

## 5. ACȚIONĂRI ELECTROMECHANICE CU MOTOARE DE CURENT CONTINUU CU EXCITAȚIE SEPARATĂ

### 5.1. Ecuațiile diferențiale inițiale [16], [38], [40], [94], [97]

Acționările electromecanice cu m.c.c. cu excitație separată sau derivație se compun din mașina de lucru, mecanismul de transmisie și motorul de antrenare.

Pentru stabilirea modelelor abstracte ale acționării cu m.c.c. cu excitație separată se consideră că momentele de inerție, masele și cuplul static sunt raportate la arborele motorului (fig.5.1).

Considerând motorul de acționare ca obiect orientat se pot pune în evidență (fig.5.2) elementele vectorului variabilelor de comandă și vectorului variabilelor de ieșire.

$$u = \begin{bmatrix} u_a \\ R_s \\ u_e \\ R_c \\ m_s \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} \omega \\ \alpha \\ \varepsilon \\ m \end{bmatrix}$$

Ecuațiile diferențiale inițiale se obțin prin aplicarea teoremelor lui Kirchhoff în circuitul de excitație și în circuitul indusului la care se adaugă ecuația fundamentală a mișcării.

Rezultă:

$$u_e = (R_e + R_c) \cdot i_e + \frac{d}{dt}(L_e \cdot i_e)$$

Curentul de excitație  $i_e$  dă naștere fluxului total  $\varphi_t = L_e \cdot i_e$ .

Neglijând fluxul de scăpări se poate considera că fluxul util este

$$\varphi = f(i_e)$$

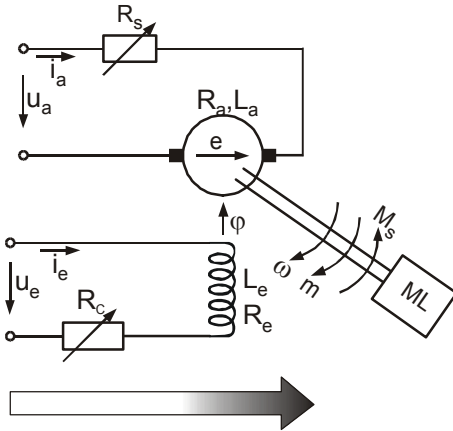


Fig. 5.1. Schema de principiu a acționării cu m.c.c. cu excitație separată.

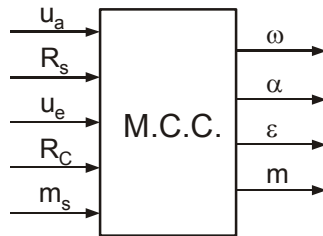


Fig. 5.2 M.c.c. cu excitație separată ca obiect orientat

Pentru circuitul indusului se obține ecuația:

$$u_a = (R_s + R_a) \cdot i_a + \frac{d}{dt}(L_a \cdot i_a) + e + \Delta u_p$$

unde:  $e = k \cdot \varphi \cdot \omega$  - tensiunea electromotoare;

$\Delta u_p$  - căderea de tensiune pe contactele perie – colector;

$$k = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a} - \text{constanta tensiunii electromotoare};$$

$\omega$  - viteza unghiulară a motorului.

Ecuția mișcării:

$$m - m_s = J \frac{d\omega}{dt};$$

Cuplul electromagnetic:  $m = k \cdot \varphi \cdot i_a$ ;

Spațiul unghiular:  $\alpha = \int \omega \cdot dt$ .

Considerând că inductivitățile  $L_e$  și  $L_a$  sunt constante și neglijând căderea de tensiune  $\Delta u_p$  ecuațiile diferențiale inițiale devin:

$$u_e = (R_e + R_c) \cdot i_e + L_e \frac{di_e}{dt};$$

$$u_a = (R_s + R_a) \cdot i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + k \cdot \varphi \cdot \omega;$$

$$m = m_s + J \frac{d\omega}{dt}; \quad m = k \cdot \varphi \cdot i_a; \quad \alpha = \int \omega \cdot dt .$$

## 5.2. Modele abstracte pentru analiza acționărilor electromecanice cu m.c.c. cu excitație separată

Modelele matematice pentru analiza acționărilor electromecanice rezultă din ecuațiile diferențiale inițiale și pot fi exprimate sub forma ecuațiilor diferențiale intrare – ieșire și intare – stare, sub forma ecuațiilor de stare sau a funcțiilor de transfer dacă se analizează regimul dinamic. Modelele matematice sau abstracte utilizate pentru analiza acționărilor electromecanice în regim staționar pot fi exprimate sub forma ecuațiilor algebrice.

Trecerea unei acționări dintr-o stare de echilibru energetic în altă stare de echilibru energetic, determinată de modificarea comenzilor sau perturbațiilor, este însoțită de variația mărimilor de stare și de ieșire ale acționării.

Regimul de funcționare în care una sau mai multe mărimi ale acționării variază în timp se numește regim dinamic sau regim tranzitoriu.

Modelele abstracte – matematice sau grafice – care descriu evoluția în timp a variabilelor de stare și ieșire pe durata regimului tranzitoriu se numesc modele dinamice.

Modelele abstracte care descriu dependența dintre variabilele acționării – altele decât timpul se numesc modele abstracte statice.

Modelele abstracte dinamice servesc la stabilirea modului în care evoluează viteza, curentul, cuplul motor în timpul regimului tranzitoriu. Rezultatele obținute servesc la alegerea corectă a puterii motorului electric, la alegerea și reglarea elementelor de comandă și protecție, la identificarea metodelor de reducere a consumului de energie.

Modelele abstracte dinamice se obțin din ecuațiile diferențiale inițiale. În ipoteza că

$$L_a = \text{ct.}, L_e = \text{ct.}, \Delta u_p = 0$$

ecuațiile diferențiale inițiale devin:

$$u_e = R_e + L_e \frac{di_e}{dt};$$

$$\varphi = f(i_e);$$

$$u_a = (R_s + R_a) \cdot i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e;$$

$$m = k \cdot \varphi \cdot \omega; \quad m - m_s = J \frac{d\omega}{dt};$$

$$m = k \cdot \varphi \cdot i_a; \quad \alpha = \int \omega \cdot dt.$$

Ecuațiile diferențiale inițiale conțin neliniarități determinate de caracteristicile statice - curba de magnetizare și neliniarități de tip produs ( $\varphi \cdot i_a$ ) respectiv ( $\varphi \cdot \omega$ ).

Deoarece utilizarea modelelor abstracte neliniare presupune un formalism matematic complicat fără ca rezultatele practice să conducă la performanțe deosebite, se pune problema liniarizării ecuațiilor diferențiale inițiale.

Eliminarea neliniarității de tip caracteristică statică se face prin liniarizarea curbei de magnetizare, respectiv considerând că acționarea funcționează pe porțiunea cuprinsă între origine și punctul ( $I_{eN}, \Phi_N$ ), sau prin liniarizarea pe porțiuni (fig. 5.3).

Eliminarea neliniarității de tip produs se face considerând că  $u_e = U_e$  și deci  $i_e = I_e$  respectiv  $\varphi = \Phi$ , adică acestea au valori constante.

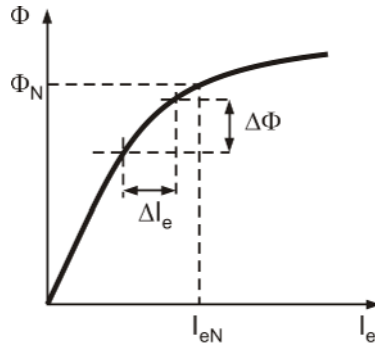


Fig. 5.3. Liniarizarea curbei de magnetizare.

### 5.2.1. Ecuația diferențială intrare - ieșire și intrare - stare

Presupunând că acționarea este comandată prin indus în prezența perturbației principale  $M_s$  și la flux nominal, rezultă:

$$u_a = R \cdot i_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + e$$

unde:  $R = R_a + R_s$  ;  
 $e = k \cdot \phi_N \cdot \omega$  ;

Rezultă cuplul electromagnetic:

$$m = k \cdot \phi_N \cdot i_a$$

care învinge cuplul static și asigură cuplul dinamic:

$$J \frac{d\omega}{dt} = m - m_s$$

Explicitând curentul:

$$i_a = \frac{1}{k\phi_N} m_s + \frac{J}{k\phi_N} \frac{d\omega}{dt}$$

făcând derivata acestuia în raport cu timpul,

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{k\phi_N} \frac{dm_s}{dt} + \frac{J}{k\phi_N} \frac{d^2\omega}{dt^2}$$

și înlocuind în ecuația de echilibru a tensiunilor din circuitul indusului se obține ecuația diferențială intrare – ieșire:

$$\frac{L_a \cdot J}{(k\phi_N)^2} \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{R \cdot J}{(k\phi_N)^2} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{u_a}{k\phi_N} - \frac{R \cdot m_s}{(k\phi_N)^2} - \frac{L_a}{(k\phi_N)^2} \frac{dm_s}{dt}$$

Notând cu:

$T_a = \frac{L_a}{R}$  - constanta electromagnetică de timp, iar  $L_a$  inductivitatea indusului poate fi calculată cu relația:

$$L_a = \beta \cdot \frac{R_a}{p \cdot \Omega_N}$$

unde:  $p$  - numărul de perechi de poli;

iar  $\beta = 0,26 \dots 0,32$  pentru m.c.c. cu excitație separată compensate;

$\beta = 0,32 \dots 0,42$  pentru m.c.c. fără înfășurarea de compensație, rapide.

$\beta = 0,42 \dots 0,62$  pentru m.c.c. fără înfășurare de compensare, de construcție normală.

$$T_{em} = \frac{JR}{(k\phi_N)^2} - \text{constanta electromecanică de timp};$$

ecuația diferențială intrare – ieșire devine:

$$T_a T_{em} \frac{d^2\omega}{dt^2} + T_{em} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{u_a}{k\phi_N} - \frac{R}{(k\phi_N)^2} (m_s + T_a \frac{dm_s}{dt})$$

Similar se obține ecuația diferențială intrare – stare

$$T_a T_{em} \frac{d^2 i_a}{dt^2} + T_{em} \frac{d i_a}{dt} + i_a = \frac{m_s}{k\phi_N} - \frac{J}{(k\phi_N)^2} \frac{d u_a}{dt}.$$

### 5.2.2. Funcții de transfer

Aplicând transformata Laplace ecuațiilor diferențiale inițiale se obțin ecuațiile operaționale inițiale:

$$U_e(s) = R_e I_e(s) + L_e s I_e(s) - L_e I_e(0_+)$$

$$\phi(s) = c I_e(s)$$

$$U(s) = E(s) + I_a(s) - L_a I_a(0_+)$$

$$E(s) = k\phi\Omega(s) + k\Omega\phi(s)$$

$$M(s) - M_S(s) = J s \Omega(s) - J \omega(0_+)$$

$$M(s) = k\phi I_a(s) + k I_a \phi(s)$$

Considerând ca variabilă de intrare tensiunea de alimentare și ca variabile de ieșire viteza unghiulară, se obține ecuația operațională intrare – ieșire:

$$(T_a T_{em} s^2 + T_{em} s + 1) \Omega(s) = \frac{1}{(k\phi_N)} U(s) - \frac{R}{(k\phi_N)^2} (1 + s \cdot T_a) M_S(s)$$

Ținând seama de definiția funcției de transfer rezultă funcția de transfer a m.c.c. la comanda prin indus

$$G_1(s) = \frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{K_m}{T_a T_{em} s^2 + T_{em} s + 1};$$

$$K_m = \frac{1}{k\phi_N};$$

respectiv funcția de transfer la modificarea cuplului rezistent (perturbație):

$$G_2(s) = \frac{\Omega(s)}{M_S(s)} = -\frac{\frac{R}{(k\phi_N)^2} (1 + sT_a)}{T_a T_{em} s^2 + T_{em} s + 1}$$

Deoarece în mod obișnuit comanda acționării se face în prezența cuplului static deci acționarea, în cel mai simplu caz, are două variabile de intrare și o variabilă de ieșire modelul operațional poate fi exprimat sub formă matriceală:

$$\Omega(s) = [G_1(s) \ G_2(s)] \cdot \begin{bmatrix} U(s) \\ M_S(s) \end{bmatrix}$$

Considerând ca variabilă de intrare tensiunea de alimentare a indusului și ca variabilă de ieșire curentul din indus se obține ecuația operațională:

$$(T_a T_{em} s^2 + T_{em} s + 1) I_a(s) = \frac{1}{R_a} T_{em} s U(s) + \frac{1}{k\phi_N} M_S(s)$$

Rezultă imediat funcțiile de transfer

$$G_3(s) = \frac{1}{R_a} \frac{s T_{em}}{T_a T_{em} s^2 + T_{em} s + 1};$$

$$G_4(s) = \frac{\frac{1}{k\phi_N}}{T_a T_{em} s^2 + T_{em} s + 1};$$

Modelul operațional sub formă matriceală

$$I_a(s) = [G_3(s) \ G_4(s)] \cdot \begin{bmatrix} U(s) \\ M_S(s) \end{bmatrix}.$$

Din analiza acestor modele abstracte rezultă că acționarea cu motor de curent continuu cu excitație separată este un obiect de ordinul II, putând avea o comportare aperiodică sau oscilatorie după cum rădăcinile ecuației caracteristice

$$T_a T_{em} s^2 + T_{em} s + 1 = 0$$

sunt reale și distincte sau sunt complexe.

Punând condiția ca discriminantul

$$\Delta = T_{em}^2 - 4T_a T_{em} > 0$$

rezultă că dacă  $T_{em} > 4T_a$  comportarea este aperiodică.

Dacă  $T_a \ll T_{em}$  atunci  $T_a \approx 0$ , ecuația caracteristică devine:

$$T_{em} \cdot s + 1 = 0$$

iar acționarea se comportă ca un element aperiodic de ordinul I.

### 5.3. Caracteristicile statice mecanice și electromecanice [24],[84]

Pentru analiza comportării acționării cu motoare de curent continuu cu excitație separată în regim staționar se particularizează  $M_d = 0$ , adică  $M = M_s$ , iar ecuațiile de funcționare devin:

$$\begin{aligned} U_e &= (R_c + R_e)I_e \\ \phi &= f(I_e) \\ U_a &= (R_a + R_s)I_a + E \\ E &= k\phi\Omega \\ M &= M_s \\ M &= k\phi I_a \end{aligned}$$

Din acest sistem rezultă ecuația caracteristicilor electromecanice definite ca dependența dintre viteza unghiulară  $\Omega$  și curentul din indus  $\Omega = f(I_a)$

$$\Omega = \frac{U}{k\phi} - \frac{R_a + R_s}{k\phi} I_a$$

respectiv caracteristica mecanică definită ca dependența dintre viteza unghiulară  $\Omega$  și cuplul la arbore și exprimată analitic prin relația:

$$\Omega = \frac{U}{k\phi} - \frac{R_a + R_s}{(k\phi)^2} M$$

Se observă că aceste caracteristici sunt drepte cu panta negativă care pot fi trasate prin două puncte.

Notând:

$$\Omega_0 = \frac{U}{k\phi} \quad \text{viteza de funcționare în gol ideal,}$$

$$\Delta\Omega_S = \frac{R_a + R_S}{k\phi} I_a$$

sau

$$\Delta\Omega_S = \frac{R_a + R_S}{(k\phi)^2} M_s \quad \text{căderea statică de viteză,}$$

ecuația caracteristicilor statice mecanice și electromecanice poate fi scrisă sub forma

$$\Omega = \Omega_0 - \Delta\Omega_S.$$

### 5.3.1. Determinarea parametrilor corespunzători caracteristicii mecanice naturale

Funcționarea în regim staționar a acționării cu m.c.c. cu excitație separată este descrisă de ecuația caracteristicii statice, definită ca dependența dintre viteza unghiulară  $\Omega$  (fig.5.4) și cuplul la arbore.

Ecuația algebrică

$$\Omega = \frac{U_a}{k\phi} - \frac{R_a + R_S}{(k\phi)^2} M$$

se numește caracteristică mecanică iar ecuația

$$\Omega = \frac{U_a}{k\phi} - \frac{R_a + R_S}{k\phi} \cdot I_a$$

se numește caracteristică electromecanică.

Caracteristica mecanică naturală se obține pentru

$$U = U_N, R_S = 0, \Phi = \Phi_N,$$

respectiv

$$\Omega = \frac{U_N}{k\phi_N} - \frac{R_a}{(k\phi_N)^2} M$$

Parametrii acesteia sunt tensiunea nominală  $U_N$ , fluxul nominal  $\Phi_N$  și rezistența indusului  $R_a$ .

Unii dintre aceștia sunt indicați în catalogul motorului sau pe plăcuța cu datele nominale iar alții pot fi calculați.

Astfel, în catalog se indică:

- $U_N$  [V] - tensiunea nominală;

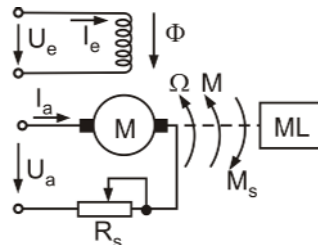


Fig.5.4. Schema de principiu a acționării cu m.c.c. cu excitație separată funcționând în regim staționar



- $I_N$  [A] - curentul nominal;
- $P_N$  [kW] - puterea nominală;
- $n_N$  [rot/min] - turația nominală;
- $U_{eN}$  - tensiunea nominală a înfășurării de excitație (dacă nu este indicată se consideră egală cu  $U_N$ );
- $R_e$  - rezistența înfășurării de excitație;
- $R_a$  - rezistența înfășurării indusului.

Dacă nu se indică valoarea rezistenței  $R_a$  ea poate fi măsurată sau, în lipsa motorului, calculată din ipoteză că pierderile prin efect Joule pe  $R_a$  sunt jumătate din pierderile nominale totale

$$R_a = 0,5p_N$$

Știind că  $\eta_N = \frac{P_{1N} - P_N}{P_{1N}}$

unde:  $P_{1N} = U_N \cdot I_N$  este puterea electrică nominală.

Rezultă  $R_a = 0,5(1 - \eta_N) \cdot R_N$

unde  $R_N = \frac{U_N}{I_N}$  - rezistența nominală.

Produsul  $k\phi_N$  se calculează din ecuația cracteristicii electromecanice naturale particularizată pentru punctul nominal de funcționare:

$$k\phi_N = \frac{U_N - R_a \cdot I_N}{\Omega_N} \quad [\text{Wb}];$$

unde:  $\Omega_N = \frac{2\pi n_N}{60}$  [rad/s] - viteza unghiulară nominală.

Viteza de funcționare în gol ideal  $\Omega_0$  se poate calcula cu relația:

$$\Omega_0 = \frac{U_N}{k\phi_N} \quad [\text{rad} / \text{s}]$$

sau poate fi determinată experimental (fig. 5.5).

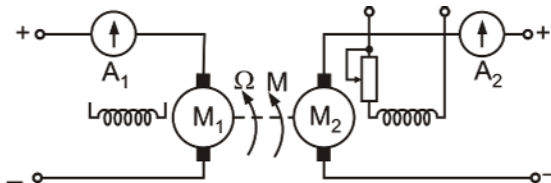


Fig. 5.5. Schema de principiu pentru determinarea experimentală a vitezei de funcționare în gol ideal.

### 5.3.2. Caracteristica electromecanică și mecanică artificială de tensiune

Caracteristica artificială de tensiune se definește ca dependența  $\Omega = f(I)$  sau  $\Omega = f(M)$  obținută pentru  $U = U_x$ ,  $R_s = 0$ ,  $\phi = \phi_N$ .

Rezultă:

$$\Omega = \frac{U_x}{k\phi_N} - \frac{R_a}{k\phi_N} \cdot I_a$$

respectiv,

$$\Omega = \frac{U_x}{k\phi_N} - \frac{R_a}{(k\phi_N)^2} \cdot M.$$

Viteza de funcționare în gol ideal (fig. 5.6):

$$\Omega_{0u} = \frac{U_x}{k\phi_N}$$

poate fi mai mare decât  $\Omega_0$  dacă  $U_x > U_N$  sau mai mică decât  $\Omega_0$  dacă  $U_x < U_N$ .

Ea se poate calcula din relația de definiție sau din raportul:

$$\frac{\Omega_{01}}{\Omega_{02}} = \frac{U_1}{U_2}$$

Majoritatea motoarelor electrice de acționare sunt proiectate pentru a funcționa la  $U \leq U_N$  sau la tensiuni majorate față de  $U_N$  cu câteva procente; există și motoare speciale care pot funcționa la tensiune mărită.

Căderea statică de viteză

$$\Delta\Omega_s = \frac{R_a}{(k\phi_N)^2} M$$

nu depinde de tensiune și este egală cu căderea statică corespunzătoare caracteristicii mecanice naturale la același cuplu. Reprezentarea grafică se face considerând punctul de funcționare în gol ideal ( $0, \Omega_{0u}$ ) și punctul de funcționare la sarcină nominală ( $M_N, \Omega_{0u} - \Delta\Omega_{SN}$ ).

Și această caracteristică statică este rigidă, coeficientul de rigiditate fiind mai mic de 10 %.

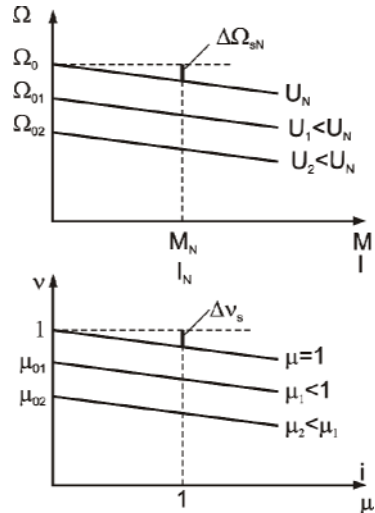


Fig. 5.6. Reprezentarea grafică a caracteristicilor mecanice artificiale de tensiune.

### 5.3.3. Caracteristica electromecanică și mecanică artificială reostatică

Caracteristica artificială reostatică se definește ca dependența  $\Omega = f(I)$  sau  $\Omega = f(M)$  obținută pentru  $U = U_N$ ,  $R_s \neq 0$ ,  $\phi = \phi_N$ .

Rezultă:

$$\Omega = \frac{U_N}{k\phi_N} - \frac{R_a + R_s}{k\phi_N} \cdot I_a$$

respectiv,

$$\Omega = \frac{U_N}{k\phi_N} - \frac{R_a + R_s}{(k\phi_N)^2} \cdot M.$$

Viteza de funcționare în gol ideal (fig.5.7)

$$\Omega_0 = \frac{U_N}{k\phi_N}$$

este egală cu cea corespunzătoare caracteristicii mecanice naturale.

Căderea statică de viteză

$$\Delta\Omega_{SX} = \frac{R_a + R_s}{(k\phi_N)^2} M$$

crește odată cu mărirea rezistenței suplimentare.

Dacă se notează:

$$\Delta\Omega_{S1} = \frac{R_a + R_{S1}}{(k\phi_N)^2} M;$$

$$\Delta\Omega_{S2} = \frac{R_a + R_{S2}}{(k\phi_N)^2} M$$

rezultă că 
$$\frac{\Delta\Omega_{S1}}{\Delta\Omega_{S2}} = \frac{R_a + R_{S1}}{R_a + R_{S2}}$$

Caracteristicile mecanice reostatice sunt drepte concurente în punctul de funcționare în gol ideal, mai înclinate decât caracteristica mecanică naturală cu cât rezistența suplimentară este mai mare. În funcție de valoarea lui  $R_s$  aceste caracteristici pot fi semirigide sau moi.

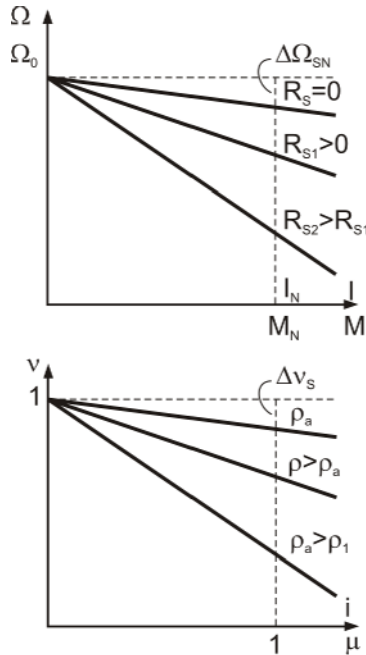


Fig.5.7. Reprezentarea grafică a caracteristicilor mecanice artificiale reostatice

Reprezentarea grafică (fig.5.7) se obține considerând punctul de funcționare în gol ideal ( $0, \Omega_0$ ) și punctul de funcționare la sarcină nominală ( $M_N, \Omega = \Omega_0 - \Delta\Omega_{SX}$ ).

Căderea statică de viteză se poate calcula din relația:

$$\Delta\Omega_{SX} = \frac{R_a + R_{S1}}{R_a} \Delta\Omega_{SN}$$

unde:  $\Delta\Omega_{SN}$  - căderea statică de viteză corespunzătoare cuplului nominal pe caracteristica mecanică naturală.

### 5.3.4. Caracteristica electromecanică și mecanică artificială de flux

Caracteristica artificială de flux se definește ca dependența  $\Omega = f(I)$  sau  $\Omega = f(M)$  obținută pentru  $U = U_N, R_S = 0, \phi \neq \phi_N$ .

Rezultă:

$$\Omega = \frac{U_N}{k\phi_X} - \frac{R_a}{k\phi_X} \cdot I_a \quad \text{respectiv:} \quad \Omega = \frac{U_N}{k\phi_X} - \frac{R_a}{(k\phi_X)^2} \cdot M$$

Deoarece fluxul nominal, prin calculul de proiectare, corespunde cotului curbei de magnetizare, rezultă că prin creșterea curentului de excitație nu se obține o modificare esențială a fluxului, în schimb cresc pierderile prin efect Joule. Din acest considerent  $\phi_x < \phi_N$ .

Se observă că viteza de funcționare în gol ideal

$$\Omega_{0\phi} = \frac{U_N}{k\phi_X}$$

cât și căderea statică de viteză

$$\Delta\Omega_{SX} = \frac{R_a}{k\phi_X} I; \quad \Delta\Omega_{SX} = \frac{R_a}{(k\phi_X)^2} M$$

cresc cu diminuarea fluxului.

Considerând fluxurile  $\phi_1$  și  $\phi_2$  se poate scrie că:

$$\frac{\Omega_{01}}{\Omega_{02}} = \frac{\phi_2}{\phi_1}; \quad \frac{\Delta\Omega_{S1}}{\Delta\Omega_{S2}} = \left( \frac{\phi_2}{\phi_1} \right)^2$$

Rezultă că aceste caracteristici statice sunt plasate deasupra caracteristicii mecanice naturale și sunt mai înclinate decât aceasta. Din punct de vedere al rigidității pot fi considerate semirigide.

Reprezentarea grafică (fig.5.8) se obține considerând două puncte: punctul de funcționare în gol ideal ( $0, \Omega_{0\phi}$ ) și punctul de

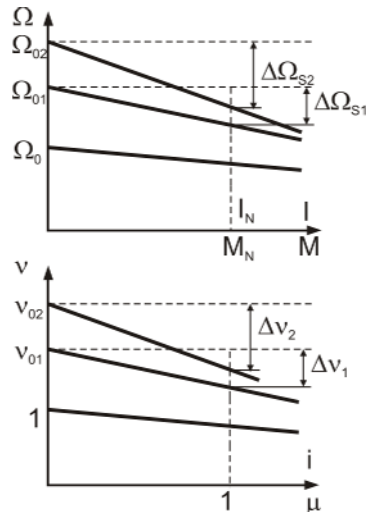


Fig.5.8. Reprezentarea grafică a caracteristicii mecanice artificiale de flux

funcționare în sarcină ( $M_N, \Omega_{0\phi} - \Delta\Omega_{sx}$ ).

La majoritatea mașinilor  $\phi_{\min} = 0,5\phi_N$ . Sub această limită mașina demagnetizându-se și pentru un anumit cuplu de sarcină  $M_s$  curentul prin circuitul indusului crește inadmisibil. Există și motoare electrice care admit  $\phi_{\min} = (0,2 \dots 0,3)\phi_N$ .

Caracteristicile electromecanice sau mecanice servesc la studiul pornirii, reglării vitezei, frânării și reversării de sens. Practic se pot întâlni atât caracteristici statice definite ca mai sus cât și combinații ale acestora.

#### **5.4. Analiza metodelor și determinarea parametrilor pentru pornirea acționărilor electromecanice cu motoare de curent continuu cu excitație separată [35]**

Din ecuația de echilibru a tensiunilor din circuitul indusului  $U_N = R_a I_a + k\phi_N \Omega$  rezultă că la viteză nulă și la viteze mici corespunzătoare regimului de pornire, curentul din indusul motorului ia valori mari:

$$I_a = \frac{U_N}{R_a} = (10 \dots 20) I_N$$

Apariția acestui curent are următoarele implicații:

- distrugerea izolației înfășurării motorului, a aparatelor de măsură sau a aparatelor de comandă datorită căldurii produse;
- înrăutățirea condițiilor de comutație;
- topirea lipiturilor conductoarelor la colector;
- apariția unui cuplu sub formă de impuls care poate duce la deteriorări mecanice ale motoarelor, ale mașinii de lucru și ale mecanismului de transmisie;
- perturbarea celorlalți consumatori prin căderea de tensiune din rețea.

Având în vedere aceste implicații s-au imaginat mai multe metode de pornire care urmăresc în principal reducerea curentului în momentul inițial și ținând seama de cuplul static în momentul pornirii.

Din acest punct de vedere se consideră că pornirea poate avea loc:

- în gol, dacă  $M_s = 0$  (mașini unelte);
- la jumătate din sarcina nominală în cazul pompelor centrifugale, ventilatoarelor;
- la sarcină nominală, în cazul acționărilor benzilor transportoare, instalații de ridicat, pompe cu piston, vehicule de transport, etc.;
- la sarcină mai mare decât cea nominală în cazul calandrelor, morilor cu bile, etc.

##### **5.4.1 Pornirea prin cuplare directă la rețea a indusului**

Schema de principiu (fig.5.9) prin care se asigură pornirea este simplă, aparatul de comandă și protecție este redus.

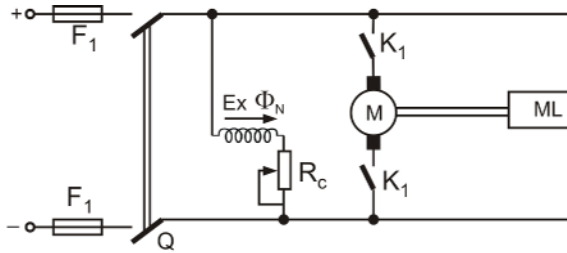


Fig.5.9. Schema electrică de principiu pentru pornirea prin cuplare directă la rețea.

Pentru pornirea motorului se închide mai întâi întreruptorul cu pârghie Q prin care se asigură alimentarea înfășurării de excitație și se reglează curentul la valoarea nominală. Apoi se comandă manual sau automat închiderea contactelor K1 care asigură alimentarea înfășurării indusului. În planul fazelor pornirea are loc pe caracteristica mecanică naturală (fig.5.10).

Având în vedere valoarea mare a curentului de pornire și implicațiile acestuia asupra acționării, metoda se folosește la acționările cu motoare de putere medie ce pornesc în gol. La acestea rezistența indusului este mare astfel încât  $I_p = (8 \dots 10)I_N$ , momentul de inerție este mic, timpul de pornire este mic 0,1- 0,5 sec, iar cantitatea de căldură dezvoltată în rotor este redusă.

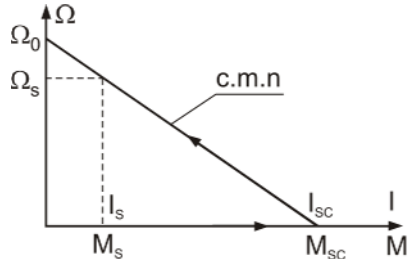


Fig.5.10. Deplasarea punctului de funcționare la pornirea prin cuplare directă la rețea

#### 5.4.2. Determinarea parametrilor pentru pornirea pe caracteristici artificiale reostatice

Pentru limitarea curentului în timpul pornirii acționărilor cu motoare de curent continuu de putere mare sau la care cuplul static este diferit de zero se introduc rezistențe suplimentare în circuitul indusului. Constructiv, reostatele de pornire pot fi cu lichid sau metalice. În majoritatea aplicațiilor industriale reostatele de pornire sunt metalice, formate din mai multe trepte, răcite cu aer sau cu ulei.

Pentru pornirea reostatică se închide întrerupătorul cu pârghie Q prin care se asigură alimentarea înfășurării de excitație (fig. 5.11). Se reglează reostatul de câmp astfel încât curentul de excitație să aibă valoarea nominală. Se comandă închiderea contactelor K și indusul înseriat cu rezistența

$$R_1 = r_1 + r_2 + r_3 + R_a$$

este alimentat cu tensiunea nominală.

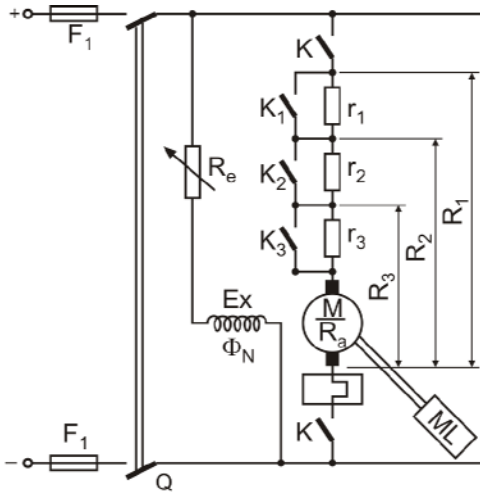


Fig.5.11. Schema electrică pentru pornirea reostatică a acționării cu motor de curent continuu cu excitație separată

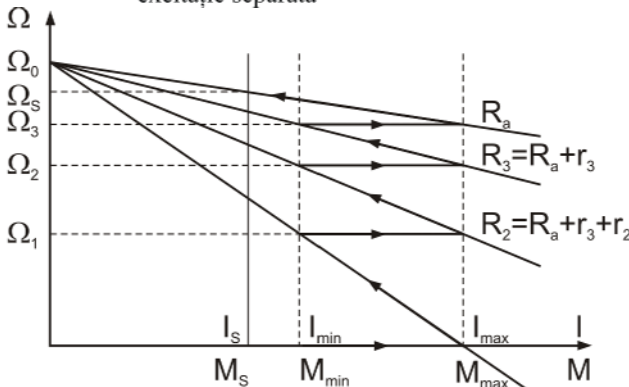


Fig.5.12. Deplasarea punctului de funcționare la pornirea reostatică

Curentul prin indus crește până la  $I_{\max} = \frac{U_N}{R_1}$ , viteza rămânând nulă.

Cuplul dezvoltat de motor crește la  $M_{\max}$  corespunzător intersecției caracteristicii mecanice cu dreapta  $\Omega = 0$  (fig.5.12).

Punctul de funcționare se deplasează pe această caracteristică reostatică, viteza crește iar cuplul scade.

La atingerea valorii  $M_{\min} > M_S$  respectiv realizarea vitezei  $\Omega_1$  se comandă închiderea contactului  $K_1$  care scurtcircuitază rezistența primei trepte de pornire  $r_1$ . Datorită inerției sistemului se consideră că punctul de funcționare trece la viteza

constantă pe caracteristica reostatică cu  $R_2=r_2+r_3+R_a$  aleasă astfel încât curentul, respectiv cuplul, să aibă valoarea  $I_{\max}$ , respectiv  $M_{\max}$ .

Punctul de funcționare se deplasează pe această caracteristică artificială până la atingerea cuplului minim sau a vitezei  $\Omega_2$  când se comandă închiderea contactului  $K_2$ . Acesta scurtcircuitează rezistența treptei  $r_2$  și punctul de funcționare trece pe caracteristica de rezistență  $R_3=r_3+R_a$ .

În final punctul de funcționare trece pe caracteristica mecanică naturală și se deplasează până la îndeplinirea condiției  $M=M_s$  unde se obține punctul de funcționare staționară. Din analiza făcută rezultă că la pornirea reostatică în trepte cuplul dezvoltat de motor se modifică permanent între două limite  $M_{\max}$  și  $M_{\min}$ .

Cele două limite trebuie alese astfel încât cuplul dezvoltat de motor să nu depășească valoarea cuplului maxim admisibil și să nu scadă sub valoarea cuplului static. De asemenea, în orice moment cuplul dezvoltat de motor trebuie să învingă cuplul static și să asigure cuplul dinamic necesar accelerării maselor astfel încât:

$$M_{\text{pmed}} = M_s + J\varepsilon_{\text{med}}$$

unde:  $\varepsilon_{\text{med}}$  - accelerația medie la pornire.

Cuplul mediu de pornire se consideră media geometrică dintre cele două limite:

$$M_{\text{pmed}} = \sqrt{M_{\min} \cdot M_{\max}}$$

La proiectarea acționării cu motoare de curent continuu cu excitație separată și pornire reostatică se pune problema determinării numărului de trepte și alegerea din catalog a elementelor rezistive necesare.

În multe aplicații practice numărul de trepte se impune sau se alege comparativ cu alte acționări similare.

### 5.4.3. Pornirea pe caracteristici de tensiune

La acționările de putere mare și cu porniri frecvente pierderile pe reostatul de pornire sunt importante. Aceasta a impus, în condițiile tehnologice actuale, pentru o serie de instalații ce necesită și reglare de viteză, ca pornirea să se facă prin alimentarea indusului motorului de la o sursă de tensiune variabilă (fig.5.13) care poate fi: generator de curent continuu, mașină electrică, amplificatoare, amplificator magnetic și redresor necomandat, variator de tensiune continuă, redresor comandat. La aceste surse tensiunea poate fi

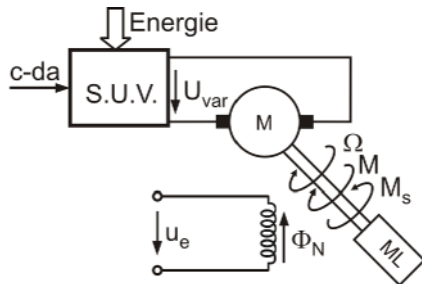


Fig.5.13. Schema electrică pentru pornirea cu tensiune variabilă a acționărilor electro-mecanice cu m.c.c. cu excitație separată.