

CAP. 13. ACȚIONAREA PRIN SERVOMOTOARE DE CURENT CONTINUU

13.1 Introducere

Acționarea electrică ocupă principalul loc în acționarea roboților industriali. Acest lucru este explicabil prin multitudinea facilităților oferite de acest tip de acționare.

Servomotorul de curent continuu este la ora actuală pe primul loc în „*topul*” servomotoarelor din robotică. Principalele inconveniente privind utilizarea acestui servomotor se referă la greutatea relativ ridicată a acestuia raportat la puterea dezvoltată. Masa servomotorului nu poate fi redusă peste o anumită treaptă deoarece carcasa, care este componenta preponderentă la masa servomotorului modern, joacă un rol esențial în închiderea fluxului magnetic.

În figura 13.1 se prezintă, principiul de funcționare al motorului de curent continuu.

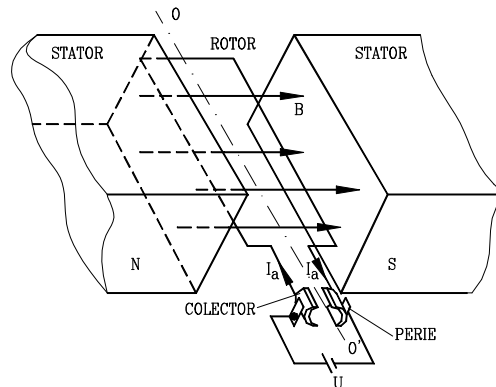


Fig. 13.1

Forța electromagnetică, dezvoltată asupra cadrului care se găsește în câmpul magnetic \mathbf{B} și care este parcurs de curentul \mathbf{I}_a , generează cuplul electromagnetic \mathbf{M} . Acest cuplu electromagnetic pune în mișcare de rotație, în jurul axei OO' , cadrul care se identifică cu rotorul motorului, dacă este superior cuplului rezistent.

O secțiune transversală printr-un motor de curent continuu clasic este prezentată în figura 13.2. Se remarcă cele două componente principale:

- a) **inductorul** ca și element fix este constituit din elemente constructive

principale: carcasa (jugul statoric), polii de excitație și înfășurarea electrică de c.c. sau magneții permanenți, polii de comutație (auxiliari) și înfășurarea corespunzătoare, scuturile frontale, sistemul perii și portperii. Inductorul asigură existența, în circuitul magnetic al mașinii, a câmpului magnetic de excitație. Îmbunătățiri a calității servomotoarelor au fost obținute, în ultima perioadă, prin utilizarea magneților în locul înfășurărilor de excitație.

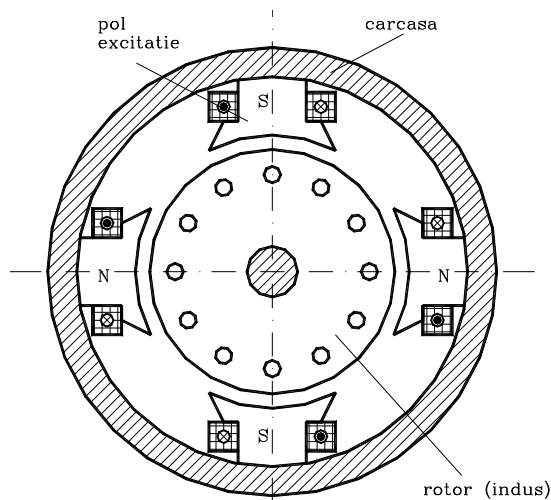


Fig. 13.2

b) Indusul se poate realiza într-o construcție clasică sau fără „fier”.

Armătura rotorică clasică, pentru motoare uzuale, se bazează în general pe tablă silicioasă laminată la cald. Crestăturile sunt deschise pentru a reduce efectele negative ale comutației. Armătura fără crestături este realizată din tole de aliaj cobalt fier. Armătura fără fier este realizată prin turnare în matrițe închise sau deschise, din țesătură de fibră de sticlă împregnată cu rășini epoxidice.

Înfășurarea indusului, parcursă de curentul I_a , este realizată în general din sârmă de cupru. Firma AXEM a înlocuit conductoarele de cupru prin conductoare de aluminiu ceea ce a determinat reducerea momentului de inerție rotoric de aproape 3 ori.

În figura 13.3 sunt reprezentate schemele principale ale servomotoarelor de c.c. cu rotor cilindric (a), cu rotor în formă de pahar (b) și cu întrefier axial (c).

În funcție de modul de conectare electrică a înfășurării inductoare se pot menționa motoarele cu excitație separată, paralelă și serie. Primele două variante sunt cele mai răspândite și cu aplicabilitatea cea mai largă. În robotică se utilizează în general servomotoare cu excitația prin magneți permanenți. Se utilizează în construcția acestor motoare una din categoriile de magneți Alnico, pe bază de ferite sau pe bază de pământuri rare.

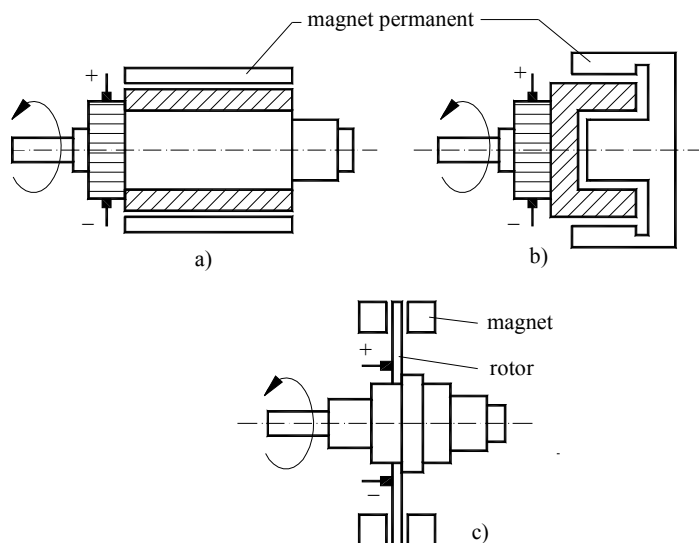


Fig.13.3

13.2 Ecuațiile și caracteristicile mecanice ale servomotorului de curent continuu

Schemele echivalente ale unor servomotoare de curent continuu sunt prezentate în figura 13.4 (a - m.c.c. cu excitație electromagnetică separată; b - m.c.c. cu excitație prin magneți permanenți; c - m.c.c. cu excitație paralelă; d - m.c.c. cu excitație serie).

Notațiile din figură au următoarele semnificații:

- U_2 – tensiunea rețelei de alimentare;
- U_e – tensiunea circuitului de excitație;
- I_1, I_2 – curentul în circuitul inductor și respectiv cel al indusului;
- R_A, L_A – rezistența și inductivitatea indusului;
- R_e, L_e – rezistența și inductivitatea circuitului de excitație;
- R – rezistența conectată în serie cu indusul;
- E – tensiunea electromotoare indusă;
- Ω - viteza unghiulară a rotorului.

Ecuația tensiunilor electrice pentru circuitul indusului (motor cu excitație separată) se poate scrie sub forma:

$$u_2 = e + (R_A + R) \cdot i_2 + L_A \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (13.1)$$

unde tensiunea electromotoare indusă este dată de relația ($K_E = k \cdot \Phi$):

$$K_e = K_E \cdot \Omega \quad (13.2)$$

K_E reprezentând constanta electrică a mașinii.

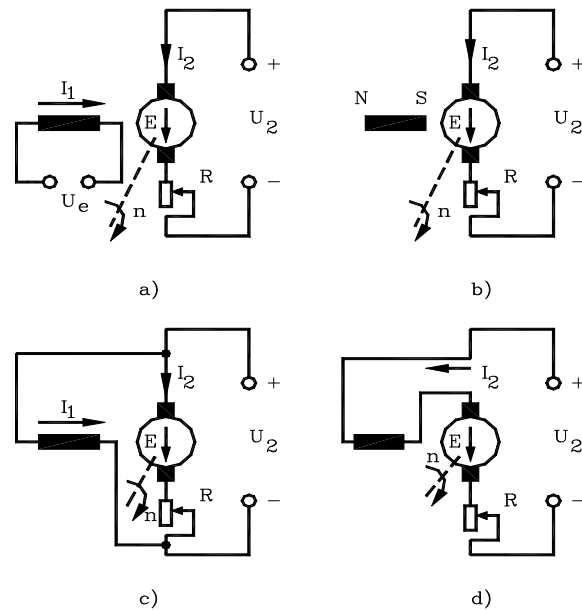


Fig. 13.4

Pentru regim staționar ecuația pentru tensiuni devine:

$$U_2 = (R + R_A) \cdot I_2 + K_E \cdot \Omega \quad (13.3)$$

Ținând cont că puterea electromagnetică a motorului este:

$$P = E \cdot I_2 \quad (13.4)$$

iar cuplul electromagnetic se exprimă prin relația:

$$M = k \cdot \Phi \cdot I_2 = K_E \cdot I_2 \quad (13.5)$$

relația (13.3) devine după transformări:

$$\Omega = \frac{U_2}{K_E} - \frac{R + R_A}{K_E^2} \cdot M \quad (13.6)$$

Relația anterioară reprezintă *ecuația caracteristicii mecanice a motorului cu excitație separată și în derivație*. Această relație scoate în evidență posibilitățile de a regla viteza unghiulară a rotorului:

- prin modificarea tensiunii de alimentare U_2 a indusului;
- prin modificarea rezistenței electrice R , intercalate în circuitul indusului.

Observația 1: relația (13.6) este determinată în condițiile neglijării reacției indusului și a căderii de tensiune la perii.

Observația 2: având în vedere faptul că servomotoarele electrice utilizate în robotică sunt în general cu excitație prin magneți permanenți, nu am luat în considerare și posibilitatea reglării vitezei prin circuitul inductor.

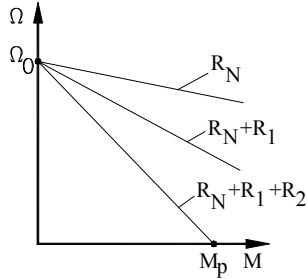


Fig. 13.5

Constanta electrică a mașinii K_E , corespunzătoare fluxului magnetic nominal, se poate determina din relația (13.5) și (13.6) pentru valorile nominale:

$$K_E = \frac{U_{2N} - R_A \cdot I_{2N}}{\Omega_N} \quad (13.7)$$

Notând viteza de mers în gol prin termenul:

$$\Omega_0 = \frac{U_2}{K_E} \quad (13.8)$$

se pot reprezenta caracteristicile mecanice artificiale pentru diferite valori ale rezistenței R (fig. 13.5) conectate în circuitul indusului.

Coordonata M_p poartă denumirea de *cuplu de pornire* și este dat de expresia:

$$M_p = \frac{K_E \cdot U_2}{R + R_A} \quad (13.9)$$

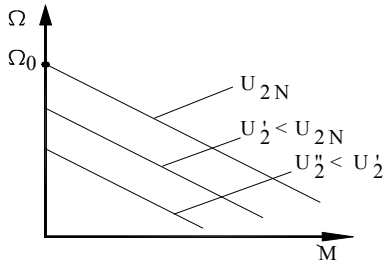


Fig. 13.6

Pe baza relației (13.6) se pot reprezenta și caracteristicile mecanice artificiale obținute prin modificarea tensiunii de alimentare (fig. 13.6). Relația (13.6) permite după transformări o scriere de forma:

$$M = \frac{K_E \cdot U_2}{R_A} - \frac{K_E^2}{R_A} \cdot \Omega \quad (13.10)$$

care permite trasarea dependenței $M = f(U_2)$ (fig. 13.7).

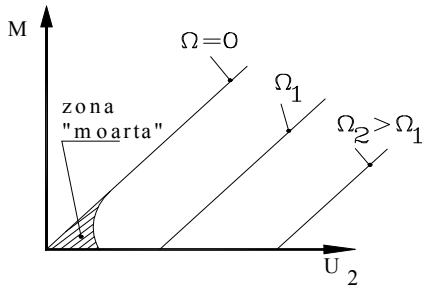


Fig. 13.7

Caracteristicile din figura 13.7 scot în evidență existența unei valori minime a semnalului de comandă care trebuie depășită pentru ca motorul să se pună în funcțiune. Această zonă de insensibilitate a motorului este limitată pentru servomotoarele de comandă (sub 3 % U_2).

13.3 Regimul de pornire

Condițiile de pornire ale servomotorului de curent continuu pot avea un puternic efect negativ în buna funcționare a acestuia. Un curent prea mare poate

influența producerea diverselor avarii:

- distrugerea izolației înfășurărilor mașinilor și aparatelor de comandă și măsură, datorită căldurii ce se degajă;
- comutație necorespunzătoare, cu posibilitatea apariției focului circular;
- solicitarea mare a periiilor;
- solicitarea lipiturilor la conductoarele înfășurărilor;
- solicitarea conductoarelor de alimentare;
- cupluri mari, care pot produce deteriorări mecanice.

Ca urmare, se pune problema limitării curentului de pornire la valori admisibile, care se stabilesc în funcție de durata pornirii.

Din punct de vedere al valorii cuplului de pornire, se consideră că pornirea poate avea loc în gol ($M_r = 0$), la jumătate din sarcina nominală, la sarcină nominală și la cuplu superior celui nominal. De exemplu: mașinile electrice din sistemele de acționare ale strungurilor, preselor sau compresoarelor pot porni în gol în timp ce ventilatoarele și compresoarele centrifuge se consideră că pornesc la jumătate de sarcină. Pornirea la sarcina nominală este întâlnită la acționarea benzilor transportoare, utilajelor de ridicat și a pompelor cu piston. În cazul roboților industriali cuplul de pornire depinde de cupla cinematică conducătoare.

Procedeele de pornire utilizate la mașinile electrice de c.c. cu excitație în derivație și separată sunt :

- pornirea prin conectarea directă la rețea;
- pornirea cu rezistențe adiționale, intercalate în circuitul indusului;
- pornirea prin variația tensiunii de alimentare pe baza circuitelor cu comutație statică.

Pornirea prin conectare directă la rețea este cel mai simplu procedeu și economic ca investiție sub aspectul aparatajului utilizat. Curentul de pornire ia însă valori ridicate. La pornirea în gol curentul are valori cuprinse în intervalul:

$$\frac{I_p}{I_N} = 8,5 \dots 13,8 \quad (13.11)$$

iar timpul de pornire 0,1 ... 0,3 s. La pornirea în sarcină curentul de pornire este cu aproximativ 15-35 % mai mare. Din acest motiv acest procedeu se aplică destul de rar în practică și numai la mașini de putere mică.

Pornirea reostatică (prin cuplare de rezistențe adiționale) utilizează conectarea unei rezistențe în trepte în circuitul indusului în scopul limitării curentului de pornire. În plus se urmărește obținerea unei porniri line cu accelerație constantă. Practic, rezistența de pornire se modifică însă în trepte, calculate astfel încât curentul să varieze între două limite. Valoarea maximă a curentului în timpul pornirii trebuie să fie mai mică decât cea admisibilă, iar curentul minim trebuie să fie mai mare decât curentul de sarcină. Orientativ:

$$i_{\max} = (1,5 \dots 2,5) \cdot i_N \quad (13.12)$$

$$i_{\min} = (1,1\dots 1,2) \cdot i_N \quad (13.13)$$

În scop explicativ este prezentat modul de conectare a trei rezistențe adiționale R_{ai} în circuitul indusului unui motor de c.c. (fig.13.8). Rând pe rând cele trei rezistențe

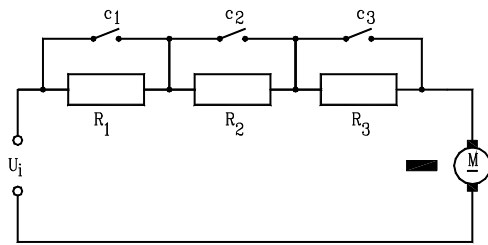


Fig. 13.8

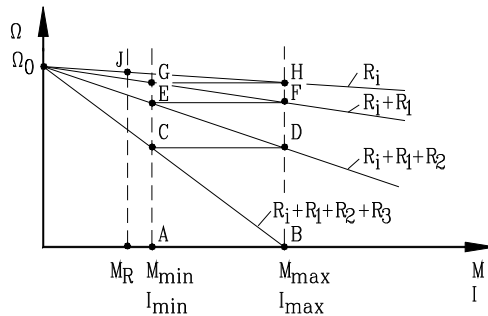


Fig. 13.9

sunt scurtcircuitate prin închiderea contactelor c_i . În acest mod mașina funcționează pe rând pe câte o caracteristică mecanică artificială până la stabilizarea funcționării în punctul H corespunzător cuplului rezistent dat (fig. 13.9).

Trecerea de pe o caracteristică artificială pe alta ($C \rightarrow D, E \rightarrow F, G \rightarrow H$) este

posibilă printr-o scurtcircuitare executată manual de către un operator sau în mod automat, funcție de viteza de rotație sau de timp.

Comanda scurtcircuitării rezistențelor funcție de viteză necesită măsurarea vitezei (de exemplu în mod indirect prin intermediul tensiunii electromotoare induse) urmată apoi de acționarea aparatajului corespunzător. Comanda scurtcircuitării funcție de timp presupune utilizarea unor relee cu temporizare la închidere.

Exemplu

Roboții pășitori constituie o categorie de roboți aflată într-o expansiune puternică din punctul de vedere al aplicațiilor: control, manipulare în teren accidentat, operații speciale, etc.

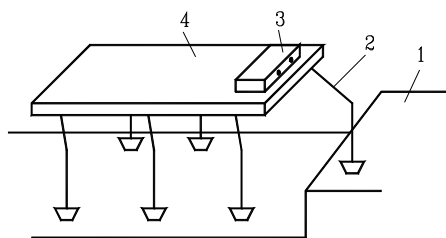


Fig. 13.10

În figura 13.10 este prezentată schema principială a unui robot pășitor care escaladează un obstacol I de tip treaptă. Robotul dispune de 6 « picioare » din care 2 conectate la platforma 4 pe care este montat sistemul de comandă și sistemul informațional vizual.

Fiecare „picioar” are 3 grade de mobilitate: extensie, ridicare, rotire. Fiecare grad de mobilitate este acționat

separat prin intermediul sistemelor SA_i ($i = 1, 2, 3$) (fig. 13.11). Fiecare grad de mobilitate este dotat cu traductoare de poziție P_i ($i = 1, 2, 3$) și de viteză V_i ($i = 1, 2, 3$). Forțele verticale sunt măsurate prin senzorul F_1 , forțele orizontale prin senzorul F_2 , iar cele din extensie prin senzorul F_3 . Potentiometrul R are rolul unui senzor de contact cu mediul de deplasare.

În figura 13.12 este prezentată schema electrică de acționare a unui motor electric de c. c. cu pornire prin rezistențe adiționale utilizat în componența cuplei conducătoare a unui robot mobil.

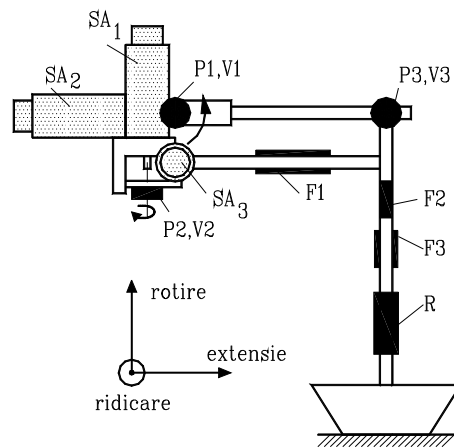


Fig. 13.11

Notațiile utilizate în schemă sunt cele clasice. Sunt evidențiate circuitele de putere pentru alimentarea m. c. c. și circuitele de comandă automată a pornirii.

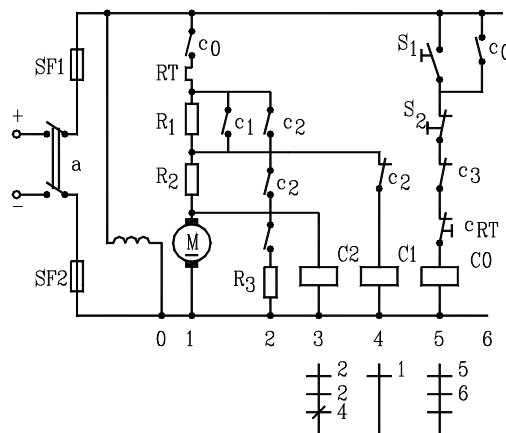


Fig. 13.12

Sistemul de comandă cuprinde următoarele aparate:

- Un întrerupător manual „a” cu rol de separator, care manevrează numai atunci când motorul este oprit.
- Un contactor de linie C_0 , cu un contact auxiliar de autoblocare (pe circuitul 6).
- Un releu termic R_T pentru protecția motorului împotriva suprasarcinilor, cu contacte în circuitul 5;
- Contactoarele de scurtcircuitare C_1 și C_2 cu contacte în circuitele 2, 4 și 6;
- Contactele limitatoarelor de cursă S_1, S_2 ;
- Siguranțele fuzibile SF_1, SF_2 pentru protecția circuitelor.

Sistemul de comandă se bazează pe un inversor Nordac, controlat prin microprocesor, folosind tehnologia IGBT pentru siguranță și flexibilitate.

Pornirea prin variația tensiunii de alimentare este metoda utilizată în acționările moderne întrucât aceasta permite concomitent și reglarea vitezei.

Metoda se bazează pe creșterea tensiunii de alimentare de la valoare redusă, chiar egală cu zero, până la tensiunea nominală. Alimentarea se poate realiza printr-un convertor cu elemente statice. Tensiunea se poate modifica automat în timp, astfel încât curentul să se mențină constant în timpul pornirii, asigurându-se astfel un timp de pornire minim concomitent cu anularea consumului de energie electrică în rezistențele de pornire parcurse de curentul principal. Aceste modalități vor fi examinate în cadrul paragrafului referitor la reglarea vitezei.

13.4 Regimul de frânare

Mașina electrică posedă însușirea de a funcționa atât în regimul de motor cât și în cel de frână. Clasificarea se face după cum mașina produce sau se opune mișcării. În figura 13.13 se prezintă sensul parametrilor electrici și mecanici în cele 2 regimuri de funcționare (a-regimul de motor; b-regimul de frână) forța „F” este cea care produce cuplul electromagnetic iar „v” este viteza periferică a rotorului.

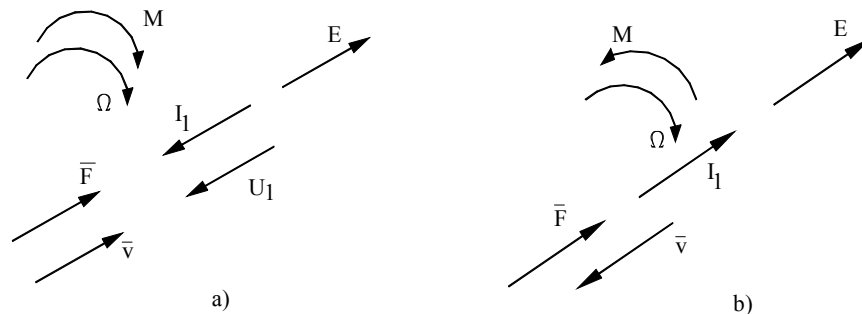


Fig. 13.13

Există practic trei metode de frânare:

- **Frânarea cu recuperare**

Dacă viteza devine mai mare decât viteza de mers în gol Ω_0 tensiunea electromotoare devine mai mare decât tensiunea la borne, curentul prin indus își modifică sensul:

$$I_2 = \frac{K_E \cdot \Omega_0 - K_E \cdot \Omega}{R_A} < 0 \quad (13.14)$$

iar cuplul electromagnetic devine cuplu de frânare.

Energia obținută dinspre echipamentul mecanic se transmite în rețea de către mașina electrică, care va funcționa ca și generator.

Observație

- ❖ *Această metodă se poate aplica numai la viteze mai mari a rotorului decât viteza de mers în gol și prin această metodă nu se poate opri echipamentul acționat.*
- ❖ *Acționarea modului de translație pe verticală pentru un robot industrial poate fi asociat acestei categorii de frânare.*

- **Frânarea prin contracurent**

În cazul acționării unei sarcini caracterizată de un cuplu rezistent potențial, frânarea se comandă prin mărirea rezistenței R din circuitul electric al indusului. În acest fel funcționarea stabilizată pe caracteristica mecanică se atinge la o viteză negativă corespunzătoare unui cuplu rezistent M_R . Dacă se dorește oprirea elementului antrenat, rotorul trebuie să fie imobilizat printr-un mijloc extern (mecanic, electromagnetic, etc.), la trecerea prin zero a vitezei (punctual C pe caracteristica 2, fig. 13.14) concomitent cu deconectarea motorului de la rețeaua de alimentare.

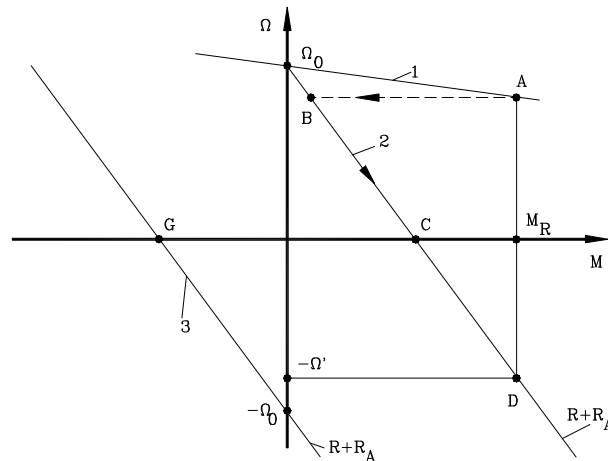


Fig.13.14

La mecanismele de tip reactiv, frânarea se realizează prin inversarea polarității tensiunii U la bornele indusului, concomitent cu introducerea unei rezistențe R în circuitul acestuia. Funcționarea are loc pe caracteristica – 3 – de viteze de mers în gol – Ω_0 . Metoda poate conduce la șocuri mecanice puternice care pot deteriora componentele mecanice ale mecanismului antrenat.

- **Frânarea reostatică**

Metoda se realizează prin deconectarea indusului de la rețea și conectarea acestuia pe o rezistență de frânare. Mașina va funcționa ca generator, transformând energia cinetică a elementelor mobile în energie electrică care se consumă pe rezistența de frânare. Această metodă reprezintă avantajul simplității montajului.

13.5 Caracteristicile dinamice ale acționărilor cu motoare de curent continuu cu excitație separată

13.5.1 Introducere

Deosebirea importantă între un sistem închis și un circuit deschis constă în legătura de reacție și efectele acesteia.

Să considerăm un sistem pentru care mărimea de intrare (sau de comandă) este $x_i(t)$ iar mărimea de ieșire este $x_e(t)$. Dependența dintre cele două mărimi poate fi descrisă printr-o ecuație diferențială liniară cu coeficienți constanți. Oricare element ale cărui performanțe sunt descrise printr-o astfel de ecuație este denumit liniar. Este cazul unui număr preponderent de elemente din cazul sistemelor automate. Pe lângă metodele oferite de sistemul de calcul automatizat – softul MathCAD, MatLAB, - una din posibilitățile de rezolvare a ecuațiilor dinamice ale sistemului de acționare este cea de utilizare a transformatei Laplace. Simplificarea utilizării transformatei Laplace este și mai pregnantă la utilizarea noțiunilor de funcție de transfer și schemă bloc.

Funcția de *transfer* reprezintă raportul dintre transformata Laplace a mărimii de ieșire și cea a mărimii de intrare:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (13.15)$$

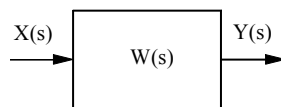


Fig. 13.15

Funcția de transfer $W(s)$ reprezintă o proprietate a elementului dat. Pentru sisteme liniare a căror funcție de transfer este cunoscută, transformata Laplace a semnalului de ieșire (de răspuns) poate fi determinată din relația (13.15). Schema bloc corespunzătoare acestei relații este prezentată în figura 13.15

Combinarea mai multor sisteme într-*un singur bloc* rezultat poate fi extinsă. Rearanjarea schemelor bloc în vederea simplificării, este denumită „algebra schemelor

bloc”. In figura 13.16 sunt reprezentate cele mai importante identități ale algebrei schemelor bloc, care sunt utilizate în simplificarea sistemelor.

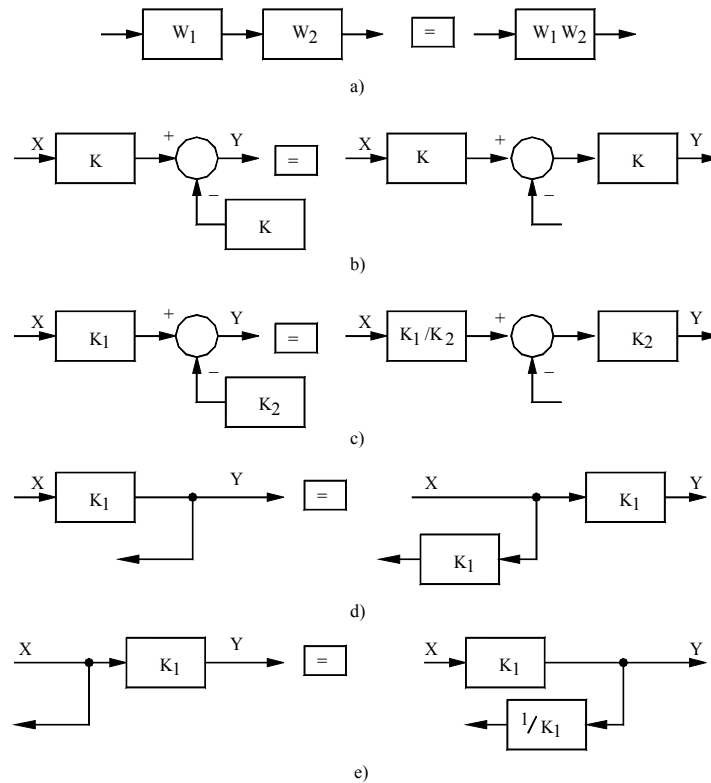


Fig. 13.16

13.5.2 Funcțiile de transfer ale motorului de curent continuu cu excitație separată și simularea funcționării acestuia

Folosind notațiile din figura 13.4, neglijând neliniaritățile introduse de fenomenele de saturație, considerând curentul de excitație constant funcționarea dinamică a motorului este guvernată de ecuațiile operaționale:

$$U_2(s) - E(s) = I_2(s) \cdot R_A \cdot (1 + s \cdot \tau_E) \tag{13.16}$$

$$E(s) = K_E \cdot \Omega(s) \tag{13.17}$$

$$M(s) = K_M \cdot I_2(s) \tag{13.18}$$

$$M(s) - M_R(s) = s \cdot J \cdot \Omega(s) \tag{13.19}$$

$$\tau_E = \frac{L_A}{R_A} \quad (13.20)$$

Constanta electrică de timp τ_E a circuitului electric al indusului este o dată de catalog sau se poate calcula pe baza relației de definiție.

Având în vedere ipoteza unui curent de excitație constant (sau excitație prin magnet permanent) și un circuit al indusului fără rezistențe suplimentare atunci mărimea de reglare, pe baza căreia se obține viteza dorită (mărimea de ieșire din sistem), este tensiunea de alimentare a indusului U_2 (mărimea de intrare). Momentul rezistent M_R constituie mărimea perturbatoare și are în general două componente: una independentă de viteză M_{RS} și una proporțională cu viteza M_{RV} .

$$M_R = M_{RS} + M_{RV} = M_{RS} + K_V \Omega \quad (13.21)$$

Schema bloc a sistemului considerat este prezentată în figura 13.17.

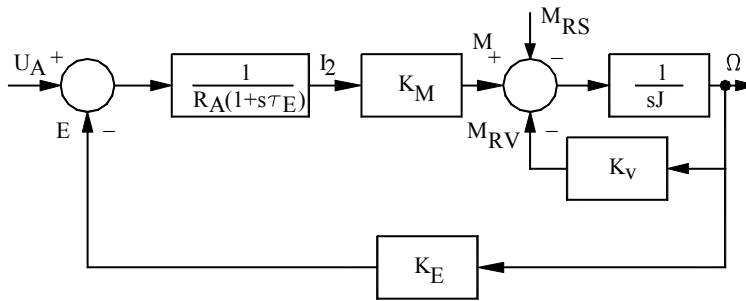


Fig. 13.17

După transformări repetate (și neglijând frecările vâscoase) schema rezultată este prezentată în figura 13.18.

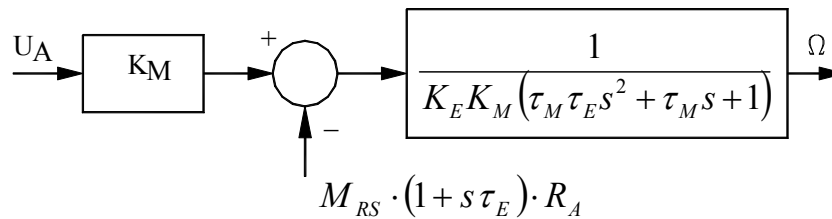


Fig. 13.18

Pe baza schemei anterioare se poate scrie relația funcției de transfer în ipoteza unui moment rezistent $M_{RS} = 0$:

$$W(s) = \frac{\Omega(s)}{U_2(s)} = \frac{1}{K_E} \cdot \frac{1}{\tau_e \tau_M s^2 + \tau_M s + 1} \quad (13.22)$$

unde $\tau_M = \frac{R_A J}{K_E K_M}$ reprezintă constanta mecanică a motorului.

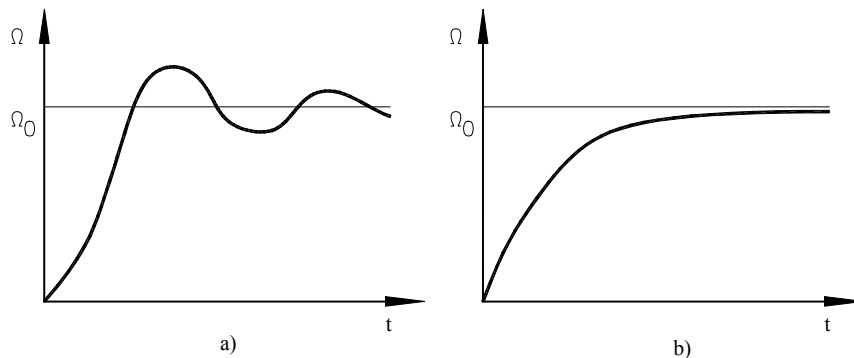


Fig. 13.19

Dacă constanta de timp mecanică nu este neglijabilă în raport cu cea electrică, răspunsul motorului (la un semnal tip treaptă a tensiunii) este prezentat în figura 13.19a. Dacă $\tau_e \ll \tau_M$ răspunsul motorului este cel prezentat în figura 13.19b. Într-un mod asemănător se poate determina funcția de transfer luându-se în considerare și frecările vâscoase.

Considerând drept mărime de ieșire curentul prin indus, iar ca mărime de intrare tensiunea de alimentare a acestuia, schema bloc corespunzătoare este prezentată în figura 13.20.

Pe baza schemelor de simplificare se poate determina forma finală a schemei bloc și funcția de transfer corespunzătoare.

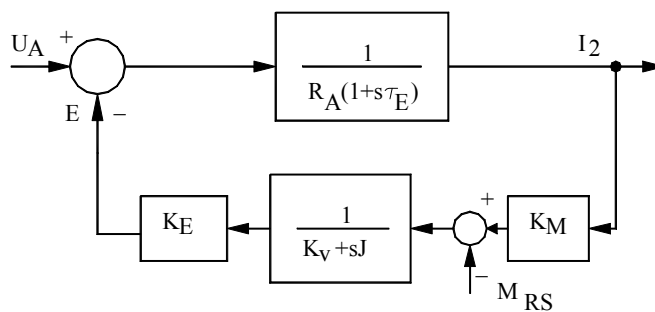


Fig. 13.20