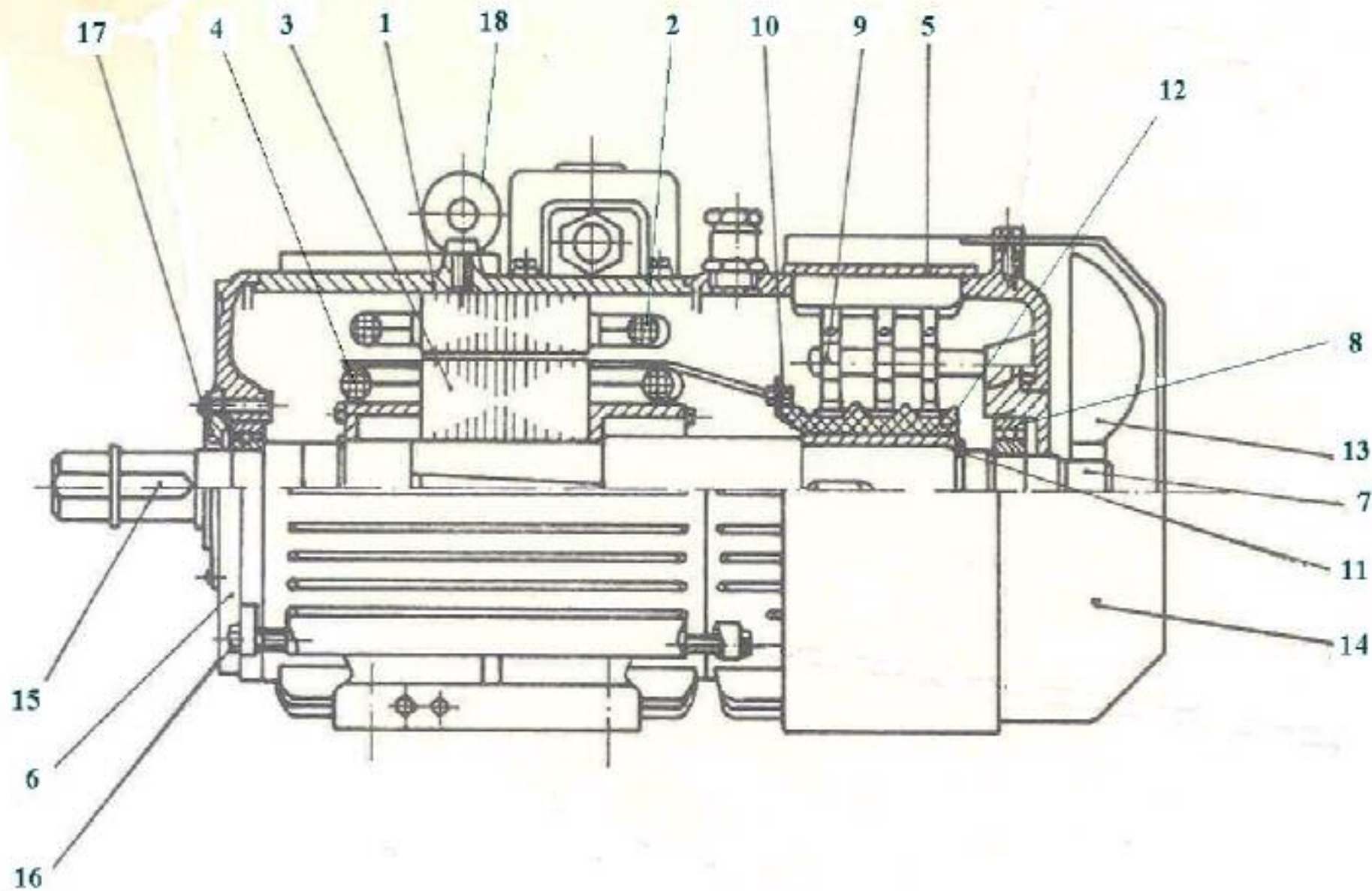

Mașina de inducție

Construcția și funcționarea

Construcția mașinii de inducție cu inele



Construcția mașinii de inducție cu inele

Semnificația notațiilor din figură:

- | | |
|-------------------------|--------------------------------|
| 1. Miez statoric | 10. Legătura înfășurare inele |
| 2. Înfășurare statorică | 11. Arc fixare inele |
| 3. Miez rotoric | 12. Izolația și inelele |
| 4. Înfășurarea rotorică | 13. Ventilator |
| 5. Carcasă | 14. Capac ventilator |
| 6. Scut portlagăr | 15. Pană |
| 7. Ax | 16. Șurub de fixare a scutului |
| 8. Rulment | 17. Capac rulment |
| 9. Tija cu perii | 18. Inel de ridicare |



Construcția mașinii de inducție



Construcția mașinii de inducție

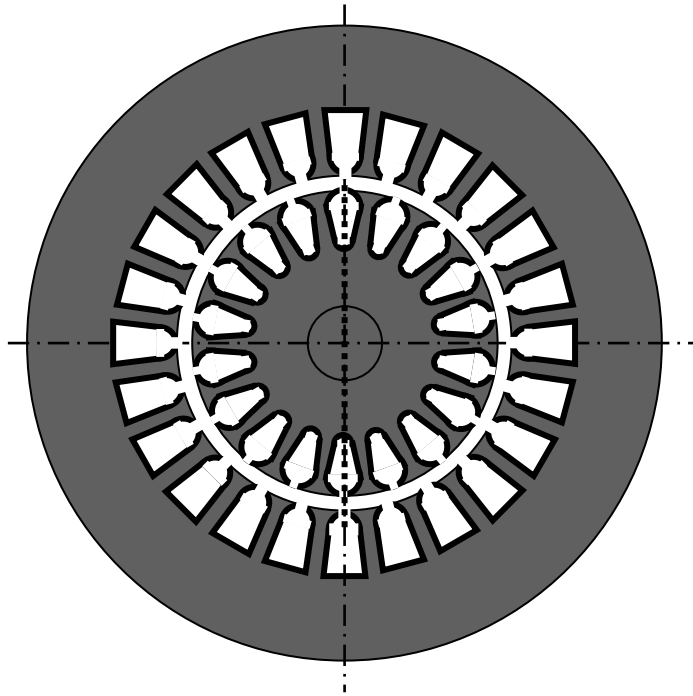


Motor de inducție clasic
pentru pompe

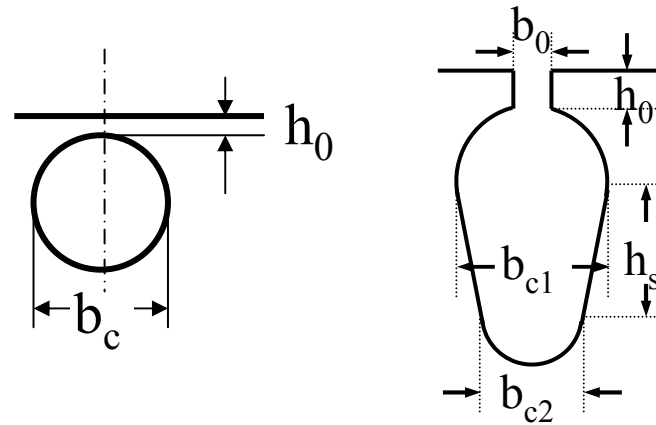


Motor de inducție cu
tensiune ridicată

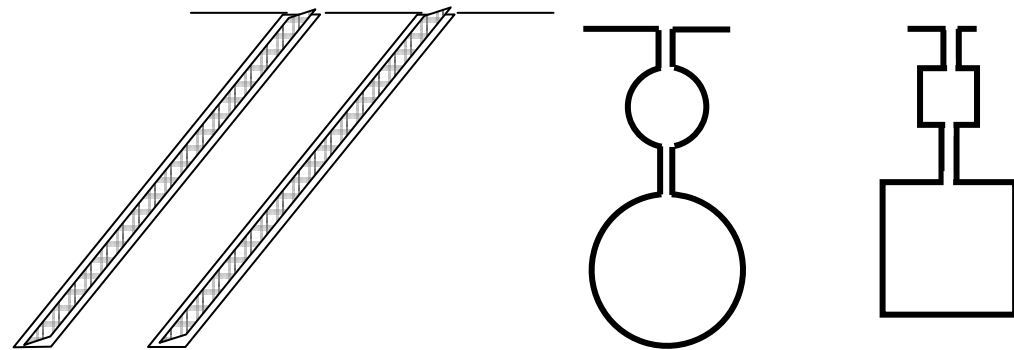
Tipul circuitului magnetic



Tipuri de creștături rotorice normale:



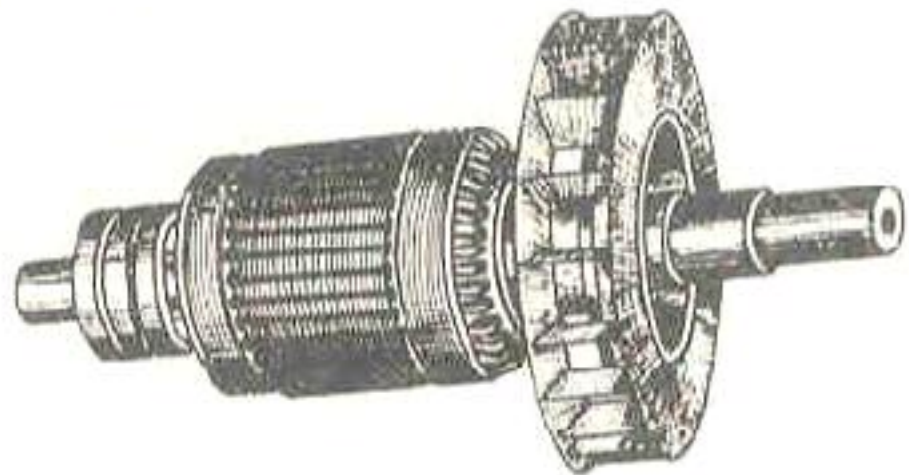
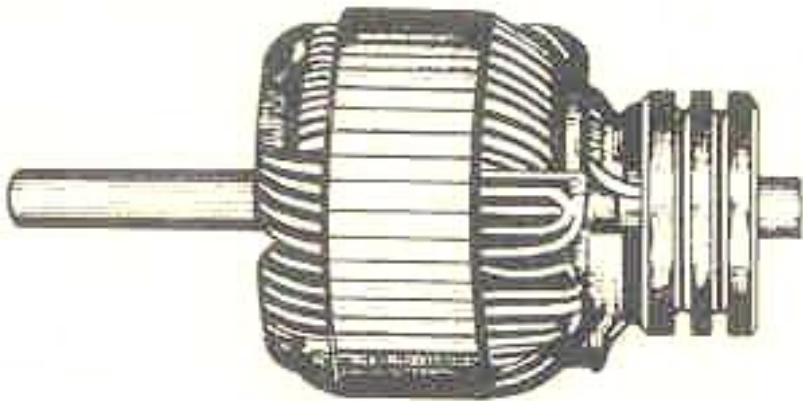
speciale :



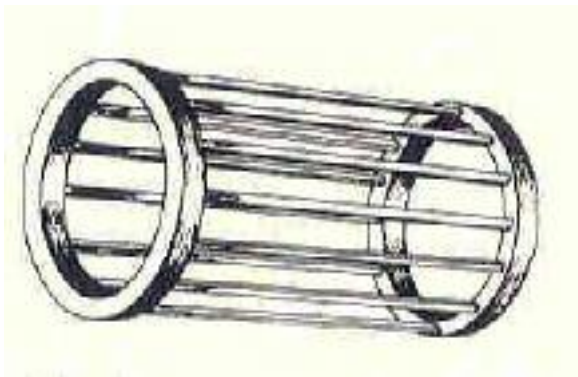
bare înalte

dublă colivie

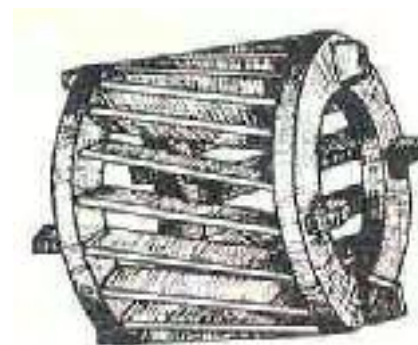
Rotoare cu bobinaje trifazate.



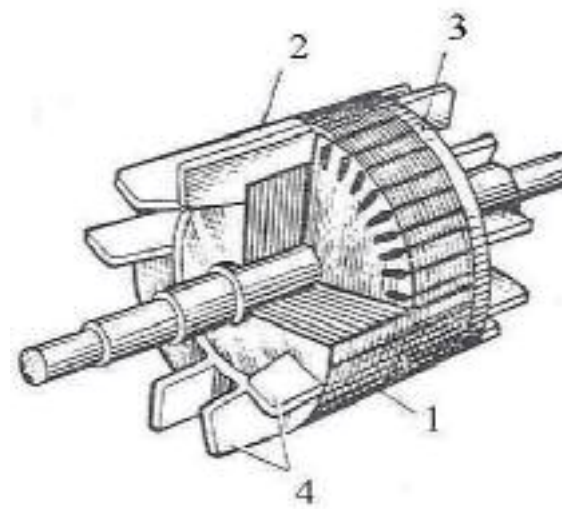
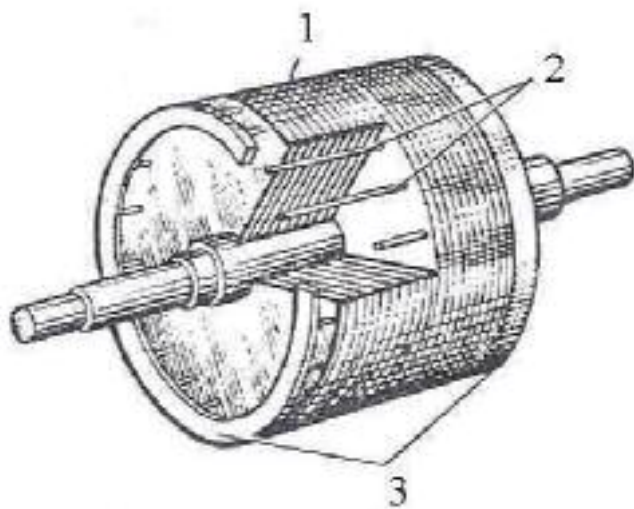
Rotor cu înfășurarea în colivie simplă



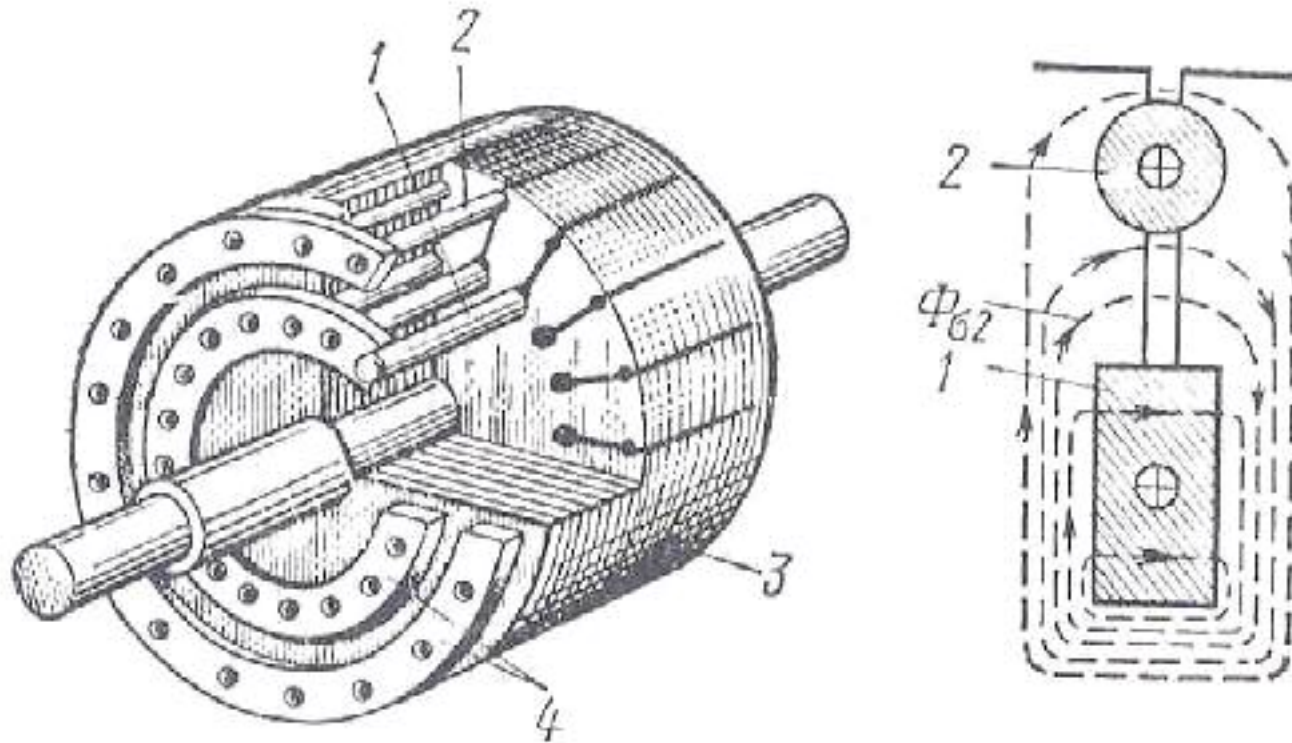
din bare de cupru



turnat din aluminiu



Rotor cu înfășurarea în dublă colivie



Principiul de funcționare

Sistemul de curenți trifazat din înfășurarea statorică, având frecvența f_s produce o solenație, un câmp magnetic învârtitor.

Viteza câmpului învârtitor circular al armonicii fundamentale.

$$n_s = \frac{f_s}{p}$$

t.e.m. indusă în stator de câmpul magnetic învârtitor

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} \quad \Psi_m = w_S \cdot k_{bS} \cdot \Phi \quad \text{Are frecvența} \quad f_S = p \cdot n_S$$

În regim sinusoidal t.e.m. indusă în stator se poate scrie: $\underline{E}_S = -j \cdot \omega_S \cdot \underline{\Psi}_S$

Viteza de rotație a câmpului magnetic învârtitor față de rotor, în mișcare de rotație cu viteza n

$$n_S - n = n_r$$

Principiul de funcționare

Se definește alunecarea rotorului față de câmpul magnetic învârtitor:

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

Atunci viteza de rotație a câmpului magnetic învârtitor față de rotor :

$$n_r = s \cdot n_S$$

t.e.m. indusă în rotor de câmpul magnetic învârtitor are frecvența

$$f_R = p \cdot n_r = p \cdot s \cdot n_S = s \cdot f_S$$

În regim sinusoidal t.e.m. indusă în înfășurarea rotorului

$$\underline{E}'_R = -j \cdot \omega_R \cdot \underline{\Psi}_R$$

Curentul din circuitul rotoric, obligator închis, are frecvența t.e.m.induse.

Principiul de funcționare

Curentul rotorice din circuitul închis al rotorului are frecvența f_R și produce o solenație învârtitoare circulară ce se rotește față de rotor cu viteza:

$$n_R = \frac{f_R}{p} = s \cdot n_S$$

Deoarece și rotorul se rotește față de stator, viteza de rotație a solenației rotorice va fi:

$$n + n_R = n_S (1 - s) + s \cdot n_S = n_S$$

Deci solenatiile statorice și rotorice se rotesc cu aceeași viteză, se rotesc sincron.

Cele două câmpuri magnetice determină un cuplu electromagnetic a cărui valoare depinde de defazajul dintre cele două solenații.

Principiul de funcționare

Relația:

$$n + n_R = n_S (1 - s) + s \cdot n_S = n_S$$

Reprezintă condiția de frecvență.

$$\pm n \pm n_R \pm n_S = 0$$

Deci are loc transformarea energiei.

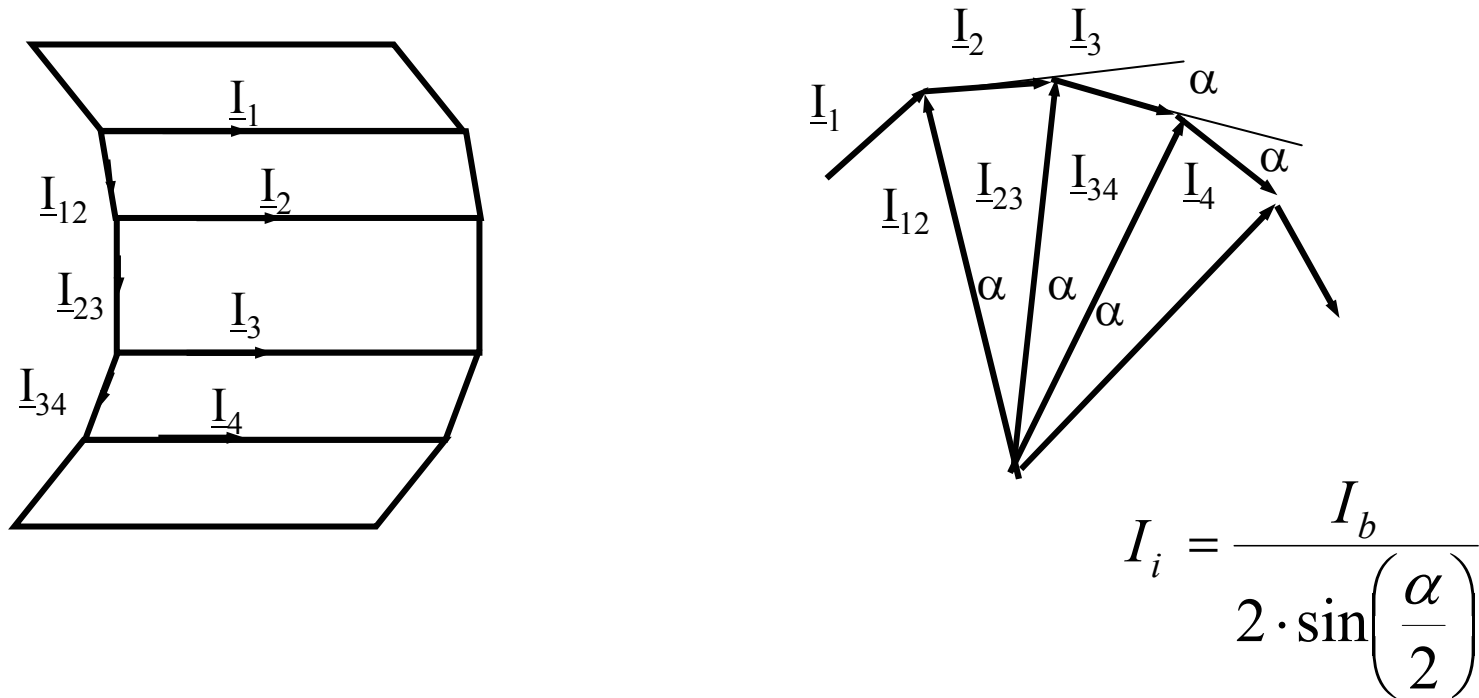
Modelul de circuit al mașinii de inducție.

Înfășurările mașinii se echivalează cu circuite electrice trifazate

Înfășurarea rotorică se raportează la stator

Miezul magnetic se echivalează cu un circuit electric trifazat format din rezistența de pierderi și inductivitatea de magnetizare.

Reducerea înfășurării în colivie la o înfășurare trifazată.



Reducerea inelelor la bare \Rightarrow înfășurare legată în stea

$$R_{be} \cdot I_b^2 = R_b \cdot I_b^2 + 2 \cdot R_i \cdot I_i^2$$

Reducerea numărului de faze și raportarea la stator

Rezultă impedanța înfășurării echivalente

$$R_{be} = R_b + \frac{R_i}{2 \cdot \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \qquad X_{be} = X_b + \frac{X_i}{2 \cdot \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

Reducerea numărului de faze și raportarea la stator.

Stator : m_S , w_S , k_{bS} ,

↑ ↑ ↑
faze spire factor bobinaj
↓ ↓ ↓

Rotor : N_{crR} , $1/2$, k_{bR}

Raportarea tensiunilor :

$$E_S = E'_R = \frac{w_S \cdot k_{bS}}{\frac{1}{2} \cdot k_{bR}} \cdot E_b$$

Raportarea impedanțelor

Solenația rezultantă:

$$F = \frac{m_S}{2} \omega_S \cdot k_{bS} \cdot I_S + \frac{N_{crR}}{2} \frac{1}{2} \cdot k_{bR} \cdot I_{be}$$

Raportarea solenațiilor :

Raportarea impedanțelor

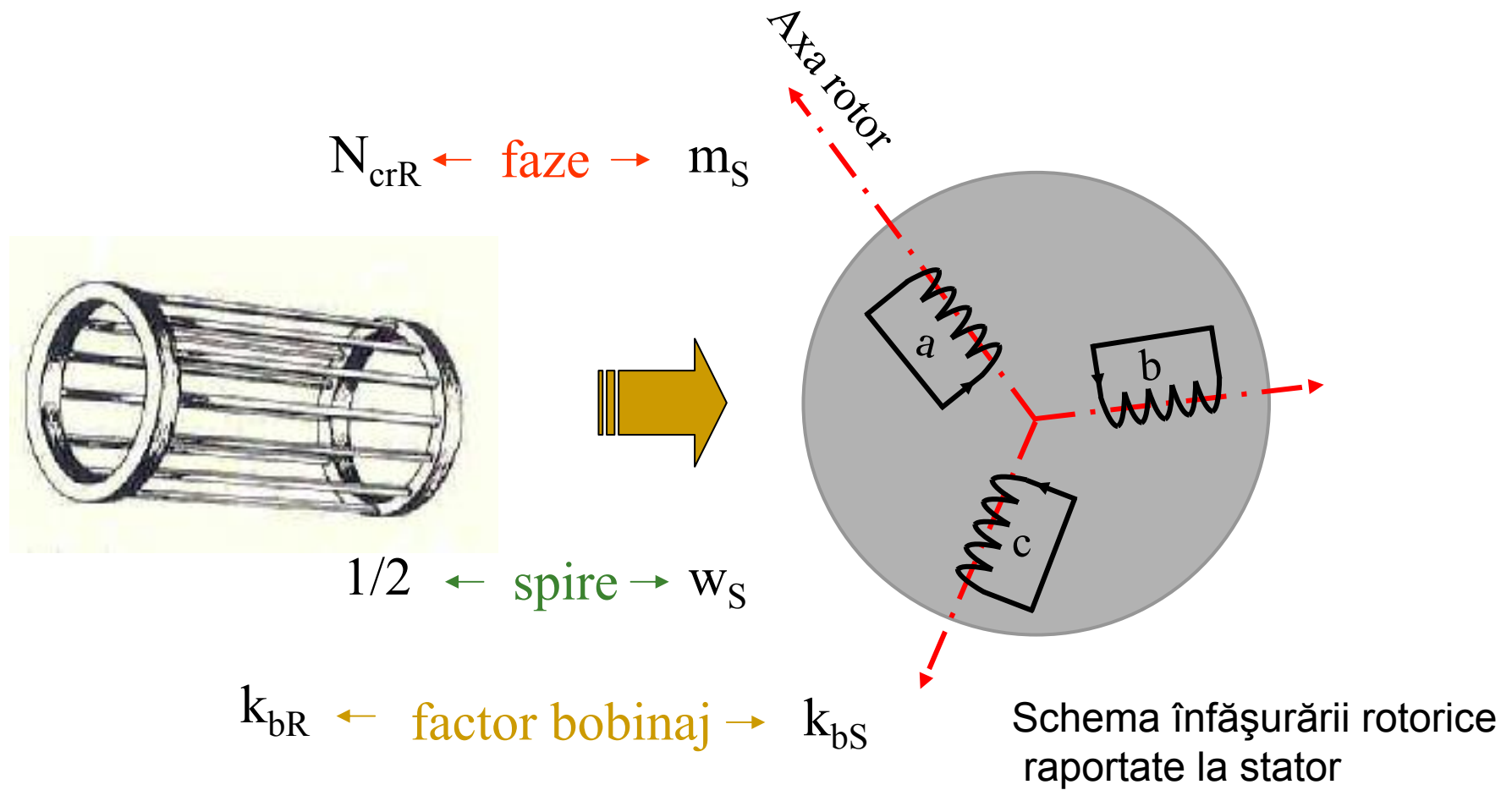
$$I'_b = \frac{N_{crR} \cdot \frac{1}{2} \cdot k_{bR}}{m_S \cdot \omega_S \cdot k_{bS}} \cdot I_b \quad \longrightarrow \quad k_Z = \frac{4 \cdot m_S \cdot (\omega_S \cdot k_{bS})^2}{N_{crR} \cdot k_{bR}^2}$$

Parametrii rotorului raportat la stator.

$$R'_R = k_{Zb} \cdot R_{be} \quad X'_{R\sigma} = k_{Zb} \cdot X_{be}$$

$$R'_R = k_Z \cdot R_R \quad X'_{R\sigma} = k_Z \cdot X_{R\sigma}$$

Reducerea înfășurării rotorului în colivie la stator



Calculul parametrilor rotorului raportat la stator

Se cunosc datele constructive ale unei mașini de inducție

în stator: $Z_s = 48$ crestături, $2p = 4$ poli,

$W_s = 88$ spire/fază,

deschiderea bobinei $Y_{1s} = 10$ crestături;

în rotor: $Z_R = 58$ crestături, înclinate cu un pas dentar statoric,

bară: secțiunea $s_b = 126 \text{ mm}^2$, lungimea $l_b = 0,22 \text{ m}$,

reactanța de scăpări $X_b = 0,236 \text{ m}\Omega$,

inelul de scurtcircuitare: secțiunea $s_i = 650 \text{ mm}^2$,

lățimea $b_i = 20 \text{ mm}$, înălțimea $h_i = 36,5 \text{ mm}$,

diametrul mediu $D_i = 0,208 \text{ m}$,

reactanța de scăpări $X_i = 3,5 \mu\Omega$

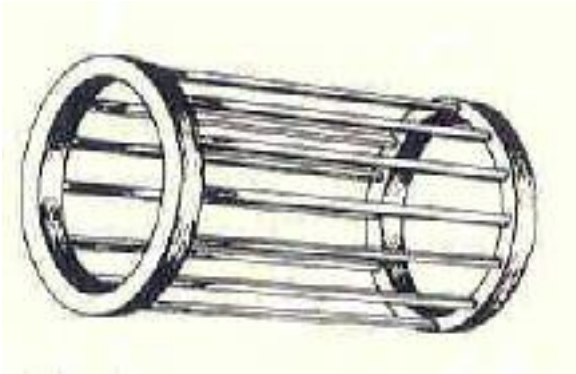
material: aluminiu rezistivitatea $\rho = 1/17 \text{ m}\Omega/\text{mm}^2$,

Calculul parametrilor rotorului raportat la stator

- Rezistența unei bare:

$$R_b = \rho \frac{l_b}{s_b} = \frac{1}{17} \frac{0,22}{126} = 102,7 \cdot 10^{-6} \Omega$$

- Rezistența porțiunii de inel aferente unei bare



$$\ell_i = \frac{\pi \cdot Di}{Z_R} = \frac{\pi \cdot 0,208}{58} = 1,127 \text{ cm}$$

$$R_i = \frac{1}{17} \frac{11,27 \cdot 10^{-3}}{650} = 1,02 \cdot 10^{-6} \Omega$$

- Impedanța inelului raportată la bară

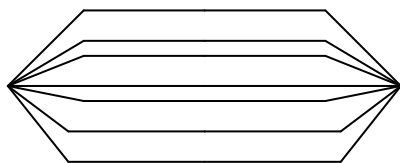
- unghiul electric între t.e.m. induse în două creștături vecine

$$\alpha = p \frac{360}{Z_R} = 2 \frac{360}{58} = 12^{\circ} 24' 50'' \quad \sin \frac{\alpha}{2} = 0,10812$$

Calculul parametrilor rotorului raportat la stator

- rezistența și reactanța inelului raportată la bară

$$R'_{ib} = \frac{R_i}{2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}} = \frac{1,02 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 0,10812^2} = 43,63 \cdot 10^{-6} \Omega$$



$$X'_{ib} = \frac{X_i}{2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}} = \frac{3,5 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 0,10812^2} = 149,7 \cdot 10^{-6} \Omega$$

- Impedanța barei echivalente

$$R_{be} = R_b + R'_{ib} = 1,03 \cdot 10^{-4} + 0,4363 \cdot 10^{-4} = 1,466 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$X_{be} = X_b + X'_{ib} = 0,236 \cdot 10^{-3} + 0,1497 \cdot 10^{-3} = 0,3857 \text{ m}\Omega$$

Calculul parametrilor rotorului raportat la stator

Factorul de bobinaj statoric

Unghiul dintre creștături

$$\alpha = p \frac{360}{Z_s} = 2 \frac{360}{48} = 15^\circ; \quad \sin \frac{\alpha}{2} = 0,13053$$

Număr de creștături pe pol și fază și pasul polar statoric

$$q = \frac{Z_s}{2pm} = \frac{48}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 4 \quad \tau = \frac{Z_s}{2 \cdot p} = \frac{48}{4} = 12 \text{ creștături}$$

Factorul de zonă

$$k_q = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin 4 \frac{15}{2}}{4 \sin \frac{15}{2}} = \frac{\sin 30^\circ}{4 \sin 7,5} = \frac{1}{2 \cdot 4 \cdot 0,13053} = 0,9576$$

Factorul de bobinaj statoric

factor de scurtare

$$k_y = \sin \frac{\pi}{2} \cdot \frac{Y_1}{\tau} = \sin 90^\circ \frac{10}{12} = \sin 75^\circ = 0,9659$$

factor de înclinare: $k_{is}=1$

factorul de bobinaj statoric

$$k_{bs} = k_{qs} k_{ys} k_{is} = 0,9576 \cdot 0,9659 \cdot 1$$

$$k_{bs} = 0,925$$

Calculul parametrilor rotorului raportat la stator

Factorul de bobinaj rotoric

pasul dentar statoric $\tau_{dS} = c = \frac{2 \cdot \pi}{Z_S} = \frac{2 \cdot \pi}{48} = \frac{\pi}{24} \text{ rad.}$

pasul polar exprimat în unghi electric $\tau = \frac{2\pi}{2p} = \frac{2\pi}{4} = \frac{\pi}{2} \text{ rad.}$

înclinarea raportată a creștăturilor rotorice $\frac{c}{\tau} = \frac{\pi}{24} \cdot \frac{2}{\pi} = \frac{1}{12}$

factor de bobinaj rotoric la rotor în colivie

$$K_{bR} = K_i = \frac{\sin \frac{\pi c}{2 \tau}}{\frac{\pi c}{2 \tau}} = \frac{\sin \frac{\pi}{24}}{\frac{\pi}{24}} = 0,9972$$

Calculul parametrilor rotorului raportat la stator

factorul de raportare la stator

$$K_Z = \frac{m_s (W_s K_{bs})^2}{m_R (W_R K_{bR})^2} = \frac{3 \cdot (88 \cdot 0,925)^2}{58 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 0,9972\right)^2} = 1378,6$$

Parametrii rotorului raportați la stator vor fi:

$$R'_R = K_Z \cdot R_{be} = 1378,6 \cdot 1,466 \cdot 10^{-4} = 0,202 \quad \Omega$$

$$X'_R = K_Z \cdot X_{be} = 1378,6 \cdot 3,857 \cdot 10^{-4} = 0,532 \quad \Omega$$

Raportarea impedanțelor

În cazul rotorului bobinat având :

Stator : m_S , w_S , k_{bS} ,

↑ ↑ ↑
faze spire factor bobinaj
↓ ↓ ↓

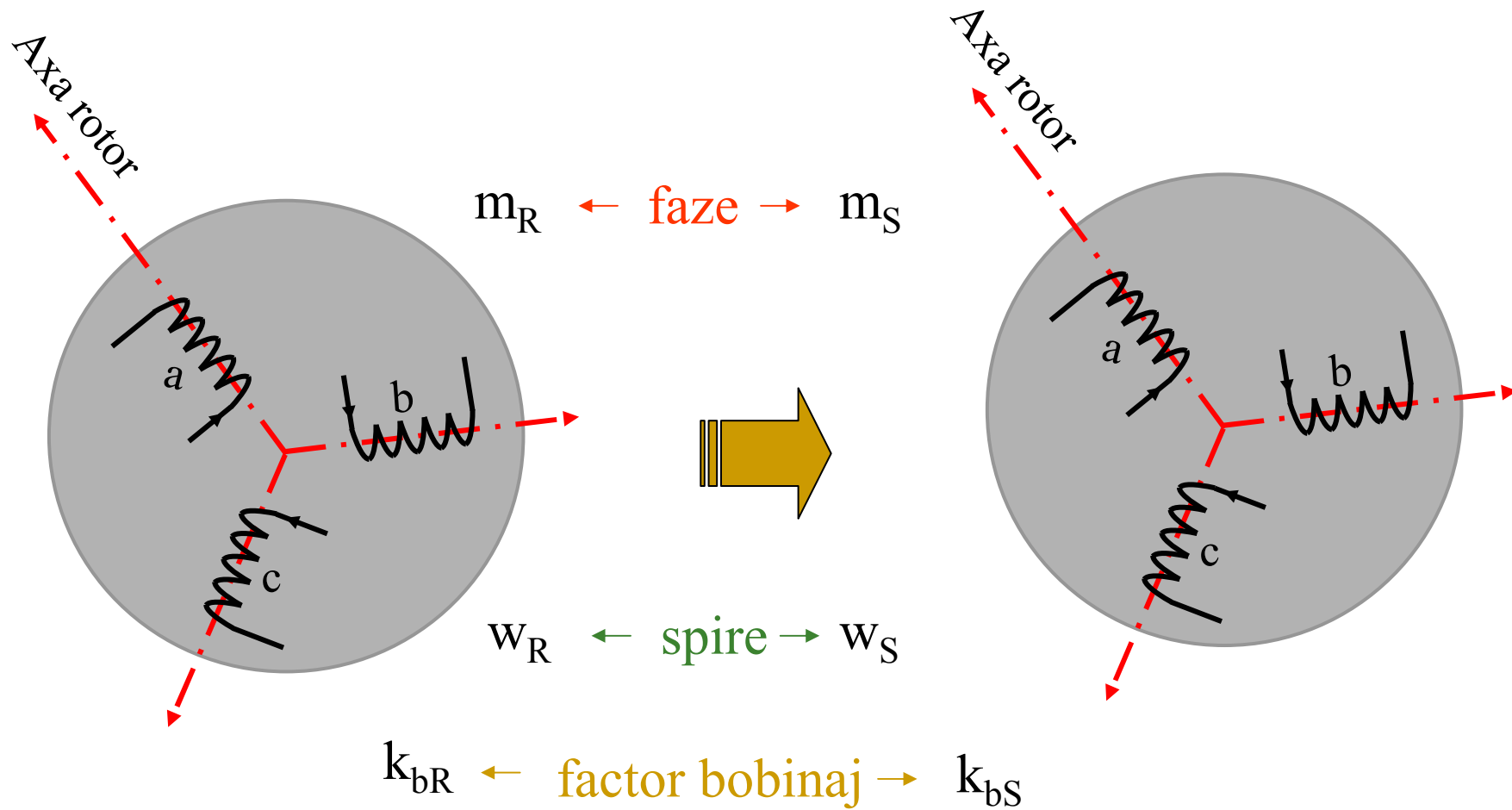
Rotor : m_R , w_R , k_{bR}

$$k_Z = \frac{m_S \cdot (w_S \cdot k_{bS})^2}{m_R \cdot (w_R \cdot k_{bR})^2}$$

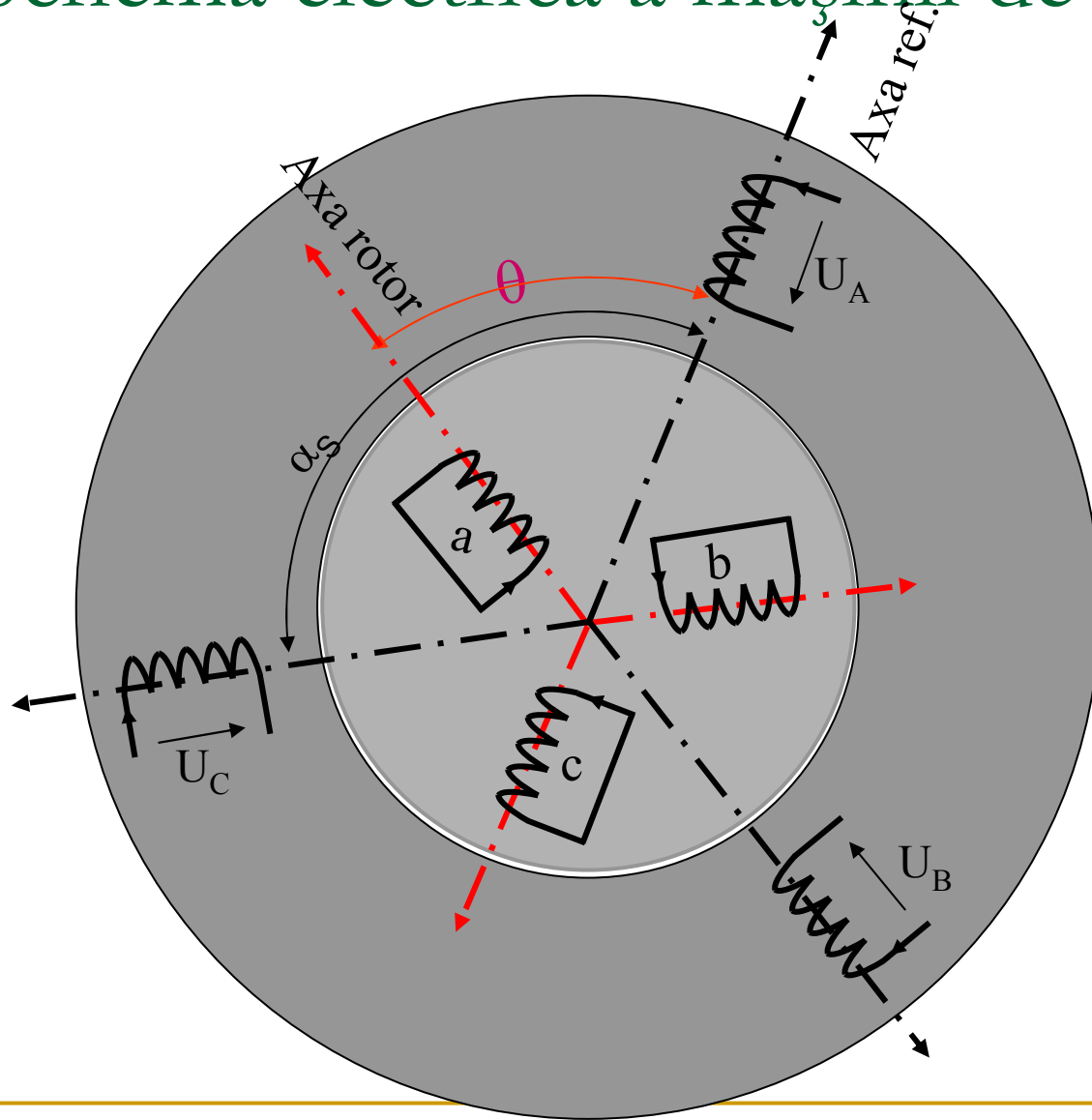
Solenția rezultantă

$$F = \frac{m_S}{2} \cdot w_S \cdot k_{bS} \cdot (i_S + i'_R)$$

Reducerea înfășurării rotorului bobinat la stator



Schema electrică a mașinii de inducție



Fluxul util total al mașinii.

$$\Psi_m = w_S \cdot k_{bS} \cdot F \cdot \Lambda$$

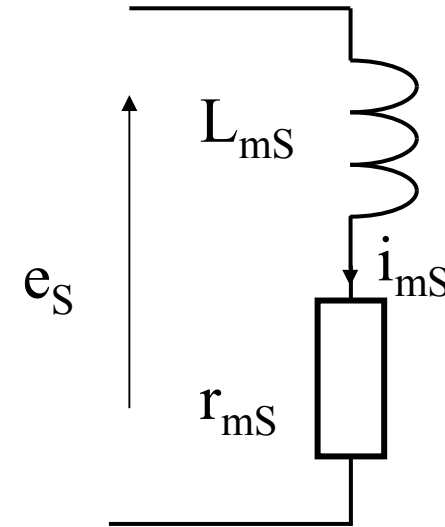
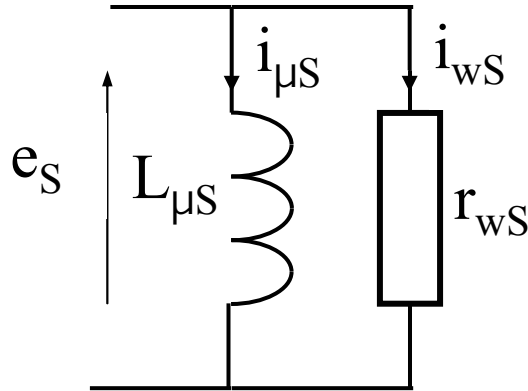
$$\Psi_m = \underbrace{\frac{m_S}{2} \cdot (w_S \cdot k_{bS})^2 \cdot \Lambda}_{L_\mu} \cdot \underbrace{(i_S + i'_R)}_{i_{mS}} = L_m \cdot i_{mS}$$

L_μ - inductivitatea de cuplaj, corespunde circuitului magnetic al mașinii.

i_{mS} - curentul de magnetizare dinspre stator

Dacă se consideră și pierderile în fier atunci se poate defini și o rezistență de pierderi. Schema echivalentă a circuitului magnetic rezultă :

Schema echivalentă a circuitului magnetic.



Fluxurile înfășurărilor:

$$\Psi_S = L_{S\sigma} \cdot i_S + \Psi_m$$

L_{mS} - inductivitatea de magnetizare, corespunde circuitului magnetic al mașinii.

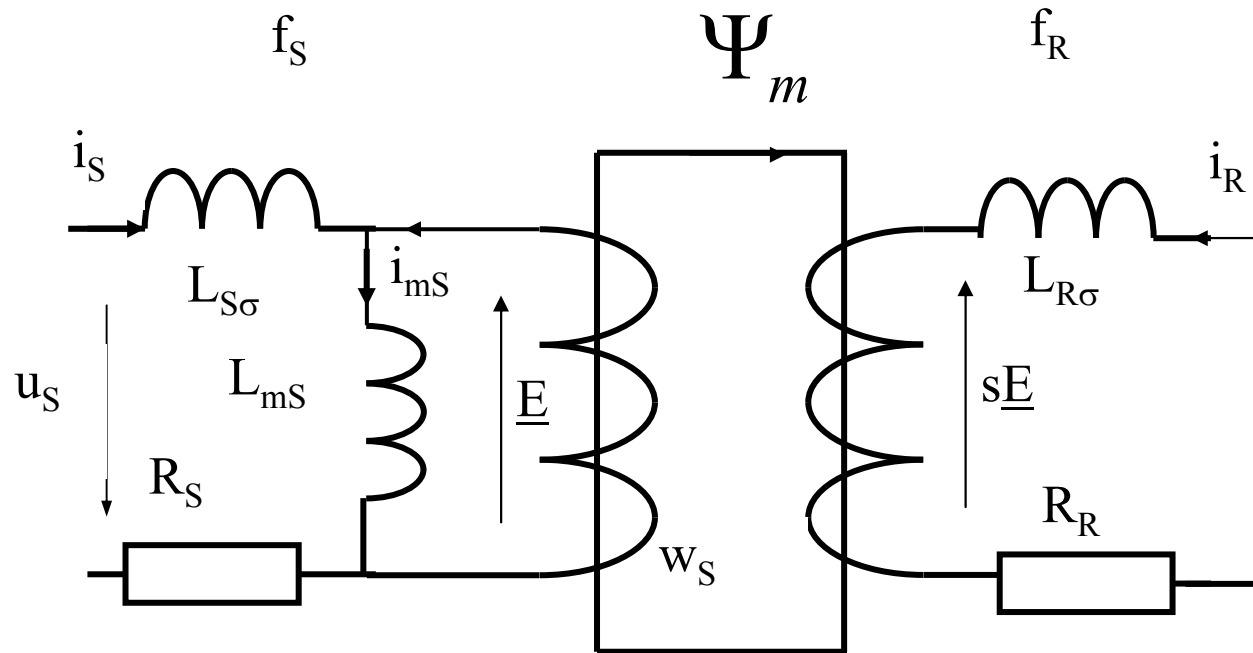
$$\Psi_R = L'_{R\sigma} \cdot i'_R + \Psi_m$$

T.e.m. induse.

$$e_S = -\frac{d\Psi_S}{dt}$$

$$e_R = -\frac{d\Psi_R}{dt}$$

Schema echivalentă de principiu a mașinii de inducție raportate.



$$u_S = R_S i_S + L_{S\sigma} \frac{di_S}{dt} - e$$

$$0 = R_R i_R + L_{R\sigma} \frac{di_R}{dt} - s \cdot e$$

Ecuatiile mașinii de inducție

Ecuatiile în regim sinusoidal:

Stator

$$\underline{U}_S = R_S \cdot \underline{I}_S + j \cdot \omega_S \cdot L_{S\sigma} \cdot \underline{I}_S - \underline{E} \quad \longrightarrow \quad \underline{f}_S$$

Rotor

$$\underline{U}'_R = 0 = R'_R \cdot \underline{I}'_R + j \cdot s \cdot \omega_S \cdot L'_{R\sigma} \cdot \underline{I}'_R - s \cdot \underline{E} \quad \longrightarrow \quad \underline{f}_R$$


Circuit magnetic

$$\underline{E} = -\left(R_{mS} + j \cdot \omega_S \cdot L_{mS}\right) \cdot \underline{I}_{mS} \quad \underline{I}_{mS} = \underline{I}_S + \underline{I}'_R$$

Transformare de frecvență

se consideră că și rotorul stă pe loc

$$f_R = s \cdot f_S$$

 $f_R = f_S$

$$\underline{U}'_R = 0 = R'_R \cdot \underline{I}'_R + j \cdot s \cdot \omega_S \cdot L'_{R\sigma} \cdot \underline{I}'_R - s \cdot \underline{E}$$

Impărțirea ecuației circuitului rotoric cu s

$$\frac{\underline{U}'_R}{s} = 0 = \frac{R'_R}{s} \cdot \underline{I}'_R + j \cdot \omega_S \cdot \underbrace{L'_{R\sigma}}_{X'_{R\sigma}} \cdot \underline{I}'_R - \underline{E}$$

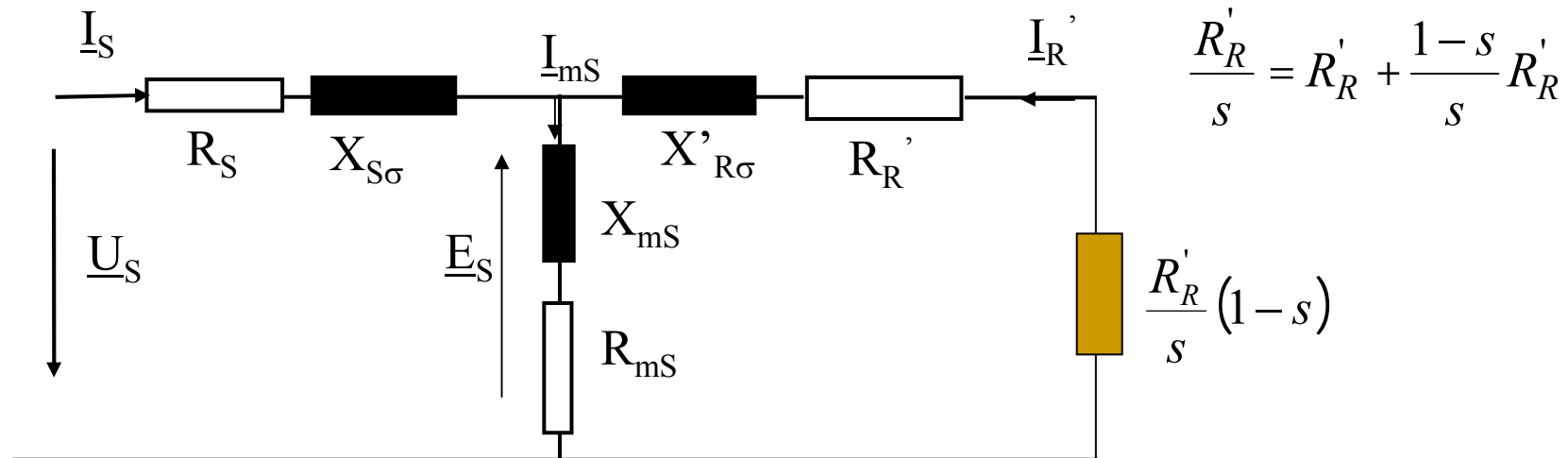
Cele două înfășurări fixe  Transformator

Schema echivalentă  Transformator cu sarcină ohmică

Schema echivalentă în T

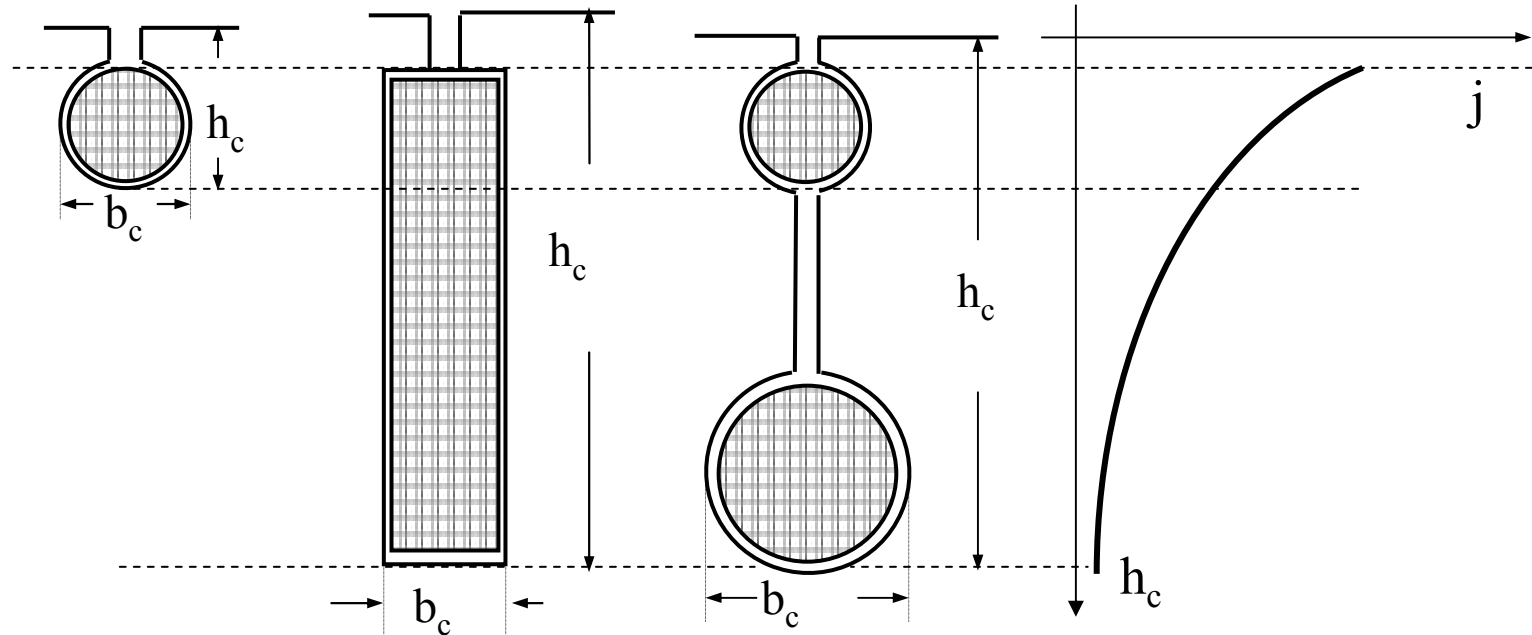
$$\underline{U}_S = R_S \cdot \underline{I}_S + j \cdot X_{S\sigma} \cdot \underline{I}_S - \underline{E}_S$$

$$\underline{U}'_R = 0 = \frac{R'_R}{s} \cdot \underline{I}'_R + j \cdot X'_{R\sigma} \cdot \underline{I}'_R - \underline{E}_S$$



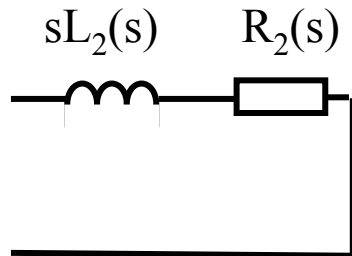
$$\underline{I}_{mS} = \underline{I}_S + \underline{I}'_R \quad \underline{E}_S = - (R_{mS} + j \cdot X_{mS}) \cdot \underline{I}_{mS}$$

Refularea curentului în barele rotorului



Rotor cu bare înalte

$$\frac{h_c}{b_c} \geq 8$$



Schema echivalentă a rotorului

Efectul de refulare este dependent de:

- materialul conductorului
- dimensiunile conductorului
- frecvența curentului.

Refularea curentului în barele rotorului

Efectul de refulare influențează numai partea din creștătură a înfășurării.

Se definește înălțimea de calcul al conductorului:

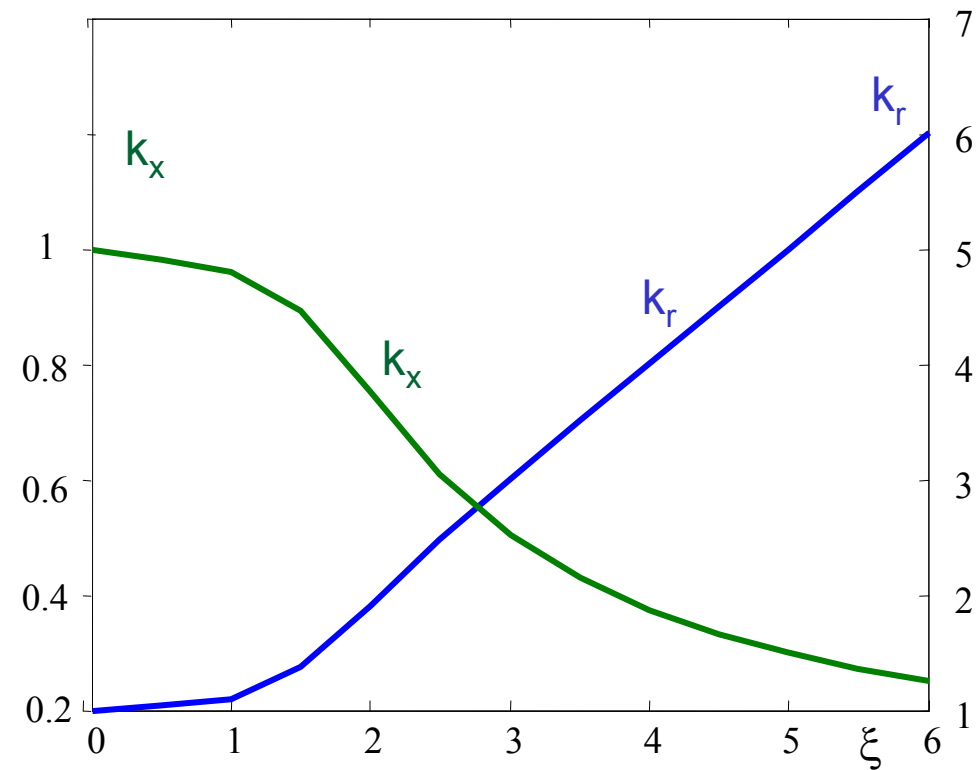
$$\xi = h \cdot \sqrt{\frac{b_c \mu_0 \cdot \omega}{b \cdot 2 \cdot \rho}}$$

Expresiile parametrilor în acest caz

$$R_2(s) = k_r \cdot R_{2b} + R_{2f}$$

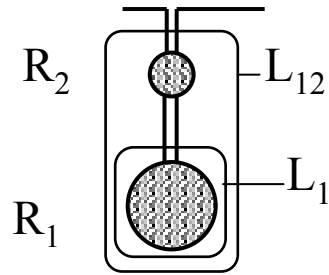
$$L_2(s) = k_x \cdot L_{2b} + L_{2f}$$

Valorile coeficienților k_r , și k_x

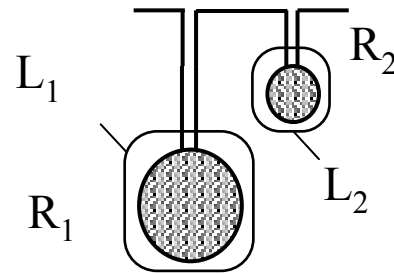


Refularea curentului în barele rotorului

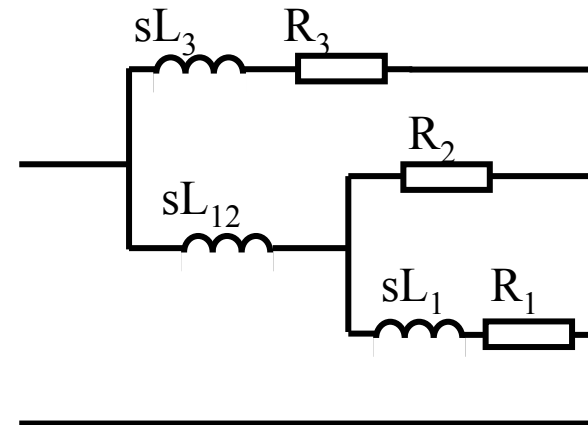
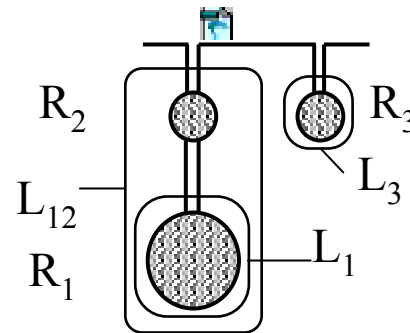
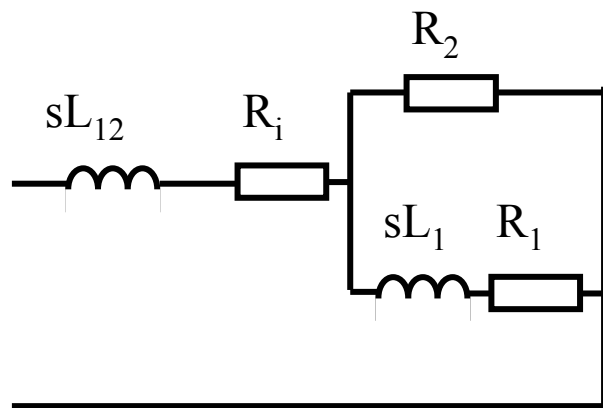
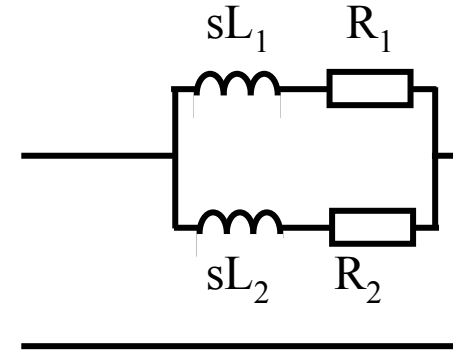
Motoare cu dublă colivie



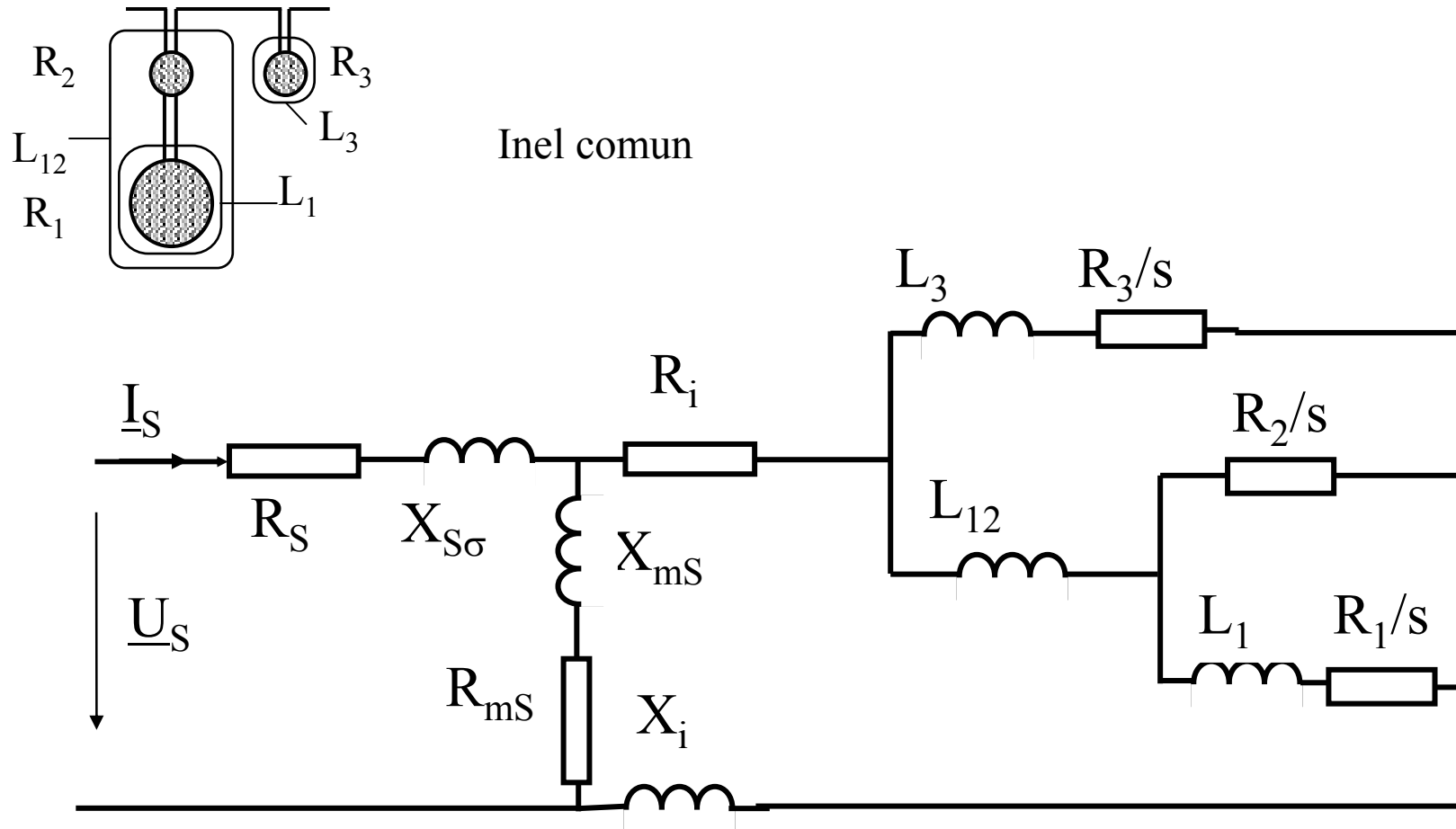
Inel comun



Inele separate

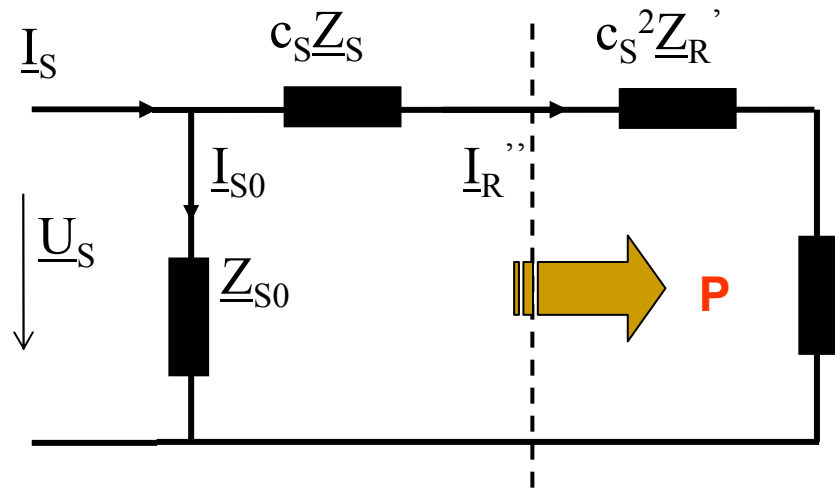


Schema echivalentă a motorului cu dublă colivie



Cuplul mașinii de inducție

Din schema echivalentă în L



$$\underline{I}_R'' = \frac{\underline{U}_S}{c_S \cdot \left(\underline{Z}_S + c_S \cdot \underline{Z}'_{Rs} \right)}$$

$$c_S^2 \frac{R'_R}{s} (1-s)$$

Unde :

$$\underline{Z}'_{Rs} = \frac{R'_R}{s} + j \cdot X'_{R\sigma}$$

Puterea electromagnetică

$$P = m_S \cdot \frac{R'_R}{s} \cdot c_S^2 \cdot I_R''^2$$

$$I_R''^2 = \underline{I}_R'' \cdot \underline{I}_R''^* = \frac{U_S^2}{c_S^2 \cdot \left[\left(R_S + c_S \cdot \frac{R'_R}{s} \right)^2 + \left(X_{S\sigma} + c_S \cdot X'_{R\sigma} \right)^2 \right]}$$

Cuplul electromagnetic

$$C = \frac{P}{\Omega_S} = \frac{p \cdot P}{\omega_S} = \frac{p \cdot m_S}{\omega_S} \cdot \frac{U_S^2 \cdot \frac{R'_R}{s}}{\left[\left(R_S + c_S \cdot \frac{R'_R}{s} \right)^2 + \left(X_{S\sigma} + c_S \cdot X'_{R\sigma} \right)^2 \right]}$$

Cuplul mașinii de inducție depinde de :

- pătratul tensiunii de alimentare, direct,
- parametrii înfășurărilor statorice și rotorice,
- pulsația electrică a tensiunii de alimentare, invers,
- numărul perechilor de poli, direct,
- alunecarea rotorului față de câmp.

La $s = 0$ rotorul se rotește sincron cu câmpul, nu se induce t.e.m. nu există curent în rotor ,deci cuplul $C = 0$.

Cuplul și alunecarea critică

La $s \rightarrow \infty$ rezistența $\frac{R'_R}{s} \rightarrow 0$ curentul în rotor este zero, deci cuplul $C = 0$.

Deci, în intervalul $0 \leq s < \infty$ cuplul are o valoare extremă.

Cuplul maxim se obține calculând : $\frac{dC}{ds} = 0$

Rezultă : alunecarea critică

$$s_k = \frac{c_S \cdot R'_R}{\pm \sqrt{R_S^2 + (X_{S\sigma} + c_S \cdot X'_{R\sigma})^2}}$$

și cuplul critic sau de răsturnare

$$C_k = \frac{p \cdot m_S}{\omega_S} \frac{U_S^2}{2 \cdot c_S} \frac{1}{R_S \pm \sqrt{R_S^2 + (X_{S\sigma} + c_S \cdot X'_{R\sigma})^2}}$$

Raportând cuplul la cuplul critic $\frac{C}{C_k}$

Variația cuplului cu alunecare

notând
$$\varepsilon = \frac{s_k \cdot R_S}{c_S \cdot R'_R} = \frac{R_S}{\pm \sqrt{R_S^2 + (X_{S\sigma} + c_S \cdot X'_{R\sigma})^2}}$$

Rezultă :

$$\frac{C}{C_k} = \frac{2 \cdot (1 + \varepsilon)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 \cdot \varepsilon}$$

Relația lui Kloss

La mașini mari se consideră

$$R_S \ll R_R$$

$$\varepsilon \approx 0$$

$$\frac{C}{C_k} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}$$

La $s \ll s_k$

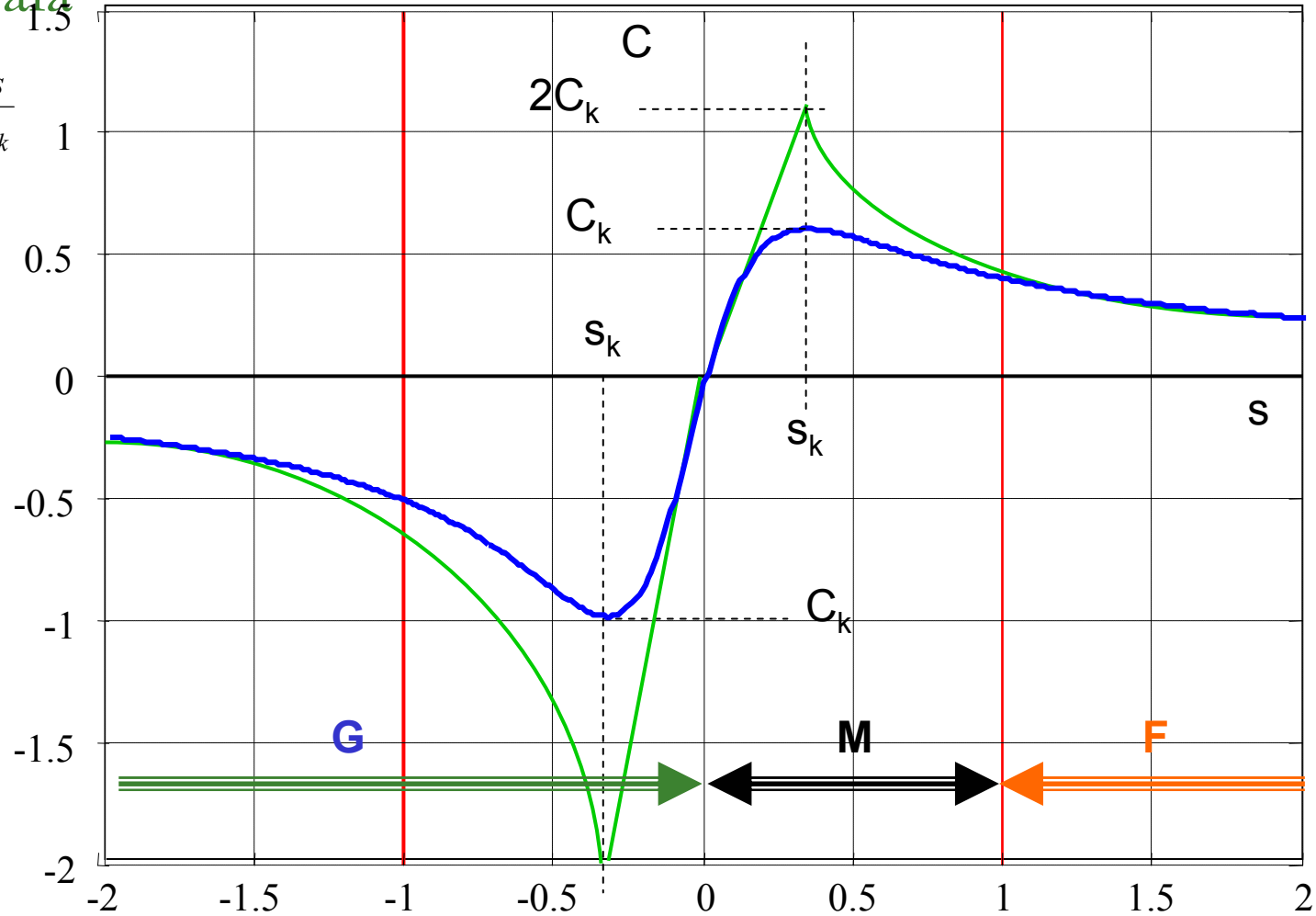
$$\frac{C}{C_k} \approx \frac{2}{\frac{s_k}{s}} = 2 \cdot \frac{s}{s_k}$$

La $s \gg s_k$

$$\frac{C}{C_k} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_k}} = 2 \cdot \frac{s_k}{s}$$

Variația cuplului cu alunecare - caracteristica mecanică naturală

$$\frac{C}{C_k} \cong \frac{2}{\frac{s_k}{s}} = 2 \cdot \frac{s}{s_k}$$



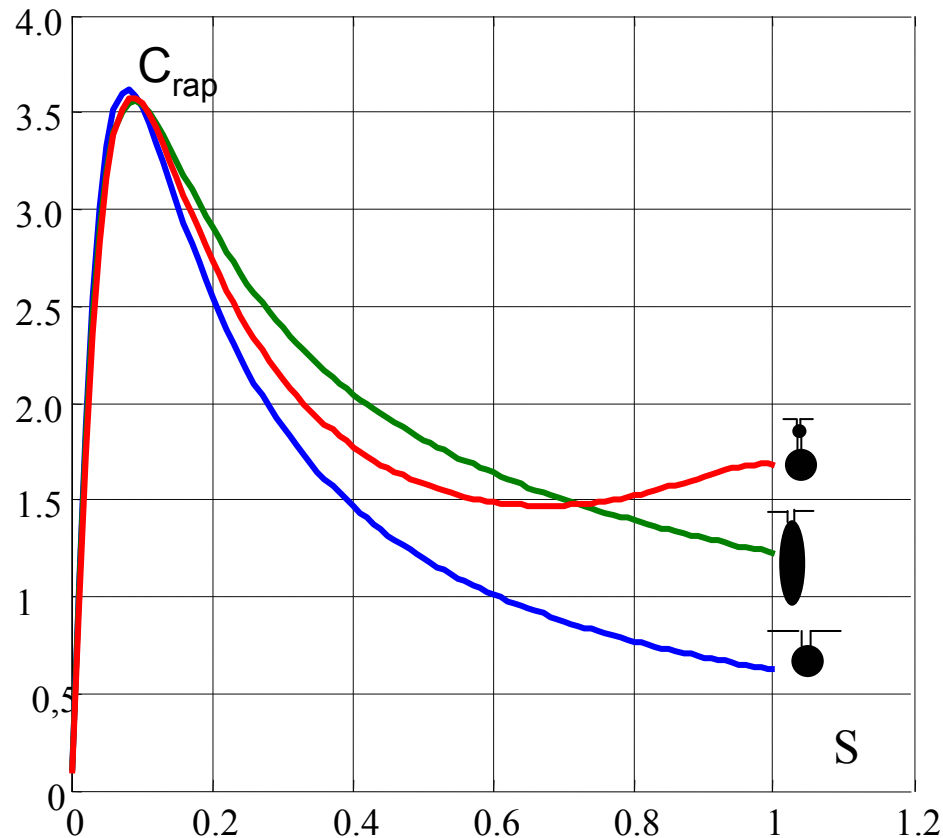
Capacitatea de supraîncărcare

$$\frac{C_k}{C_N} = 1.8 \div 3.5$$

Cuplul maxim și de pornire

Cuplul critic raportat

$$C_{krap} = \frac{C_k}{C_N} \approx 2 \div 3.5$$



Cuplul de pornire raportat

$$C_{prap} = \frac{C_p}{C_N} \approx 0.2 \div 2.5$$

Valorile limită ale cuplurilor depind
De tipul constructiv al rotorului