

Capitolul 6

MASINA DE CURENT CONTINUU

6.1 Elemente constructive

Masina de curent continuu poate fi reprezentata schematic, într-o sectiune transversala (figura 6.1) care evidentiaza cele doua parti constructive de baza:

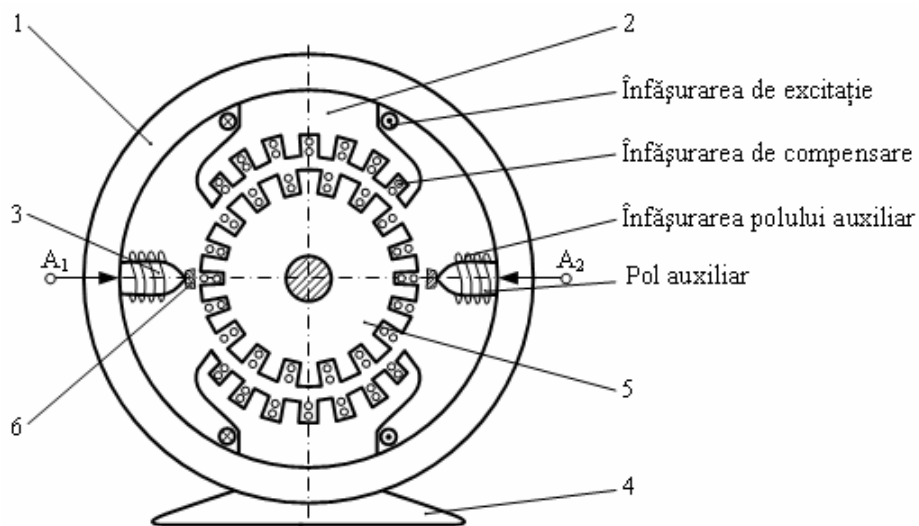


Figura 6.1

Statorul, partea imobila a masinii, ce joaca rol de inductor si care are ca elemente constructive principale:

- 1 – carcasa (jugul statoric);
- 2 – poli de excitație împreună cu înfășurarea concentrată de c.c.(bobine);
- 3 – poli de comutație (auxiliari) cu înfășurarea concentrată corespunzătoare;
- 4 – talpa de prindere;
- 5 – rotorul, care joaca rol de indus, urmând sa dam o scurta descriere a elementelor sale constructive, ulterior;
- 6 – perie.

Carcasa (jugul statoric) reprezinta partea imobila pe care se fixeaza polii de excitatie si cei de comutatie. La masinile de putere mai mare decât câteva sute de wati, carcasa si jugul statoric (care serveste drept drum de închidere a fluxului magnetic inductor), reprezinta aceeași piesa constructiva. Pentru a oferi fluxului magnetic o reluctanta cât mai mica, carcasa se construiesc din fonta sau otel turnat, uneori din tabla groasa de otel sudata.

La masinile mici si la masinile alimentate prin instalatii de redresare cu gama larga de reglare a vitezei, jugul statoric se realizeaza din tole de otel electrotehnic de $(0,5\pm 1)$ mm grosime, stantate în forma adecvata, încât se realizeaza dintr-o data si polii de excitatie.

Polii de excitatie (principali) se construiesc din tole de otel electrotehnic de $(0,5\pm 1)$ mm grosime, strânse pachet cu ajutorul unor buloane nituite. Ei poarta bobinele de excitatie strabatute de curentul de excitatie.

În partea spre rotor, miezul polar se termina cu asa-numita talpa a polului sau piesa polara, în scopul de a înlesni trecerea fluxului magnetic prin zona îngusta de aer dintre pol si rotor numita întrefier. Din punct de vedere mecanic, talpa polului serveste pentru asigurarea pozitiei bobinei montata pe miezul polului.

Bobinele de excitatie se realizeaza dintr-un conductor rotund sau profilat de cupru. Conductorul este izolat pentru a nu produce scurtcircuit între spirele bobinei.

Bobinele polilor de excitatie se leaga între ele în serie sau paralel si se alimenteaza de la bornele de excitatie din cutia de borne. Legaturile bobinelor se realizeaza astfel încât fluxul magnetic al unui pol sa fie dirijat dinspre piesa polara spre rotor (pol Nord), iar cel al unui pol vecin dinspre rotor spre piesa polara (pol Sud).

Polii de comutatie (auxiliari) constau dintr-un miez si din bobina înfasurata pe miez. Polii auxiliari se aseaza exact în axa de simetrie (axa neutra) dintre polii principali.

Rotorul împreuna cu colectorul este reprezentat în figura 6.2.

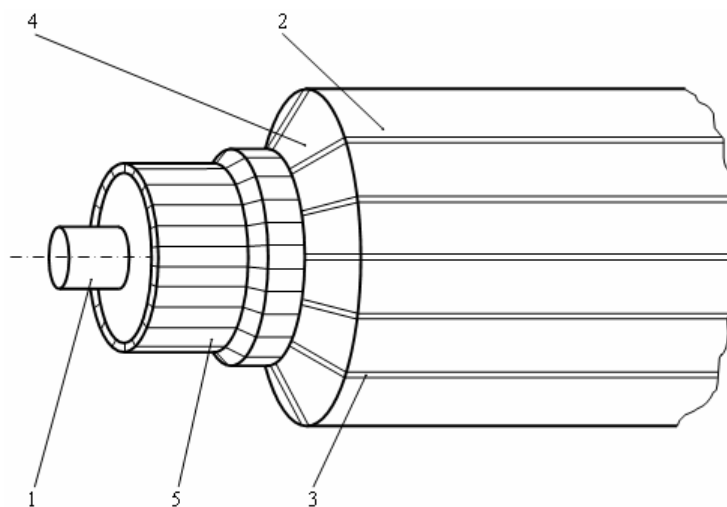


Figura 6.2

Miezul rotoric 2 – se construiește din tole de otel electrotehnic de forma circulara cu dinti si crestaturi, izolate între ele si este plasat pe arborele 1. Crestaturile longitudinale 3 se constituie în sediul înfasurarii rotorice.

Înfășurarea rotorica este formata din “sectii” a caror capete 4 se leaga la *colector* 5, care este un subansamblu caracteristic masinii de c.c.

Colectorul are forma cilindrica, fiind construit din placute de cupru, denumite lamele, izolate una fata de cealalta printr-un strat de mica si, de asemenea, izolate fata de suport.

Capetele sectiilor înfasurarii rotorice se lipesc direct de aripioarele lamelor cu un aliaj de cositor sau se utilizeaza ca piese intermediare niste “stegulete” (cazul masinilor de putere mare).

Colectorul se învârteste solidar cu rotorul.

Pentru a realiza o legatura între înfasurarea rotorica care se învârteste si bornele masinii care sunt imobile, pe colector freaca o serie de “perii” realizate din material conductor, în general pe baza de grafit, care asigura frecari si uzuri mai reduse. Prin intermediul unor piese speciale, “portperii”, perii realizeaza un contact electric sub presiune constanta cu lamelele colectorului.

Periile sunt legate galvanic între ele, si anume perii de numar impar (socotite la periferia colectorului) se leaga la o borna a masinii, iar perii de numar par se leaga la cealalta borna. Periile sunt plasate la distanta egala la periferia colectorului, iar numarul de rânduri de perii este egal cu numarul de poli de excitatie din masina.

6.2 Câmpul magnetic inductor

Câmpul magnetic inductor este creat de polii de excitatie de pe stator. Liniile de câmp într-o masina cu $p=2$ sunt reprezentate în figura 6.3.

Din cauza permeabilitatii foarte mari a materialului feromagnetic din care sunt construiti polii si rotorul, liniile de câmp strabat întrefierul aproape radial, iesind din pol aproape normal si intrând în rotor, de asemenea, aproape normal. Facând abstractie de crestaturile rotorului, întrefierul sub piesele polare se considera constant.

Totodata, se considera câmpul magnetic inductor uniform sub piesele polare si de aceeasi valoare sub doi poli de nume contrar si, respectiv, nul în axa de simetrie interpolara (axa neutra). În afara pieselor polare, câmpul scade brusc, din cauza cresterii simtitoare a întrefierului. Convenind sa consideram câmpul magnetic de sub polul nord – pozitiv si respectiv cel de sub polul sud – negativ, inductia magnetica variaza la periferia rotorului ca în figura 6.4.

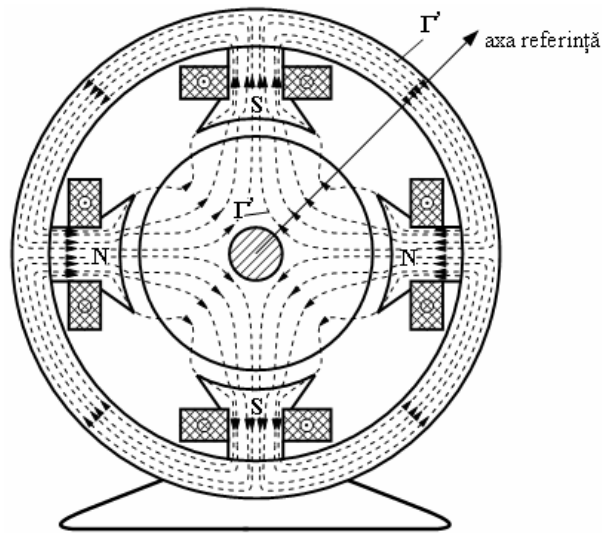


Figura 6.3

În figura 6.4 s-a considerat ca inducția sub talpa polara are o valoare constantă, conform ipotezelor simplificatoare enunțate anterior.

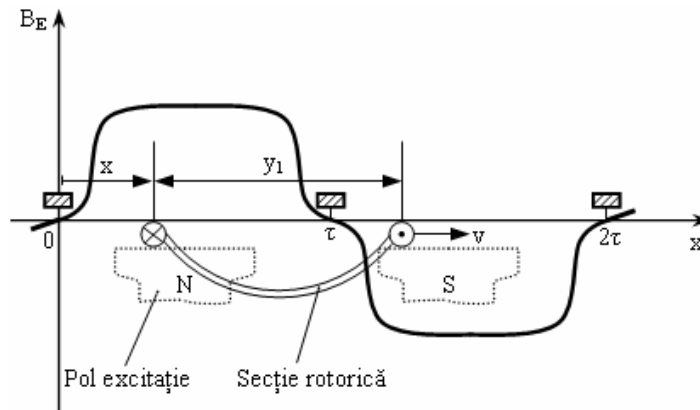


Figura 6.4

Dacă notăm pasul polar (distanța) între axele a 2 poli succesivi de nume contrar cu τ rezulta:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p},$$

unde:

D – diametrul rotorului;

$2 \cdot p$ – numărul de poli de excitație.

Pentru un anumit curent de excitație se poate calcula o valoare medie a inducției pe un pas polar cu:

$$D = \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^{\tau} B(x) dx,$$

și astfel putem defini fluxul de excitație ca fiind:

$$\Phi = B_{E_{med}} \cdot L \cdot \tau,$$

unde:

L – lungimea armaturii rotorice.

Fluxul de excitație este ca atare funcție numai de curentul de excitație, $\Phi(I_e)$.

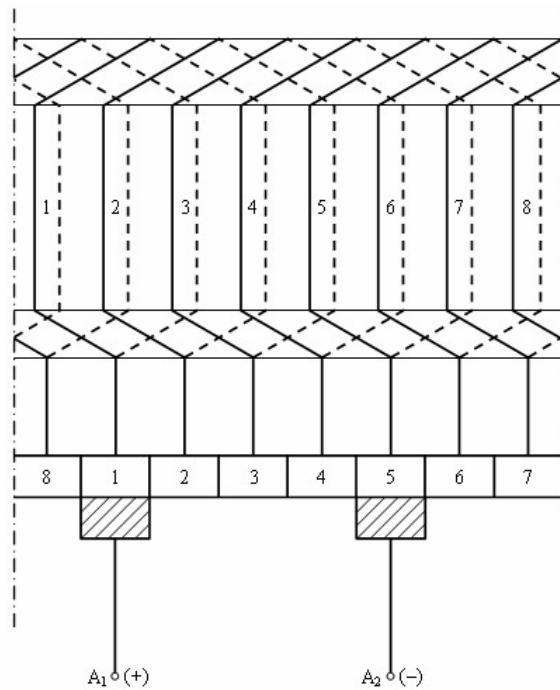
6.3 Înfășurările rotorice de c.c.

Există două variante constructive de înfășurări de c.c., care au cea mai largă răspândire:

- *înfășurări buclate;*
- *înfășurări ondulate.*

- *Înfășurarea buclată:* În figura 6.5, a este reprezentată o înfășurare buclată simplă în schema desfășurată, având $Z = 8$ crestături $2p = 2$. Înfășurările buclate, se realizează în două straturi, în sensul că în aceeași crestătură sunt două laturi de secție; una în partea superioară a crestăturii (figurată cu linie plină), iar cealaltă, în partea inferioară (figurată cu linie întreruptă).

Înfășurarea constă într-o serie de secții identice, fiecare secție având una sau mai multe (pentru simplificare am considerat că o secție are o singură spira), secțiile fiind legate în serie. Capetele secțiilor se leagă între ele pentru a asigura înscrierea secțiilor și, în același timp, se leagă și la câte o lamelă de colector. Prin urmare, înfășurarea descrisă, ca de altfel toate înfășurările de curent continuu, nu au capete libere. Înfășurarea de c.c. este deci o înfășurare închisă.



a)

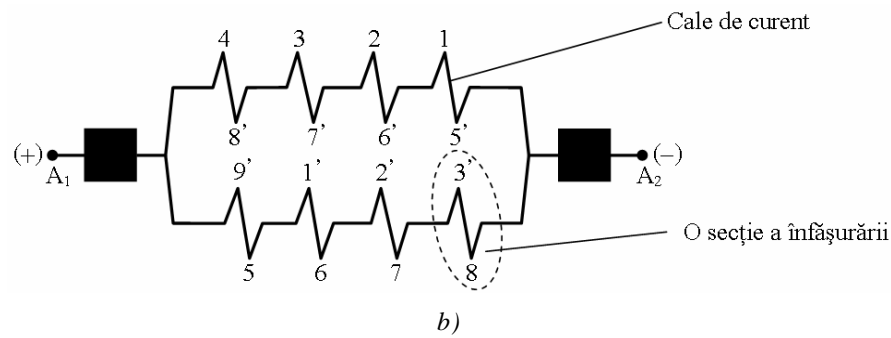


Figura 6.5

Pasul unei secții (deschiderea între latura de ducere și cea de întoarcere a unei secții) este notată cu y_1 și de obicei este egală cu pasul polar. Deci:

$$y_1 = \tau = \frac{Z}{2 \cdot p} = 4 \text{ crestaturi.}$$

Plasarea periilor pe colector și legăturile dintre ele și bobinele mașinii conduc la împărțirea înfășurării prezentate în figura 6.5, a în două cai de curent, în sensul că dacă înfășurarea ar fi alimentată de la borne cu un curent I , el s-ar divide în doi curenți I_a (figura 6.5, b). Aceasta repartitie este valabilă la un moment dat. În orice caz, se observă că în toate crestaturile care se afla sub un pol, sensul curentului prin laturile diferitelor secții este același.

Caracteristic pentru înfășurarea buclată este faptul că numărul cailor de curent în paralel "2a" este egal cu numărul $2 \cdot p$ de poli, adică $a = p$. În plus, numărul periilor pe colector este egal cu numărul de poli.

- *Înfășurarea ondulată:* Pentru această înfășurare caracteristic este faptul că între numărul de lamele la colector, așa numitul ordin de multiplicitate (numărul de închideri al înfășurării la colector) și numărul de perechi de poli există o legătură foarte strânsă prin relația:

$$y = \frac{k - m}{p},$$

unde: y – este pasul rezultat al înfășurării;

k – numărul de lamele la colector;

p – numărul de perechi de poli de excitație.

Pentru amândouă înfășurările se definesc, de fapt, trei pași:

y_1 – pasul la ducere (sau pasul în față) – este cotelat între latura de ducere a unei secții (convențional aflată sub un pol Nord de excitație) și latura de întoarcere a acesteia (aflată sub polul Sud de excitație);

y_2 – pasul la întoarcere (sau pasul la spate) – este cotelat între latura de întoarcere a unei secții rotorice și latura de ducere a secției următoare;

y – pasul rezultat.

La înfasurarile buclate între cei trei pasi exista legatura:

$$y = y_1 - y_2.$$

La înfasurarile ondulate, legatura între pasi este urmatoarea:

$$y = y_1 + y_2.$$

În general, în ambele tipuri de înfasurare, numarul de lamele de colector este egal cu numarul de sectii si de crestaturi.

În practica, ambele tipuri de înfasurari sunt utilizate pe scara larga. Înfasurarea ondulata, prezinta avantajul de a permite $a < p$, utilizat în conductia unor masini cu numar mare de poli (viteza mica) si intensitati mici (numar de cai de curent în paralel putine).

6.4 T.e.m. indusa în masina de c.c.

Sa presupunem ca rotorul masinii este rotit în câmpul magnetic inductor al polilor de excitatie si ca în doua crestaturi ale rotorului, situate la periferia rotorului, la distanta y_1 una de alta (în exemplul nostru $y_1 = \tau$) se afla latura de ducere si, respectiv, de întoarcere a unei sectii de înfasurare (figura 6.6). Fie Ω viteza unghiulara de rotatie a rotorului presupusa constanta. Evident ca atunci când sectia se rotește odata cu rotorul, fluxul printr-o spira oarecare variaza în timp. Astfel, atunci când sectia se afla sub polul nord de excitatie, fluxul are un anumit sens, iar când sectia se afla sub polul sud, fluxul schimba de sens, fiind evident, totodata, faptul ca, într-o pozitie intermediara fluxul devine nul.

Daca consideram axa polului nord drept axa de referinta, la un moment oarecare t , latura de ducere se gaseste la o distanta periferica x fata de axa de referinta, iar latura de întoarcere la distanta $x + y_1$.

Conform legii inductiei electromagnetice, deoarece latura de ducere taie liniile de câmp magnetic inductor cu o anumita viteza \bar{v} , se poate calcula expresia t.e.m. induse într-o spira cu:

$$e_s = \int_0^L [\bar{v} \times \bar{B}(x)] d\bar{l} = v \cdot B(x) \cdot L,$$

unde:

L – lungimea laturii active a spirei.

Daca se calculeaza valoarea medie a inductiei sub un pas polar ca fiind:

$$B_{med} = \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^{\tau} B(x) dx,$$

expresia mediata a t.e.m. devine:

$$E_{s,med} = B_{med} \cdot v \cdot L.$$

Se stie ca $v = \Omega \cdot \frac{D}{2}$ si prin definitie pasul polar $\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p}$. Deci $v = \frac{\Omega \cdot p \cdot \tau}{\pi}$ sau:

$$E_{s_{med}} = \frac{p}{\pi} \cdot \Omega \cdot B_{med} \cdot L \cdot \tau.$$

Considerând produsul dintre B_{med} si aria $L \cdot \tau$ ca fiind un flux magnetic mediu de excitatie.

$$\Phi_{med} = B_{med} \cdot L \cdot \tau; e_{s_{med}} = \frac{p}{\pi} \cdot \Omega \cdot \Phi_{med}.$$

Tinând cont ca înfasurarea este formata din $\frac{N}{2 \cdot a}$ spire înseriate (unde "2a"numarul cai în paralel), rezulta ca t.e.m. totala este:

$$E = \frac{N}{2 \cdot a} \cdot e_{s_{med}} \text{ adica } E = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2 \cdot \pi} \cdot \Omega \cdot \Phi_{med}. \quad (6.1)$$

T.e.m. indusa în înfasurarea rotorului datorita rotatiei rotorului în câmpul polilor de excitatie depinde ca atare de unele marimi constructive p, a, N, si de unele marimi functionale: Φ_{med} si Ω .

Ca atare expresia (6.1) se mai poate scrie:

$$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega,$$

unde: $K = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2 \cdot \pi}$ se mai numeste si constanta masinii de c.c.

Deoarece pe eticheta masinii viteza este exprimata în rotatii pe minut se poate face conversia:

$$\Omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \text{ si deci } E = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{60} \cdot n \cdot \Phi_{med} \quad (6.2)$$

sau: $E = K_E \cdot n \cdot \Phi_{med}$, unde $K_E = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{60}$.

Fluxul magnetic depinde la rândul lui de curentul de excitatie.

Daca circuitul magnetic al masinii nu este saturat, atunci fluxul de excitatie depinde liniar de curentul de excitatie si, deci, ecuatia (6.1) mai poate fi:

$$E = K_E' \cdot n \cdot I_{ex}. \quad (6.3)$$

6.5 Cuplul electromagnetic dezvoltat de masina de c.c.

Sa presupunem ca o masina de c.c. are înfășurarea de excitație alimentată astfel încât latura de ducere a unei secții se găsește sub incidența unui câmp magnetic $\vec{B}(x)$.

Presupunem ca periile se găsesc în axa neutră și înfășurarea rotorică este parcursă de curentul I ; curentul dintr-o cale oarecare de curent din cele $2 \cdot a$ care în total va fi $I_a = \frac{I}{2 \cdot a}$.

Sensul curentului printr-o secție oarecare este indicat în figura 6.6, care se referă pentru simplitate la o masina cu $2 \cdot p = 2$ poli.

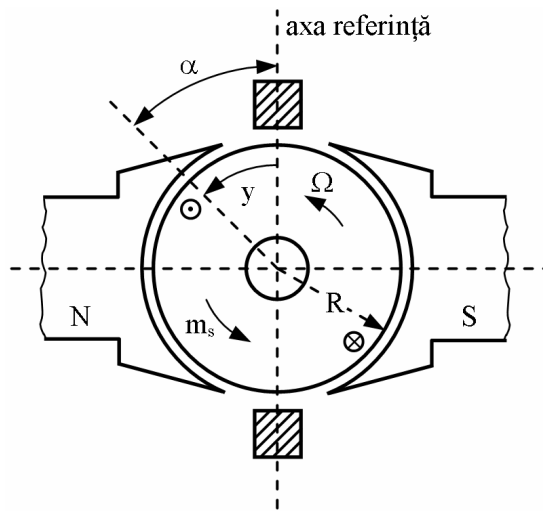


Figura 6.6

Vom calcula cuplul electromagnetic exercitat asupra rotorului mașinii, plecând de la expresia cuplului exercitat asupra unei secții.

$$M_s = f_c \cdot D,$$

unde:

$$f_c = \int_0^L I_a \overline{dl} \times \vec{B}(x) = I_a \cdot L \cdot B(x).$$

Se poate apela la valoarea inducției medii sub un pas polar:

$$f_{cmed} = I_a \cdot L \cdot B_{med} M;$$

$$M_{smed} = I_a \cdot L \cdot B_{med} \cdot D.$$

Știind că $L = \frac{2 \cdot p \cdot \tau}{\pi}$, $M_{smed} = I_a \cdot \frac{2 \cdot p}{\pi} \cdot B_{med} \cdot L \cdot \tau = I_a \cdot \frac{2 \cdot p}{\pi} \cdot \Phi_{med}$, ca toată înfășurarea are

$\frac{N}{2}$ spire și ca $I_a = \frac{I}{2 \cdot a}$, rezulta cuplul total ca fiind:

$$M = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2 \cdot \pi} \cdot I \cdot \Phi_{\text{med}}, \quad (6.4)$$

sau

$$M = K \cdot I \cdot \Phi_{\text{med}}. \quad (6.5)$$

Cuplul electromagnetic exercitat asupra rotorului masinii de c.c. este, prin urmare, proportional cu curentul total schimbat pe la borne cu reseaua exterioara si cu fluxul magnetic corespunzator unui pas polar.

Daca masina este nesaturata, fluxul magnetic depinde linear de curentul de excitatie si deci:

$$M = K' \cdot I \cdot I_{\text{ex}}. \quad (6.6)$$

6.6 Reactia indusului si comutatia la masina de c.c.

Daca masina de c.c. este conectata la o retea si exista un schimb de putere electrica pe la bornele masinii, atunci spirele înfásurării rotorului sunt strabatute de curent.

Înfásurarea rotorica va produce un câmp magnetic propriu, denumit câmp “magnetic de reactie”, spre deosebire de câmpul de excitatie al polilor masinii, figura 6.7, a.

În functionarea masinii, câmpul de reactie se suprapune peste câmpul de excitatie si influenteaza functionarea masinii (figura 6.7, b).

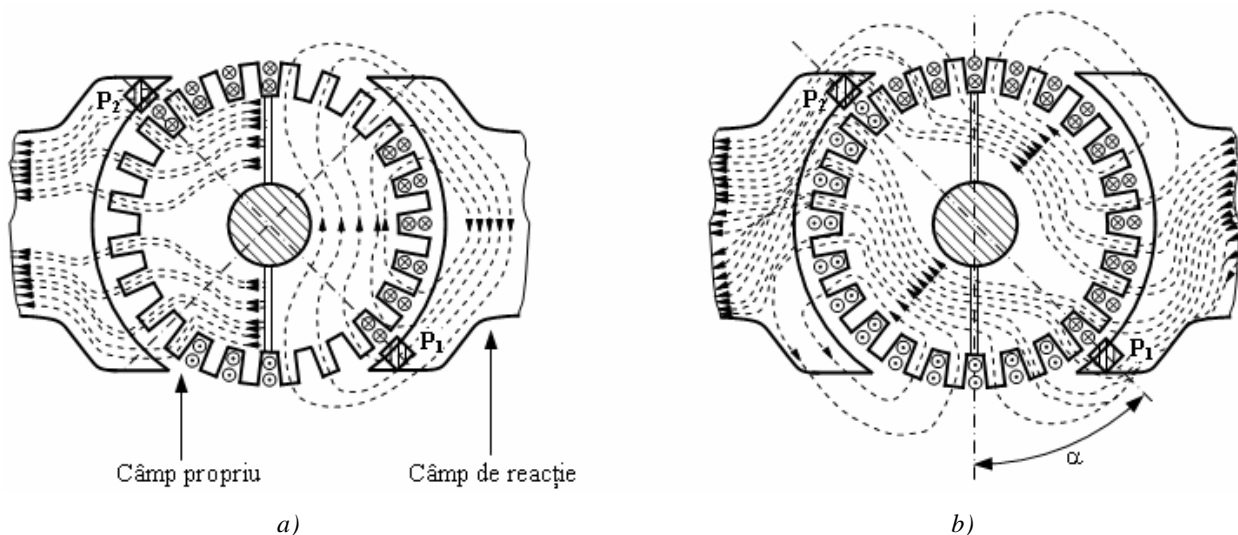


Figura 6.7

Spectrul liniilor de câmp rezultat ce apare în figura 6.7, a a fost dedus după cum urmează:

Pe o jumătate a unei piese polare în întrefier, liniile de câmp ale câmpului de reacție au același sens ca și liniile de câmp ale câmpului de excitatie, iar pe cealaltă jumătate a aceleiași piese polare, liniile câmpului de reacție au sens contrar liniilor câmpului de excitatie.

Deci, câmpul de reacție întărește câmpul de excitație pe o jumătate a piesei polare și îl slăbește pe cealaltă jumătate a piesei polare. În ipoteza admisibilă ca circuitul magnetic nu este saturat, prezentând liniaritate, se poate deduce câmpul rezultat B din suprapunerea câmpului de excitație B_E și câmpului de reacție B_A , figura 6.8. Fluxul Φ al unui pas polar nu este schimbat față de Φ_{med} corespunzător câmpului mediu de excitație și, ca atare, nici t.e.m. indusă nu este afectată.

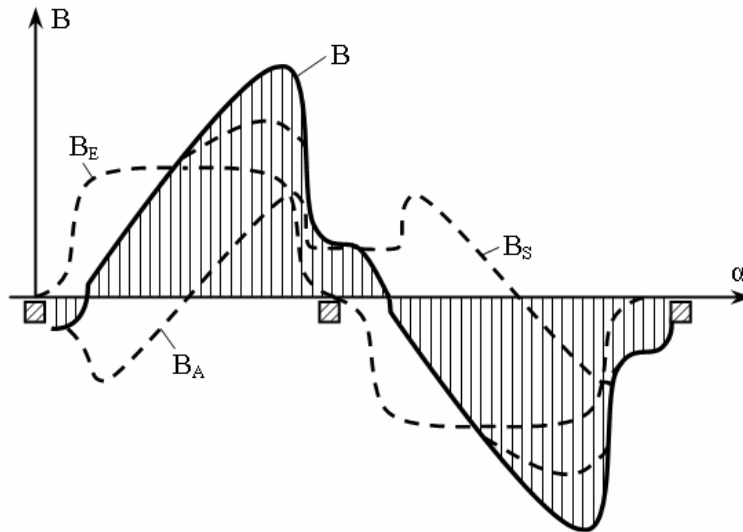


Figura 6.8

Dacă se ține seama, însă, de saturația magnetică a pieselor polare și a dinților rotorici, slăbirea câmpului sub o jumătate a piesei polare nu este pe deplin compensată în calculul unui flux magnetic pe un pas polar, de creșterea câmpului în cealaltă jumătate a piesei polare. Prin urmare, variația câmpului rezultat este în această situație prin diferența (B_s) și fluxul Φ este cu câteva procente mai mic decât Φ_{med} și ca atare și t.e.m. este puțin afectată.

Se mai remarcă faptul că în axa interpolară (axa neutră) câmpul rezultat nu mai este nul.

Pentru reducerea apreciabilă a acestor efecte, se utilizează o înfășurare de compensare a reacției indusului, care să compenseze câmpul de reacție sub polii de excitație. Înfășurarea de compensare se introduce în creștături practicate în piesele polare ale polilor de excitație (figura 6.1) și se leagă în serie cu înfășurarea rotorică, sensul curentului prin conductoarele înfășurării de compensare situate într-o creștătură oarecare a unui pol este invers sensului curentului în conductoarele din creștătura rotorului exact în față.

În timpul funcționării mașinii de c.c. diferitele secții ale înfășurării rotorice trec dintr-o cale de curent în alta, odată cu trecerea periei de pe o lamelă de colector pe cea vecină.

În mod inevitabil, trecerea secției dintr-o cale de curent în alta este legată de scurtcircuitarea, pentru o anumită durată a secției respective, de către perii și la inversarea în acest timp a sensului curentului în secție.

Ansamblul fenomenelor electromagnetice care au loc în acest interval de timp poarta numele de “comutatie”. Sa urmarim în figura 6.9 pozitia relativa perie-lamele în timpul procesului de comutatie.

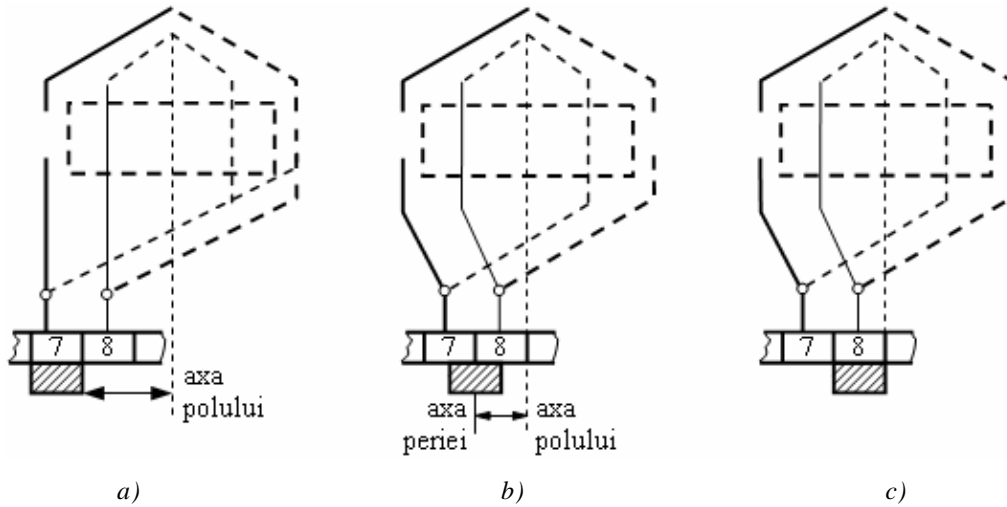


Figura 6.9

Daca în figura 6.9, a ($t = 0$) curentul din sectia de comutatie are un anumit sens, dupa expirarea timpului de comutatie figura 6.9, c ($t = t_c$) curentul s-a stabilit la aceeași valoare, dar de sens schimbat. Se observa, totodata, ca în intervalul de comutatie ($0 < t < t_c$) figura 6.9, b sectia este scurtcircuitata de perie, care calca concomitent pe cele doua lamele vecine.

În figura 6.10 este redată variatia curentului în timpul procesului de comutatie prin sectia respectiva.

Se observa ca variatia curentului în timp $\frac{di_a}{dt} = \frac{\Delta I'_a}{\Delta t} = \frac{2 \cdot I_a}{t_c}$ poate capata valori considerabile

care duce la aparitia în sectia scurtcircuitata a unei t.e.m. de comutatie considerabila:

$$e_A = -L_a \cdot \frac{di_a}{dt},$$

unde: L_a – este inductivitatea proprie a sectiei.

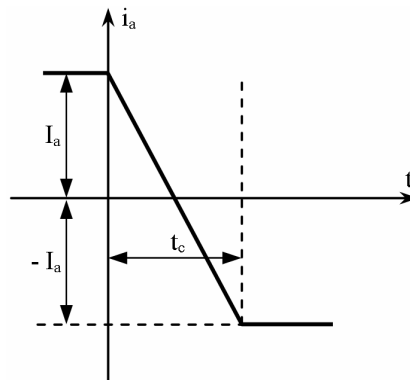


Figura 6.10

Totodata câmpul magnetic din axa periiilor nefiind nul (datorita reactiei indusului) apare si o t.e.m. de rotatie e_R .

Evident ca aceste doua t.e.m. se compun dând nastere în spira aflata în comutatie la un curent suplimentar.

Curentul suplimentar conduce la solicitari termice suplimentare si depinde de suma rezistentelor dintre perie si cele doua lamele de colector vecine. La anularea lui prin parasirea primei lamele de catre perie se stabileste o tensiune ce întretine scânteii periculoase. În unele cazuri scânteile pot fi foarte intense si încalzirea colectorului poate depasi limitele admisibile, functionarea masinii fiind periclitata.

În masinile moderne, pentru producerea unui câmp magnetic suplimentar necesar compensarii t.e.m. $e_R + e_A$, se întrebuinteaza niste poli suplimentari, denumiti poli auxiliari sau poli de comutatie, iar periile ramân în axa neutra (figura 6.9). Înfasurarea lor se conecteaza în serie cu înfasurarea rotorului, câmpul creat producând o t.e.m. suplimentara ce compenseaza automat t.e.m. de comutatie $e_R + e_A$, indiferent de sarcina sau viteza.

6.7 Regimurile energetice de functionare ale masinii de c.c.

Masina de c.c. poate functiona în trei regimuri, din punct de vedere al transformarii energetice efectuate: de generator, de motor si de frâna.

6.7.1 Regimul de generator

În regimul de generator, masina transforma puterea mecanica primita pe la arbore de la un motor (care antreneaza masina) în putere electrica debitata într-o retea de curent continuu.

Sa presupunem ca masina de c.c. este antrenata de catre un motor primar (motor Diesel, turbina cu abur, turbina hidraulica etc.) în sensul aratat în figura 6.11, cu viteza Ω (turatia n) constanta. Motorul primar dezvolta pentru aceasta cuplul activ M_a cu acelasi sens ca si viteza de rotatie. Mai presupunem ca înfasurarea de excitatie a masinii de c.c. este asigurata de un curent I_e de la sursa de c.c. oarecare, care poate fi un redresor, un acumulator, un alt generator de c.c. sau chiar masina electrica considerata (autoexcitatie).

În aceste conditii, în sectiile înfasurarii rotorului, învârtite în câmpul magnetic de excitatie, se vor induce t.e.m., care se regasesc la bornele exterioare A_1 si A_2 sub forma unei tensiuni de mers în gol, egala cu t.e.m. culeasa de perii ($U_0 = E$).

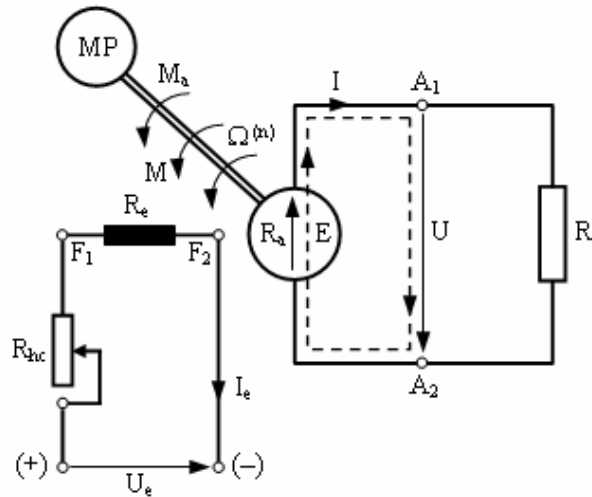


Figura 6.11

Daca între aceleasi borne A_1 si A_2 conectam o rezistenta de sarcina oarecare R_s , t.e.m. E va da nastere unui curent I care va strabate înfasurarea rotorului, având același sens ca și t.e.m. E .

La functionarea în sarcina, tensiunea U_A la bornele înfasurarii rotorului va fi obtinuta de t.e.m. E în urma acoperirii unor caderi de tensiune cauzate de curentul I la trecerea prin înfasurarea rotorului, prin înfasurarea polilor auxiliari și prin înfasurarea de compensare ($R_a \cdot I$) pe de o parte, și la trecerea prin contactele perii colector ale masinii pe de alta parte (ΔU_p).

Într-adevar, aplicând teorema a II-a a lui Kirchhoff pe conturul din figura 6.11, se obtine:

$$R_a + \Delta U_p + U = E, \quad (6.7)$$

relatie ce poarta denumirea de ecuatie de functionare a masinii în regim de generator.

Daca se neglijeaza caderea de tensiune ΔU_p la perii în raport cu caderea ohmica $R_a \cdot I$ ecuatie de functionare se simplifica:

$$E = U + R_a \cdot I. \quad (6.8)$$

Daca ne referim la cuplurile ce actioneaza asupra masinii în regim de generator, putem evidentia:

- cuplul activ M_a , datorat motorului primar, care dicteaza și sensul de rotatie (același sens cu Ω);
- cuplul M_m , datorat frecării rotorului cu aerul, frecării din lagarele masinii și pierderilor mecanice în ventilatorul fixat pe același arbore, M_m fiind un cuplu rezistent (de sens contrar cu Ω);
- cuplul M_{Fe} , datorat pierderilor în fierul rotorului prin fenomenul de histerezis și prin curenti turbionari, fiind tot un cuplu rezistent;
- cuplul electromagnetic, a carui valoare este:

$$M = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2 \cdot \pi} \cdot \Phi \cdot I,$$

si care se opune, de asemenea, miscarii.

Daca $\Omega = \text{ct.}$, atunci:

$$M_a = M + M_m + M_{Fe}.$$

Puterea mecanica transmisa masinii prin intermediul arborelui de catre motorul primar va fi:

$$P_1 = M_a \cdot \Omega = M \cdot \Omega + M_m \cdot \Omega + M_{Fe} \cdot \Omega = P + P_m + P_{Fe},$$

în care termenii au urmatoarea semnificatie fizica:

- $P_m = M_m \cdot \Omega$ - pierderi datorate frecarilor;
- $P_{Fe} = M_{Fe} \cdot \Omega$ - pierderi în fierul rotorului;
- $P = M \cdot \Omega = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2 \cdot \pi} \cdot \Phi \cdot I \cdot \Omega = E \cdot I$ - puterea electromagnetica;

si utilizând ecuatia (6.7):

$$P = E \cdot I = U \cdot I + \Delta U_p \cdot I + R_a \cdot I^2,$$

unde: - $P_2 = U \cdot I$ - este puterea utila, de natura electrica cedata receptorului si care are ponderea cea mai mare.

- $\Delta U_p \cdot I + R_a \cdot I^2$ - pierderi Joule la perii si în înfasurarea rotorului.

Bilantul puterilor masinii în regim de generator este ilustrat în figura 6.12, unde s-a inclus si puterea electrica necesara excitatiei, cât si pierderile Joule din rezistenta înfasurarii de excitatie.

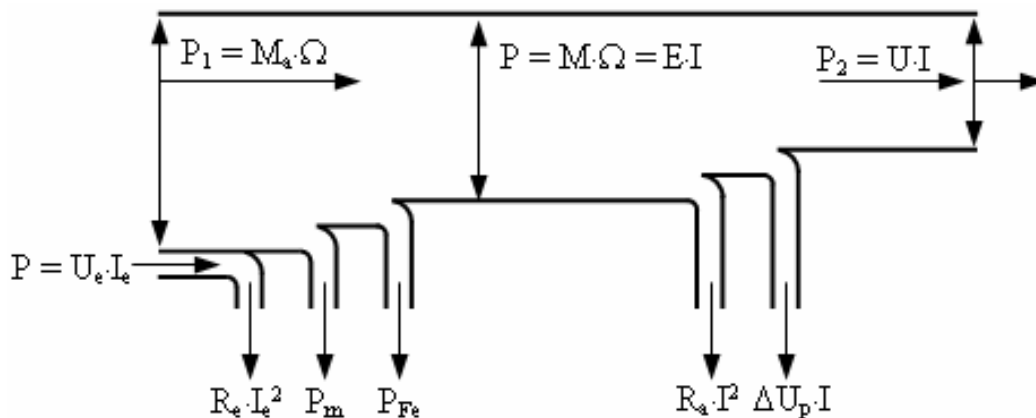


Figura 6.12

6.7.2 Regimul de motor electric

În regimul de motor, masina transforma energia electrica primita de la o retea electrica în energie mecanica, prin intermediul câmpului electromagnetic.

Sa consideram o masina electrica conectata prin intermediul bornelor sale A_1 si A_2 la o retea electrica de c.c. cu tensiune constanta U , indiferent de conditiile de functionare. Masina va absorbi

un curent I în înfășurarea rotorului, a polilor auxiliari și eventual în cea de compensare. Sa presupunem ca înfășurarea de excitație este străbatută de un curent I_e provenit de la o sursă oarecare sau chiar de la aceeași rețea de la care se alimentează și înfășurarea rotorului (autoexcitație). Sa considerăm sensurile celor doi curenți I și I_e în cele două circuite ale mașinii, precum cele din figura 6.13.

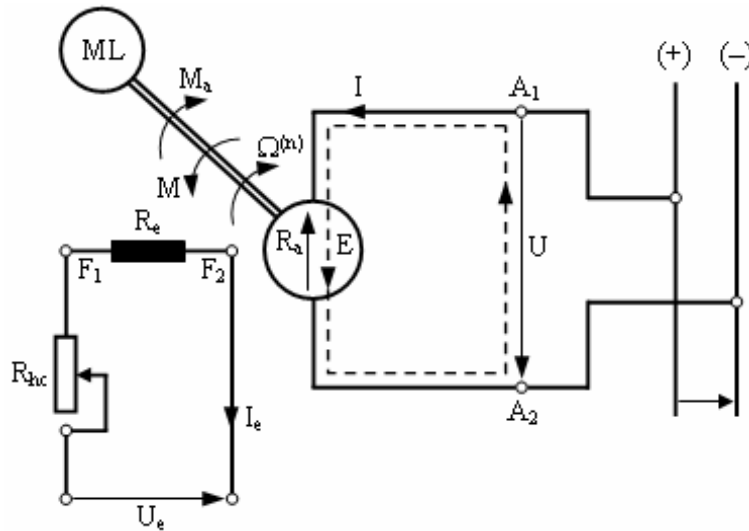


Figura 6.13

Conductoarele înfășurării rotorice, fiind străbatute de curent și aflându-se în câmpul magnetic al polilor de excitație, vor fi solicitate de forțe electromagnetice, care vor da naștere unui cuplu de forma:

$$M = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2 \cdot \pi} \cdot \Phi \cdot I.$$

Dacă acest cuplu este mai mare decât cel static, opus la ax (cuplul de frecare și cel al mașinii de lucru cuplate mecanic), atunci rotorul accelerează până când cuplul său egalează cuplul static. După aceasta, mașina se mișcă uniform ($\Omega = \text{ct.}$).

Datorită mișcării conductoarelor înfășurării rotorice în câmpul magnetic de excitație, ei devin sediul unei t.e.m. care are **sens contrar** sensului curentului din înfășurare:

$$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2 \cdot \pi} \cdot \Omega \cdot \Phi.$$

Dacă se aplică teorema a II-a a lui Kirchhoff pe traseul punctat din figura 6.13, se obține:

$$U = E + R_a \cdot I + \Delta U_p, \quad (6.9)$$

sau ecuația de funcționare a mașinii în regim de motor, care în cazul neglijării căderii de tensiune la perii devine:

$$U = E + R_a \cdot I. \quad (6.10)$$

Sa presupunem ca motorul tracteaza o masina de lucru care are un cuplu rezistent M_r si luând în considerare si cuplurile rezistente proprii definite anterior, putem scrie ecuatia cuplurilor când miscarea este uniforma ($\Omega = \text{ct.}$).

$$M = M_r + M_m + M_{Fe}.$$

Daca se multiplica ecuatia prin Ω se obtine un bilant de puteri, dupa cum urmeaza:

$$P = M \cdot \Omega = P_2 + P_m + P_{Fe},$$

unde: $P = M \cdot \Omega = E \cdot I$ - poate fi considerata puterea mecanica totala dezvoltata de catre motor, dar si puterea electrica, rezultând ca diferenta între puterea electrica de alimentare $P_1 = U \cdot I$ si respectiv pierderile prin efect Joule în înfasurari si la perii.

$$P = P_1 - R_a \cdot I^2 - \Delta U_p \cdot I.$$

Ca atare, bilantul puterilor masinii în regim de motor, se poate ilustra ca în figura 6.14.

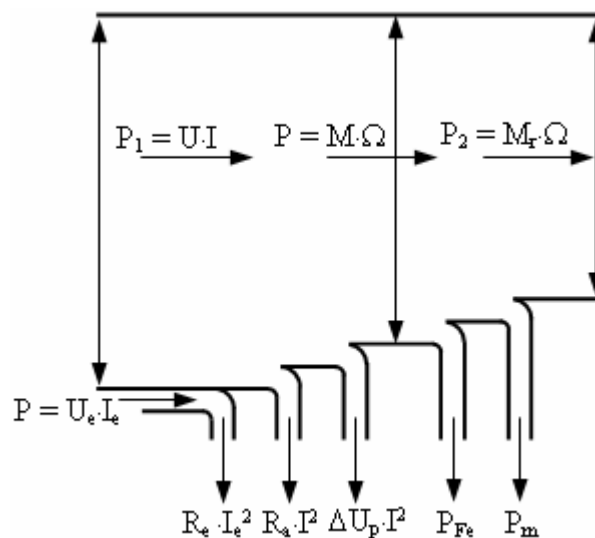


Figura 6.14

6.7.3 Masina de c.c. în regim de frâna

În regim de frâna electrica, masina primeste putere mecanica pe la arbore si putere electrica de la retea de c.c. si le transforma ireversibil, în timp, în caldura, dezvoltând, totodata, un cuplu necesar frânării unei instalatii mecanice.

Pentru a înțelege functionarea masinii într-un astfel de regim, sa presupunem ca functioneaza initial în regim de motor, dezvoltând un anumit cuplu activ la o viteza de rotatie, sensul vitezei fiind acelasi cu al cuplului.

În aceasta situatie se inverseaza sensul tensiunii U la bornele înfasurării rotorului, se adauga o rezistenta suplimentara R_F în serie cu înfasurarea rotorica, pastrând sensul initial al curentului de excitatie.

Cuplul electromagnetic dezvoltat de motor schimba de sens odata cu curentul I , în comparatie cu regimul initial de motor electric si se opune vitezei de rotatie întocmai ca un cuplu de frânare (rezistent).

Bilantul de puteri în acest regim de functionare este ilustrat în figura 6.15.

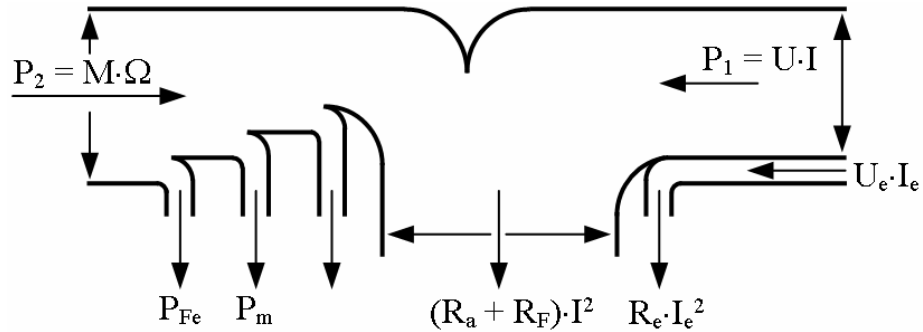


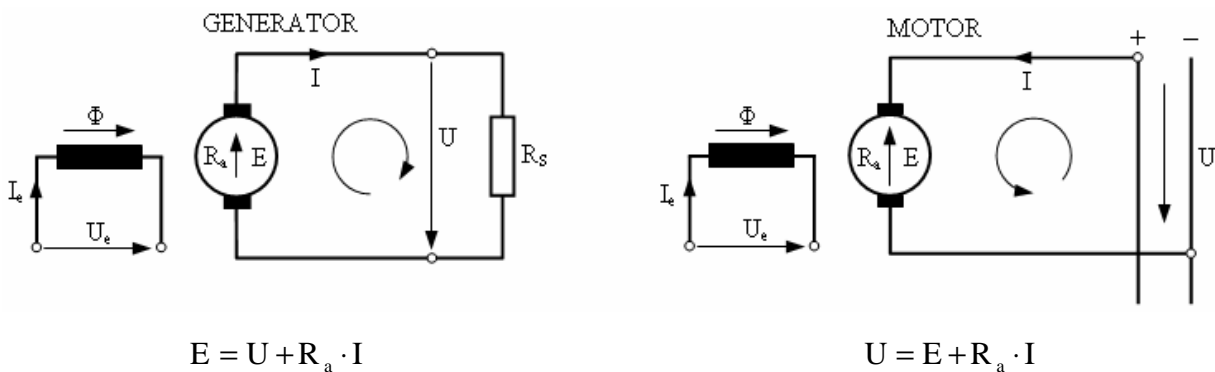
Figura 6.15

Deși transformarea ireversibilă a unei puteri mecanice simultan cu cea a unei puteri electrice în căldură prin efect Joule este excesiv de solicitantă pentru mașină, totuși, acest regim de funcționare are importante aplicații în acționările electrice industriale.

6.8 Ecuațiile în regim staționar ale mașinii de c.c. după tipul excitației

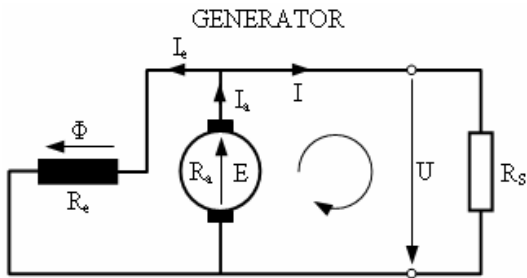
Mășinile de c.c. se pot clasifica după modul de realizare a alimentării excitației. În continuare vom prezenta schemele electrice ale mașinii de c.c. în regimul de generator, respectiv, de motor și vom scrie ecuațiile în regim staționar cu ajutorul teoremelor lui Kirchhoff.

➤ *Mașina de c.c. cu excitația alimentată de la o sursă separată (independentă).*

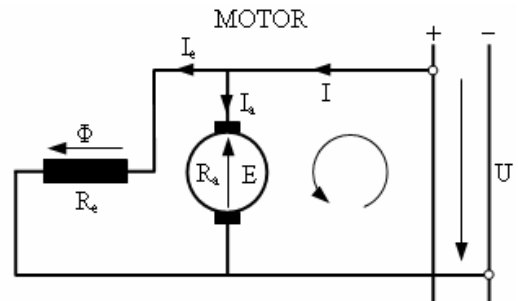


➤ Masina de c.c. cu excitatie alimentata de la propria înfasurare rotorica (autoexcitatie)

a) derivatie:

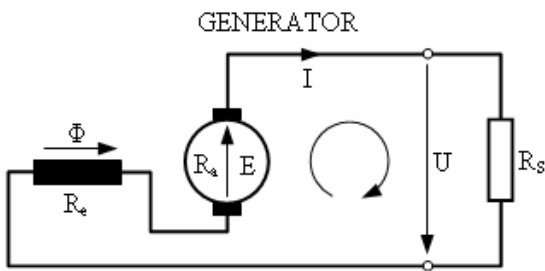


$$\begin{cases} E = U + R_a \cdot I_a \\ I_a = I + I_e \end{cases}$$

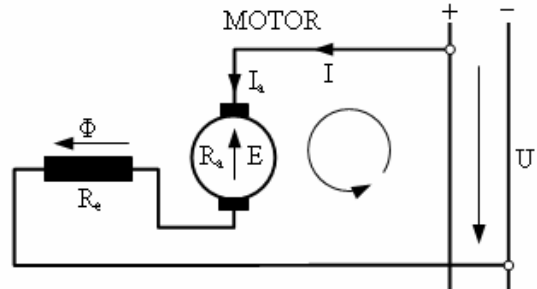


$$\begin{cases} U = E + R_a \cdot I_a \\ I = I_a + I_e \end{cases}$$

b) serie:

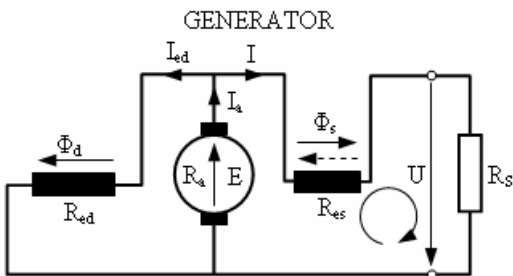


$$E = U + (R_a + R_e) \cdot I$$

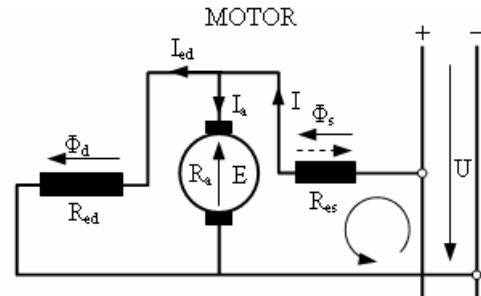


$$U = E + (R_a + R_e) \cdot I$$

c) mixta:



$$\begin{cases} E = U + R_a \cdot I_a + R_{es} \cdot I \\ I_a = I_{cd} + I \end{cases}$$



$$\begin{cases} U = E + R_a \cdot I_a + R_{es} \cdot I \\ I = I_a + I_{cd} \end{cases}$$

6.9 Caracteristicile generatorului de c.c.

Functionarea în regim staționar a unui generator de c.c. depinde de o serie de marimi, cum ar fi: t.e.m. E , tensiunea la borne U , curentul din înfășurarea rotorica I , curentul de excitație I_e , viteza de rotație Ω (turația n). Aceste marimi nu sunt independente, ele fiind legate de ecuațiile deduse în capitolele anterioare.

Dependenta dintre două din marimile enunțate mai sus, în ipoteza ca celelalte sunt constante, poartă numele de caracteristică.

Din punctul de vedere al importanței în exploatare, cât și pentru evaluarea performanțelor unui generator, ne vor interesa următoarele lui caracteristici:

- Caracteristica de mers în gol $U_0 = f(I_e)$ când $I = 0$ și $n = \text{ct.}$;
- Caracteristica externă $U = f(I)$ când $I_e = \text{ct.}$ și $n = \text{ct.}$;
- Caracteristica de reglaj $I_e = f(I)$ când $U = \text{ct.}$ și $n = \text{ct.}$

6.9.1 Generatorul cu excitație alimentată separat

a) Condiția de mers în gol înseamnă o valoare infinită a rezistenței de sarcină $R_s = \infty$ astfel încât curentul debitat să se anuleze $I = 0$ și deci $U_0 = E$.

Dacă turația este constantă, din expresia t.e.m. se observă că unica mărime dependentă de curentul de excitație este fluxul magnetic.

Este evident că alătură caracteristicii $U_0 = f(I_e)$ este de fapt $\Phi(I_e)$ adică curba de magnetizare, ca în figura 6.16.

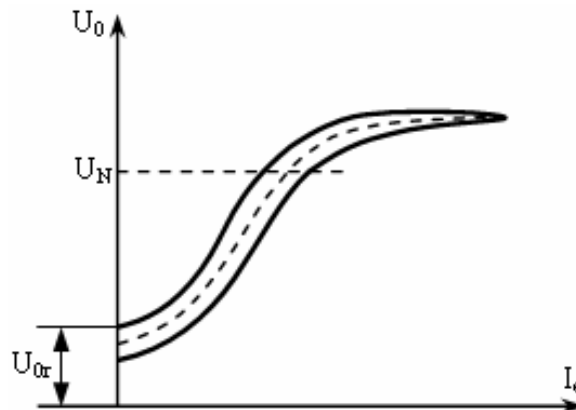


Figura 6.16

Este de remarcat faptul ca pentru $I_e = 0$, t.e.m. si, deci, tensiunea de mers în gol U_0 are o valoare diferita de zero U_{or} , care se datoreaza fluxului remanent al polilor de excitatie, daca masina a mai functionat anterior.

Se mai poate remarca o zona de relativa liniaritate între cele doua marimi (regim de functionare cu miezul nesaturat) si, totodata, faptul ca la o tensiune de mers în gol [cu (15 ÷ 20)% mai mare decât tensiunea nominala], se manifesta fenomenul de saturatie, tensiunea ramânând, practic, constanta la cresterea curentului de excitatie.

Cum din cauza fenomenului de histerezis magnetic dependenta $U_0 = f(I_e)$ nu este univoca, se mai considera, prin conventie, drept caracteristica de mers în gol, curba medie pe ordonata a celor doua ramuri ale buclei de histerezis magnetic (curba punctata).

b) Caracteristica externa $U = f(I)$ presupune valori finite ale rezistentei de sarcina $0 < R < \infty$. Ecuatia de dependenta $U = E - R_a \cdot I$, în conditiile de restrictie $E = ct.$, ne arata o dependenta liniara cu panta foarte mica (rigida), deoarece, constructiv, ea are asemenea valori încât propria cadere de tensiune $R_a \cdot I$ sa nu depaseasca (10 ÷ 15)% din tensiunea nominala (figura 6.17).

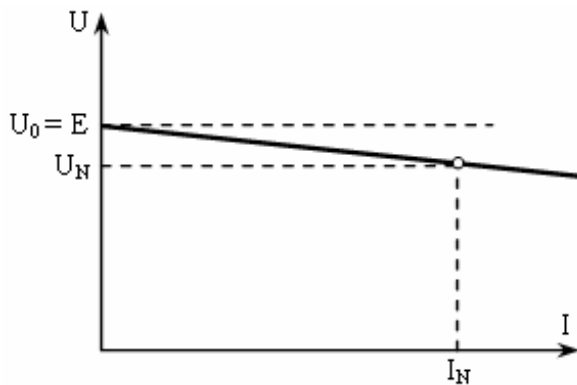


Figura 6.17

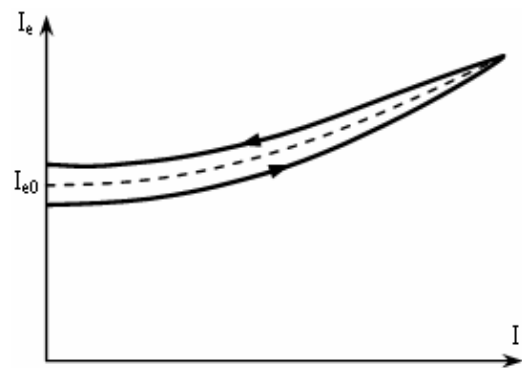


Figura 6.18

Caracteristica pune în evidenta capacitatea generatorului de a-si mentine singur tensiunea la borne, în limite admisibile pentru receptoare, atunci când sarcina variaza, stiut fiind faptul ca diferitele receptoare functioneaza cu maximum de eficienta, daca tensiunea la borne nu variaza în limite prea mari fata de valoarea prescrisa.

c) Caracteristica de reglaj $I_e = f(I)$ când $U = ct.$ si $n = ct.$ trasata în figura 6.18, ne arata în ce sens si cu cât anume trebuie modificat curentul de excitatie pentru ca, atunci când sarcina variaza, tensiunea la borne sa ramâna constanta.

6.9.2 Generatorul cu autoexcitatie derivatie

Daca privim ecuatiile masinii cu autoexcitatie derivatie în regim de generator, deduse în capitolul precedent si tinem cont de faptul ca rezistenta circuitului de excitatie este mult mai mare decât rezistenta circuitului rotoric, rezulta ca, curentul de excitatie este de, doar, (1 ÷ 5)% din curentul debitat pe sarcina si, ca atare, se poate neglija.

Cu aceasta aproximatie ecuatiile devin identice cu cele ale generatorului cu excitatie separata.

Devine evident faptul ca si caracteristicile acestui generator sunt similare cu cele prezentate anterior.

6.9.3 Generatorul cu autoexcitatie serie

Deoarece la aceasta masina curentul debitat este si curentul de excitatie, rezulta ca atât caracteristica de mers în gol, cât si caracteristica de reglaj nu au sens.

Caracteristica externa, unica care se poate ridica, dar si aceasta în conditiile unui flux magnetic de excitatie variabil prin variatia curentului, este redată în figura 6.19. Ea apare prin scaderea grafica a curbei $E(I)$ (curba de magnetizare) si, respectiv, caderii proprii de tensiune $(R_a + R_e) \cdot I$ conform ecuatiei:

$$U = E(I) - (R_a + R_e) \cdot I.$$

Curba rezultanta ne arata incapacitatea acestui generator de a-si pastra tensiunea aproape constanta, independent de sarcina, cerinta strict necesara în exploatare.

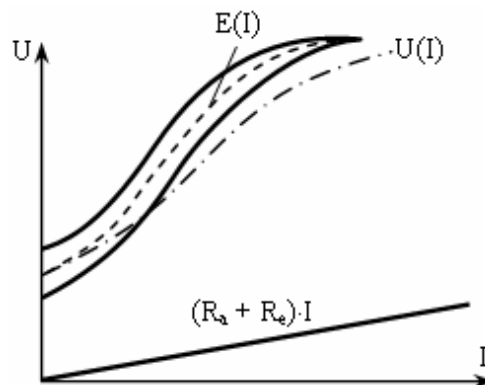


Figura 6.19

Este evident ca generatorul cu autoexcitatie serie nu este întrebuintat în practica din acest motiv.

6.9.4 Generatorul cu autoexcitatie mixta

Trebuie specificat mai întâi faptul ca, fluxul magnetic ce contribuie la crearea t.e.m. din masina se datoreaza practic înfășurării de excitatie derivatie, înfășurarea serie având numai rolul de a modifica în limite relativ mici, (10 ÷ 15)%, fluxul de excitatie principal, dupa cum se leaga aditional sau diferential.

Deci fluxul total poate fi scris:

$$\Phi = \Phi_d(I_{ed}) \pm \Phi_s(I).$$

Ca atare, înfășurarea de autoexcitatie serie poate întari sau poate slabi fluxul principal de excitatie Φ_d .

Se mai poate remarca faptul ca punând conditiile de mers în gol, ecuatiile devine similare cu cea a generatorului cu autoexcitatie derivatie, de unde si similitudinea caracteristicii cu același nume.

Caracteristica externa, data de ecuatiile:

$$U = E_d(I_{ed}) \pm E_s(I) - R_a \cdot I_a - R_{es} \cdot I,$$

ne arata doua tipuri de curbe evidentiate în figura 6.20, dupa cum excitatia serie e legata aditional 2 sau diferential 1.

Totodata, se mai remarca faptul ca în conditiile caracteristicii externe ideale (2'), se obtine o independenta a tensiunii fata de sarcina si ca atare este inutila caracteristica de reglaj.

Funcție de aceeași condiție, legarea aditionala 2 sau diferentiala 1 a circuitului de excitatie si caracteristica de reglaj prezinta cele doua variante conform figura 6.21.

Se poate remarca faptul ca generatorul de c.c. cu autoexcitatie mixta se recomanda pentru alimentarea consumatorilor foarte pretentiosi la conditia de tensiune constanta independent de sarcina (excitatie masinii sincrone, lampi de iluminat etc.).

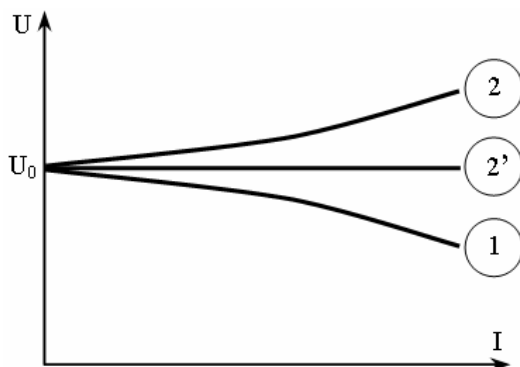


Figura 6.20

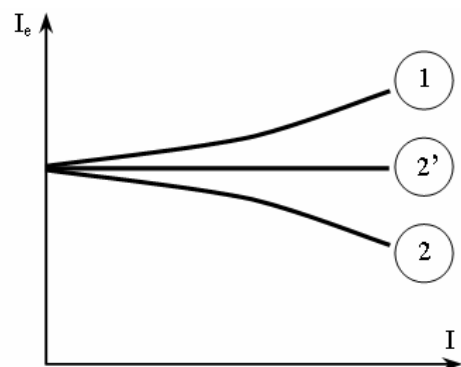


Figura 6.21

6.10 Caracteristicile motorului de c.c.

Pentru o masina de c.c. care functioneaza în regim de motor, pot varia în timpul functionarii urmatoarele marimi: U , I , I_e , Ω , M , P_2 .

Vom prezenta în cele ce urmeaza doua caracteristici, capabile sa ilustreze performantele masinii în comparatie cu cele studiate anterior, cât si posibilitatea modificarii lor (familii) prin variatia celorlalte marimi ce prezinta interes în utilizare.

Acestea sunt:

- Caracteristica de mers în gol $n_0 = f(I_e)$ ridicata în conditiile $U = \text{ct.}$, $M = 0$, ceea ce implica $I = 0$;
- Caracteristica mecanica $n = f(M)$ ridicata în conditiile $I_e = \text{ct.}$, $U = \text{ct.}$

De la bun început trebuie sa precizam ca între motorul cu excitatie separata si cel cu autoexcitatie derivatie nu exista nici o deosebire în functionare.

Ca atare, vom prezenta – în acest paragraf – numai caracteristicile motorului de c.c. cu excitatie separata.

Conform celor aratate în paragrafele anterioare, ecuatiile motorului cu excitatie separata sunt:

$$E = K_e \cdot n \cdot \Phi(I_e) \text{ si în regim nesaturat } E = K_e' \cdot n \cdot I_e;$$

$$M = K \cdot \Phi(I_e) \cdot I \text{ si în regim nesaturat } M = K' \cdot I_e \cdot I, \quad U = E + R_a \cdot I.$$

6.10.1 Caracteristica de mers în gol

Notiunea de mers în gol presupune absenta cuplului rezistent, lucru imposibil de realizat, datorita necesitatii dezvoltarii de catre motor a unui cuplu pentru acoperirea în regim stationar a cuplului de frecari în lagare si cu aerul (datorita existentei ventilatorului).

$$M_0 = M_f,$$

Valoarea cuplului de frecari este data de relatia:

$$M_0 = \frac{P_f}{\Omega_0} = K_m \cdot I_{a_0} \cdot \Phi(I_e),$$

unde:

$$P_f = U_N \cdot I_{a_0} - \text{puterea absorbita de motor la mersul în gol};$$

$$\Omega_0 - \text{viteza unghiulara a motorului la mersul în gol};$$

I_{a_0} – curentul absorbit la mersul în gol de înfasurarea rotorica.

Din expresia de mai sus, deoarece cuplul de frecari este foarte mic, rezulta pentru curentul absorbit de la retea de înfasurarea rotorica o valoare foarte mica (câteva procente din I_a). Reactia transversala fiind, practic, astfel, inexistentă, cu o foarte buna aproximatie ecuatia de tensiuni a indusului se poate pune sub forma:

$$E_0 = K_e \cdot n_0 \cdot \Phi_0 = U_N - R_a \cdot I_0 - \Delta U_{p_0} \cong U_N,$$

din care rezulta:

$$n_0 = \frac{U_N}{K_e \cdot \Phi_0}.$$

Turatia de mers în gol este, astfel, invers proportioala cu fluxul inductor polar principal, a carui dependenta de intensitatea I_e a curentului de excitatie este data de caracteristica de magnetizare a masinii (figura 6.22):

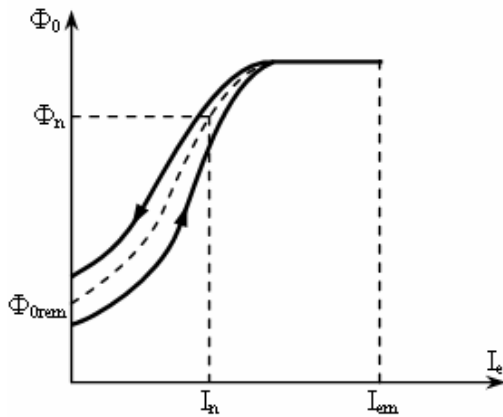


Figura 6.22

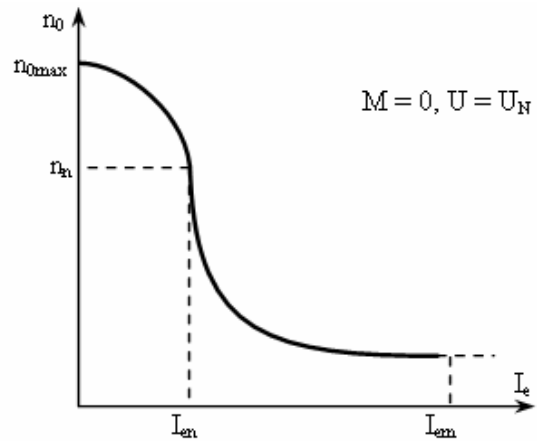


Figura 6.23

Valoarea maxima a turatiei se obtine pentru (figura 6.23):

$$n_{0\max} = n_0|_{(I_e=0)} = \frac{U_N}{K_e \cdot \Phi_{0\text{rem}}}.$$

Aceasta valoare este, însa, oarecum, foarte ridicata si poate duce la sollicitari mecanice nepermise pentru masina, motiv pentru care trebuie evitata. De aceea, la ridicarea în laborator a caracteristicii, curentul de excitatie se coboara numai pâna la valori corespunzând unei turatii cu cel mult (20 ÷ 25)% peste valoarea nominala n_n .

Pe de alta parte, la cresteri mari ale curentului de excitatie, circuitul magnetic al masinii se satureaza, fluxul Φ_0 se plafoneaza si turatia nu mai are scaderi sensibile. Curentul maxim de excitatie pâna la care se poate merge este cel impus de rezistenta proprie a înfasurarii de excitatie:

$$I_{em} = \frac{U_N}{R_{ex}}.$$

Acesta valoare se obtine, practic, la scurtcircuitarea completa a reostatului de câmp, plasat în circuitul de excitatie al motorului.

Forma acestei caracteristici evidentiaza un mare avantaj al motorului de c.c. cu excitatie independenta (derivatie) si anume faptul ca printr-un reglaj corespunzator al curentului de excitatie, turatia poate fi reglata între limite foarte largi.

Pentru motorul de c.c. cu excitatie serie, deoarece $I_e = I_a = I$ caracteristica de mers în gol nu are sens.

6.10.2 Caracteristica mecanica

Caracteristica mecanica defineste dependenta $n = f(M)$ în conditiile $I_e = \text{ct.}$, $U = \text{ct.}$

Pentru determinarea ei vom defini, mai întâi, caracteristicile:

- de sarcina, numita si caracteristica externa a motorului $n = f(I)$ în conditiile $I_e = \text{ct.}$, $U = \text{ct.}$;
- caracteristica cuplului electromagnetic $M = f(I)$ în conditiile $I_e = \text{ct.}$, $U = \text{ct.}$

a) Caracteristica de sarcina a motorului de c.c. cu excitatie independenta (derivatie).

Schema simbolica asociata motorului de c.c. cu excitatie independenta a fost prezentata în capitolul 6.8, având ecuatiile:

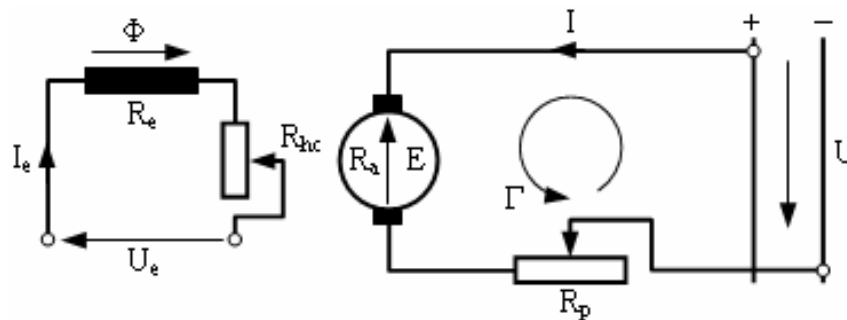


Figura 6.24

$$U_N = E + R_a \cdot I + \Delta U_p,$$

neglijând ΔU_p – caderea de tensiune la perii, obținem:

$$U_N = E + R_a \cdot I,$$

dar

$$E = K_e \cdot n \cdot \Phi,$$

rezulta:

$$n = \frac{U_N}{K_e \cdot \Phi} - \frac{R_a \cdot I}{K_e \cdot \Phi} = n_0 - \frac{R_a}{K_e} \cdot I.$$

Deoarece rezistenta indusului este foarte mica, rezulta ca la functionarea în plina sarcina, caderea de tensiune $R_a \cdot I$ reprezinta numai câteva procente din tensiunea aplicata U_N , deci turatia va scade foarte putin comparativ cu mersul în gol. La curenti mari în indus apare, însa, o usoara crestere a turatiei din cauza reactiei indusului. Forma acestei caracteristici este redata în figura 6.25, a.

Caracteristica cuplului electromagnetic $M = f(I)$ este data de relatia $M = K_m \cdot \Phi \cdot I$ având forma liniara, pâna aproape de curentul nominal, unde din cauza reactiei indusului se constata o usoara aplatizare a curbei, conform figurii 6.25, a. Cuplul electromagnetic fiind $M = M_u + M_0$ rezulta $M_u = M - M_0$ obtinem, astfel, caracteristica mecanica din figura 6.25, c.

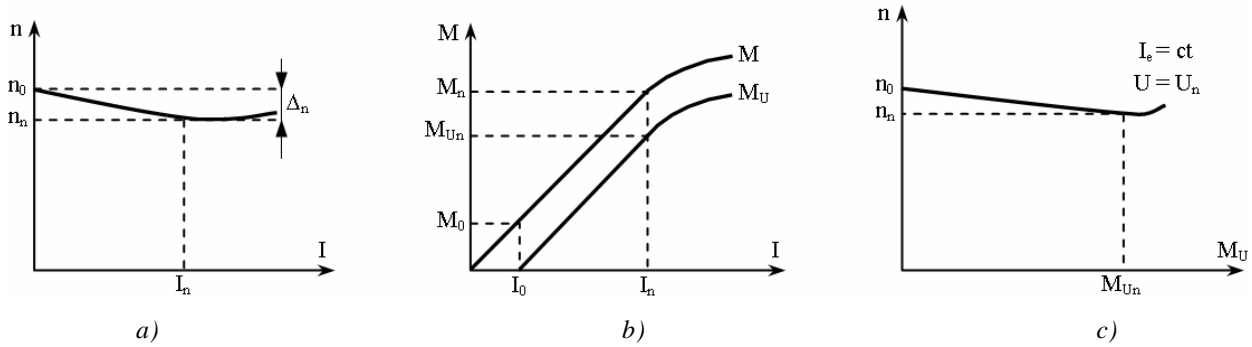


Figura 6.25

b) Caracteristicile motorului de c.c. cu excitatie serie

Schema simbolica a motorului de c.c. cu excitatie serie este redata mai jos (figura 6.26).

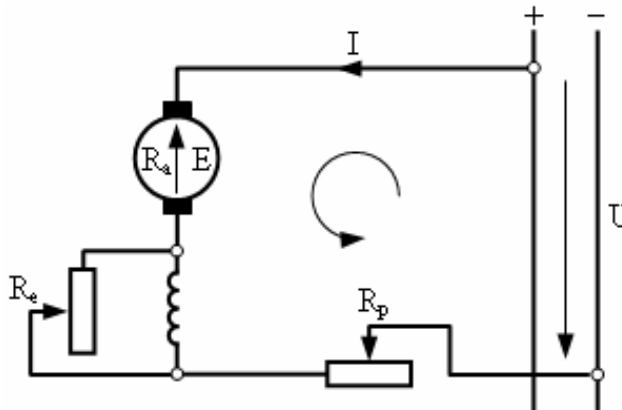


Figura 6.26

Neglijând caderea de tensiune la perii ($\Delta U_p \approx 0$) se obtin ecuatiile:

$$\begin{cases} U = E + (R_a + R_e) \cdot I \\ E = K_e \cdot n \cdot \Phi \\ M = K_m \cdot \Phi \cdot I \end{cases} .$$

Deoarece curentul absorbit de motor de la retea are, acum, aceeași intensitate cu cel ce parcurge înfășurarea rotorica și de excitație, fluxul mașinii este funcție de curentul din indus, având o dependență neliniară. Putem aproxima această caracteristică magnetică neliniară în funcție de curentul din indus cu relația (figura 6.27):

$$\Phi = \Phi_s \cdot \frac{I}{I + I_1},$$

în care:

Φ_s – fluxul de saturație al polilor inductori;

I_1 – valoarea curentului determinată de intersecția tangentei la porțiunea liniară a caracteristicii de magnetizare $\operatorname{tg}\alpha = \frac{\Phi_s}{I_1}$.

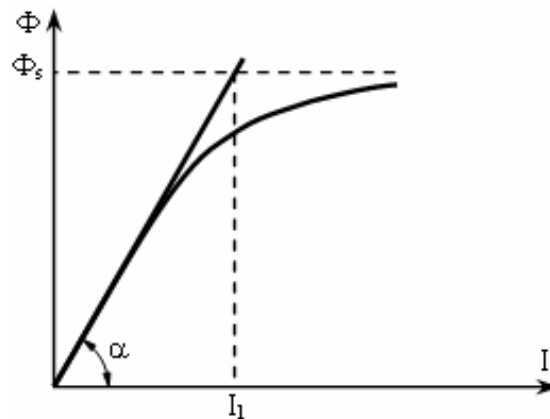


Figura 6.27

Pentru determinarea caracteristicii mecanice a motorului serie vom analiza comparativ valoarea curentului din indus, în raport cu valoarea limită a curentului de excitație, I_1 .

Caracteristica cuplului $M = f(I)$ la motorul de c.c. cu excitație serie.

În ecuația cuplului înlocuind fluxul Φ cu expresia $\Phi = \Phi_s \cdot \frac{I}{I + I_1}$, rezulta:

$$M = K_m \cdot \Phi_s \cdot \frac{I^2}{I + I_1}.$$

Pentru $I \ll I_1$ rezulta: $M = K_m \cdot \Phi_s \cdot \frac{I^2}{I_1} = K_m \cdot \frac{\Phi_s}{I_1} \cdot I^2 = K_m \cdot I^2 \cdot \operatorname{tg}\alpha$, deci $M = f(I^2)$ variație

patrată având valoarea $I = I_1 \cdot M_1 = K_m \cdot \Phi_s \cdot I_1$.

Pentru $I \gg I_1$ rezulta: $M = K_m \cdot \Phi_s \cdot \frac{I}{I_1} = K_m \cdot \Phi_s \cdot I = f(I)$ deci: $M = f(I)$ – variație liniară.

Dependența astfel obținută, este redată în figura 6.28:

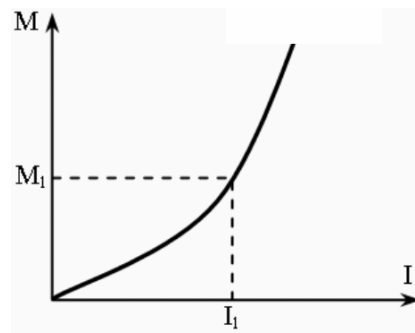


Figura 6.28

Caracteristica de sarcina (externa) $n = f(I)$ se obtine din ecuatia de tensiuni:

$$U_N = E + (R_a + R_e) \cdot I,$$

unde:

$$E = K_e \cdot n \cdot \Phi \text{ obtinând: } \Phi = \Phi_s \cdot \frac{I}{I + I_1}.$$

$$n = \frac{U_N}{K_e \cdot \Phi_s \cdot \frac{I}{I + I_1}} - \frac{(R_a + R_e)}{K_e \cdot \Phi_s \cdot \frac{1}{I + I_1}} \text{ sau } n = (I + I_1) \cdot \left(\frac{U_N}{K_e \cdot \Phi_s \cdot I} - \frac{R_a + R_e}{K_e \cdot \Phi_s} \right)$$

La valori mici ale curentului din indus $I \ll I_1$ rezulta:

$$n = I_1 \cdot \left(\frac{U_N}{K_e \cdot \Phi_s \cdot I} - \frac{R_a + R_e}{K_e \cdot \Phi_s} \right) \text{ deci, } n = f\left(\frac{1}{I}\right), n \sim \frac{1}{I}.$$

Pentru valoarea curentului din indus $I \gg I_1$:

$$n = \frac{U}{K_e \cdot \Phi_s} - \frac{R_a + R_e}{K_e \cdot \Phi_s} \cdot I,$$

caracteristica liniara asemanatoare cu cea a motorului derivatie dar de panta mult mai mare datorata prezentei rezistentei înfasurarii de excitatie. În figura 6.29 este redată variatia $n = f(I)$.

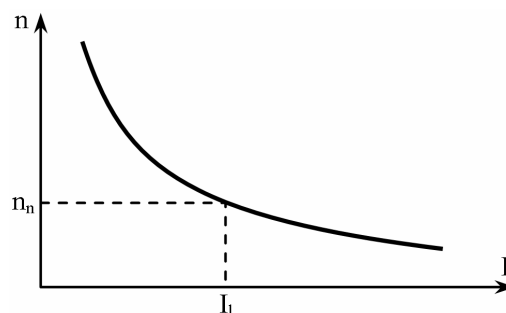


Figura 6.29

Caracteristica mecanica $n = f(M)$ se obtine înlocuind expresia cuplului în relatia turatiei:

$$M = K_m \cdot \Phi_s \cdot \frac{I^2}{I + I_1}.$$

Obtinem astfel:

$$n = \frac{K_m}{K_e} \cdot \left(\frac{U_N \cdot I}{M} - \frac{(R_e + R_a) \cdot I^2}{M} \right)$$

Pentru $I \ll I_1$ expresia cuplului este:

$$M = K_m \cdot \frac{\Phi_s}{I_1} \cdot I^2 \text{ sau } I = \sqrt{\frac{I_1}{\Phi_s \cdot K_m}} \cdot \sqrt{M},$$

$$\text{si, respectiv, } n = \sqrt{\frac{K_m \cdot I_L}{K_e^2 \cdot \Phi_s}} \cdot \frac{U_N}{\sqrt{M}} - \frac{(R_e + R_a) \cdot I_1}{K_e \cdot \Phi_s} = K \cdot \frac{U_N}{\sqrt{M}} - \frac{(R_a + R_e)}{K_e \cdot \Phi_s} \cdot I_1, \text{ deci, } n \sim \frac{1}{\sqrt{M}}.$$

La valori mari ale curentului din indus, $I \gg I_1$ avem:

$$n = \frac{U}{K_e \cdot \Phi_s} - \frac{R_a + R_e}{K_e \cdot K_m \cdot \Phi_s^2} \cdot M,$$

caracteristica identica cu cea a motorului cu excitatie derivatie, dar de panta pronuntata datorita înserierii cu indusul a înfasurarii de excitatie (figura 6.30).

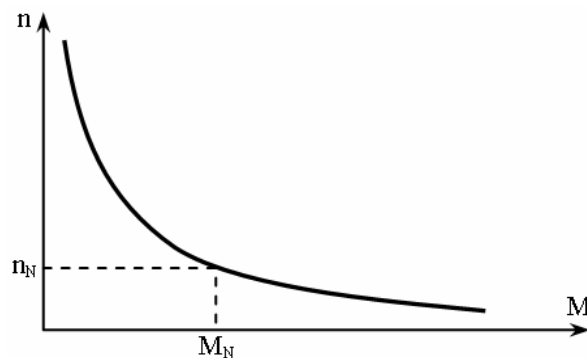


Figura 6.30

Din examinarea caracteristicii, rezulta ca la cupluri mici motorul se ambaleaza, deci trebuie evitata functionarea în gol. Datorita caracteristicii mecanice cazatoare, motorul cu excitatie serie este utilizat la tractiunea electrica urbana si feroviara.

c) Caracteristica mecanica a motorului cu excitatie mixta

Motoarele cu excitatie mixta prezinta doua înfasurari: una serie, iar cealalta derivatie, care functie de modul de parcurgere a curentilor, fluxurile lor pot fi aditionale sau diferentiale.

În cazul conexiunii aditionale înfasurarea serie este principala si magnetizeaza masina în acelasi sens cu sensul în care magnetizeaza solenatia produsa de înfasurarea derivatie. Odata cu cresterea curentului de sarcina creste si fluxul magnetic inductor, ceea ce produce scaderea turatiei motorului.

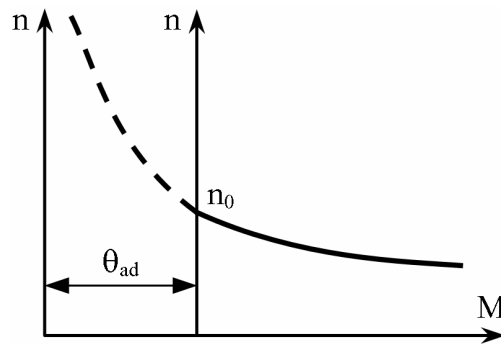


Figura 6.31

Caracteristica se poate constitui la fel ca pentru motorul serie, solenatia înfășurării derivate deplasând axa ordonatelor spre dreapta (figura 6.31).

În cazul conexiunii diferentiale, înfășurarea derivate este principala, magnetizând masina în sens opus magnetizării produse de înfășurarea serie. Odata cu creșterea curentului de sarcină, scade fluxul magnetic inductor, ducând la creșterea turatiei și ambalarea motorului.

Caracteristica se determina din cea a motorului derivate cu deplasarea spre dreapta a axei ordonatelor în condițiile unui motor necompensat, decicuo puternica reacție a indusului (figura 6.32).

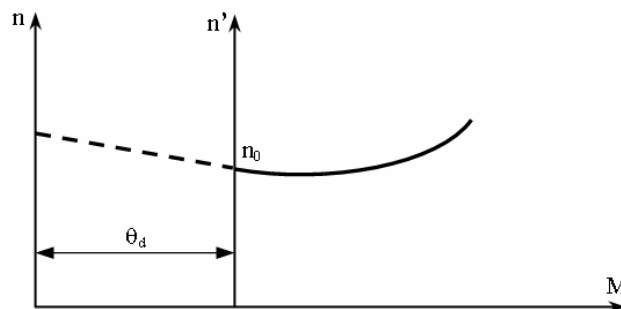


Figura 6.32

Motorul ramâne diferentiale se utilizeaza în acționările electrice în care sarcina are o durată scurtă, iar turatia să fie cât mai constantă de la funcționarea în gol la funcționarea în sarcină, ca de exemplu la acționarea laminoarelor.

6.11 Reglarea vitezei motoarelor de c.c.

Una din cerințele impuse motorului de c.c. utilizat în acționările electrice, este aceea ca viteza să poată fi reglată ușor în limite largi.

Posibilitatea concretă de reglare a vitezei (turatiei) motoarelor de c.c. rezulta din examinarea expresiei caracteristicii mecanice.

Principal, aceste posibilitati sunt urmatoarele:

- variația tensiunii la bornele circuitului rotoric prin introducerea de rezistențe suplimentare în circuitul rotoric, păstrând tensiunea rețelei neschimbata;

- variatia tensiunii U a sursei de alimentare;
- variatia fluxului de excitatie (de fapt a curentului de excitatie).

6.11.1 Reglarea vitezei prin modificarea rezistentei rotorice (reglaj reostatic)

a) Motorul de c.c. cu excitatie independenta (derivatie)

Din examinarea expresiei caracteristicii mecanice $n = \frac{U_N}{K_e \cdot \Phi} - \frac{R_a \cdot I}{K_e \cdot \Phi} = n_0 - \frac{R_a}{K_e \cdot \Phi} \cdot I$

rezulta ca prin modificarea rezistentei rotorice, turatia de mers în gol nu se modifica deoarece nu depinde de rezistenta rotorica. Prin modificarea rezistentei (introducerea de rezistente suplimentare în circuitul rotoric) se modifica panta caracteristicii.

În figura 6.33 sunt reprezentate câteva caracteristici obtinute prin introducerea de rezistente în circuitul rotoric. Caracteristicile astfel obtinute se numesc artificiale, iar caracterstica motorului în conditii nominale (R_{aN} , U_N , Φ_N) se numeste naturala.

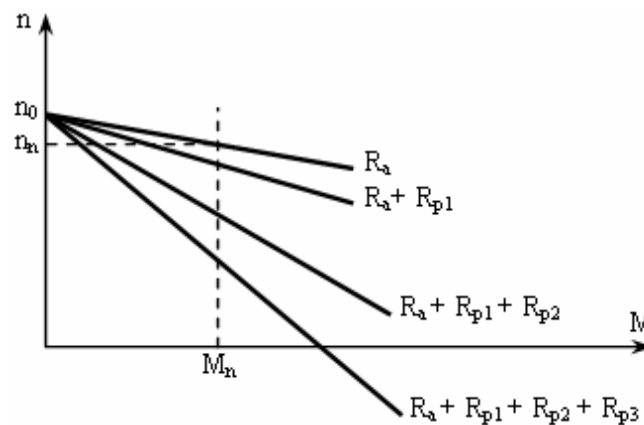


Figura 6.33

Ecuatia unei caracteristici artificiale este:

$$n = \frac{U_N}{K_e \cdot \Phi} - \frac{(R_a + \sum R_p)}{K_m \cdot K_e \cdot \Phi^2} \cdot M.$$

Reglajul reostatic este simplu, el putând fi folosit și la pornirea motorului, dar la sarcini relativ reduse se obtine o gama îngusta de reglare a vitezei.

Randamentul sistemului scade prin introducerea de rezistenta suplimentara, datorita pierderilor Joule.

b) Motorul de c.c. serie.

Forma caracteristicilor artificiale obtinute în cazul reglajului reostatic este prezentata în figura 6.34.

Reglajul reostatic este mai eficient în cazul unor sarcini mici.

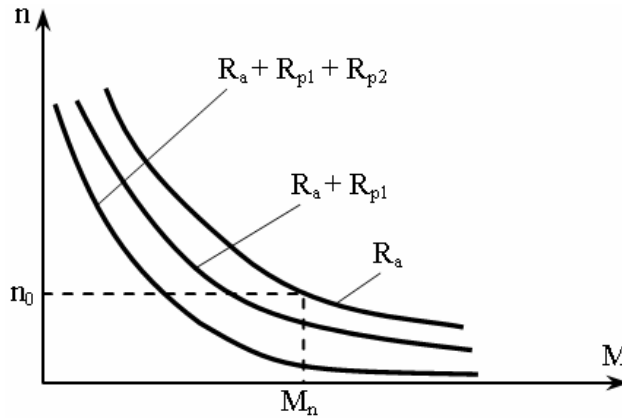


Figura 6.34

6.11.2 Reglarea vitezei prin variatia tensiunii sursei de alimentare U

Aceasta metoda presupune existenta unei surse independente de c.c. (grup Ward – Leonard sau alimentarea din mutator comandat).

a) Motoarele de c.c. cu excitatie independenta (derivatie)

Prin variatia tensiunii de alimentare se modifica turatia de mers în gol fara modificarea pantei caracteristicii mecanice.

În figura 6.35, a sunt reprezentate câteva caracteristici mecanice artificiale obtinute prin variatia tensiunii de alimentare.

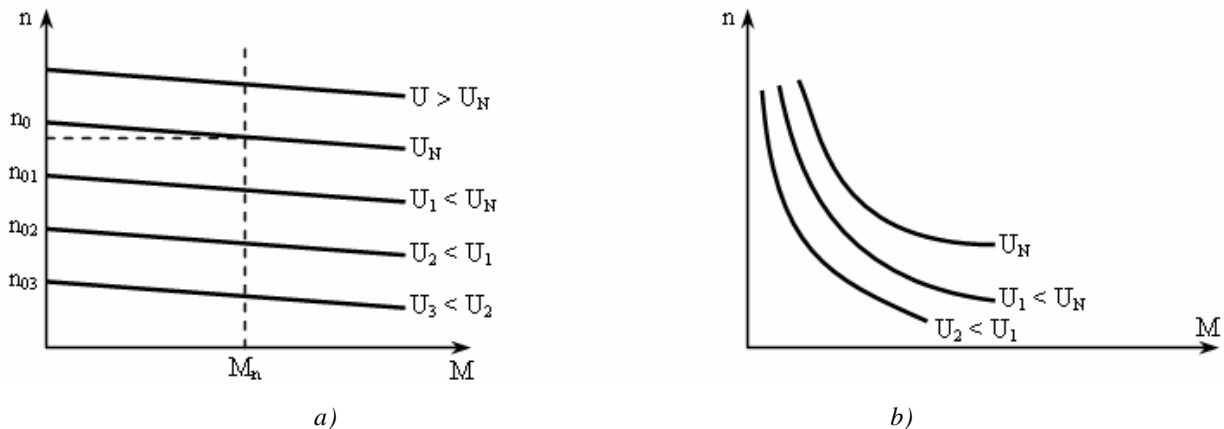


Figura 6.35

Procedeul este eficient la orice sarcina a masinii, observându-se ca aceste caracteristici sunt paralele.

b) Motorul serie

Famiile de caracteristici artificiale obtinute prin reglajul tensiunii de alimentare sunt prezentate în figura 6. 35, b.

6.11.3 Reglajul turatiei prin variatia flux ului de excitatie

Metoda se bazeaza pe variatia fluxului de excitatie prin introducerea unui reostat în circuitul de excitatie. Prin reducerea fluxului de excitatie se modifica atât turatia de mers în gol cât si panta caracteristicii mecanice. Familia de caracteristici artificiale obtinuta prin reducerea fluxului, este data în figura 6.35.

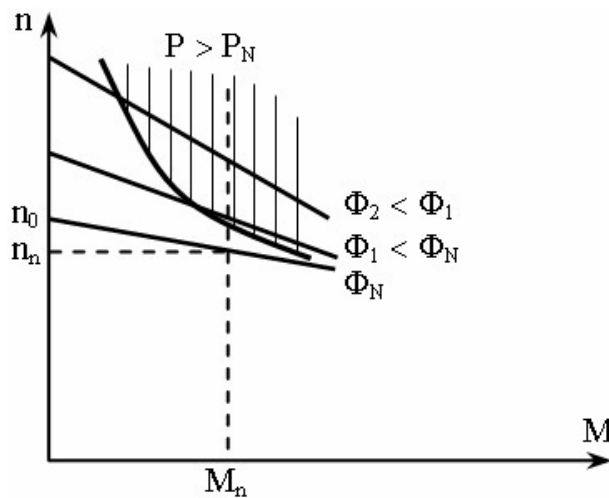


Figura 6.36

Trebuie remarcat ca pastrarea unui cuplu electromagnetic constant din $M = K_m \cdot \Phi \cdot I = ct.$ produce, prin reducerea fluxului, o crestere a curentului rotor absorbit de masina, crestere invers proportionala cu fluxul, deci, direct proportionala cu turatia. Dar cresterea curentului rotoric peste valoarea nominala pe o durata mare conduce la supraîncalzirea excesiva a masinii.

Pentru a evita supraîncalzirea, trebuie pastrata puterea constanta si din relatiile:

$$P_N = M \cdot \Omega = ct.$$

rezulta ca prin reducerea fluxului, crescând turatia, cuplul masinii trebuie redus. Reducerea cuplului se face dupa o lege exponentiala, iar în figura 6.36, este reprezentata hasurat portiunea unde este depasita puterea nominala.

Metoda se aplica în cazul sarcinilor reduse, deoarece diminuarea fluxului determina o înrautatie a comutatiei.

Reducerea fluxului în cazul motoarelor cu excitatie serie conduce la caracteristici de forma data în figura 6.37 si este aplicata rar.

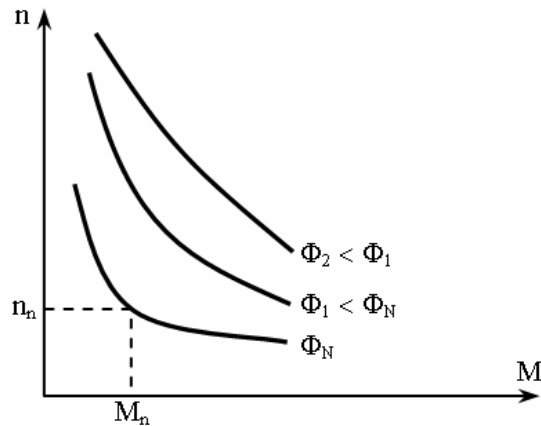


Figura 6.37

Observatie

Fluxul magnetic poate fi si crescut peste valoarea nominala la motoarele de c.c. cu excitatie independenta (derivatie) caz în care turatia la arbore va scadea , acest reglaj facându-se la cuplu constant.

Astfel, modificarea fluxului de excitatie permite un reglaj al turatiei atât în sens crescator cât si descrescator în raport cu turatia de mers în gol ideal (n_0).

6.12 Frânarea masinii de c.c.

Masina de c.c. poate fi utilizata în actionari electrice si pentru frânarea sistemului actionat. În acest mod masina poate fi pusa în functiune în regim de generator care sa debiteze pe retea proprie (frânare dinamica) sau pe o retea de tensiune constanta (frânare recuperativa), fie în regim de frâna propriu-zisa (frânare potentiala, respectiv, frânare contracurent).

6.12.1 Frânarea dinamica

O masina de c.c. care functiona în regim de motor, este pusa sa functioneze în regim de generator pe o retea proprie prin deconectarea indusului de la retea si conectarea acestuia pe o rezistenta de frânare. Schema unei astfel de frânari este data în figura 6.38, având ecuatiile:

$$\begin{cases} U_N = 0 \\ E = (R_a + R_F) \cdot I_F = K_m \cdot \Phi \cdot \Omega. \\ \Omega = \left(\frac{R_a + R_F}{K_m \cdot \Phi} \right) \cdot I_F \end{cases}$$

În cazul generatorului excitat și conectat pe o rezistență constantă, cuplul electromagnetic scade proporțional cu turația, ajunând la turații joase făcând ca aceasta metodă să nu mai devină eficientă. În acest caz este necesară combinarea cu o frânare mecanică (cu saboti).

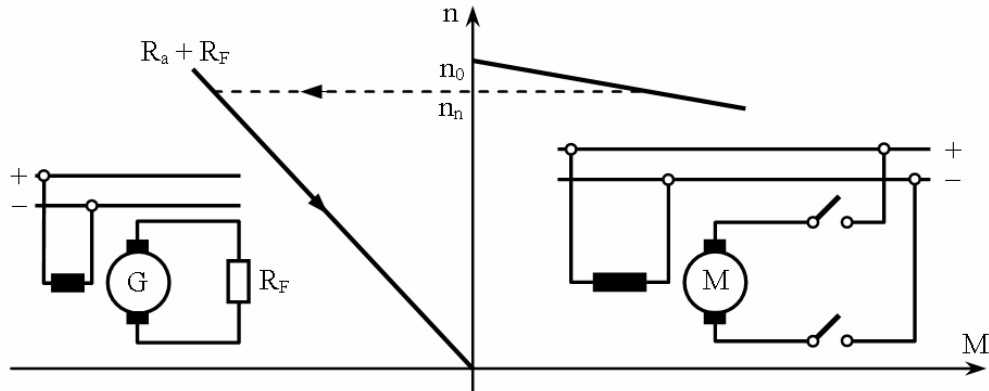


Figura 6.38

6.12.2 Frânarea recuperativa

Dacă mașina de c.c., care funcționează în regim de motor este antrenată din exterior la o turație mai mare decât turația $n_0 = \frac{U_N}{K_e \cdot \Phi}$ mașina trece în regim de generator și debitează în rețea o putere electrică.

La fluxul de excitație constant $\Phi = \text{ct.}$, tensiunea electromotoare $E = K_e \cdot \Phi \cdot \Omega$, este funcție de viteza Ω . Tensiunea rețelei fiind constantă, este dată de relația $U_N = K_e \cdot \Phi \cdot \Omega$. Pentru viteze $\Omega > \Omega_0$, tensiunea electromotoare devine mai mare decât tensiunea de alimentare $|E| > U_N$ și curentul schimbă de sens $I = \frac{U - |E|}{R_a} < 0$. Rezultă cuplul electromagnetic $M = K_m \cdot \Phi \cdot I < 0$ schimbă de sens devenind cuplul de frânare $M = K_m \cdot \Phi \cdot I < 0$. Caracteristica mașinii este descrisă de relația:

$$\Omega = \Omega_0 + \frac{R_a}{(K_m \cdot \Phi)^2} \cdot M,$$

cu reprezentarea grafică din figura 6.39.

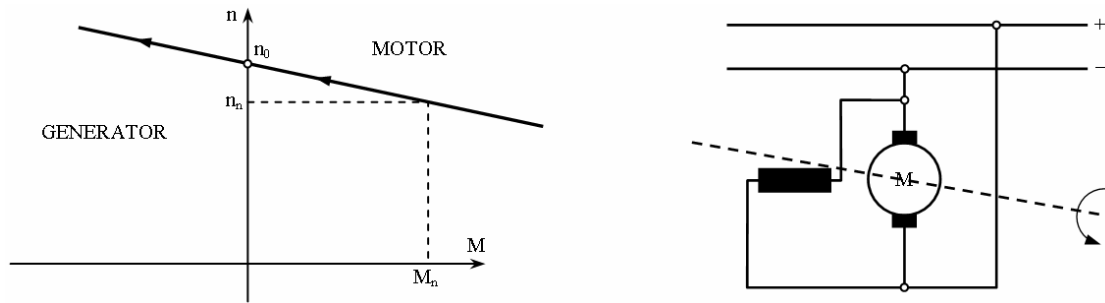


Figura 6.39

6.12.3 Frânarea propriu-zisa

Frânarea propriu-zisa se aplica functie de tipul sarcinii motorului de c.c. si anume de tip potential (macara) sau de tip reactiv.

a) Sarcini potentiale

Frânarea presupune reducerea turatiei motorului pâna la anulare, la aceeași polaritate a tensiunii de alimentare. Sa consideram o macara în care pentru ridicare, masina a fost conectata ca motor, functionând pe caracteristica naturala, în punctul nominal A_n . Când greutatea a ajuns la o anumita înaltime, se pune problema frânării.

Frânarea presupune introducerea unui reostat de frânare R_F , în circuitul rotoric. Masina functionând la cuplu electromagnetic constant, punctul de functionare trece din punctul A_n în punctul de intersectie al caracteristicii artificiale, cu dreapta $M = ct.$ pe traseul din figura 6.40.

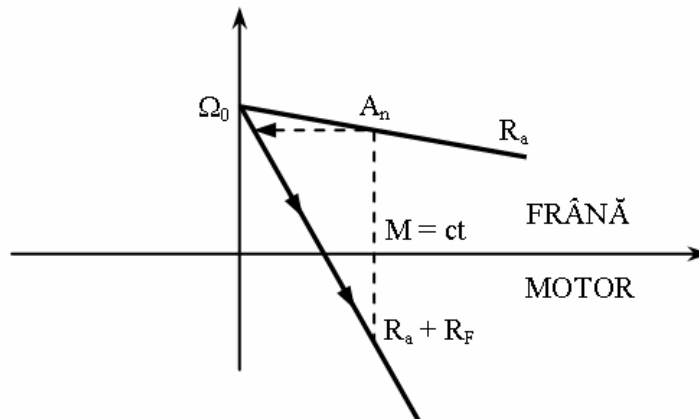


Figura 6.40

Caracteristica de frânare va fi:

$$\Omega = \Omega_0 - \frac{R_a + R_F}{(K_m \cdot \Phi)^2} \cdot M.$$

La anularea turatiei, masina va fi deconectata si blocheaza sarcina.

b) Sarcini reactive

Frânarea se realizeaza prin inversarea polaritatii (contraconectare sau contracurent) tensiunii de alimentare si introducerea în circuitul rotoric a unei rezistente de limitare a curentului.

Prin inversarea polaritatii, tensiunea la bornele motorului este $-U_N$. Ecuatia tensiunilor pentru motor va fi : $-U_N = E + R_a \cdot I \Rightarrow I = \frac{-U - E}{R_a} < 0$, iar $M = K_m \cdot \Phi \cdot I < 0$ (cuplul de frânare).

Prin introducerea de rezistenta suplimentara, se limiteaza valoarea curentului dat de ecuatiile de mai sus la valoarea:

$$I = \frac{-U - E}{R_a + R_F} < 0.$$

Ecuatia caracteristicii mecanice, devine astfel:

$$\Omega = -\Omega_0 - \frac{R_a + R_F}{(K_m \cdot \Phi)^2} \cdot M,$$

având reprezentarea grafica din figura 6.41:

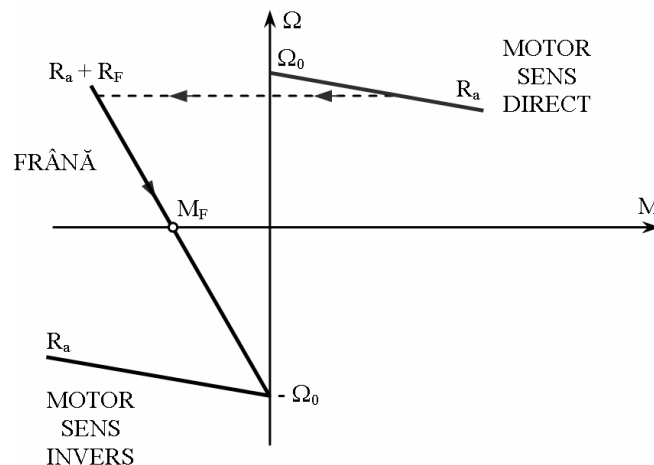


Figura 6.41

La anularea turatiei, masina trebuie deconectata, pentru a nu se porni în sens invers.

6.13 Regimul dinamic al masinii de c.c.

La functionarea unei masini electrice, apar adesea schimbari ale parametrilor si caracteristicilor de functionare ale sistemelor cu care este conectata masina, sau modificari ale caracteristicilor de functionare ale masinii: acestea sunt urmate de procese tranzitorii de trecere de la un regim stationar de functionare la alt regim stationar de functionare.

La generatoarele de c.c. sunt caracteristice procesele tranzitorii ce se produc la variatia tensiunii de excitatie si a rezistentei de sarcina.

La motoare, regimul dinamic (procesele tranzitorii) exista ori de câte ori apare un reglaj al turatiei motorului.

6.13.1 Regimul dinamic al generatoarelor de c.c.

Se considera ca masina de c.c. functioneaza la viteza constanta si se neglijeaza reactia indusului.

a) Generatorul cu caracteristica magnetica liniara

Ecuatia tensiunilor pentru circuitul de excitatie în regim tranzitoriu este:

$$U_e = R_e \cdot i_e + L_e \cdot \frac{di_e}{dt} \text{ unde } U_e = \text{ct.}$$

Aplicând transformata Laplace, rezulta:

$$U_e = R_e \cdot I_e(s) + s \cdot L_e \cdot I_e(s)$$

$$I_e(s) = \frac{U_e}{R_e + s \cdot L_e} = \frac{M_e}{R_e} \cdot \left(\frac{1}{1 + s \cdot T_e} \right)$$

unde $T_e = \frac{L_e}{R_e}$ - constanta de timp a circuitului de excitatie.

Deci, la aplicarea unei trepte de tensiune U_e , în circuitul de excitatie curentul creste de la zero la valoarea stabilizata $\frac{U_e}{R_e}$, crestere exponentiala dupa relatia:

$$I_e = \frac{U_e}{R_e} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_e}} \right),$$

cu reprezentarea data de graficul din figura 6.42:

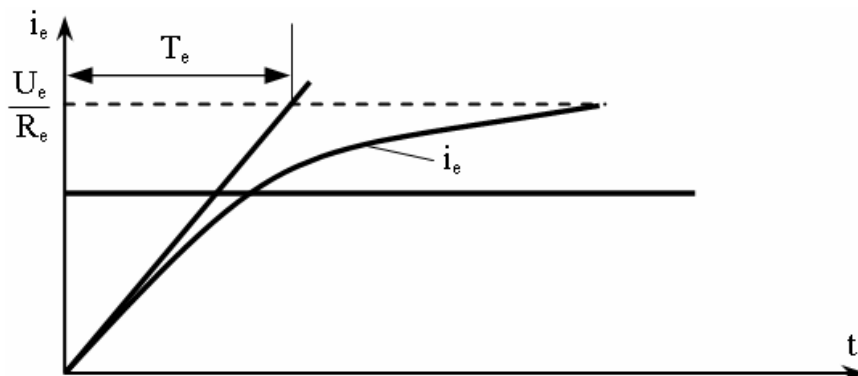


Figura 6.42

La generatorul autoexcitat (derivatie), ecuatia caracteristicii de functionare în gol poate fi exprimata de relatia:

$$U_e = U_r + K \cdot i_e,$$

unde:

U_r – tensiunea remanenta;

K – panta caracteristicii de functionare în gol.

Ecuatia tensiunilor pe circuitul de excitatie va fi:

$$U_r + K \cdot i_e = R_e \cdot i_e + L_e \cdot \frac{di_e}{dt} \text{ sau } U_r = (R_e - K) \cdot i_e + L_e \cdot \frac{di_e}{dt},$$

cu solutia:

$$i_e = \frac{U_r}{R_e - K} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right);$$

$$T = \frac{L_e}{R_e - K} = \frac{L_e}{R_e} \cdot \frac{1}{1-a}, \text{ unde } a = \frac{K}{R_e}.$$

Se observa ca $T = T_e \cdot \frac{1}{1-a}$, deci $T > T_e$, deoarece tensiunea de excitatie creste odata cu

tensiunea de la bornele indusului. Reprezentarea grafica a curentului de excitatie este data în figura 6.43:

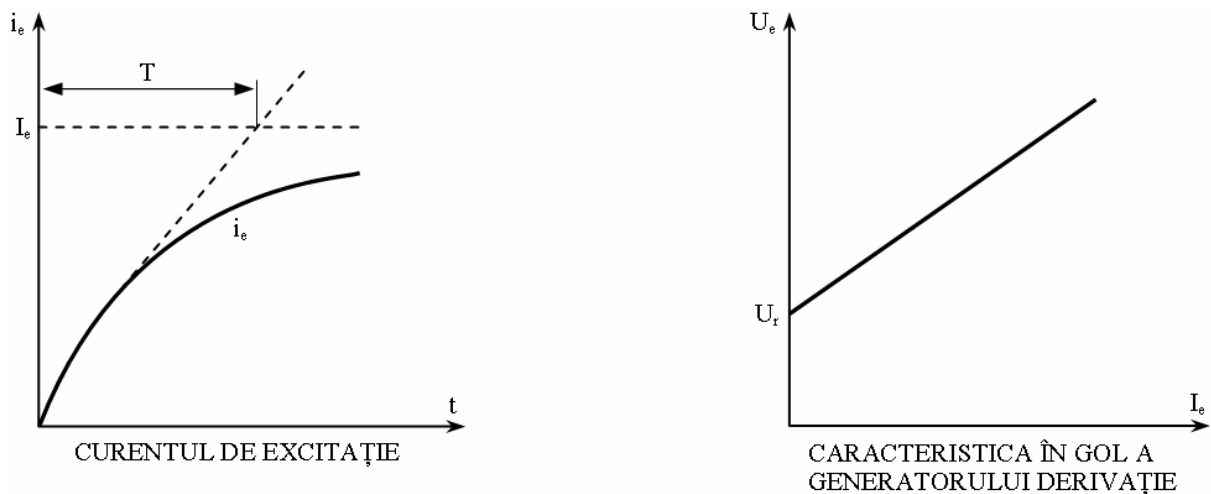


Figura 6.43

b) Generatorul cu caracteristica neliniara

Ecuatia tensiunilor pentru generatorul cu excitatie independenta corespunzatoare circuitului de excitatie este:

$$U_e = R_e \cdot i_e + N_e \cdot \frac{d\phi_e}{dt},$$

iar a caracteristicii magnetice $\varphi_e = f(i_e)$ în care:

N_e – numărul de spire al înfășurării de excitație;

φ_e – fluxul magnetic inductor.

se obține prin aproximarea urbei medii a acestei caracteristici cu relația:

$$\varphi_e = \Phi_s \cdot \left(\frac{i_e}{i_e + I_{e_0}} \right),$$

unde:

Φ_s – valoarea de saturație a fluxului magnetic;

I_{e_0} – curentul de excitație corespunzător fluxului de saturație.

Pentru $i_e \ll I_{e_0}$ rezulta $\varphi_e = \Phi_s \cdot \left(\frac{i_e}{I_{e_0}} \right)$, iar $d\varphi_e = \left(\frac{\Phi_s}{I_{e_0}} \right) \cdot di_e$. Înlocuind în ecuația

tensiunilor, rezulta:

$$U_e = R_e \cdot i_e + N_e \cdot \frac{\Phi_s}{I_{e_0}} \cdot \frac{di_e}{dt}.$$

Aplicând transformata Laplace, obținem:

$$I_e(s) = \frac{U_e}{R_e + N_e \cdot \frac{\Phi_s}{I_{e_0}} \cdot s} = \frac{U_e}{R_e} \cdot \frac{1}{1 + T_1 s},$$

unde: $T_1 = N_e \cdot \frac{\Phi_s}{I_{e_0}} \cdot \frac{1}{R_e}$ – constanta de timp a circuitului de excitație pentru $i_e \ll I_{e_0}$.

Pentru $i_e \gg I_{e_0}$, rezulta $\varphi_e = \Phi_s$, iar $d\varphi_e = 0$. Înlocuind în ecuația tensiunilor, rezulta:

$$U_e = R_e \cdot i_e, \text{ sau } i_e = \frac{U_e}{R_e} = I_{e_0}.$$

Punând condiția pentru I_{e_0} , rezulta $I_{e_0} = \frac{U_e}{R_e}$.

În figura 6.44 este prezentată variația $I_e = f(t)$.

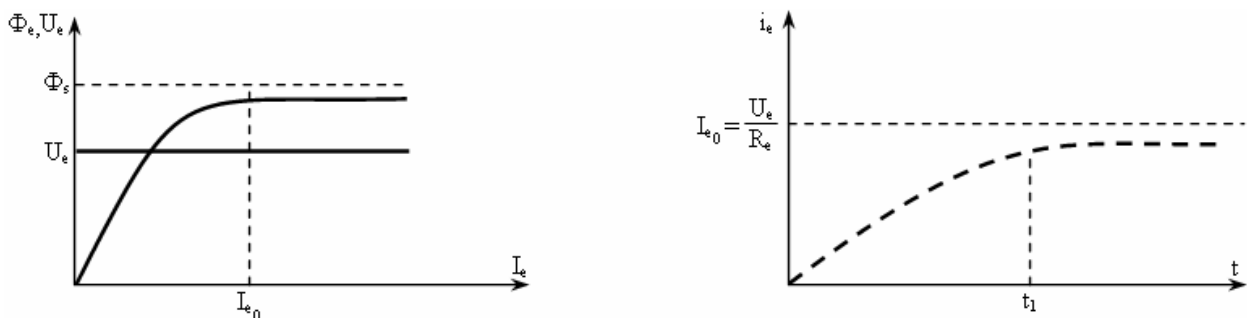


Figura 6.44

Timpul necesar cresterii curentului de excitatie pâna la valoarea limita I_{e_0} , este obtinuta din ecuatie:

$$U_e = R_e \cdot i_e + N_e \cdot \frac{d\varphi_e}{dt},$$

$$dt = N_e \cdot \frac{d\varphi_e}{U_e - R_e \cdot i_e}.$$

Înlocuind $d\varphi_e = \left(\frac{\Phi_s}{I_{e_0}} \right) \cdot di_e$, obtinem:

$$t_1 = N_e \cdot \int_0^{I_{e_0}} \frac{\Phi_s}{I_{e_0}} \cdot \frac{di_e}{U_e - R_e \cdot i_e} = \frac{N_e}{R_e} \cdot \int_0^{I_{e_0}} \frac{\Phi_s}{I_{e_0}} \cdot \frac{di_e}{\frac{U_e}{R_e} - i_e},$$

$$t_1 = \frac{N_e \cdot \Phi_s}{I_{e_0}} \cdot \ln(-U_e + R_e \cdot i_e) \Big|_0^{I_{e_0}},$$

$$t_1 = \frac{N_e \cdot \Phi_s}{I_{e_0}} \cdot \ln \left(1 - \frac{i_e}{I_{e_0}} \right)$$

Pentru generatorul autoexcitat $U_e = U_r + K \cdot \varphi_e$, iar ecuatie tensiunilor devine:

$$U_r + K \cdot \varphi_e = R_e \cdot i_e + N_e \cdot \frac{d\varphi_e}{dt}.$$

Pentru $I_e \ll I_{e_0}$, $\varphi_e = \left(\frac{\Phi_s}{I_{e_0}} \right) \cdot i_e$, iar $d\varphi_e = \left(\frac{\Phi_s}{I_{e_0}} \right) \cdot di_e$. Prin aplicarea transformatei Laplace

rezulta:

$$I_e(s) = \frac{U_r}{R_e - \frac{K \cdot \Phi_s}{I_{e_0}}} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot T},$$

$$\text{unde: } T = \frac{\frac{K \cdot \Phi_s}{I_{e_0}}}{R_e - K \cdot \frac{\Phi_s}{I_{e_0}}} = \frac{N_e \cdot \Phi_s}{R_e \cdot I_{e_0}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{K \cdot \Phi_s}{R_e \cdot I_{e_0}}} \text{ sau } I_e = \frac{U_r}{R_e - \frac{K \cdot \Phi_s}{I_{e_0}}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

Comparând cele doua rezultate, rezulta:

$$T = T_1 \cdot \frac{1}{1-b} \text{ cu } b = \frac{K \cdot \Phi_s}{R_e \cdot I_{e_0}} \text{ sau } \frac{T}{T_1} = \frac{1}{1-b} \text{ deci } T \text{ este mai mare decât } T_1 \text{ de } \frac{1}{1-b} \text{ ori.}$$

6.13.2 Regimul dinamic al motoarelor de c.c.

În funcționarea motoarelor de c.c. se pot modifica următorii parametri:

- tensiunea la bornele indusului;
- rezistența circuitului indusului;
- rezistența circuitului de excitație;
- cuplul aplicat la axul mașinii.

Regimul dinamic reprezintă trecerea dintr-un regim stabilizat în alt regim stabilizat, la modificarea unui parametru enunțat mai sus.

Ecuatiile de funcționare ale motoarelor de c.c. cu excitație independentă, în regim dinamic, sunt:

- ecuația circuitului de excitație de rezistență R_e și inductivitate L_e este:

$$u_e = R_e \cdot i_e + L_e \cdot \frac{di_e}{dt},$$

având schema electrică echivalentă în figura 6.45:

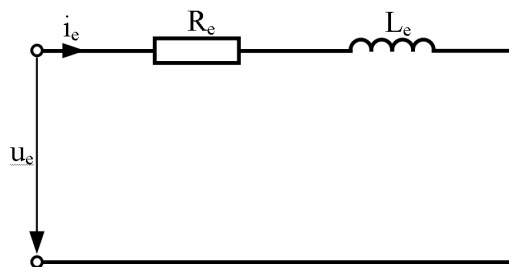


Figura 6.45

- ecuația circuitului indusului (rotor) de rezistență R_a și inductivitate L_a , ce se mișcă cu viteza unghiulară Ω este:

$$u_a = R_a \cdot i_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + K_m \cdot \Phi \cdot \Omega,$$

cu schema electrică echivalentă prezentată în figura 6.46:

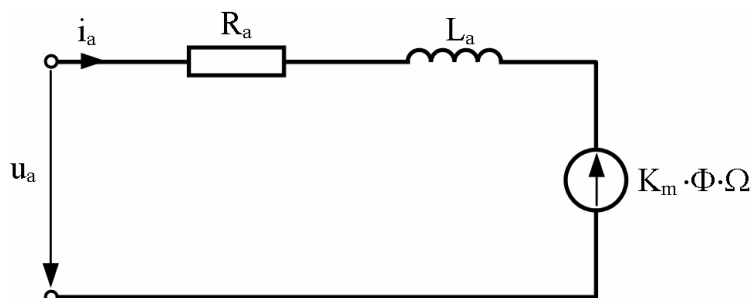


Figura 6.46

- o ecuatia miscarii rotorului având momentul de inertie total J_a , viteza instantanee Ω , cuplul aplicat la ax m_s si coeficientul de frecari vâscoase F_a este urmatoarea:

$$m = F_a \cdot \Omega + J_a \cdot \frac{d\Omega}{dt} + m_s,$$

iar schema electrica asociata este reprezentata în figura 6.47:

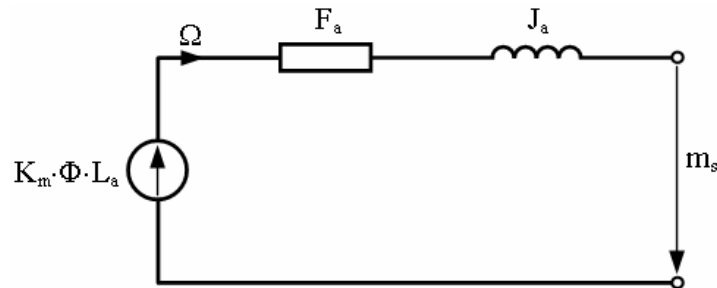


Figura 6.47

Prin aplicarea transformatei Laplace ecuatiilor de mai sus, se obtine schema structurala a motorului de c.c. si anume:

➤ pentru stator:

$$U_e = R_e \cdot I_e(s) + s \cdot L_e \cdot I_e(s) \text{ sau } I_e(s) = \frac{U_e}{R_e + s \cdot L_e} = \frac{U_e}{R_e} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot T_e},$$

unde: $T_e = \frac{L_e}{R_e}$, constanta de timp a circuitului de excitatie, rezultând urmatoarea schema

structurala pentru excitatie:

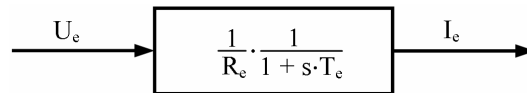


Figura 6.48

Cunoscând curentul de excitatie din caracteristica magnetica liniara $\Phi = C_\varphi \cdot i_e$ prin aplicarea transformatei Laplace, rezulta:

$$\Phi(s) = C_\varphi \cdot I_e(s).$$

Deci, schema pe partea de excitatie se poate completa astfel:

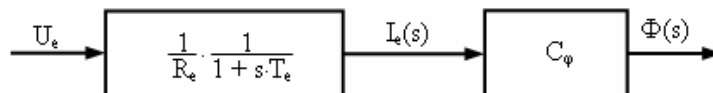


Figura 6.49

➤ pentru rotor:

$$U_a = R_a \cdot I_a(s) + s \cdot L_a \cdot I_a(s) + K_m \cdot \Phi(s) \cdot \Omega(s).$$

de unde rezulta curentul rotoric:

$$I_a(s) = \frac{U_a - K_m \cdot \Phi(s) \cdot \Omega(s)}{R_a + s \cdot L_a} = \frac{U_a - K_m \cdot \Phi(s) \cdot \Omega(s)}{R_a} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot T_a},$$

cu $T_a = \frac{L_a}{R_a}$ – constanta de timp a rotorului.

Cunoscând curentul rotoric $I_a(s)$, rezulta cuplul electromagnetic $M(s) = K_m \cdot \Phi(s) \cdot I_a(s)$.

Se poate realiza urmatoarea schema structurala a rotorului:

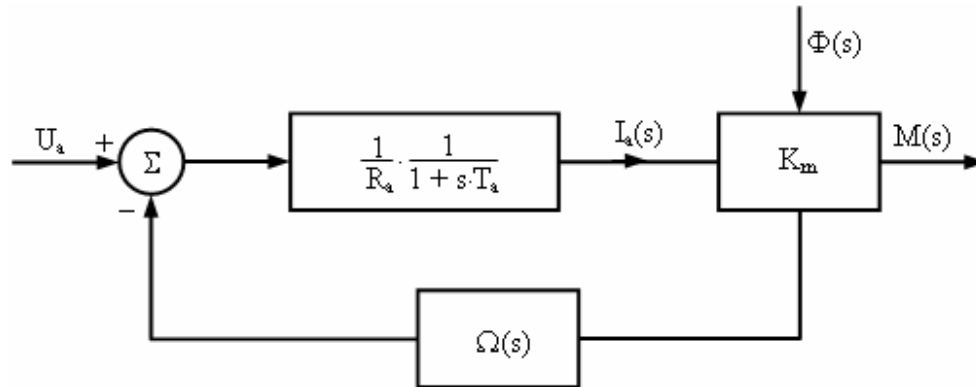


Figura 6.50

➤ pe partea mecanica:

$$M(s) = F_a \cdot \Omega(s) + s \cdot J_a \cdot \Omega(s) + M_s(s),$$

rezultând viteza rotorica:

$$\Omega(s) = \frac{M(s) - M_s(s)}{F_a + s \cdot J_a},$$

si schema structurala:

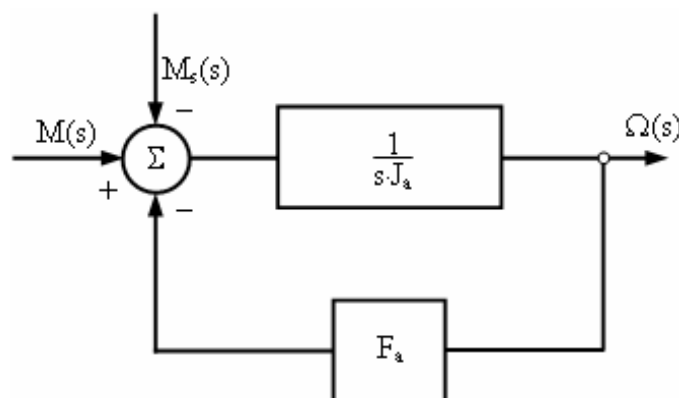


Figura 6.51

Reunind aceste componente, rezulta schema structurala a masinii de curent continuu (figura 6.52).

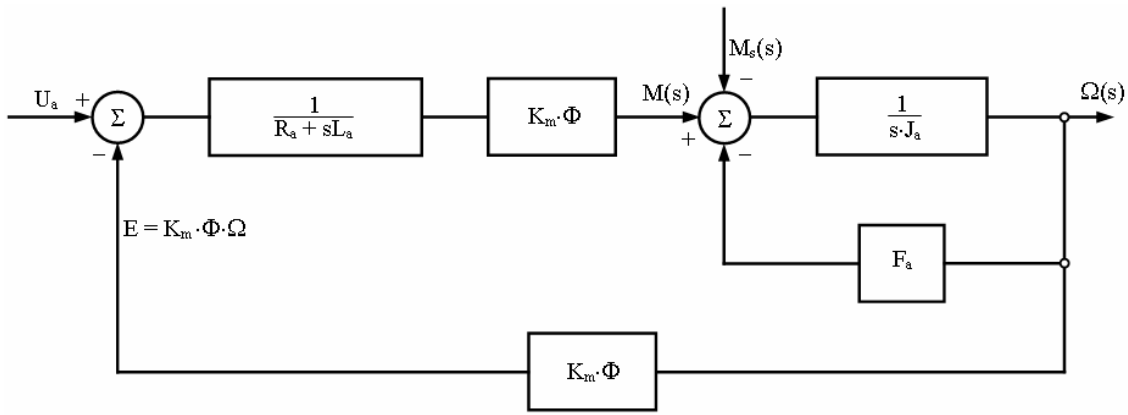


Figura 6.52

A. La variatia tensiunii de alimentare, la cuplu de sarcina constant:

$$U_a = U_1 \text{ pentru } t \leq 0;$$

$$U_a = U_2 \text{ pentru } t \geq 0;$$

$$m = M_{a_1} = M_{a_2}.$$

Marimea de intrare fiind tensiunea de alimentare, la variatia ei se produce atît modificarea vitezei, cît si a curentului rotoric. Raspunsul masinii se analizeaza pe baza schemei structurale functie de marimea de iesire, astfel:

a) marime de iesire viteza rotorica

Schema structurala a masinii de c.c. în care se neglijeaza coeficientul de frecari vâscoase ($F_a = 0$) pentru marime de intrare tensiunea de alimentare, iar marime de iesire viteza rotorica, este redată mai jos (figura 6.53):

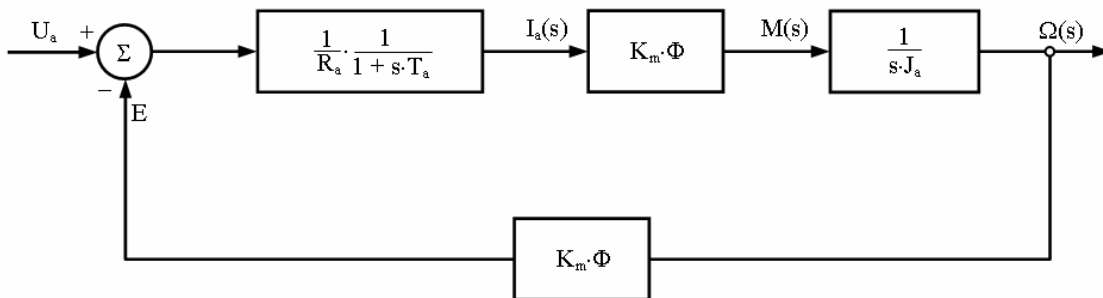


Figura 6.53

Funcțiile de transfer sunt:

1) pe cale directa:

$$Y_d = \frac{\Omega}{U_a - E} = \frac{1}{R_a \cdot (1 + s \cdot T_a)} \cdot K_m \cdot \Phi \cdot \frac{1}{s \cdot J_a} = \frac{1}{K_m \cdot \Phi} \cdot \frac{1}{(1 + s \cdot T_a)} \cdot \frac{1}{s \cdot T_m},$$

unde:

$$T_m = \frac{J_a \cdot R_a}{(K_m \cdot \Phi)^2} - \text{constanta electromecanica de timp a motorului},$$

2) pe cale de reactie:

$$Y_r = \frac{E(s)}{\Omega(s)} = K_m \cdot \Phi;$$

3) în circuit închis:

$$Y = \frac{Y_d}{1 + Y_d \cdot Y_r} = \frac{1}{K_m \cdot \Phi} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot T_m + s^2 \cdot T_a \cdot T_m} = \frac{\Omega(s)}{U_a(s)}$$

Poliile funcției de transfer sunt date de rezolvarea ecuației:

$$s^2 \cdot T_a \cdot T_m + s \cdot T_m + 1 = 0,$$

cu notațiile:

$$\delta = \frac{1}{2 \cdot T_a} - \text{factorul de amortizare};$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{T_a \cdot T_m} - \text{pulsatia proprie};$$

rezulta:

$$s_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}.$$

Daca:

– $\delta^2 > \omega_0^2$, atunci $s_{1,2} \in \mathfrak{R}$ cu $s_1 \neq s_2$ regimul este aperiodic;

– $\delta^2 = \omega_0^2$, atunci $s_1 = s_2 = -\delta$ – regim aperiodic critic;

– $\delta^2 < \omega_0^2$, atunci $s_{1,2} = a \pm j \cdot b$ (complex conjugate) – regimul este oscilatoriu amortizat.

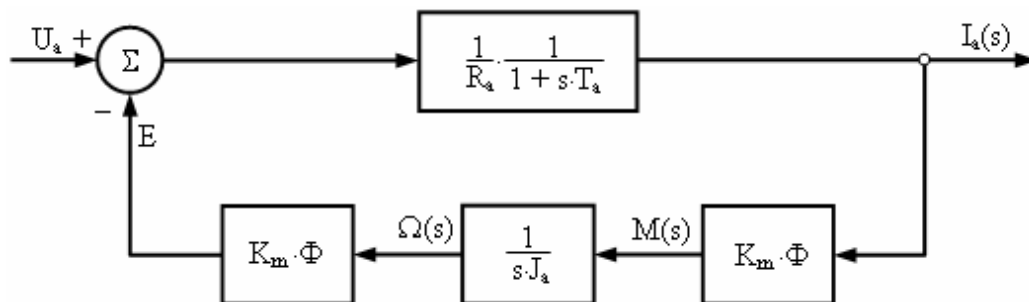
Daca:

– $\delta = 0$, $s_{1,2} = \pm j \cdot \omega_0$ – regimul este oscilant.

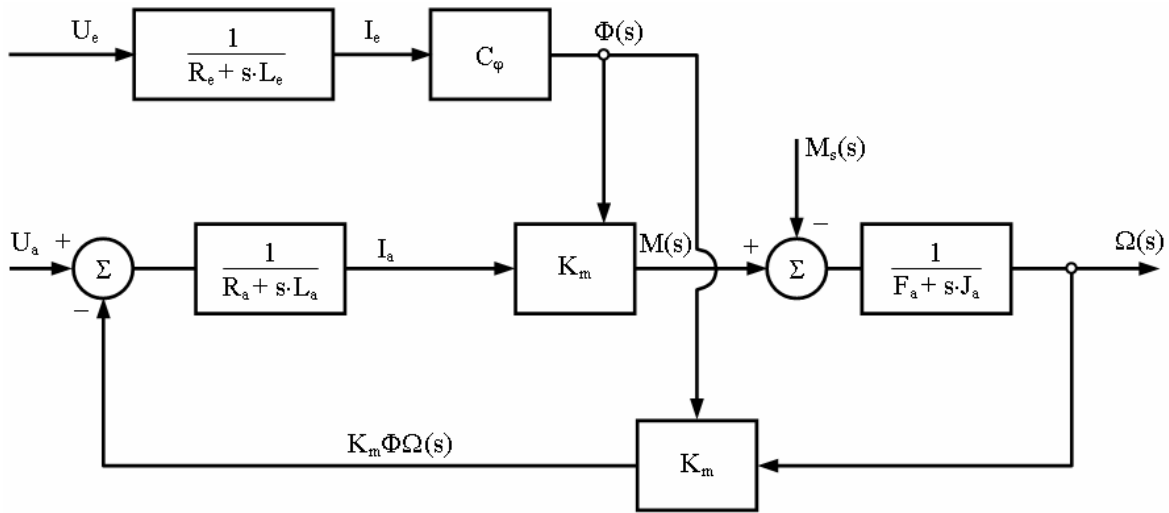
În funcție de valorile parametrilor δ , respectiv ω_0 , răspunsul motorului la variațiile tensiunii de alimentare corespunde unuia din regimurile de mai sus.

b) marime de iesire curentul rotoric

Schema structurală a mașinii de curent continuu (cu neglijarea coeficientului de frecare vâscoase) ce are marime de intrare tensiunea de alimentare, iar marime de iesire curentul rotoric, este redată în figura 6.54, a:



a)



b)

Figura 6.54

Funcțiile de transfer sunt:

$$- \text{ pe calea directă: } I_d = \frac{I_a}{U_a - E} = \frac{1}{R_a} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot T_a};;$$

$$- \text{ pe cale de reacție: } Y_r = \frac{E}{I_a} = \frac{R_a}{s \cdot T_m};;$$

$$- \text{ în circuit închis: } Y = \frac{I_a}{U_a} = \frac{1}{R_a} \cdot \frac{s \cdot T_m}{s^2 \cdot T_a \cdot T_m + s \cdot T_m + 1} ..$$

Polii ecuației caracteristice $s^2 \cdot T_a \cdot T_m + s \cdot T_m + 1 = 0$ depind de constantele motorului T_a respectiv T_m . Raspunsul sistemului se încadrează și în acest caz în unul din regimurile descrise la punctul a).

Motoarele de curent continuu cu excitație independentă, de construcție normală, au de regulă $\delta^2 < \omega_0^2$, deci raspunsul are un caracter oscilatoriu amortizat.

Observație

Dacă se ține seama și de coeficientul de frecări vâscoase (figura 6.54, b), funcția de transfer a vitezei în raport cu tensiunea de alimentare devine:

$$Y = \frac{1}{K_m} \cdot \frac{1}{1 + \frac{T_m}{T_F} + s \cdot \frac{T_m \cdot (T_a + T_F)}{T_a} + s^2 \cdot T_a \cdot T_m} \text{ cu } T_F = \frac{J_a}{F_a}.$$

B. La variația cuplului de sarcină, schemele structurale având marimi de ieșire viteză, respectiv curentul rotor, sunt redată în figura 6.55:

La flux constant $\Phi = \text{ct.}$ schema structurală ce are drept marime de intrare tensiunea rotorica, iar ca marime de ieșire viteză, este:

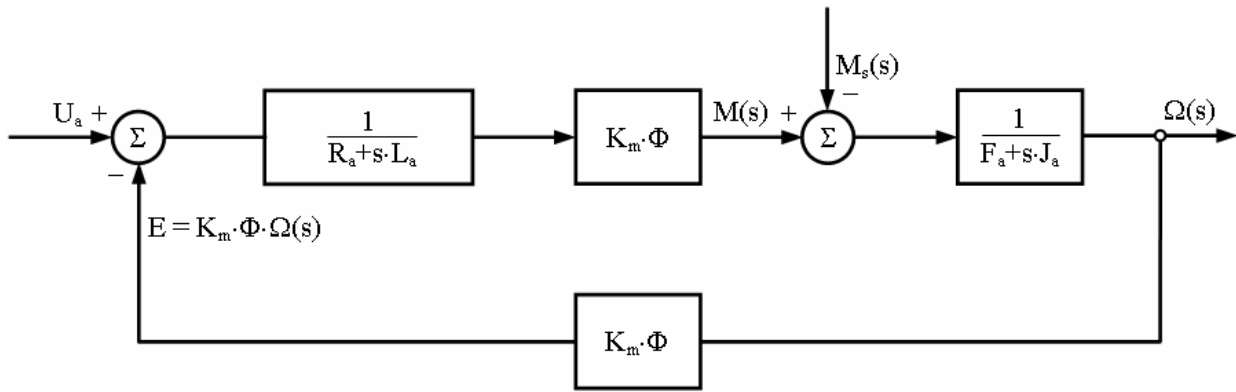


Figura 6.55

Daca se neglijeaza frezarile vâscoase schema structurala din figura 6.55 se transforma ca în figura 6.56:

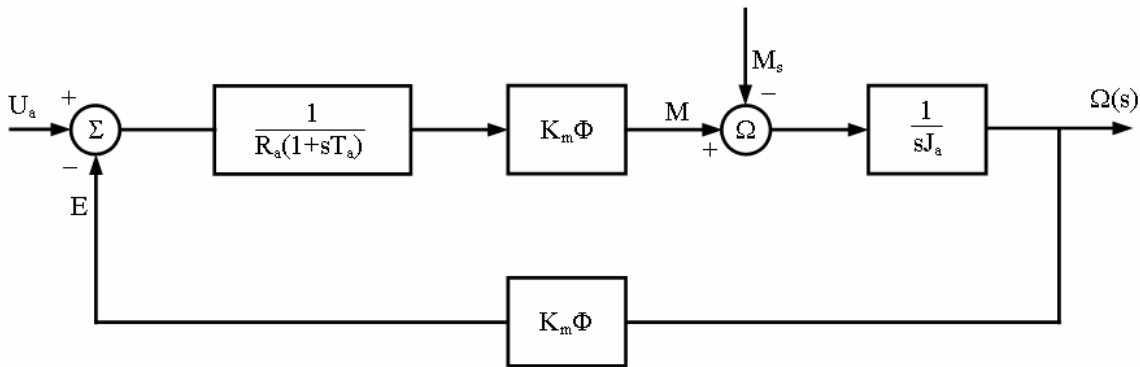


Figura 6.56

În cazul în care $\Phi = ct.$, marimea de intrare este tensiunea rotorica, iar marimea de iesire este curentul rotoric, schema structurala este cea din figura 6.57.

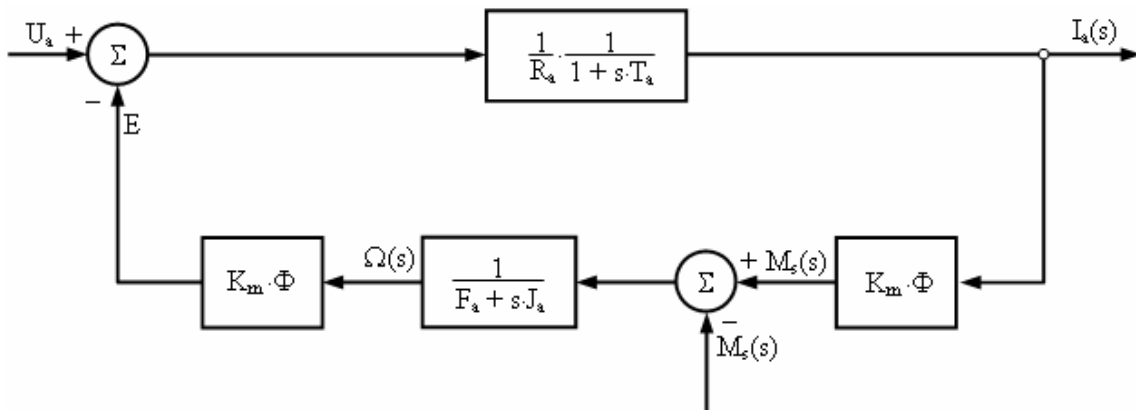


Figura 6.57

Pe baza schemei structurale se analizeaza regimurile dinamice ale motoarelor de curent continuu în functie de parametrii modificati si anume functie de marimile de intrare, respectiv, de iesire, se analizeaza polii functiei de transfer, rezultând astfel raspunsul masinii (marimii de iesire) la variatia marimii de intrare.

APLICATII

1. Un motor serie de curent continuu cu caracteristica magnetica liniara are urmatoarele date nominale: cuplul electromagnetic $M_n = 500\text{Nm}$, tensiunea la borne $U_n = 500\text{V}$, turatia $n = 1800$ rot/min. Rezistenta totala a circuitului format de înfasurarea de excitatie este $R = 0,2 \Omega$.

Se cere sa se determine caracteristica mecanica a motorului.

REZOLVARE:

Caracteristica magnetica fiind liniara rezulta expresia cuplului electromagnetic:

$$M = \frac{k_e}{2 \cdot \pi} \cdot I^2,$$

si expresia tensiunii electromotoare:

$$U_e = k_e \cdot n \cdot I.$$

Din ecuatia tensiunilor $k_e \cdot n \cdot I = U_n - R \cdot I$ se obtine expresia curentului:

$$I = \frac{U_n}{k_e \cdot n + R}.$$

Înlocuind aceasta expresie în relatia cuplului se determina ecuatia caracteristicii mecanice:

$$M = \frac{k_e}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{U_n^2}{(k_e \cdot n + R)^2}.$$

Cunoscând punctul nominal de functionare se determina constanta k_e :

$$480 = \frac{k_e}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{500^2}{\left(k_e \cdot \frac{1800}{60} \cdot 0,2\right)^2},$$

obtinându-se valoarea $k_e = 0,0778$.

Deci ecuatia caracteristicii mecanice pentru motorul dat este:

$$M = \frac{3090}{(0,0778 \cdot n + 0,2)^2}.$$

2. Un motor derivatie de curent continuu are urmatoarele date nominale: $P_n = 20\text{kW}$, $U_n = 220\text{V}$.

Se cere sa se determine rezistenta reostatului de pornire din indus pentru regimul de pornire caracterizat de $I_p = 1,2 \cdot I_n$.

Se neglijeaza rezistenta indusului. Randamentul motorului în regim nominal este $\eta = 0,85$.

REZOLVARE:

Curentul absorbit de motor în regimul nominal are valoarea:

$$I_n = \frac{P_n}{\eta \cdot U_n} = \frac{20 \cdot 10^3}{0,85 \cdot 220} = 107 \text{A.}$$

Valoarea curentului din indus este data de relatia:

$$I = \frac{U_n - U_e}{R'_1}.$$

La pornire, $n = 0$, deci tensiunea electromotoare indusa în masina este nula, rezultând:

$$I'_p = \frac{U_n}{R'_1}.$$

Pentru a se limita valoarea curentului de pornire se introduce în serie cu indusul un reostat de pornire astfel încât:

$$I_p = 1,2 \cdot I_n = \frac{U_n}{R_1 + R_p}.$$

Daca se neglijeaza rezistenta indusului rezulta valoarea rezistentei reostatului:

$$R_p = \frac{U_n}{1,2 \cdot I_n} - R_1 = \frac{220}{1,2 \cdot 107} - 0,5 = 1,71 \Omega.$$

3. Un motor derivatie de curent continuu are urmatoarele date nominale: puterea $P_n = 15 \text{kW}$, tensiunea $U_n = 220 \text{V}$, randamentul $\eta_n = 0,85$, iar rezistenta înfasurarii de excitatie $R_e = 400 \Omega$. Turatia nominala a motorului este $n_n = 1200 \text{ rot/min.}$, iar rezistenta indusului este $R_i = 0,5 \Omega$.

Se cere sa se determine valorile raportate ale cuplului de pornire si ale curentului de pornire în urmatoarele cazuri:

1. motorul este pornit prin cuplare directa la retea;
2. motorul este pornit cu ajutorul unui reostat de pornire de valoare $R_p = 1,5 \Omega$, înfasurarea de excitatie fiind conectata direct în retea;
3. motorul este pornit cu ajutorul aceluiasi reostat de pornire, însa înfasurarea de excitatie este conectata la bornele indusului.

Se neglijeaza pierderile mecanice si în fier si se considera ca motorul are o caracteristica magnetica liniara.

REZOLVARE:

Curentul nominal al motorului are valoarea:

$$I_n = \frac{P_n}{\eta_n \cdot U_n} = \frac{15 \cdot 10^3}{0,862 \cdot 220} = 79,1A,$$

iar cuplul nominal al motorului este:

$$M_n = \frac{P_n}{\frac{2 \cdot \pi \cdot n_n}{60}} = \frac{15 \cdot 10^3}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1200}{60}} = 119,5Nm.$$

1. În cazul pornirii directe curentul de pornire are valoarea:

$$I_{i_1} = \frac{U_n}{R_i} = \frac{220}{0,5} = 440A,$$

iar curentul absorbit de înfasurarea de excitație are valoarea:

$$I_1 = I_{i_1} + I_{e_1} = 440 + 5,5 = 445,5A,$$

sau în unitati relative

$$i_1 = \frac{I_1}{I_n} = \frac{445,5}{79,1} = 5,632u.r..$$

Considerând caracteristica magnetica liniara, cuplul electromagnetic al motorului are expresia:

$$M = k_m \cdot \Phi \cdot I_i = k_m \cdot k_e \cdot I_e \cdot I_i = C_m \cdot I_e \cdot I_i.$$

Presupunând același curent de excitație la funcționarea nominală, ca și la pornirea directă (întreaga tensiune la borne se aplica circuitului de excitație) rezulta cuplul de pornire calculat în unitati relative:

$$m_{p_1} = \frac{M_{i_1}}{M_n} = \frac{C_m \cdot I_{e_1} \cdot I_{i_1}}{C_m \cdot I_{e_n} \cdot I_{i_n}} = \frac{I_{i_1}}{I_{i_n}} = \frac{440}{79,1 - 5,5} = 5,978u.r.,$$

unde: $I_{i_n} = I_n - I_{e_n}$ este curentul prin indus la funcționarea în sarcina nominală a motorului.

Se observa ca, în cazul acestei porniri motorul este solicitat puternic din punct de vedere electric (curentul prin indus este mai mare) și mecanic (cuplul de pornire are o valoare mare față de cuplul nominal).

2. Curentul de pornire absorbit de indus în cazul pornirii cu reostat de pornire este:

$$I_2 = I_{i_2} + I_{e_2} = 110 + 5,5 = 115,5A,$$

sau în unitati relative:

$$i_2 = \frac{I_2}{I_n} = \frac{115,5}{79,1} = 1,46u.r..$$

Cuplul de pornire este:

$$m_{p_2} = \frac{M_2}{M_n} = \frac{C_m \cdot I_{e_2} \cdot I_{i_2}}{C_m \cdot I_{e_n} \cdot I_{i_n}} = \frac{I_{i_2}}{I_{i_n}} = \frac{110}{79,1-5,5} = 1,495.$$

Pornirea cu reostat de pornire conectat în serie cu indusul este avantajoasa, solicitarile mecanice si electrice ale motorului fiind reduse.

3. Curentul absorbit de motor în cazul în care înfășurarea de excitație este conectată în paralel cu indusul are valoarea:

$$I_3 = \frac{U_n}{R_{echiv}} = \frac{U_n}{R_p + \frac{R_e \cdot R_i}{R_e + R_i}} = \frac{220 \cdot (40 + 0,5)}{1,5 \cdot 40,5 + 40 \cdot 0,5} = 109A,$$

iar curentul de înfășurarea de excitație este:

$$I_{e_3} = I_3 - I_{i_3} = 110,3 - 109 = 1,3A.$$

Valoarea relativa a cuplului de va fi:

$$m_{p_3} = \frac{M_3}{M_n} = \frac{C_m \cdot I_{e_3} \cdot I_{i_3}}{C_m \cdot I_{e_n} \cdot I_{i_n}} = \frac{I_{e_3} \cdot I_{i_3}}{I_{e_n} \cdot I_{i_n}} = \frac{1,3 \cdot 109}{5,5 \cdot (79,1 - 5,5)} = 0,35ur..$$

Se observa ca în cazul pornirii cu reostat si având înfășurarea de excitație conectate în paralel cu indusul, cuplul de pornire are o valoare redusa.

4. Un motor serie de curent continuu având puterea nominala $P_n = 60kW$ si tensiunea nominala $U_n = 440V$, are rezistenta circuitului serie $R_s = 0,4\Omega$.

Sa se determine rezistenta reostatului de pornire pentru ca masina sa dezvolte la pornire un cuplu $M_p = 1,5M_n$. Se presupune masina nesaturata. Randamentul motorului la sarcina nominala este $\eta_n = 0,9$.

REZOLVARE:

Curentul absorbit de motor în regimul nominal are valoarea:

$$I_n = \frac{P_n}{\eta_n \cdot U_n} = \frac{60 \cdot 10^3}{0,9 \cdot 440} = 151,5A.$$

Cuplul electromagnetic al masinii de curent continuu se calculeaza cu expresia:

$$M = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{p}{a} \cdot N \cdot \Phi \cdot I. \quad (1)$$

La motorul studiat, cu excitație serie, fluxul magnetic este produs de curentul I ; în cazul masinii nesaturate se poate scrie:

$$\Phi = k_1 \cdot I,$$

iar expresia (1) devine:

$$M = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{p}{a} \cdot N \cdot k_1 \cdot I^2 = k_2 \cdot I^2.$$

Curentul absorbit de motor la pornire este:

$$I_p = \frac{U_n}{R_p + R_s},$$

unde R_p este rezistenta reostatului de pornire.

Din conditia ca la pornire cuplul M_p sa fie $1,5 M_m$ rezulta ecuatia:

$$k_2 \cdot I_p^2 = 1,5 \cdot k_2 \cdot I_n^2 \text{ sau } \left(\frac{U_n}{R_p + R_s} \right)^2 = 1,5 I_n^2,$$

cu solutia:

$$R_p = \frac{U - \sqrt{1,5} \cdot R_s \cdot I_n}{\sqrt{1,5} \cdot I_n} = \frac{440 - \sqrt{1,5} \cdot 0,4 \cdot 151,5}{\sqrt{1,5} \cdot 151,5} = 1,97 \Omega.$$