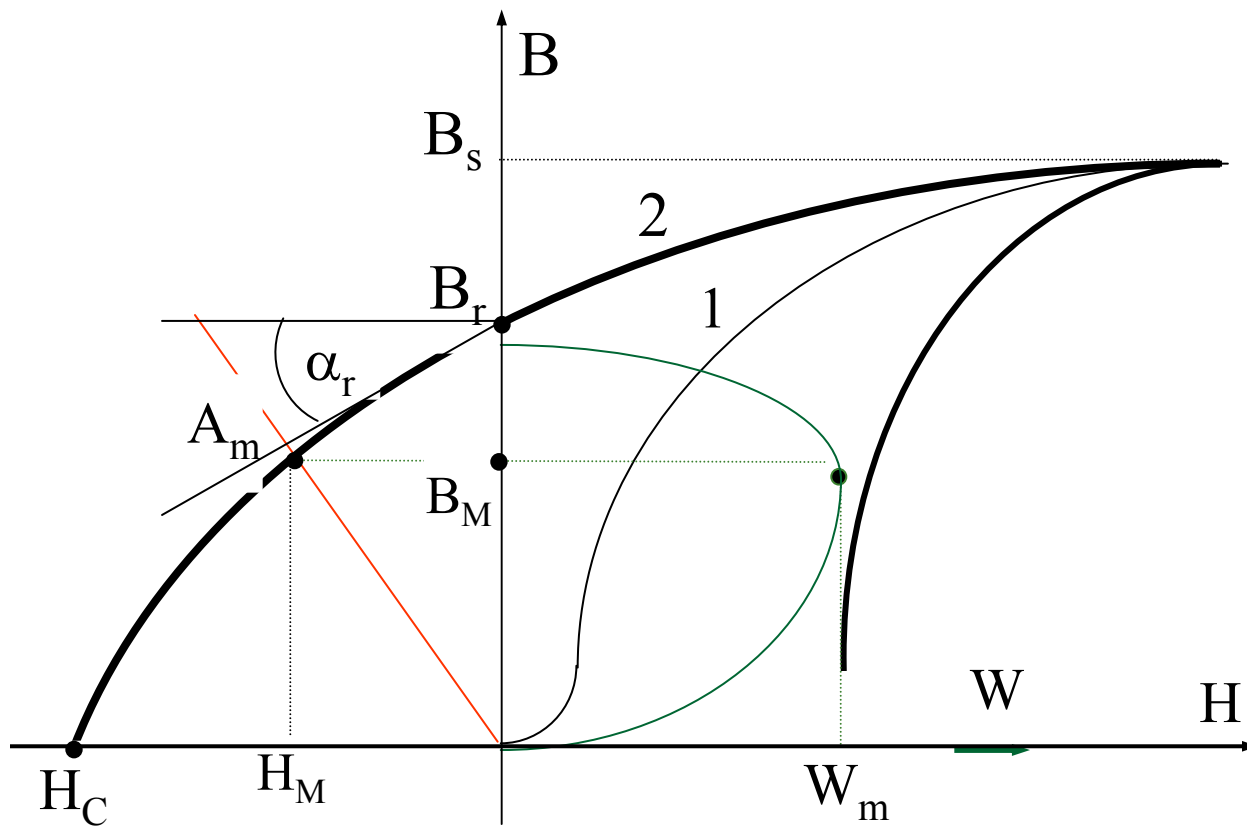
---

# Utilizarea magneților permanenți în construcția mașinilor electrice

---

Generalități

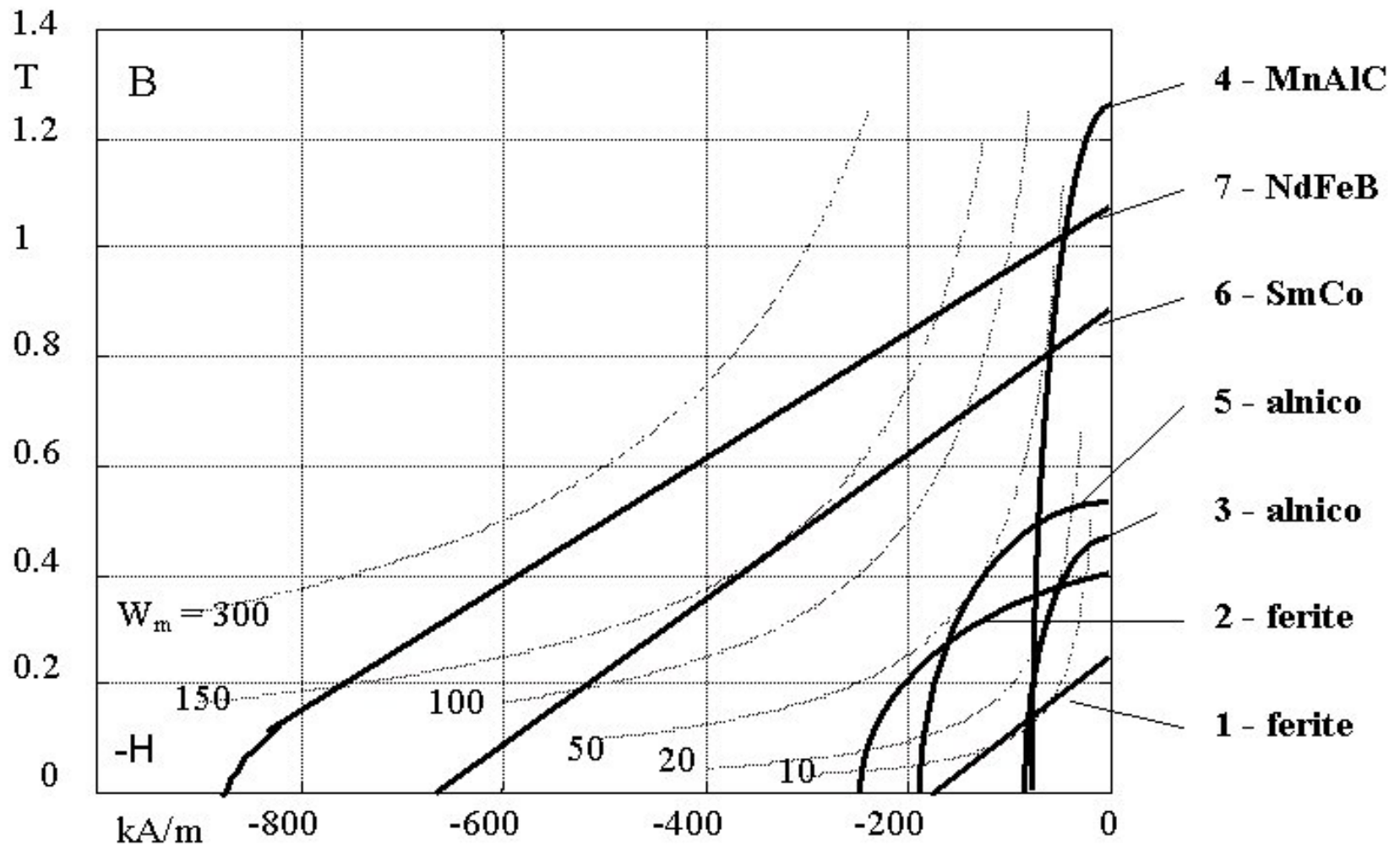
# Proprietățile magneților permanenți



Caracteristica de magnetizare.

$$B_M = B_r + \mu_0 \mu_M H_M$$

# Proprietățile magnetelor permanente



# Caracteristicile magneților

$\mu_r$  – permeabilitatea relativă de revenire

$K_{TB}$  – coeficientul de variație a inducției

$K_{TH}$  – coeficientul de variație a câmpului

|                                       | ferite | alnico | Mn-Al-C | Sm-Co  | Nd-Fe-B |
|---------------------------------------|--------|--------|---------|--------|---------|
| $\mu_r$                               | 1,1    | 1,6    | 1,9     | 1,05   | 1,1     |
| $K_{TB} \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ | - 0,19 | - 0,02 | - 0,03  | - 0,03 | - 0,11  |
| $K_{TH} \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ | - 0,20 | - 0,20 | - 0,20  | - 0,20 | - 0,60  |
| $W_m \text{ KJ/m}^3$                  | 20÷30  | 10÷70  | 50      | 160    | 250     |

$W_m$  – energia specifică maximă

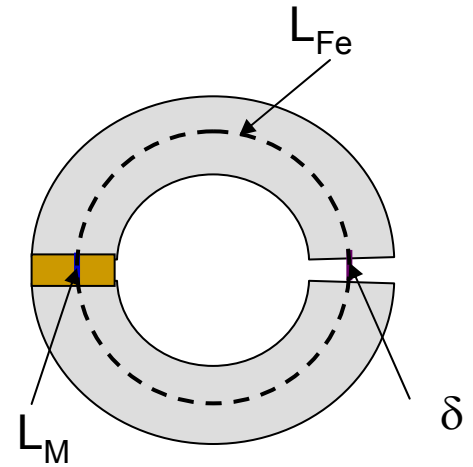
# Magnetul permanent într-un circuit magnetic

legea circuitului magnetic

$$H_M \cdot l_M + H_{Fe} \cdot l_{Fe} + H_\delta \cdot l_\delta = 0$$

expresia coeficientului de saturatie:

$$K_s = 1 + \frac{H_{Fe} \cdot l_{Fe}}{H_\delta \cdot l_\delta}$$



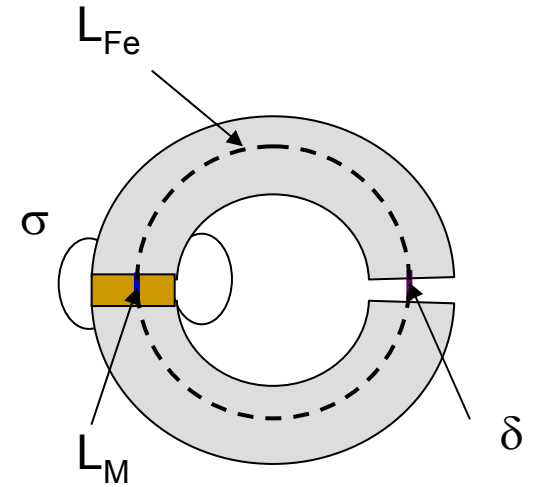
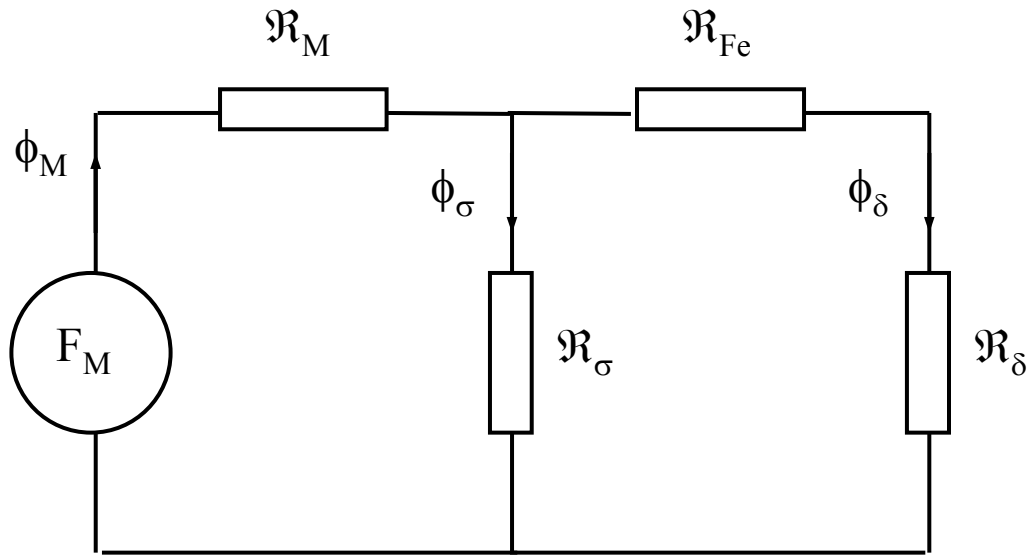
legea fluxului magnetic

$$B_M \cdot A_M = B_\delta \cdot A_\delta \cdot K_\sigma$$

legatura dintre câmpul si intensitatea câmpului magnetic

$$B_M = - \frac{K_\sigma}{K_s} K_\lambda \cdot \mu_o \cdot H_M$$

# Magnetul permanent într-un circuit magnetic



Schema echivalentă a circuitului magnetic

# Magnetul permanent într-un circuit magnetic

*coeficientul de permeanță al circuitului magnetic*

$$K_\lambda = \frac{\Lambda_\delta}{\Lambda_m} = \frac{A_\delta \cdot L_M}{A_M \cdot L_\delta}$$

legătura dintre câmpul și intensitatea câmpului magnetic

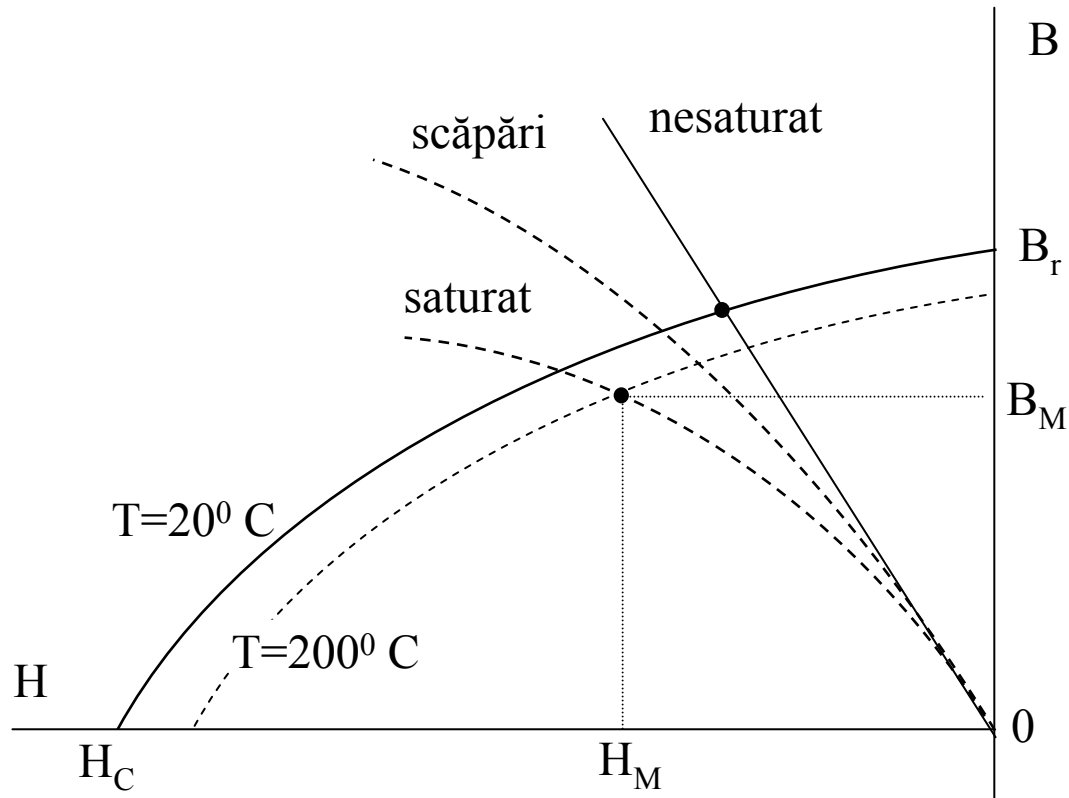
$$H_M = - \frac{B_r}{\mu_0} \frac{1}{\mu_M + \frac{K_\sigma}{K_s} K_\lambda} = - \frac{B_r}{\mu_0} \frac{K_s}{K_\sigma \cdot K_\lambda \cdot K_\delta}$$

$$B_M = B_r \frac{1}{1 + \frac{K_s \cdot \mu_M}{K_\sigma \cdot K_\lambda}} = \frac{B_r}{K_\delta}$$

$K_\delta$  este coeficientul de demagnetizare al circuitului



# Magnetul permanent într-un circuit magnetic



*Explicativă la punctul de funcționare al magnetului*

# Magnetul permanent într-un circuit magnetic

inducția magnetică în întrefier

$$B_{\delta} = B_r \frac{K_{\lambda} \cdot K_{\sigma}}{K_{\delta}} \cdot \frac{l_M}{l_{\delta}}$$

Densitatea energiei înmagazinate în magnet în punctul de funcționare va fi:

$$W_M = \frac{1}{2} B_M \cdot H_M = \frac{B_r^2}{2 \cdot \mu_0} \frac{K_s}{K_{\sigma} \cdot K_{\lambda} \cdot K_{\delta}^2}$$

# Stabilizarea punctului de funcționare al magnetului

legea circuitului magnetic în cazul solenației de demagnetizare

$$H_M \cdot l_M + H_{Fe} \cdot l_{Fe} + H_\delta \cdot l_\delta = F_d$$

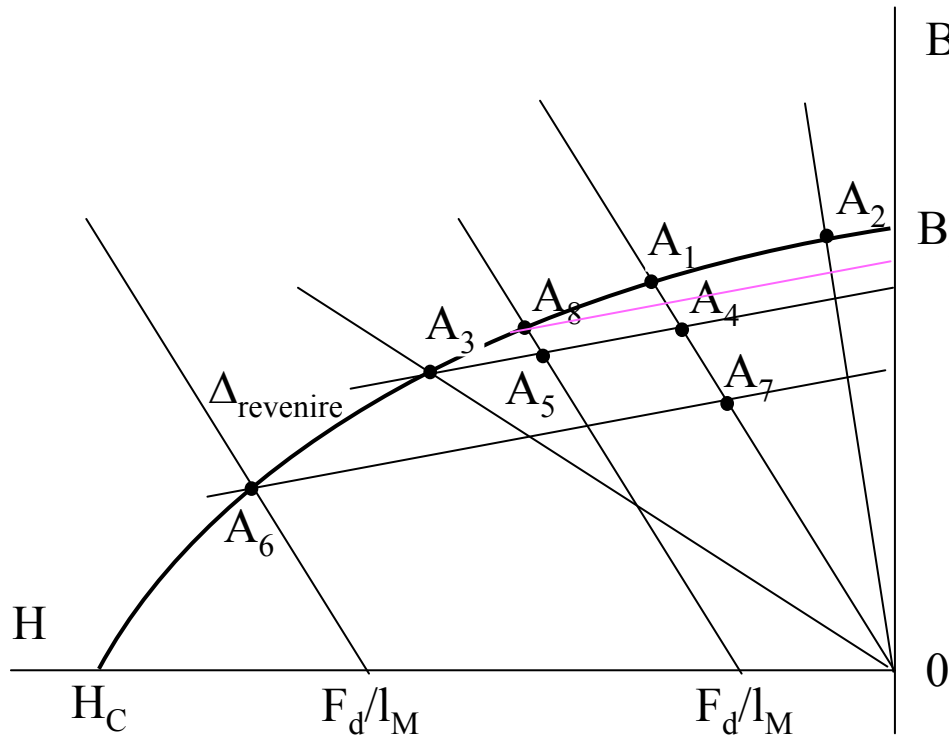
expresia caracteristicii de funcționare a circuitului magnetic

$$H_M = - \frac{F_d}{l_M} - \frac{B_M}{\mu_0 K_\lambda}$$

În cazul lipsei solenației de demagnetizare

$$B_M = - \frac{K_\sigma}{K_s} K_\lambda \cdot \mu_0 \cdot H_M$$

# Stabilirea punctului de funcționare al magnetului



Magnetizat separat

$A_2 \rightarrow A_3 \rightarrow A_4 \rightarrow A_5$

Magnetizat în mașină

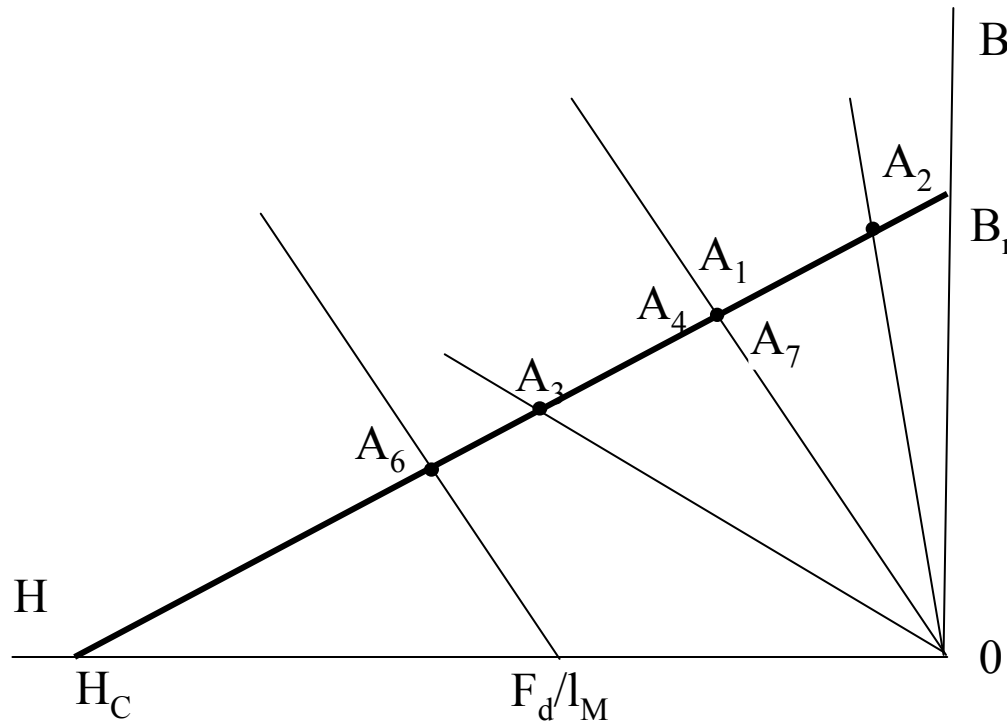
$A_1 \rightarrow A_8 \rightarrow (A_1 \ A_4)$

Solenitație externă mare

$A_6 \rightarrow A_7$

Magnetul cu caracteristica de demagnetizare neliniară

# Stabilirea punctului de funcționare al magnetului



Magnetizat separat

$$A_2 \rightarrow A_3 \rightarrow A_4$$

Magnetizat în mașină

$$A_1 \rightarrow (A_1 A_4) \rightarrow A_3$$

Solenitație externă mare

$$A_6 \rightarrow A_7$$

Magnetul cu caracteristica de demagnetizare liniară

---

# Mașini sincrone cu magneti permanenți

---

## Variante constructive, funcționare

**Dezavantajele** mașinii sincrone în construcție clasică, cu excitație electromagnetică, :

- prezența sistemului perii – inele colectoare pentru alimentarea excitației și
- necesitatea unei surse de curent continuu care poate fi o mașină de curent continuu sau un redresor comandat.

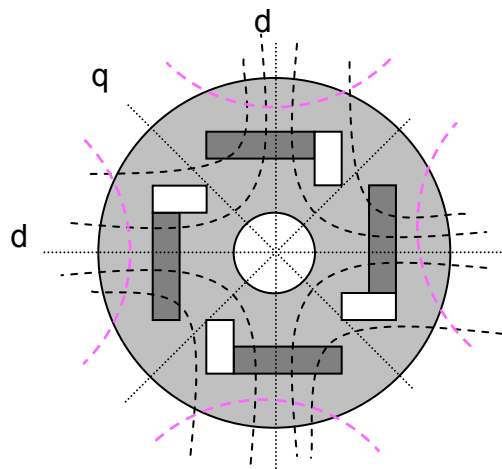
**Solutia** la puteri mici si medii: folosirea magnetilor permanenti.

**O variantă clasică:**

- statorul în construcție normală, adică miez din tole cu creștături și înfășurare repartizată.
- rotor excitația electromagnetică este înlocuită cu excitație cu magneți permanenți, existând diferite soluții constructive,

# Variante constructive, funcționare

## Rotor cilindric din tole, cu magneți permanenți îngropați

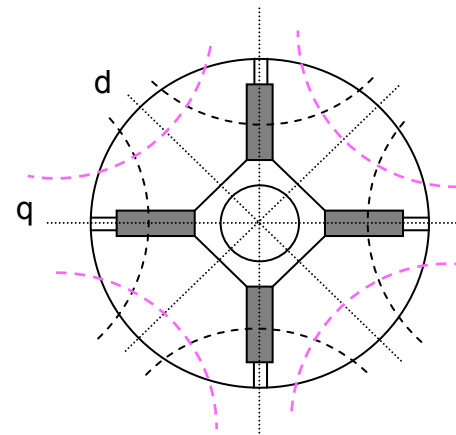


Se adună solenațiile

$H_c$  mic;  $B_r$  mare

Magnetizat paralel

$$X_d < X_q$$

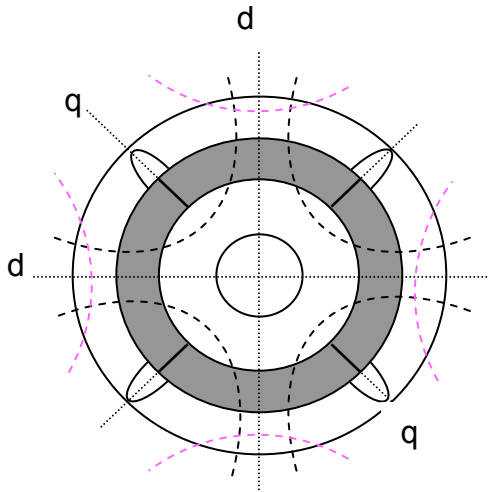


Concentrare de flux

$H_c$  mare;  $B_r$  mic

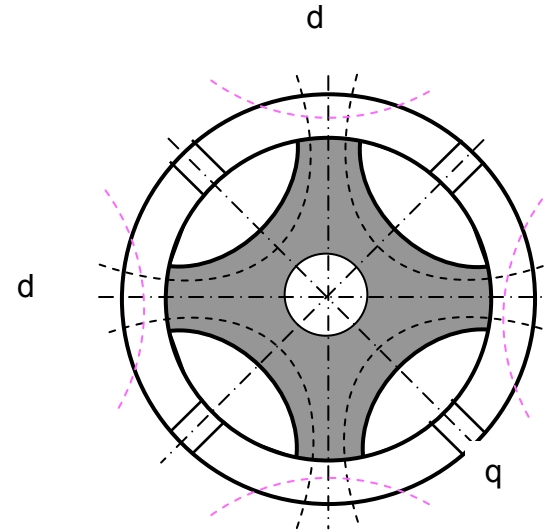


# Variante constructive, funcționare



Magnetizare radială

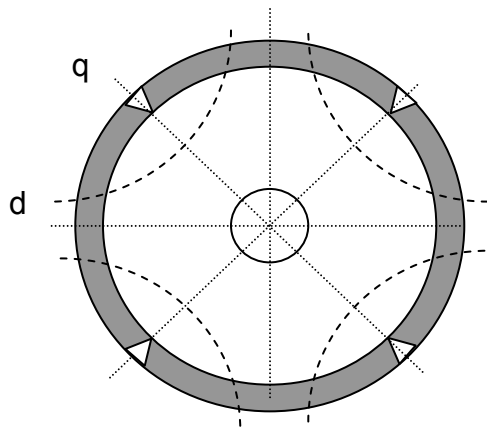
$$X_d < X_q$$



Magneți permanenți turnați

# Variante constructive, funcționare

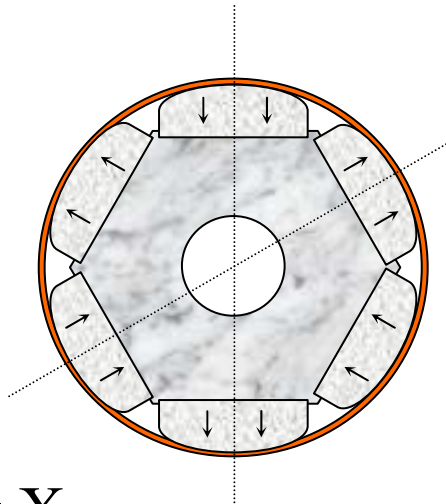
a. Rotor cilindric din tole, cu magneți permanenți dispuși în întrefier la suprafața miezului



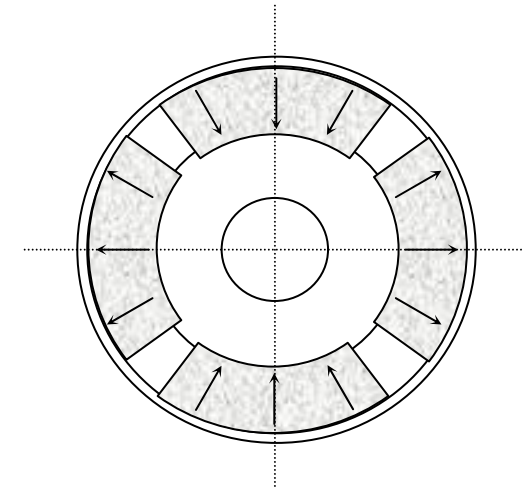
Rotor masiv

Întrefier uniform

Magnetizare radială



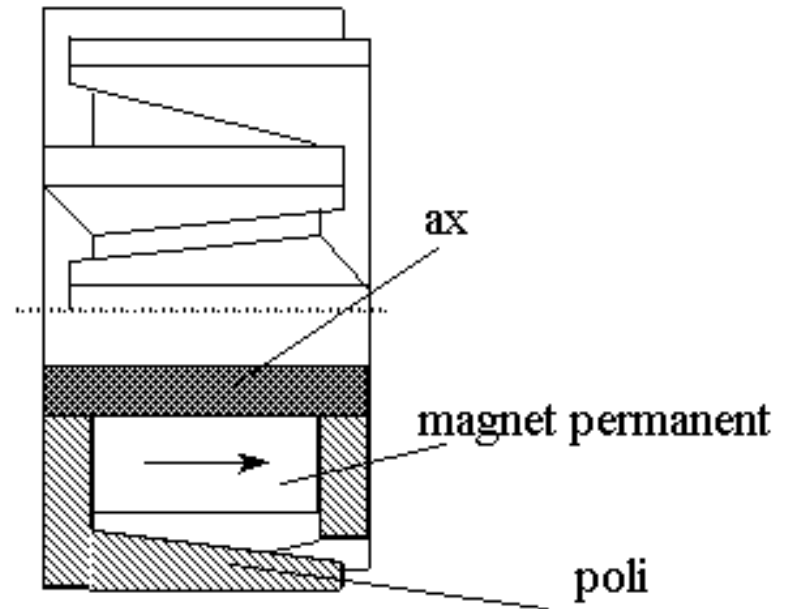
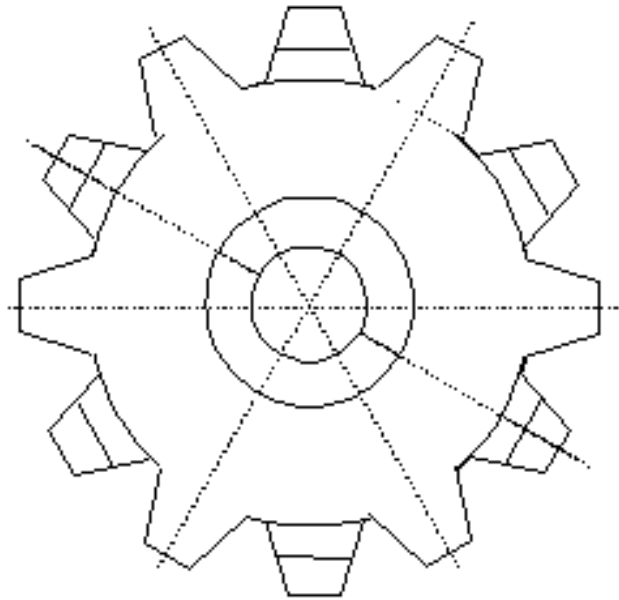
$$X_d = X_q$$



Magnetizare paralelă

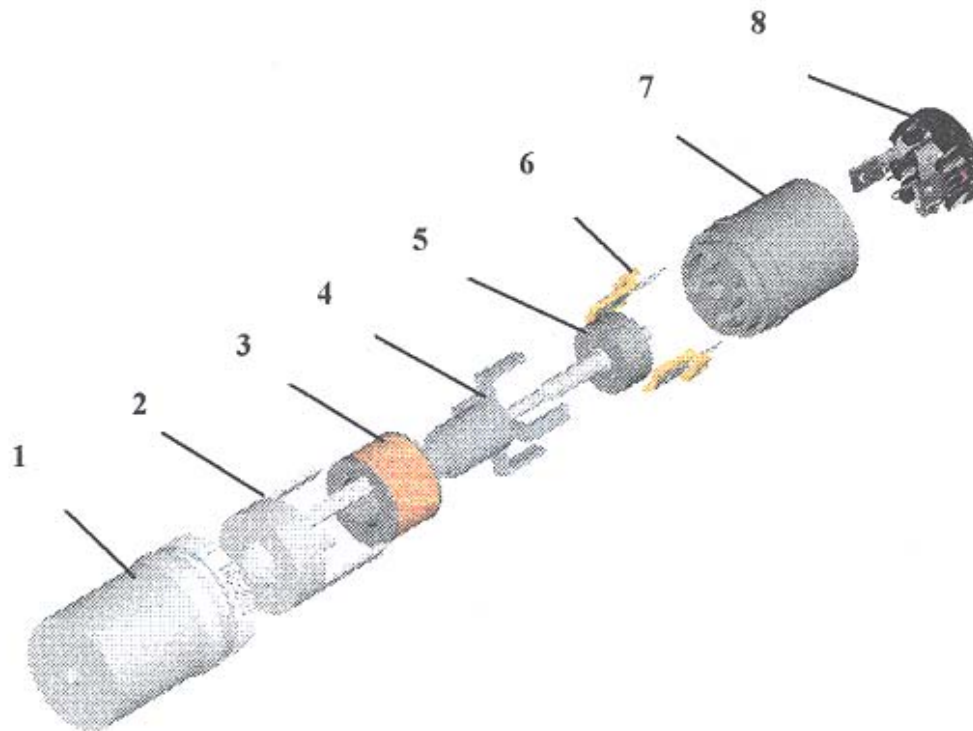
$H_c$  mare

## Variante constructive, funcționare



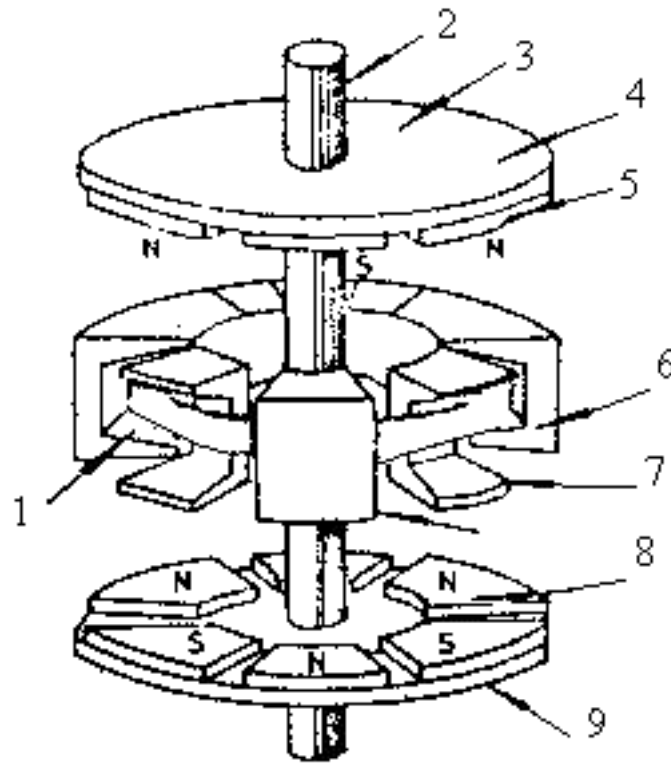
Rotor cu poli gheară, cu magnetul permanent interior

## Variante constructive, funcționare



Motor sincron cu magnet permanent și armătură statorică nesimetrică cu poli gheară: 1, 7 – carcasa motorului, cu lagăre; 2, 4 – polii gheară; 3 – bobina statorică homopolară; 5 – axul și inelul rotoric cu magnet permanent; 6 – senzori Hall; 8 – dispozitiv de alimentare și control

## Variante constructive, funcționare



Motor cu rotor disc dublu și stator cu poli gheară;

1 – înfășurare indusă,

2 – ax rotoric,

3, 9 – rotor,

4 – suport de fier,

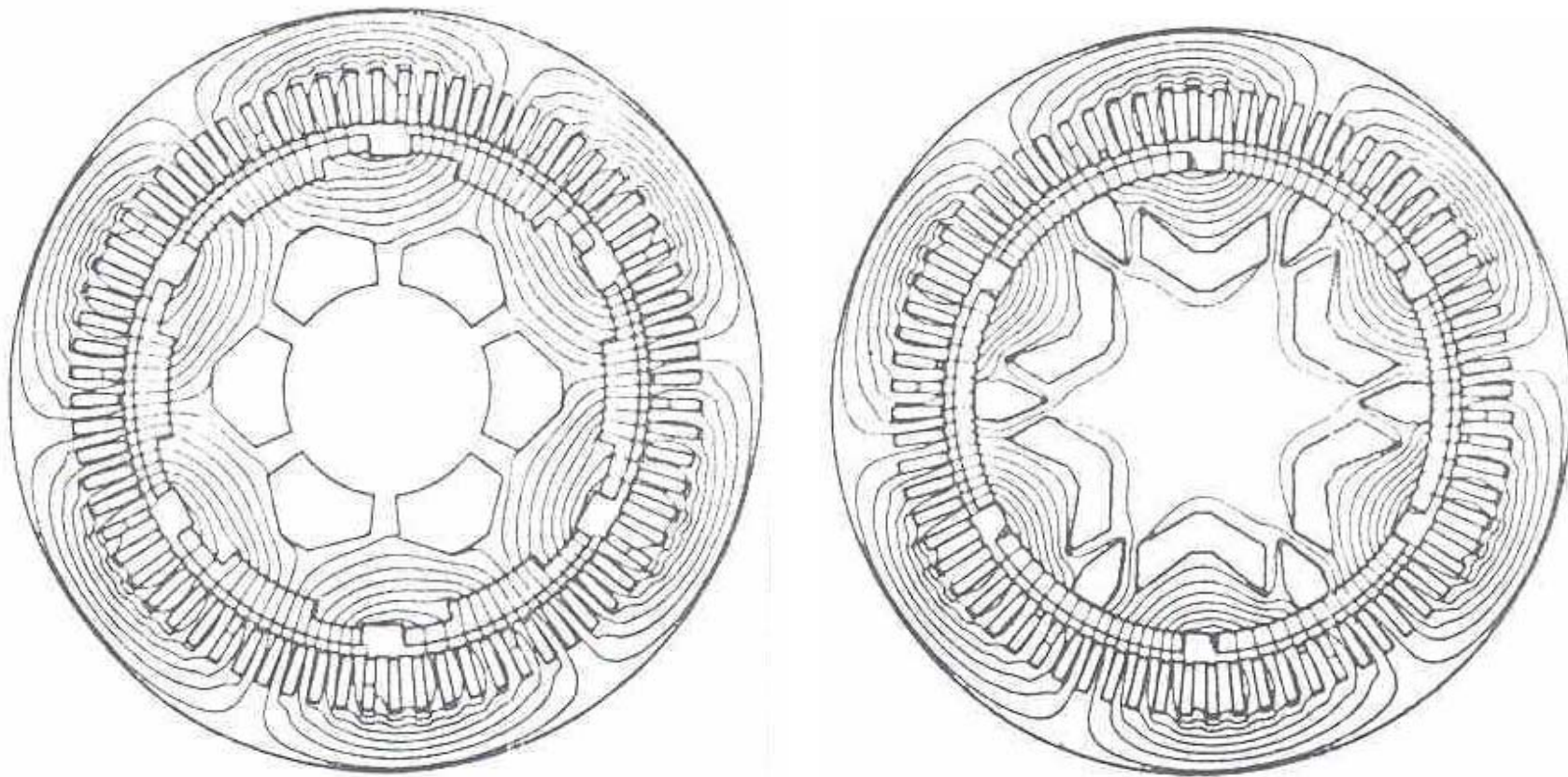
5 – magneți (magnetizați vertical),

6 – gheară exterioară,

7 – gheară interioară,

8 - magneți.

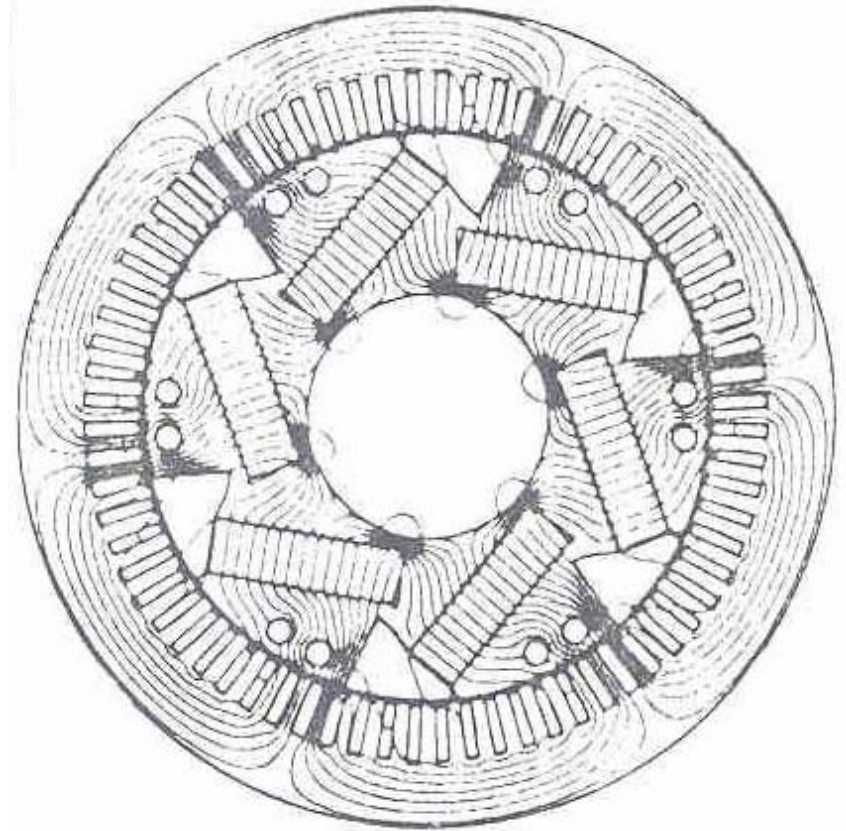
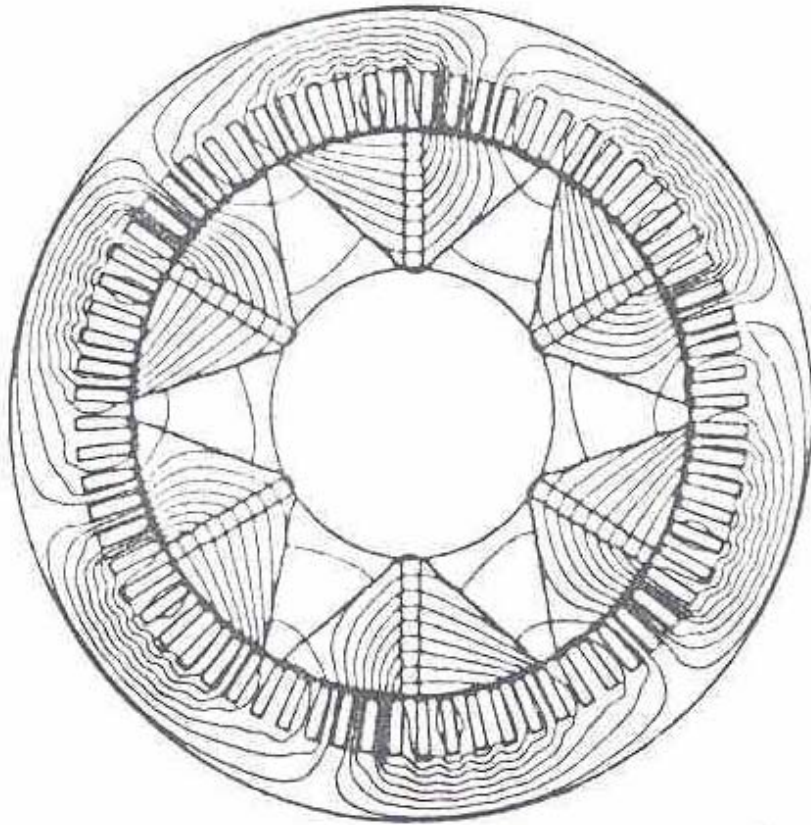
# Câmpul magnetic



Magneți permanenți dispuși în întrefier la suprafața miezului.

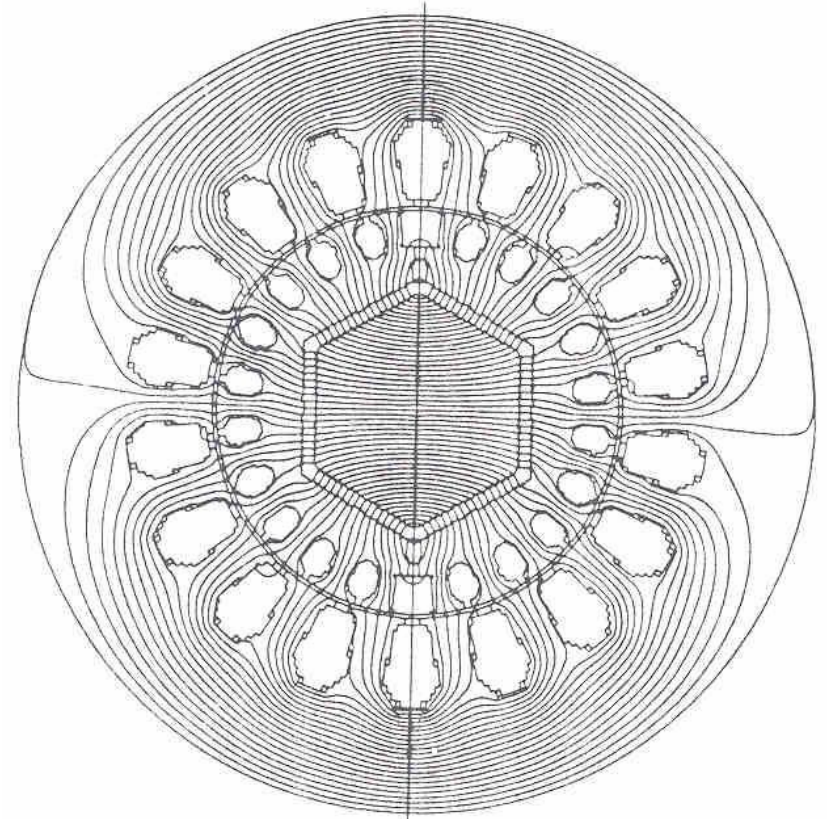
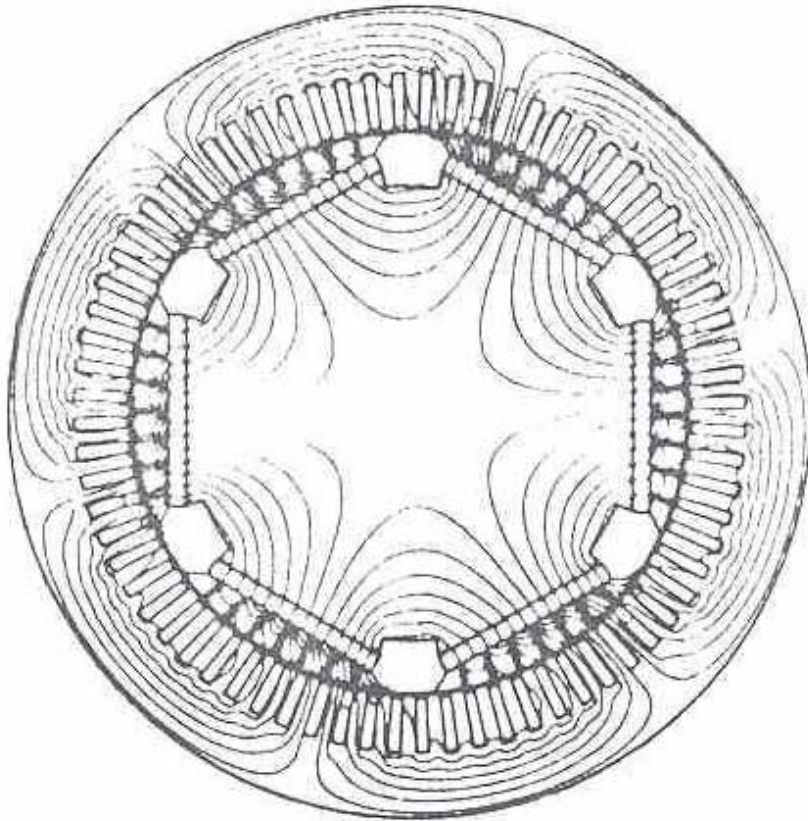


# Câmpul magnetic



Magneți permanenți îngropați.

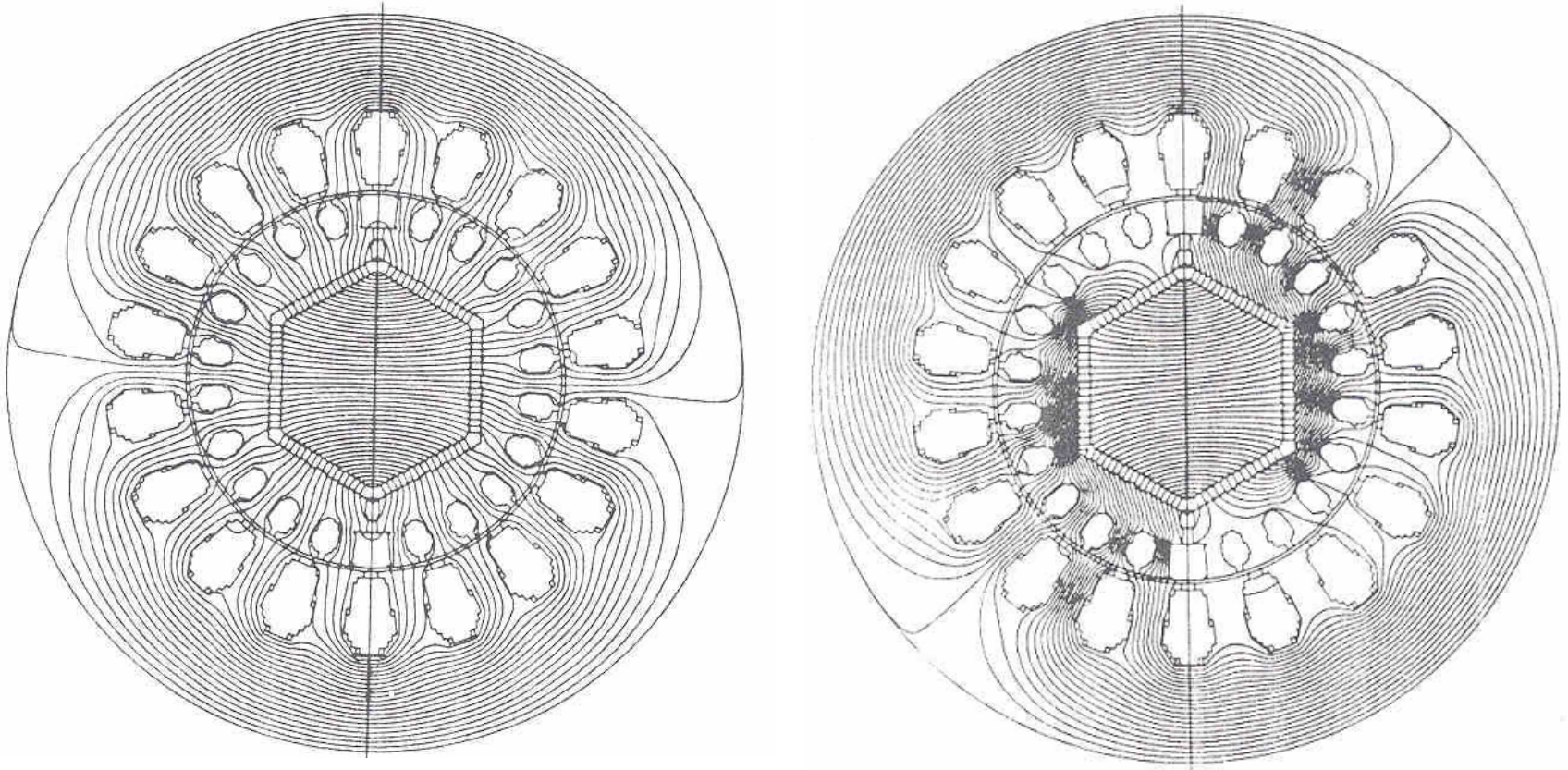
# Câmpul magnetic



Magneți permanenți îngropați.

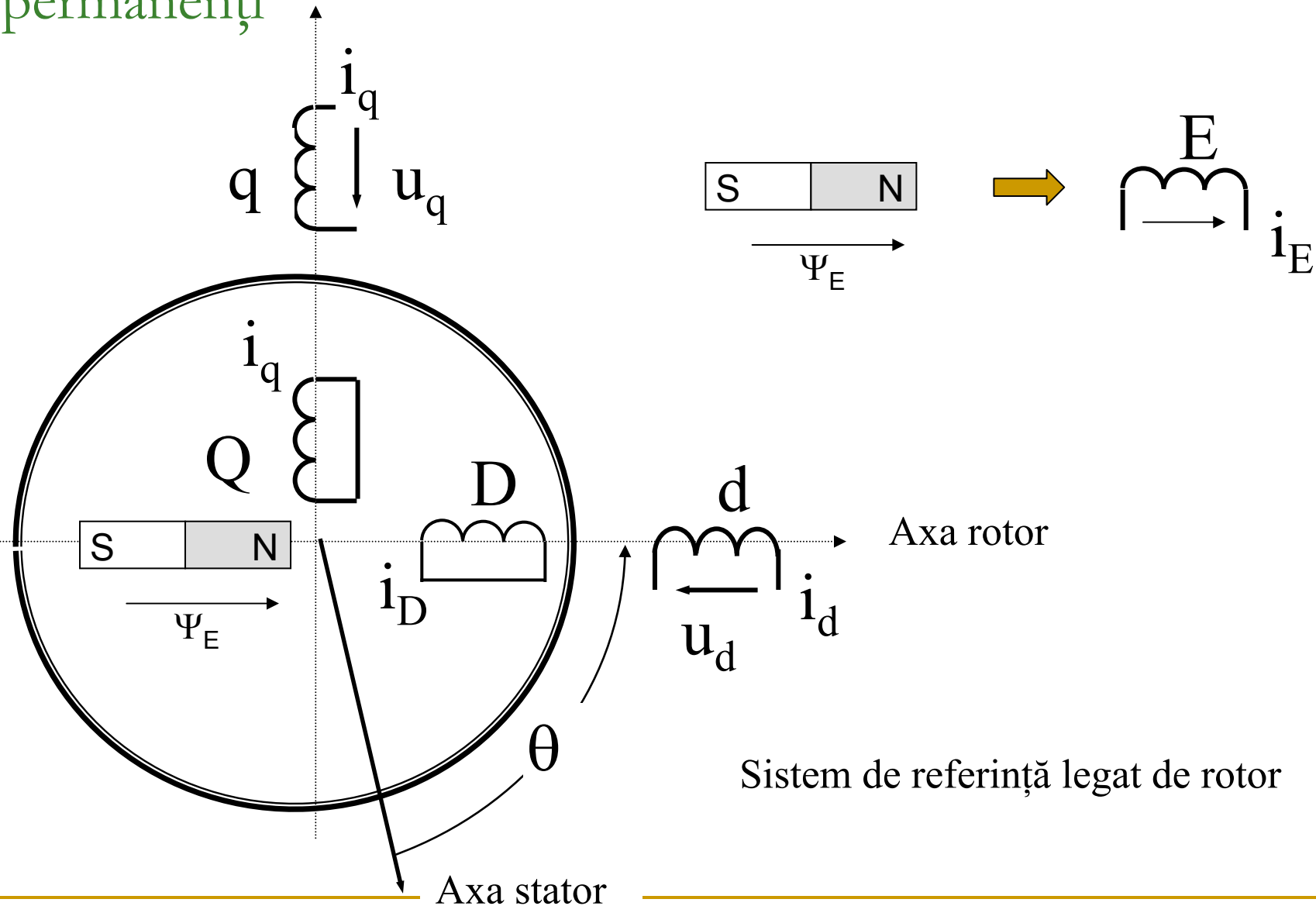


# Câmpul magnetic



Modificarea câmpului magnetic în sarcină

# Modelul matematic al mașinii sincrone cu magneți permanenți



# Modelul matematic

Ecuțiile de tensiune

$$u_d = R_S i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \Psi_q \qquad 0 = R_D i_D + \frac{d\Psi_D}{dt}$$

$$u_q = R_S i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega \Psi_d \qquad 0 = R_Q i_Q + \frac{d\Psi_Q}{dt}$$

Expresiile fluxurilor

$$\Psi_d = L_{s\sigma} i_d + \Psi_{dm};$$

$$\Psi_q = L_{s\sigma} i_q + \Psi_{qm}$$

$$\Psi_D = L_{D\sigma} i_D + \Psi_{dm};$$

$$\Psi_Q = L_{Q\sigma} i_Q + \Psi_{qm}$$

Fluxul de magnetizare

$$\Psi_{dm} = M_d (i_d + i_D) + \Psi_E; \qquad \Psi_{qm} = M_q (i_q + i_Q)$$

Ecuția de mișcare

$$p(\Psi_d \cdot i_q - \Psi_q \cdot i_d) = \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} + T_{rez}$$

## Modelul matematic

Dacă motoarele sincrone cu excitație cu magneți permanenți funcționează alimentate de la convertoare electronice, atunci **nu sunt prevăzute cu colivie rotorică.**

În această situație modelul matematic al mașinii este caracterizat de ecuațiile:

$$\begin{aligned}u_d &= R_S i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \Psi_q & 0 &= R_D i_D + \frac{d\Psi_D}{dt} & L_d &= L_{S\sigma} + M_d \\u_q &= R_S i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega \Psi_d & 0 &= R_Q i_Q + \frac{d\Psi_Q}{dt} & L_q &= L_{S\sigma} + M_q \\ \Psi_d &= L_d i_d + \Psi_E + M_d i_D \\ \Psi_q &= L_q i_q + M_q i_Q\end{aligned}$$

Cuplul  $T = p [i_q \Psi_E + (M_d - M_q) i_q i_d]$

## Modelul matematic

**În regim staționar**,  $\omega = \omega_S$ ,

- dacă inductivitățile sincrone  $L_d$ ,  $L_q$  nu depind de curent și
- fluxurile sunt constante

$$\omega_S L \Rightarrow X$$

Din ecuațiile de tensiune

$$u_d = R_S i_d - X_q i_q$$

$$u_q = R_S i_q + X_d i_d + \omega_S \Psi_E$$

Folosind notațiile

$$X_d = \omega_S L_d, X_q = \omega_S L_q$$

$$\underline{\Psi}_S = \Psi_d + j\Psi_q$$

Rezultă:

$$\underline{u}_S = R_S \underline{i}_S + jX_d i_d - X_q i_q + j\omega_S \Psi_E \quad \text{Ecuația de tensiune}$$

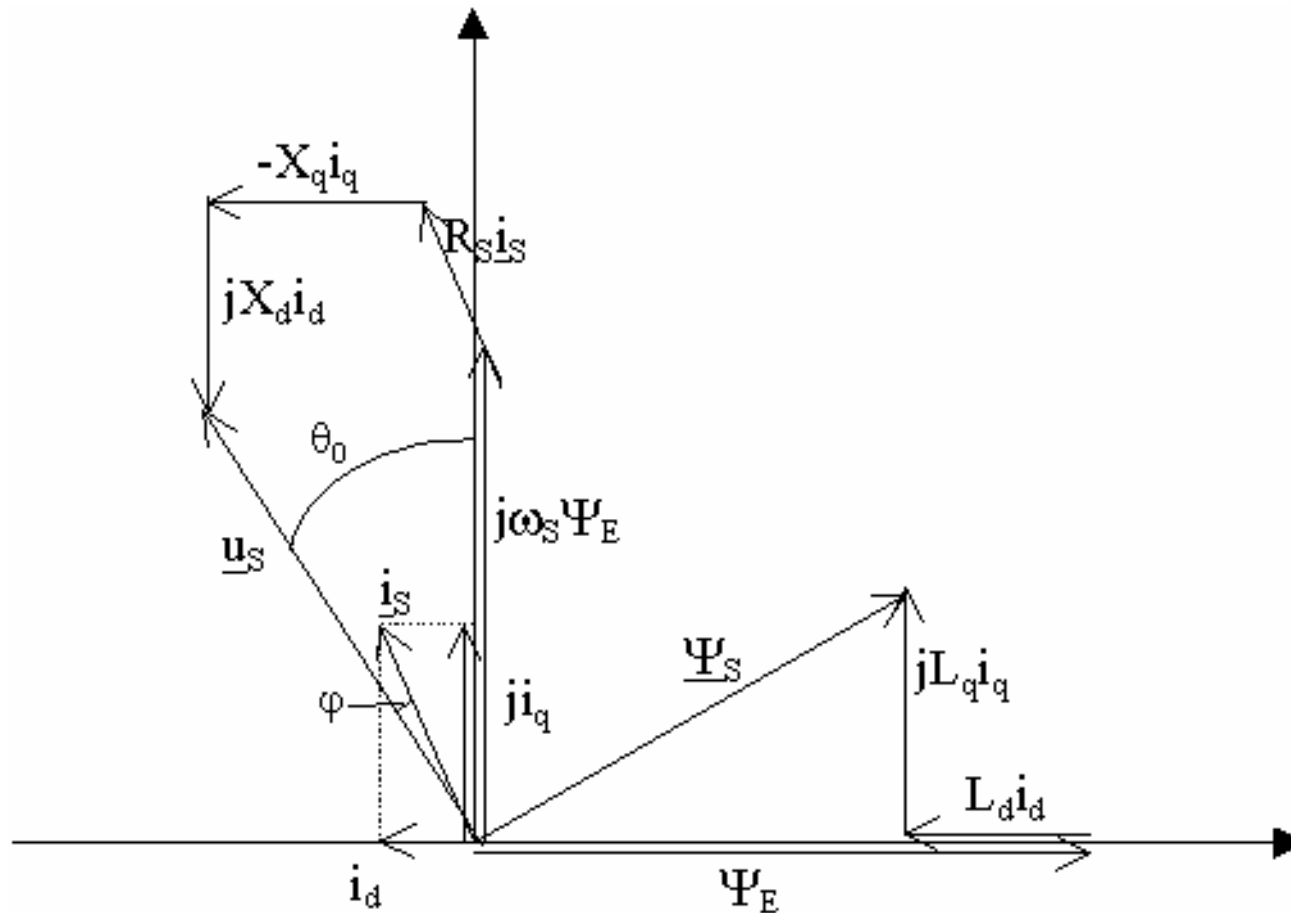
$$\underline{\Psi}_S = L_d i_d + \Psi_E + jL_q i_q \quad \text{Expresia fluxului statoric}$$

# Modelul matematic

Diagrama vectoriala

$$\underline{u}_S = R_S \underline{i}_S + jX_d \underline{i}_d - X_q \underline{i}_q + j\omega_S \Psi_E$$

$$+ \Psi_E + jL_q \underline{i}_q$$



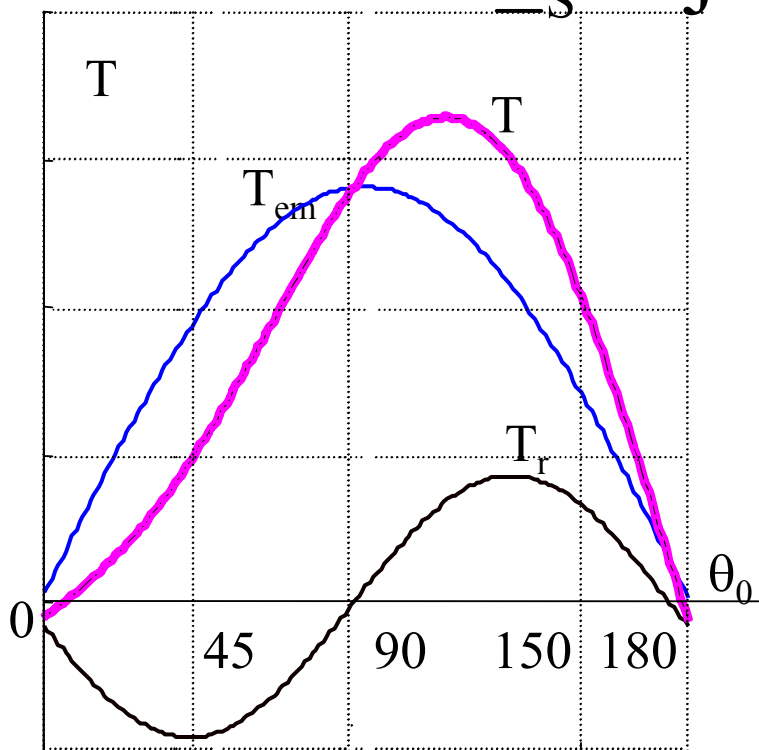
# Modelul matematic

## Cuplul mașinii.

Dacă se neglijează rezistența fazei statorice, atunci în regim staționar se obține:

$$\underline{u}_S \cong j\omega_S \underline{\Psi}_S$$

$$\omega_S \Psi_E = -\sqrt{3}E_0$$



Cuplu electromagnetic

$$T = \frac{3p}{\omega_S} \left[ \frac{UE_0}{X_d} \sin\theta_0 + \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta_0 \right]$$

Cuplu de reluctanță

## Exemplu

Mașina sincronă cu magneți permanenți dispuși pe periferia rotorului având  $2p = 4$  poli

turația nominală  $n_N = 4000$  rot/min,

curentul nominal  $I_{SN} = 1.8$  A,

cuplul nominal  $T_N = 1.3$  Nm,

inductivitatea sincronă  $L_S = 0.0275$  H ( $L_d \approx L_q = L_S$ ),

rezistența fazei statorice  $R_S = 6.1$   $\Omega$ ,

fluxul de excitație  $\Psi_E = 0.212$  Vsec.

Moment de inerție  $J = 0.000834$   $Ws^3$

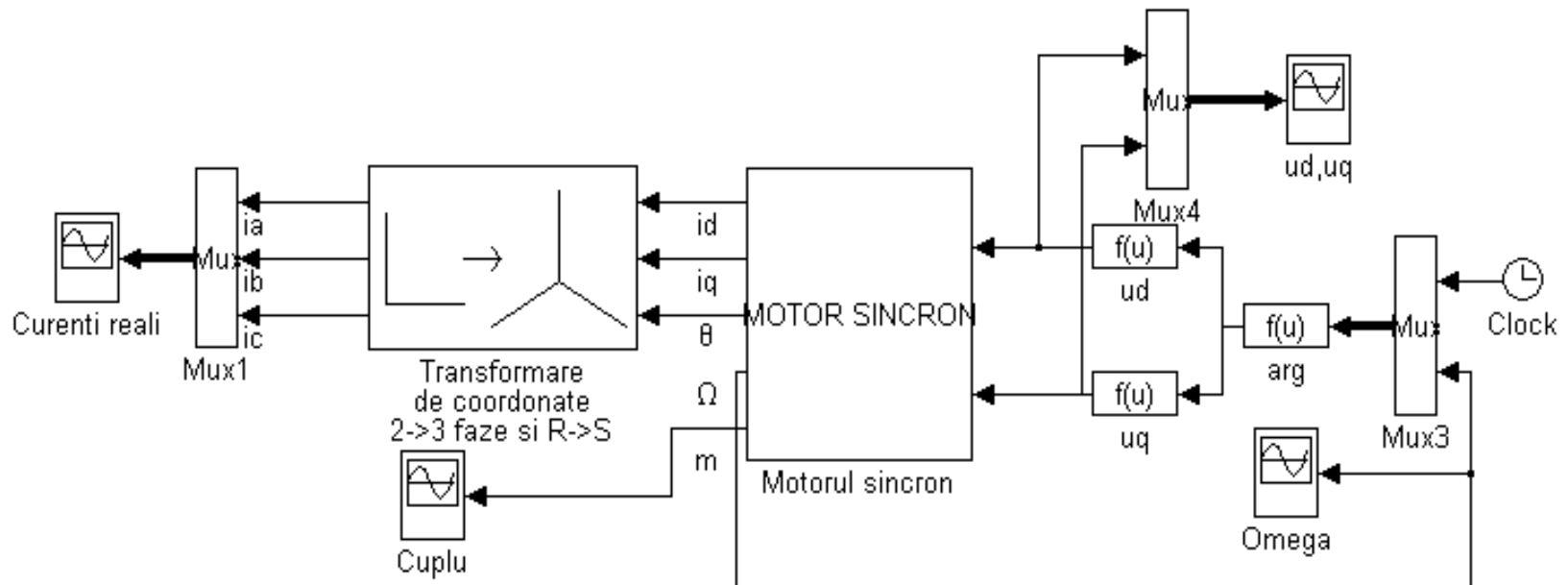
Tensiuni de alimentare  
in sistem legat de rotor

$$u_d = \sqrt{3} \cdot 15 \cdot \sin \left[ (3.14 - 2\Omega)t - \frac{\pi}{6} \right]$$

$$u_q = \sqrt{3} \cdot 15 \cdot \cos \left[ (3.14 - 2\Omega)t - \frac{\pi}{6} \right]$$

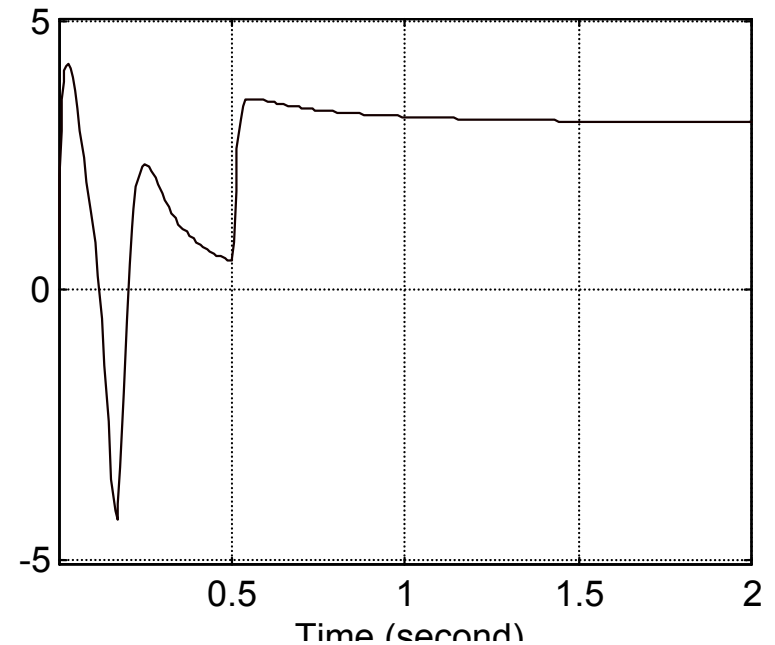
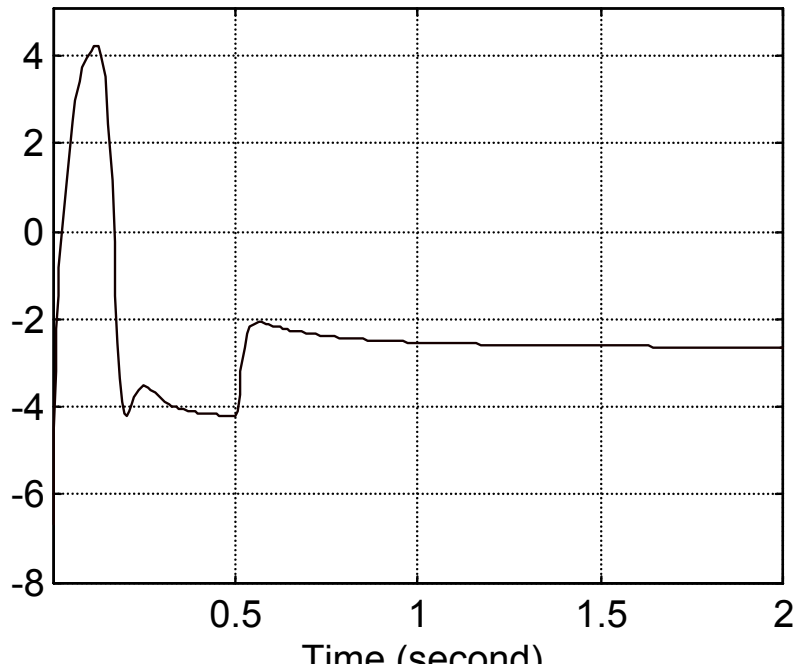


# Modelul matematic



Programul de simulare a funcționării motorului utilizând mediul MATLAB - SIMULINK

# Modelul matematic. Rezultate simulate



Variația curenților  $i_d$  (a) și  $i_q$  (b) la alimentare sinusoidală cu tensiune și frecvență redusă.

## Comanda mașinii sincrone cu magneți permanenți

Comanda motorului sincron cu excitație cu magneți permanenți se face aplicând strategia cunoscută a comenzii **cu orientare după câmpul rotoric**.

Există și situații când se renunță la realizarea ortogonalității celor două componente de câmp și respectiv de cuplu, și anume în cazurile când se dorește îmbunătățirea factorului de putere sau când este necesară o slăbire de câmp pentru creșterea turației.

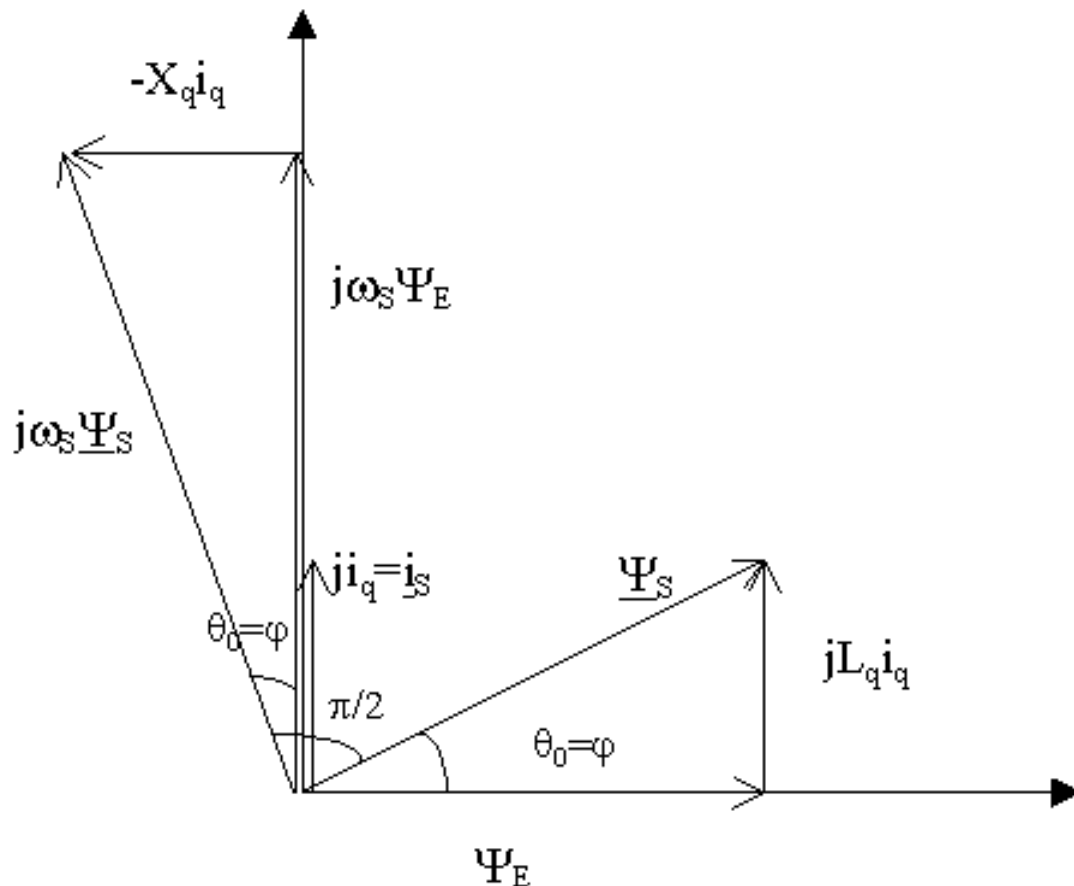
În cazul în care cele două componente nu sunt perpendiculare, răspunsul sistemului este mai lent, cuplul electromagnetic reducându-se.

În cazul mașinii sincrone cu magneți permanenți comanda se realizează cu orientare **după fluxul de excitație  $\Psi_E$** .

Deci curentul de cuplu din stator trebuie să fie pe direcția axei  $q$  și în consecință  **$i_d = 0$** .

# Comanda mașinii sincrone cu magneți permanenți

Neglijând rezistența fazei statorice, se obțin ecuațiile de regim staționar



$$\underline{u}_S = j\omega_S \underline{\Psi}_S$$

$$\underline{\Psi}_S = \Psi_E + jL_q i_q$$

Cuplul:

$$T = p i_q \Psi_E$$

# Comanda mașinii sincrone cu magneți permanenți

Factorul de putere

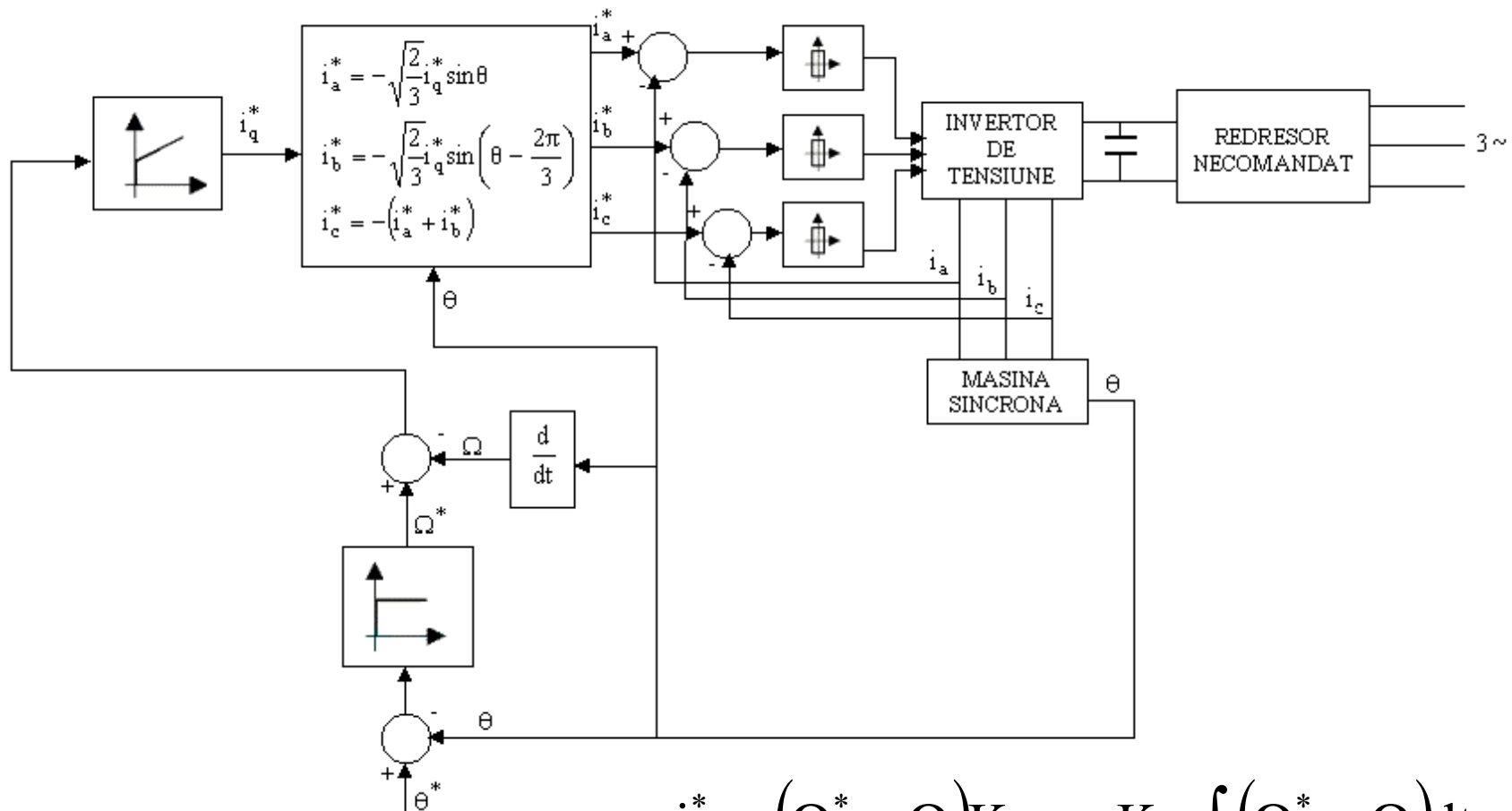
$$\cos \varphi = \frac{\Psi_E}{\sqrt{\Psi_E^2 + L_q^2 i_q^2}}$$

La creșterea sarcinii, adică a lui  $i_q$ , factorul de putere scade și crește energia reactivă absorbită.

Pentru menținerea unei valori acceptabile a factorului de putere, deci a energiei reactive cerute de motor, trebuie să existe o componentă de curent pe direcția axei d cu caracter demagnetizant .

În această situație cuplul nu mai este maxim și răspunsul motorului este mai lent.

# Comanda mașinii sincrone cu magneți permanenți



Sistem de poziționare cu comandă după fluxul rotoric cu motor  
sincron cu magneți permanenți

# Comanda mașinii sincrone cu magneți permanenți

Pulsația statorică - turația rotorului la sincronism

$$\omega_S = \frac{u_S}{\sqrt{\Psi_E^2 + L_q^2 i_q^2}}$$

- se vede că la tensiune constantă turația maximă posibilă depinde de cuplu, deci de curentul  $i_q$ .
- Pentru creșterea turației maxime posibile trebuie redus fluxul printr-o componentă demagnetizantă de flux statoric dată de un curent  $i_d \neq 0$ .

Comanda cu orientare după câmp se poate realiza fără utilizarea unui traductor de poziție, când aceasta se estimează din valorile măsurate ale curentului și tensiunii de intrare.

Există diferite strategii.

Strategia de comandă cu controlul direct al cuplului (**DTC** = direct torque control) este și ea aplicabilă în cazul motorului sincron cu magneți permanenți.

# Comanda mașinii sincrone cu magneți permanenți

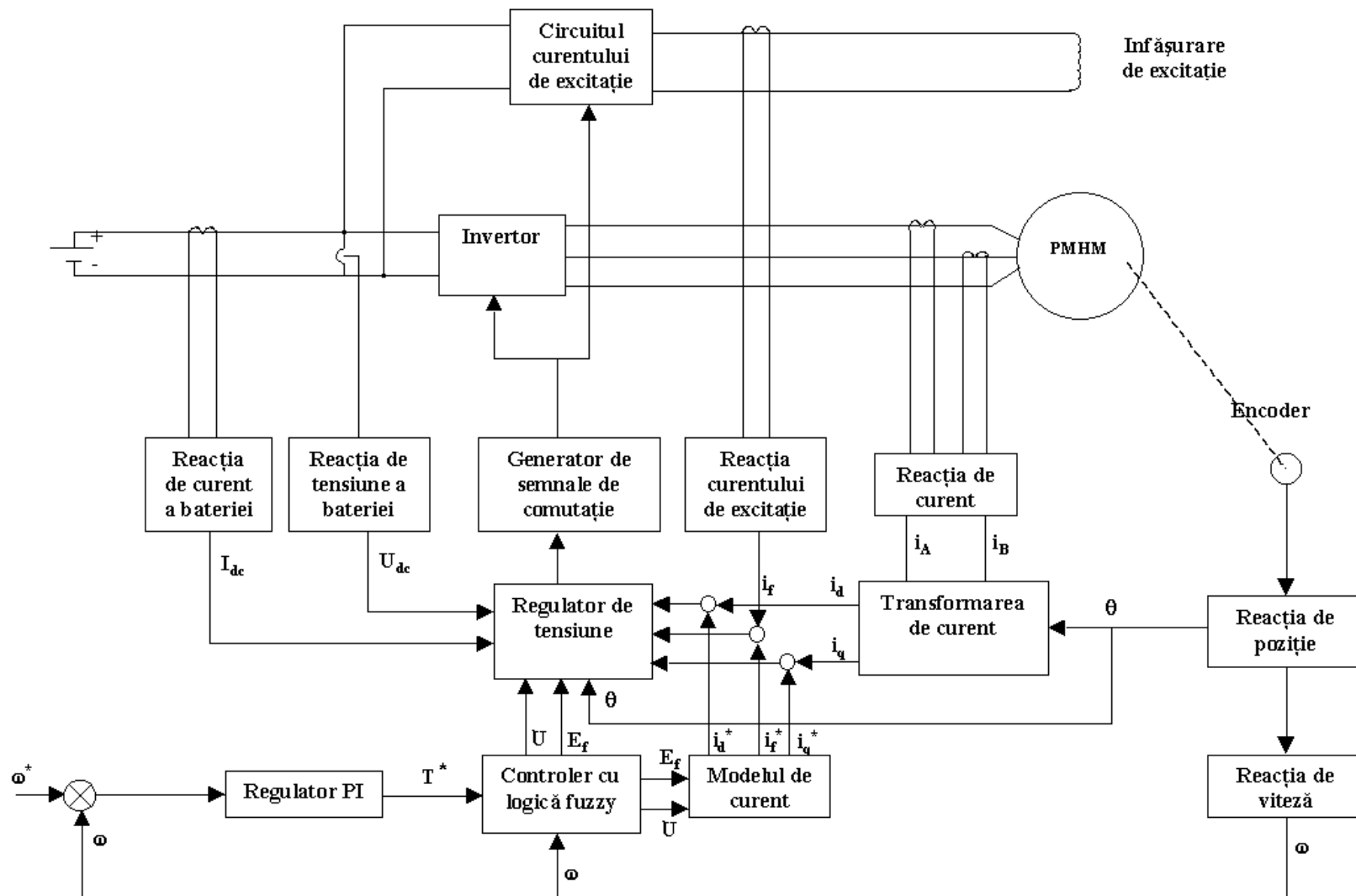


Diagrama bloc a sistemului de control pentru acționarea unui vehicul electric cu PMHM



## Bibliografie

**Biró K., Viorel I.A.**, "*On the synchronous machine dynamic behaviour modeling*", Proc. of ICEM '94, Paris, vol. II, pp. 134-138.

**Henneberger S.**, "*Design and development of permanent magnet synchronous motor for a hybrid electric vehicle drive*", Teză de doctorat, Leuven (Belgia), 1998.

**Luao J, et al.**, "*Axial flux circumferential current permanent magnet (AFCC) machine*", Proc. of IEEE - IAS Annual Meeting, St. Louis (USA), 1998, pp. 144-51.

**Li, Y.**, "*Design and control of a new class of doubly salient permanent-magnet machines*", Teză de doctorat, University of Wisconsin, Madison (USA), 1995.

**Măgureanu R., Vasile N.**, "*Servomotoare fără perii tip sincron*", Ed. Tehnică, București, seria Mașini și aparate electrice, 1990.

**Moczala H. et al.**, "*Elektrische Kleinmotoren. Wirkungsweise, Bauformen, Eigenschaften- Hinweise für den Einsatz*", Expert Verlag, 1993.

**Phillips S.M., Mehregan Y.**, "*Dynamic models for control of micromotors*", Digest of Papers of Government Microcircuit Applications Conference, New Orleans (USA), 1993, pp. 307-310.

**Soong W.L., Staton D.A., Miller T.J.E.**, "*Design of a new axially-laminated interior permanent magnet motor*", IEEE Trans. on Ind. Appl, vol. 31 (1995), pp. 358-367.

## Bibliografie

**Szabó L., Viorel I.A., Chișu Ioana, Kovács Z.** "*A novel double salient permanent magnet linear motor*", Proc. of PCIM '99, Nürnberg (Germania), vol. Intelligent Motion, 1999, pp. 285-290.

**Viorel I.A., Biró K.A.**, "*Permanent-magnet synchronous motor simplified field-circuit model*", Proc. of Electromotion '95, Cluj, pp. 182-187.

**Viorel I.A., Chișu Ioana, Radu Mihaela**, "*Double salient permanent magnet generators*", Proc. of PCIM '99, vol. Intelligent Motion, pp. 167-171.

**Viorel I.A., Chișu Ioana, Ciorba R.C.**, "*On the four phases double salient permanent magnet motors performance evaluation*", Proc. of ICEM '98, Istambul, vol. II, pp. 1184-1190.

**Viorel I.A., Tomescu Ilinca, Biró K., Radu Mihaela**, "*Radial – flux double salient permanent magnet machines time domain simulation*", Proc. of EPE-PEMC '2000, vol. 5, pp. 137-142.

**Weh H., May H., Shalaby M.**, "*Highly effective magnetic circuits for permanent magnet excited synchronous machines*", Proc. of ICEM'90, vol. 3, pp. 1040-1045.

**Yeadon P.W.H., Yeadon A.W.**, "*Handbook of small electric motors*", McGraw-Hill, New York, 2001.