

Capitolul III

MAȘINA DE CURENT CONTINUU

3.1. NOȚIUNI GENERALE

3.1.1. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE A MAȘINII DE CURENT CONTINUU

Se consideră un câmp magnetic uniform de inducție $\mathbf{B}$ produs de magneți permanenți, sau electromagneți. În acest câmp, se rotește o spiră diametrală, cu viteza liniară $\mathbf{v} = \text{const.}$, prin aplicarea cuplului exterior $\mathbf{M}$ constant, conform figurii 3.1.

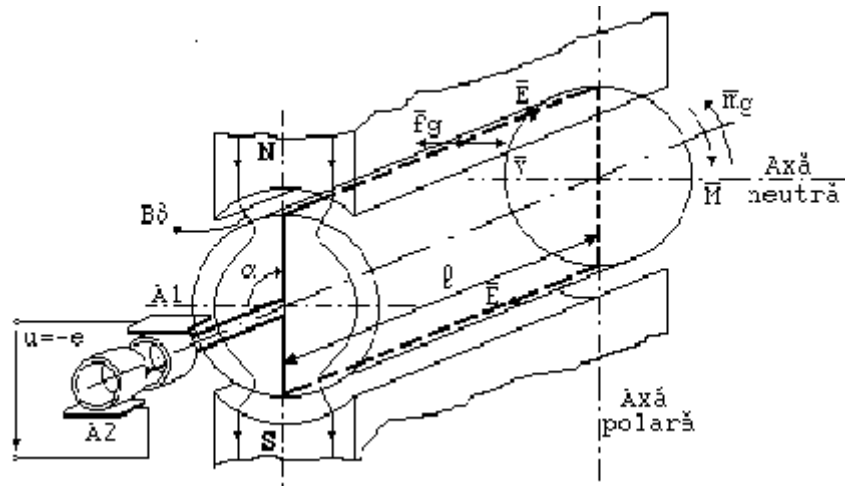


Fig. 3.1. Schema de principiu a mașinii de curent continuu.

Câmpul magnetic B_δ din întrefier, este aproximativ constant în dreptul polilor, conform figurii 3.2.a, în care s-a prezentat dependența $B_\delta = B_\delta(\alpha)$. În spire se induce tensiunea electromotoare:

$$e = 2lvB_\delta(\alpha) \quad (3.1)$$

deoarece conform figurii 3.2.a, se poate scrie:

Coordonata de poziție α va avea expresia: $B_\delta(\alpha) = B_\delta(\alpha + \pi)$, cu:

$$\alpha = \Omega t + \gamma_0 \quad (3.2)$$

în care Ω = viteza unghiulară ($\Omega = \text{const.}$), t = timpul, γ_0 = poziția inițială (poziția spirei în câmpul magnetic la $t = 0$). În cazul în care mașina are mai mult de doi poli (ca în cazul prezentat), se notează cu p numărul de perechi de poli, iar coordonata de poziție α va avea expresia:

$$\alpha = p\Omega t + \gamma_0 \quad (3.3)$$

Înlocuind valoarea coordonatei α conform relației (3.3) în expresia t.e.m. (3.1), se obține:

$$e = 2lvB_\delta(p\Omega t + \gamma_0) \quad (3.4)$$

Prin urmare, dependența $e = e(t)$ reprezentată în figura 3.2.b, repetă la o altă scară dependența $B_\delta = B_\delta(\alpha)$. Aceasta înseamnă că în spiră se induce o t.e.m. alternativă care își schimbă semnul la trecerea spirei prin axa neutră. T.e.m. e se culege în exterior prin intermediul inelelor și al periilor A_1 și A_2 .

Dacă la bornele periilor se conectează un receptor (de exemplu un rezistor), prin spiră va circula curentul i , în același sens cu câmpul electric $\mathbf{E}$

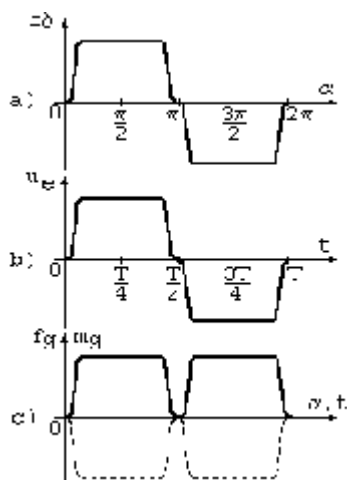


Fig. 3.2. Modul de variație a mărimilor indicate, la o rotație completă.

(regula mâinii drepte). Curentul i va da naștere forței electromagnetice $\mathbf{f}_g$ (re-gula mâinii stângi) și a cuplului electromagnetic $\mathbf{m}_g$, de sens invers față de cuplul de antrenare M .

$$f_g = 2ilB_\delta(p\Omega + \gamma_0) \quad (3.5)$$

$$m_g = D il B_\delta(p\Omega + \gamma_0) \quad (3.6)$$

în care D reprezintă diametrul spirei; f_g și m_g sunt reprezentate în figura 3.2.c.

Sistemul funcționează ca un convertor mecano-electric de energie (generator sincron, la care frecvența t.e.m. induse este impusă de viteza Ω de antrenare a rotorului).

În situația în care la bornele spirei se aplică prin intermediul periilor și a inelelor o tensiune de aceeași frecvență cu t.e.m. indusă e , curentul i prin spirală va circula în sens invers cu E , forța $\mathbf{f}_g$ și cuplul $\mathbf{m}_g$ vor fi de sens opus cazului analizat anterior (Fig. 3.2.c - linie întreruptă). Sistemul funcționează în regim de convertor electromecanic de energie (motor sincron, la care viteza de rotație Ω este impusă de frecvența tensiunii de alimentare).

Considerăm capetele spirei conectate la două semiinele, pe care calcă periile A_1 și A_2 , conform figurii 3.3.

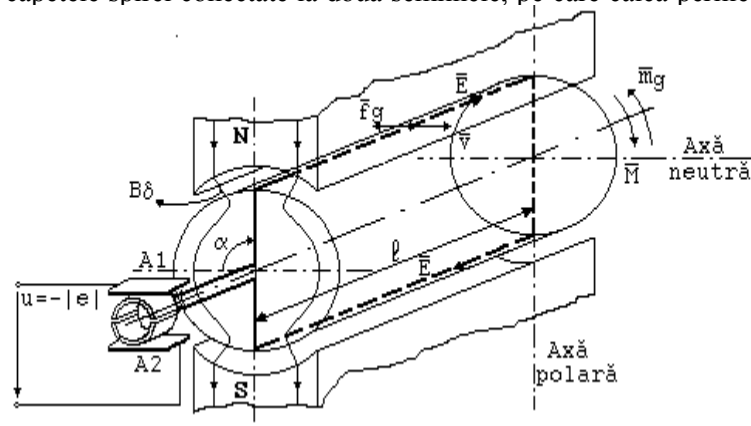


Fig. 3.3. Principiul de funcționare a mașinii de curent continuu la introducerea colectorului.

Periile se plasează pe cele două semiinele astfel încât la trecerea spirei prin axa neutră, să se realizeze și trecerea semiinelor de sub o perie sub cealaltă. La trecerea t.e.m. induse prin zero, se schimbă și sensul de parcurgere a spirei de la A_1 la A_2 , polaritatea periilor rămânând astfel constantă. Prin sistemul perii-semiinele se realizează redresarea mecanică a t.e.m. alternative e , prezentă la bornele spirei. La bornele periilor se obține o tensiune pulsatorie (fig.3.4.b). Conectând la perii un receptor, curentul din circuitul perii-receptor va rezulta pulsatoriu.

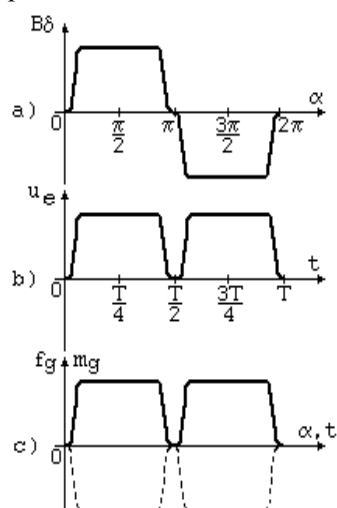


Fig. 3.4. Modul de variație a mărimilor indicate la introducerea colectorului.

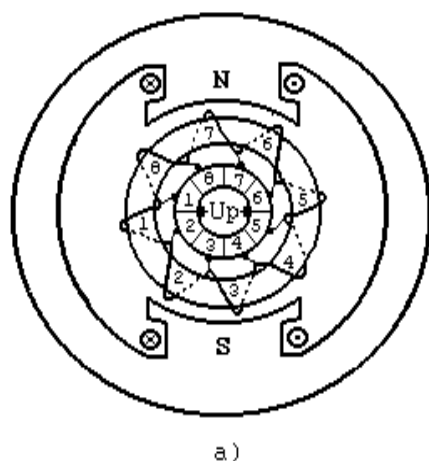
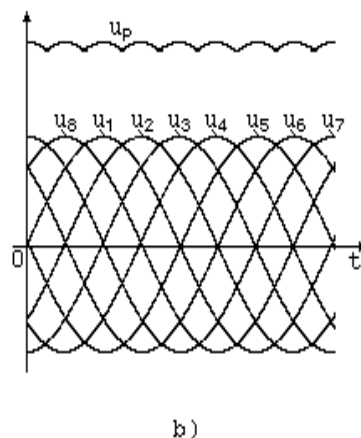


Fig. 3.5. Mașina de curent continuu cu indusul format din 8 spire.



În sistemul spirală-poli inductori, va apare forța $\mathbf{f}_g$ și cuplul $\mathbf{m}_g$ ca în cazul precedent, deoarece curentul prin spirală variază periodic în funcție de timp (Fig. 3.4.c, linie plină regim de generator, linie întreruptă regim de motor).

În realitate, în câmpul magnetic produs de polii inductori se află mai multe spire diametrale, plasate pe același miez feromagnetic (armătură rotorică), care se rotește cu viteza $v = \text{const.}$ În figura 3.5.a, este prezentată o mașină de curent continuu cu 8 spire (înfășurare în inel). Capetele lor sunt conectate la 8 sectoare de cerc, care în timpul mișcării de rotație defilează succesiv sub cele două perii. Ansamblul acestor sectoare, formează *colectorul* mașinii de curent continuu, sectoarele purtând numele de *lamelle de colector*.

Deoarece ele sunt sediul t.e.m. induse, rotorul și spirele formează indusul mașinii de curent continuu. Porțiunea de înfășurare cuprinsă între două perii succesive formează o *cale de curent*. În figura 3.5. b), s-au reprezentat fundamentale tensiunilor induse în fiecare spirală, precum și evoluția în timp a tensiunii la perii U_p .

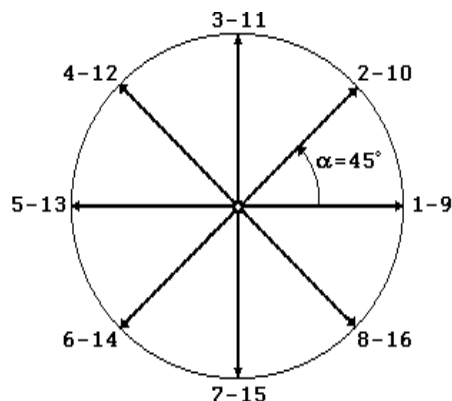


Fig. 3.6. Steaua tensiunilor induse.

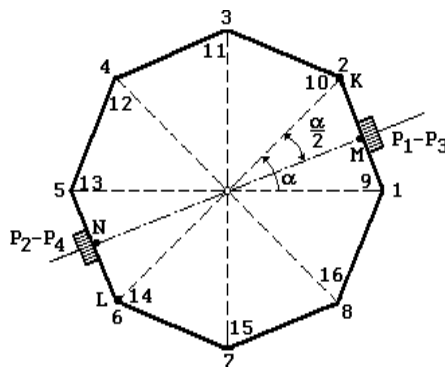


Fig. 3.7. Polygonul tensiunilor induse.

Conductoarele care se găsesc la un moment dat pe axa polilor sunt sediul unor t.e.m. maxime. Conductoarele dispuse pe axa neutră, neaflându-se în câmp, nu vor fi sediul unor t.e.m. induse. Dacă am reprezenta prin fazorii fundamentale t.e.m. corespunzătoare fiecărui conductor va rezulta o stea a t.e.m. (fig. 3.6).

Decalajul în timp între fazorii tensiunilor induse în fiecare conductor este dictat de poziția spațială a conductoarelor la un moment dat. Polygonul t.e.m. se obține însumând fazorial t.e.m. în secțiunile succesive (figura 3.7). Tensiunile induse în spire sunt defazate cu unghiul electric α :

$$\alpha = \frac{p \cdot 360^\circ}{Z}, \quad (3.7)$$

în care Z = numărul de spire, $p = 6$ numărul de perechi de poli.

Periile se plasează astfel încât să culeagă pe colector o tensiune maximă, respectiv diametrul polygonului tensiunilor electromotoare induse.

La rotirea indusului în câmpul inductor, fazorii se rotesc și se poate deduce ușor că tensiunea între perii poate varia între două valori:

$$U_{\max} = KL \text{ și } U_{\min} = MN.$$

Valoarea medie a tensiunii între două perii de semn contrar este:

$$U_{\text{med}} = \frac{1}{2}(U_{\max} + U_{\min}) = \frac{1}{2}(KL + MN). \quad (3.8)$$

Pulsația t.e.m. dintre perii este diferența dintre t.e.m. medie și valorile sale extreme:

$$\Delta U = \frac{1}{2}(1 - \cos \frac{\alpha}{2}). \quad (3.9)$$

Pulsația relativă a t.e.m. dintre perii este dată de relația:

$$\frac{\Delta U}{U_{\text{med}}} = \frac{\frac{1}{2}KL(1 - \cos \frac{\alpha}{2})}{\frac{1}{2}KL(1 + \cos \frac{\alpha}{2})} = \text{tg}^2 \frac{\alpha}{4}, \quad (3.10)$$

în care:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{S}p = \frac{360^\circ}{K}p. \quad (3.11)$$

Grad electric, grad geometric

Dacă se notează cu p numărul de perechi de poli, atunci la 1° geometric vor corespunde p grade electrice.

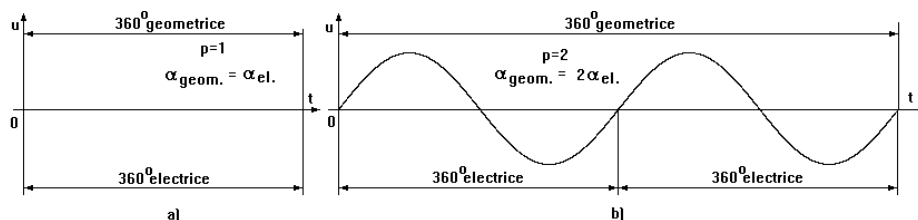


Fig. 3.8. Definirea gradelor electrice.

În figura 3.8 se reprezintă circumferința desfășurată a unui cerc și gradele electrice care se înscriu în cazul unei mașini cu două perechi de poli.

3.1.2. ELEMENTE CONSTRUCTIVE DE BAZĂ

Mașina de curent continuu se compune, ca orice mașină electrică rotativă, dintr-un inductor și un indus, despărțite printr-un strat de aer numit *întrefier*. La acest tip de mașină electrică, întotdeauna inductorul este fix, constituind statorul mașinii, iar indusul este mobil, constituind rotorul mașinii. Se cunosc două categorii principale de mașini de curent continuu:

1) Mașini homopolare (aciclice, unipolare)

Funcționarea mașinii homopolare se bazează pe principiul discului lui Faraday (Fig. 3.9). Discul metalic D se rotește cu turația n într-un câmp magnetic omogen $\vec{B}$, perpendicular pe suprafața discului. Discul conține un număr mic de sectoare S, care constituie conductoarele rotorice în care se induce t.e.m., cu sensul de la ax la periferia discului. Între peria A_1 , plasată pe periferia discului și peria A_2 , plasată pe periferia axului construit din material conductor, se culege o t.e.m. constantă, făcând inutilă prezența colectorului. Acest tip de mașini s-au construit ca generatoare de tensiuni mici și intensități mari.

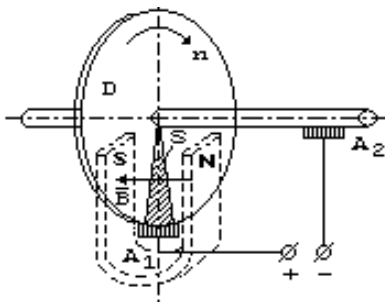


Fig. 3.9. Mașină unipolară.

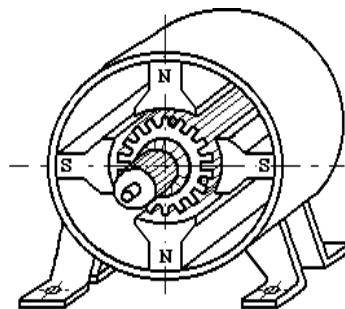


Fig. 3.10. Mașină heteropolară.

2) Mașini heteropolare (ciclice)

La aceste mașini, inductorul este format dintr-un număr de poli care alternează succesiv (Fig. 3.10). Fluxul inductor prin spirele indusului care se rotește variază periodic, fapt care determină în spire t.e.m. induse alternative. Acestea sunt redresate prin intermediul colectorului.

Elementele constructive de bază ale mașinii de curent continuu heteropolară sunt prezentate în figura 3.11.

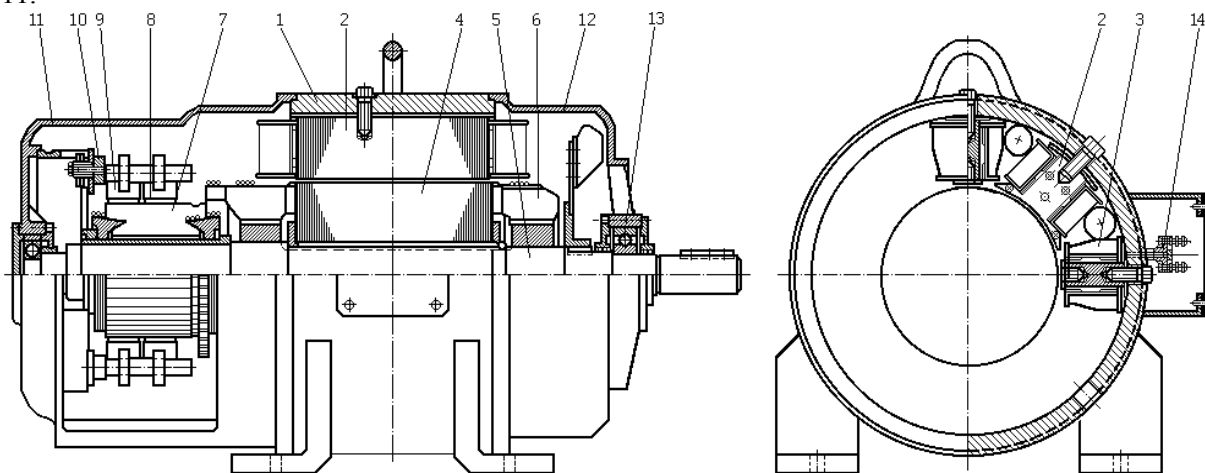


Fig. 3.11. Secțiune generală printr-o mașină de curent continuu.

a) **Inductorul** (armătura statorică), constituie partea mașinii care produce fluxul inductor. Se compune în principal din: carcasă, poli principali (de excitație), poli auxiliari (de comutație) și piesele de strângere.

- **Carcasa** (1) - este un cilindru din material feromagnetic (oțel), în interiorul căruia sunt fixați cu șuruburi, polii principali 2 și polii auxiliari 3. Carcasa contribuie la închiderea fluxului principal, constituind jugul inductorului.
- **Polii principali** (Fig. 3.12) - sunt formați dintr-un miez feromagnetic (1) realizat de obicei din tole de oțel de grosime 1..2mm, strânse prin nituri. Pe miezul polar sunt montate bobinele de excitație (3) care la partea inferioară se sprijină pe piesele polare (2) (coarnele miezului polar). După plasarea bobinelor pe miezul polar, polul principal se fixează în interiorul carcasei (5) prin șurubul (6). Bobinele de excitație se execută din conductoare de cupru izolate, cu secțiune circulară la mașinile de mică putere, și cu secțiune dreptunghiulară la mașinile de mare putere.

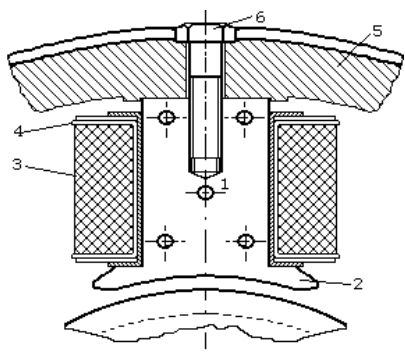


Fig. 3.12. Secțiune prin polul principal.

doită pe cant. În partea inferioară ea se sprijină pe două sau mai multe bride sudate sau prinse în șuruburi de miezul polar. Și polii auxiliari se prind de carcasă prin șuruburi, fiind plasați exact în axa neutră geometrică a mașinii, exact la mijlocul distanței dintre polii principali.

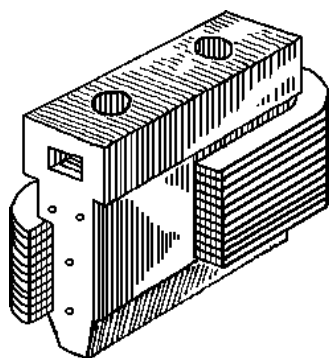


Fig. 3.13. Secțiune prin polul auxiliar.

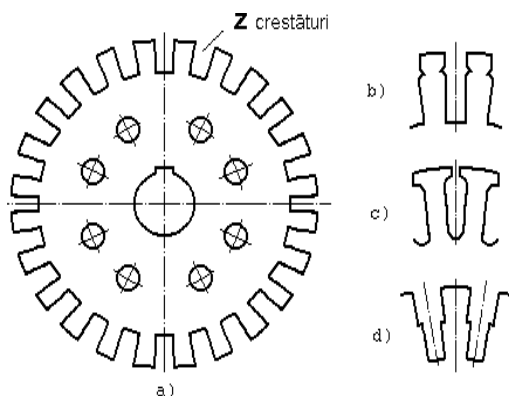


Fig. 3.14. Tolă și tipuri de creștături pentru indus.

Bobinele sunt realizate pe șabloane de forma miezului polar, sau direct în carcase izolate (4). Legarea bobinelor de excitație de pe polii mașinii se poate face în serie sau paralel, respectând condiția ca fluxul să fie dirijat la un pol dinspre inductor spre rotor (pol nord), iar la polul următor în sens invers (pol sud), astfel încât polii succesivi să alterneze pe periferia statorului.

- **Polii auxiliari** (Fig. 3.13) - se compun dintr-un miez de fier masiv (uneori și din tole) (1), având de obicei o formă paralelipipedică.

Bobina polului auxiliar (2), se execută în general din bară de cupru îndoită pe cant. În partea inferioară ea se sprijină pe două sau mai multe bride sudate sau prinse în șuruburi de miezul polar. Și polii auxiliari se prind de carcasă prin șuruburi, fiind plasați exact în axa neutră geometrică a mașinii, exact la mijlocul distanței dintre polii principali.

Legăturile bobinelor polilor auxiliari sunt realizate încât polaritatea acestora să alterneze de-a lungul periferiei statorului. La mașinile de curent continuu care lucrează la variații mari și dese de sarcină, alimentate prin mutatoare, circuitul magnetic al inductorului (poli principali plus carcasă), se realizează în întregime din tole. La periferia miezului polar principal, care în acest caz nu mai prezintă coarne polare, spre întrefier sunt practicate un număr de creștături în care se plasează un bobinaj special, numit *înfășurare de compensare*. Miezul polilor auxiliari este și el format din tole.

b) **Indusul**, este compus din: miez feromagnetic (4), ax (5), înfășurarea indusă (6) și colector (7).

- **Miezul feromagnetic** - este realizat din tole de oțel electro-tehnic de 0.5 mm grosime, izolate între ele în scopul micșorării curenților turbionari. În funcție de dimensiunile mașinii, tolele se împachetează direct pe ax, sau pe un butuc plasat pe ax.

La mașinile de putere foarte mică, se practică creștături rotorice semiînchise (Fig. 3.14,c).

În cea mai mare parte a cazurilor, indusul prezintă creștături deschise (Fig. 3.14,d), pentru a permite introducerea bobinelor preizolate. În jugul indusului se practică canale longitudinale de răcire. La mașinile la care indusul are o lungime mai mare de 30cm, se prevăd și canale radiale de răcire. În scopul reducerii la valori minime a variației permeanței circuitului magnetic la micile deplasări axiale ale indusului în timpul funcționării, lungimea indusului depășește cu 2...5mm lungimea polului inductor la fiecare capăt al mașinii.

- **Înfășurarea indusă** - se execută din conductor de cupru de secțiune circulară sau dreptunghiulară. Porțiunea din înfășurare cuprinsă între două lamele de colector vecine, se numește *secție*. Secțiile se confecționează pe șablon, se izolează cu micabandă, se micabandă la cald și apoi se introduc în creștăturile indusului. Capetele secției se conectează la lamelele de colector. Capetele de bobine (părțile frontale ale înfășurării), se izolează cu micabandă sau benzi din țesătură de sti-

clă și se asigură împotriva forței centrifuge prin bandaje din sârmă de oțel rezistent la rupere (coardă de pian), sau din fibre poliesterice și sticlă, care polimerizează la cald.

- **Colectorul** - este după cum s-a văzut la principiul de funcționare, un redresor mecanic rotativ, solidar cu indusul mașinii. El este format dintr-un număr de lamele de colector cu profil trapezoidal din cupru sau chiar aliaj de cupru și argint. Lamelele sunt izolate între ele și față de butucul colectorului cu micanită. După forma lamelei, există două tipuri de colectoare: - în coadă de rândunică (Fig. 3.15) și în formă de H (Fig. 3.16).

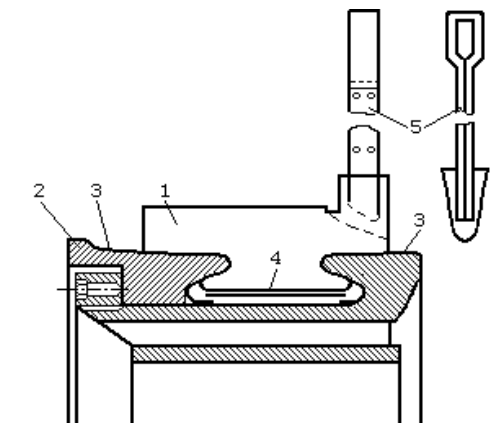


Fig. 3.15. Sistem de prindere în coadă de rândunică.

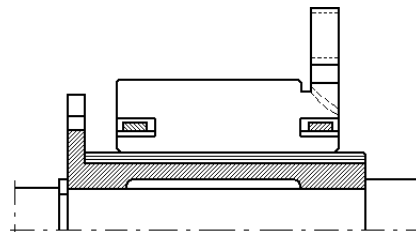


Fig. 3.16. Sistem de prindere în formă de H.

La colectoarele în coadă de rândunică, coroana lamelelor (1) se izolează față de butuc și față de conurile de strângere (2) prin manșetele (3) și cilindrii de micanită. Strângerea pe direcție axială se face cu piulițe sau buloane de strângere. Dacă diferența dintre diametrul indusului și diametrul colectorului nu este prea mare, capetele secțiilor înfășurării sunt lipite direct la lamelele de colector. În cazul în care diferența dintre cele două diametre este apreciabilă, conexiunea se face cu ajutorul stegulețelor (5).

La colectoarele în formă de H, coroana se execută cu inele de fretare din oțel rezistent la întindere care se introduc la cald ($180..200^{\circ}\text{C}$) peste două inele izolatoare. Canalele practice în coroana lamelelor sunt umplute apoi cu o masă de presare cu fulgi de azbest.

Colectoarele în **H** sunt mai simple și mai ieftine. La mașinile de tracțiune de mare putere, se folosesc colectoare în coadă de rândunică deoarece acestea permit strângeri succesive în timpul exploatării.

- **Periile** - (Fig. 3.11.(8)), calcă pe lamelele colectorului, făcând legătura dintre circuitul indusului care este mobil și circuitul exterior care este fix. Periile sunt susținute de **portperii** (Fig. 3.11.(9)), care sunt montate pe un suport numit **cruce portperii** (Fig. 3.11.(10)). Crucea portperii permite rotirea periilor și blocarea lor într-o anumită poziție față de polii inductori. Ea se montează pe **scutul port-palier** (11) dinspre colector. Celălalt scut port-palier (11) și rulmenții (13) asigură centrarea indusului. Periile sunt conectate la **placa de borne** (14).

3.1.3. MĂRIMI NOMINALE

Mărimile nominale ale unei mașini de curent continuu sunt cele corespunzătoare regimului nominal de funcționare, pentru care se dimensionează mașina și sunt trecute pe plăcuța ei indicatoare. Pentru mașinile de curent continuu sunt normalizate următoarele mărimi:

Tensiunea la borne.

- Generatoare: 115V, 230V, 460V

- Motoare: 110V, 220V, 440V

- Generatoare pentru tracțiunea electrică: 250V, 660V, 825V, 1320V, 1650V, 2640V, 3300V.

Turația. Turațiile nominale ale mașinilor de curent continuu sunt aceleași ca și ale mașinilor de curent alternativ corespunzătoare frecvenței nominale de 50 Hz și numerelor de perechi de poli.

3.2. ÎNFĂȘURĂRILE INDUSULUI CU COLECTOR

Principiul de funcționare al mașinii de curent continuu (3.1.1), demonstrează că în componența mașinii de curent continuu intră două înfășurări: una fixă, numită de *excitație* cu rolul de a crea câmpul magnetic inductor $\vec{B}$ (Fig. 3.1) și una mobilă. Aceasta din urmă este sediul t.e.m. induse și prin intermediul ei se desfășoară fenomenul de conversie a energiei. Ea se numește înfășurare *indusă* sau înfășurarea *indusului cu colector*.

Există și mașini de curent continuu la care câmpul de inducție $\vec{B}$ este obținut prin intermediul magnetilor permanenți (mașini excitate cu magneti permanenți). În cele ce vor urma se va studia numai înfășurarea indusului, deoarece înfășurarea de excitație nu ridică probleme deosebite.

3.2.1. ELEMENTE DE BAZĂ ALE ÎNFĂȘURĂRILOR DE CURENT CONTINUU

Înfășurarea indusă este circuitul electric format din totalitatea spirelor bobinate pe indusul unei mașini electrice, întreg ansamblul devenind sediul unor t.e.m. induse. Această înfășurare formează deci un sistem de conductoare plasate într-un mod bine determinat în creștăturile rotorului și conectate la lamelele colectorului. Înfășurările indusului cu colector se construiesc ca înfășurări închise. Conductoarele înfășurării formează un circuit închis, în care t.e.m. induse se echilibrează reciproc și care este străbătut de curenți numai dacă la perii este conectată o sarcină. Astfel, înfășurarea este simetrică în raport cu orice axă diametrală a rotorului.

- **Conductorul** - este format din conductorul propriu-zis și izolația conductorului. El are o parte activă plasată în creștătura indusului și o parte frontală plasată în afara întrefierului, parte care asigură legătura cu alte conductoare.
- **Spira** - este formată din două conductoare: unul de *ducere*, iar celălalt de *întoarcere*, numite astfel după ordinea în care se succed pentru un sens determinat de parcurgere a înfășurării.

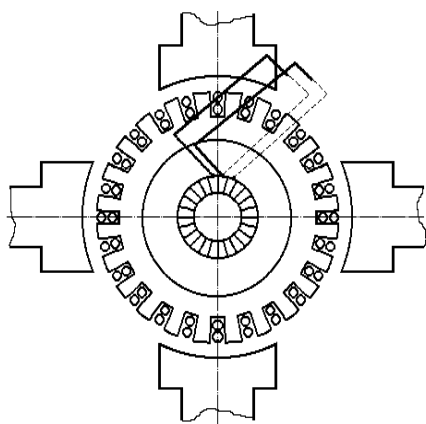


Fig. 3.17. Indus cu un conductor activ pe spiră.

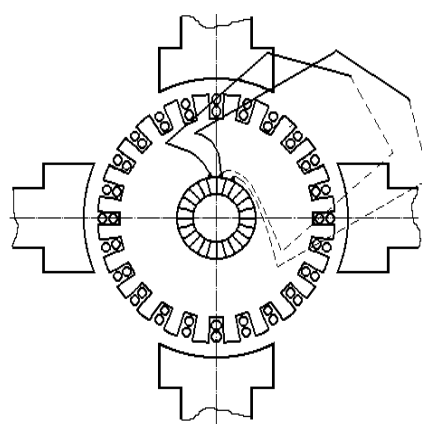


Fig. 3.18. Indus cu ambele conductoare ale spirei active.

Spira poate avea un singur conductor activ (Fig. 3.17), sau două conductoare active (Fig. 3.18). Spira cu un singur conductor activ are conductorul de ducere plasat în câmpul magnetic din întrefier, iar conductorul de întoarcere în afara câmpului magnetic din întrefier, de exemplu în interiorul circuitului magnetic al rotorului (în interiorul miezului indusului). Ea îmbrățișează numai jumătate din fluxul polar al mașinii. Această construcție o au spirele înfășurării în *inel*.

Spira cu două conductoare active are atât conductorul de ducere cât și conductorul de întoarcere plasate în creștăturile rotorului, deci în câmpul magnetic din întrefier. Cele două conductoare sunt situate unul față de celălalt la o distanță de aproximativ un pas polar. În acest caz, spira îmbrățișează întregul flux polar al mașinii. Este caracteristică înfășurării în *tobă* sau *tambur*.

- **Secția** - se definește ca fiind porțiunea din înfășurare cuprinsă între două lamele de colector care se succed în circuitul înfășurării (sunt vecine electric). Ea reprezintă unitatea constructivă a unei înfășurări. O secție poate fi formată dintr-o singură spiră, sau dacă se dorește obținerea unei tensiuni de valoare mai mare la perii, din mai multe spire înseriate. La înfășurările normale, numărul de secții S este egal cu numărul de lamele de colector K .
- **Mănunchiul** - este constituit din totalitatea conductoarelor de ducere și respectiv de întoarcere ale spirelor înseriate care formează secția. Astfel, secția va avea un mănunchi (latură) de ducere și un mănunchi (latură) de întoarcere, fiecare din aceste două mănunchiuri fiind plasate în câte o creștătură rotorică.
- **Bobina** -. Uneori, în aceeași creștătură sunt așezate mănunchiuri aparținând mai multor secții. Acestea pot fi așezate într-un singur strat sau în două straturi (Fig.3.19):

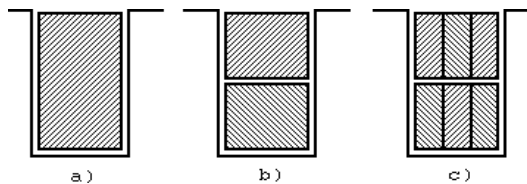


Fig. 3.19. Așezarea conductoarelor în creștătură.

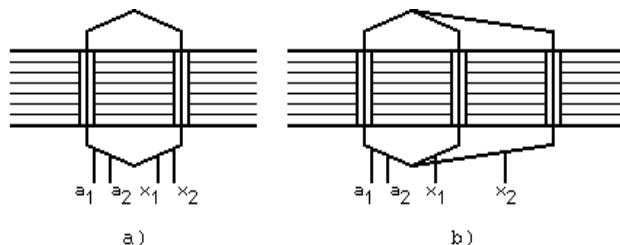


Fig. 3.20. Variante de dispunere a mănunchiurilor în creștături.

- figura 3.19.a, reprezintă o înfășurare într-un singur strat;
- figura 3.19.b, reprezintă o înfășurare în două straturi, cu o singură secție pe strat;
- figura 3.19.c, reprezintă o înfășurare în două straturi, cu câte trei secții pe strat.

Secțiile care ocupă aceeași creștătură se execută împreună pe dispozitive speciale numite *șabloane*, ansamblul formând o **bobină**. Bobina este un element constructiv al înfășurării, formată din una sau mai multe secții, care au fie ambele mănunchiuri așezate în aceeași creștătură (Fig. 3.20.a), fie numai mănunchiurile de ducere (sau de întoarcere) așezate în aceeași creștătură (Fig. 3.20.b). În acest caz, bobina care ocupă o creștătură, are u secții. Se spune că în creștătura reală se află u *creștături elementare*, sau u *bobine elementare*. Capetele secțiilor (sau a bobinelor elementare), se leagă la lamele diferite de colector. Dacă numărul secțiilor este S , iar numărul creștăturilor reale este Z , se poate scrie: $S = uZ = Z_e$, în care Z_e este numărul total de creștături elementare ale mașinii. La fiecare lamelă de colector sunt legate capetele a două secții. Numărul lamelor de colector va fi:

$$K = S = Z_e = uZ \quad (3.12)$$

Pași înfășurării, reprezintă diferitele distanțe dintre mănunchiurile secțiilor, sau dintre lamelele de colector. Se măsoară în număr de creștături reale, număr de creștături elementare, sau număr de lamele de colector.

- *pasul secțiunii* sau *pasul de ducere* y_1 , reprezintă distanța dintre mănunchiurile de ducere și de întoarcere ale aceleiași secții, impunând lățimea șablonului pe care se realizează secția.
- *pasul de legătură* dintre secții, sau *pasul de întoarcere* y_2 , reprezintă distanța dintre mănunchiul de întoarcere al primei secții și mănunchiul de ducere al următoarei secții.
- *pasul rezultat* y , reprezintă distanța dintre mănunchiurile de ducere a două secții consecutive. Este suma algebrică a pașilor elementari y_1 și y_2 .

$$y = y_1 + y_2$$

- *pasul pe colector* y_k , reprezintă numărul de lamele de colector existente între începutul și sfârșitul unei secții.

3.2.2. TIPURI DE ÎNFĂȘURĂRI

3.2.2.1. Înfășurarea în inel

Conform figurii 3.17, spirele acestei înfășurări au un singur conductor activ plasat în câmpul magnetic din întrefier. Secțiile vor avea și ele un singur mănunchi (latură) plasat în câmpul magnetic din întrefier, celălalt mănunchi fiind situat în afara câmpului magnetic principal. Execuția acestui tip de înfășurare este dificilă, deoarece bobinarea trebuie făcută direct pe miezul feromagnetic. Fixarea rotorului pe ax este greoaie. La aceeași tensiune nominală a înfășurării și aceleași solicitări electrice și magnetice în mașină, consumul de material conductor este mai mare deoarece spira are un singur conductor activ, îmbrățișând jumătate din fluxul polar al mașinii. Înfășurarea în inel nu se mai folosește în prezent la construcția mașinilor de curent continuu, ea prezentând numai un interes istoric și didactic.

3.2.2.2 Înfășurarea în tobă (tambur)

Secțiile acestei înfășurări au ambele mănunchiuri situate în câmpul magnetic din întrefier, conform figurii 3.18. Înfășurarea în tobă se execută mai ușor decât cea în inel. Bobinele se pot realiza separat pe șabloane și se pot introduce ulterior în creștăturile miezului feromagnetic (Fig. 3.21).

- (1) - mănunchi de ducere (activ);
- (2) - mănunchi de întoarcere (activ);
- (3),(4) - mănunchiuri frontale (plasate în afara câmpului magnetic din întrefier).

Consolidarea miezului pe axul rotorului este simplă. Consumul de material conductor este redus deoarece spira îmbrățișează în-tregul flux polar al mașinii. Numerotarea secțiilor și a lamelelor de colector se face de regulă astfel: se numerează secțiile de la stânga la dreapta în ordinea în care se construiesc ele. Lamela de colector va purta același număr cu numărul laturii de ducere a secției la care este legată. Succesiunea

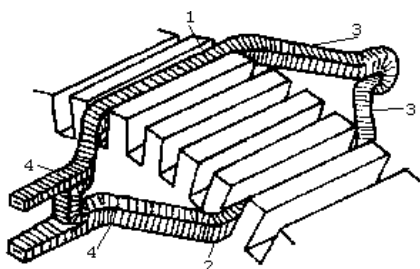


Fig. 3.21. Dispunerea bobinei pe indus.

secțiilor în circuitul înfășurării se stabilește astfel încât pentru un număr de secții dat, să rezulte o tensiune indusă maximă pe calea de curent. Pentru aceasta, se conectează în serie toate secțiile care au laturile de ducere sub un pol și laturile de întoarcere sub polul de nume contrar vecin (Fig. 3.18).

După modul de inseriere a secțiilor se deosebesc două tipuri principale de înfășurări în tobă: înfășurarea *buclată* și înfășurarea *ondulată*.

3.2.2.2.1. Înfășurarea buclată

La acest tip de înfășurare, secțiile care se succed în circuitul înfășurării și sunt conectate în serie pe calea de curent, au laturile de ducere, respectiv de întoarcere așezate sub aceeași pereche de poli. De aceea, capetele unei secții vor fi legate la lamele de colector vecine sau apropiate fizic. Figura 3.22 prezintă schema de principiu pentru o înfășurare buclată simplă cu o singură spirală pe secție (a), cu trei spire pe secție (b), precum și semnificația pașilor pentru acest tip de înfășurare.

Reprezentarea desfășurată a unei înfășurări constă în schema plană care se obține prin secționarea rotorului după o generatoare și desfășurarea lui în plan.

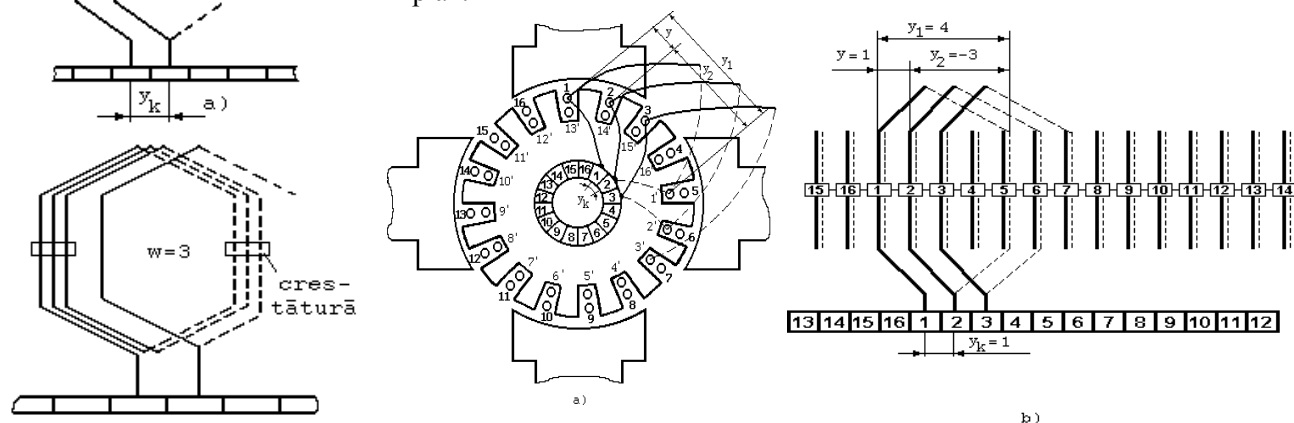


Fig. 3.23. Variante de reprezentare a înfășurării buclate simple.

Fig. 3.22. Pașii la înfășurarea buclată simplă.

a) Înfășurarea buclată simplă

Prin definiție, la înfășurarea buclată simplă, $y = y_k = 1$. Semnul + corespunde sensului de desfășurare către dreapta. În continuare, se va studia o înfășurare buclată simplă cu următorii parametri:

$$Z = K = S = 16, 2p = 4$$

Aceasta înseamnă că numărul de crestături Z este egal cu numărul de lamele de colector K și cu numărul secțiilor S .

Având patru poli, fiecăruia îi vor corespunde câte patru crestături. Pașii înfășurării se vor calcula după cum urmează:

$$y_1 = \frac{Z}{2p} = \frac{16}{4} = 4; \quad y = y_k = 1; \quad y_2 = y - y_1 = 1 - 4 = -3$$

Dacă se reprezintă această înfășurare frontal, sau în evolutivă, se obține figura 3.23.a. În figura 3.23.b se prezintă principiul reprezentării desfășurate pentru înfășurarea în discuție. Se vor figura 16 mănunchiuri de ducere (linie plină) și 16 mănunchiuri de întoarcere (linie întreruptă).

Figura 3.24 exemplifică procedeul complet al reprezentării desfășurate.

Se pleacă de la crestătura 1, deci de la mănunchiul de ducere 1, al secției 1, conectat la lamela de colector 1. Se adaugă pasul y_1 , pentru a afla deschiderea secției. Mănunchiul de întoarcere al secției 1, va trece prin crestătura 5 (1') și se va lega la lamela de colector 2, deoarece $y_k + 1 = 2$. S-a realizat astfel desenul unei secții, conectată la lamelele 1 și 2. Se continuă procedeul și pentru celelalte secții. După parcurgerea întregii circumferințe a rotorului într-un anumit sens, mănunchiul de întoarcere al ultimei secții (16'), se leagă la aceeași lamelă cu mănunchiul de ducere al primei secții (1).

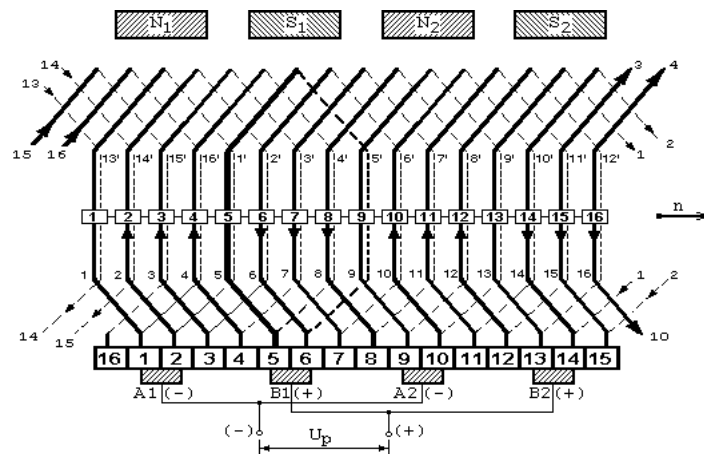


Fig. 3.24. Reprezentarea desfășurată a înfășurării buclate simple.

Considerând un anumit sens de deplasare al rotorului prin fața polilor inductori (în fig.3.24 către dreapta), se stabilește sensul t.e.m. induse în secțiile aflate în dreptul respectivi-lor poli, aplicând regula mâinii drepte. Schema electrică a înfășurării și sensul t.e.m. induse în secții E_s este arătată în figura 3.25.

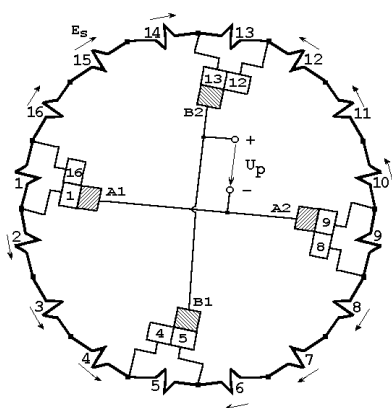


Fig. 3.25. Căile de curent fără secțiuni scurtcircuitate.

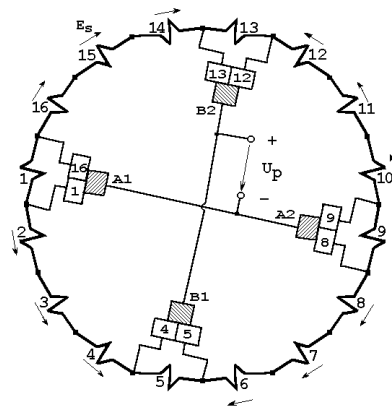


Fig. 3.25. Căile de curent cu secțiuni scurtcircuitate.

Poziția periilor

Culegerea t.e.m. induse în secțiile înfășurării se face prin intermediul periilor, fixe în spațiu, care sunt în contact permanent cu suprafața colectorului. Poziția periilor pe colector are o mare importanță în funcționarea mașinii de curent continuu.

Considerăm că peria are o lățime egală cu lățimea unei lamele de colector. În timpul funcționării, rotorul mașinii împreună cu toate secțiile înfășurării se rotește față de periile fixe. Acestea vin în contact când numai cu o singură lamelă (Fig. 3.25), când cu două lamele vecine (Fig. 3.26), deoarece colectorul este legat rigid cu rotorul. La acest tip de înfășurare, la două lamele de colector vecine pe colector sunt legate capetele aceleiași secții. În momentul în care peria calcă pe aceste lamele, secția respectivă este scurtcircuitată prin perie, deoarece aceasta este confecționată din material conductor. Din această cauză, periile trebuie plasate în așa fel pe colector, încât laturile secțiilor scurtcircuitate de perie să se găsească în momentul scurtcircuitului în axele neutre ale mașinii. Câmpul magnetic în aceste axe este foarte mic, sau chiar nul. În mănunchiurile secției scurtcircuitate se induc t.e.m. mici, sau nu se induc t.e.m. Dacă secția scurtcircuitată de perii s-ar găsi în momentul scurtcircuitului cu mănunchiurile în dreptul polilor inductori (în axele polare), t.e.m. indusă în secție ar fi maximă, iar prin secție ar circula un curent de scurtcircuit important. Secția acumulează în câmpul său magnetic o energie importantă și devine sediul unor pierderi Joule apreciable, în timpul în care este scurtcircuitată de perie. În momentul imediat următor, datorită mișcării rotorului, peria va călca numai pe lamela care urmează în sensul contrar deplasării rotorului. Se întrerupe contactul cu una din lamelele la care era conectată secția în discuție. Scurtcircuitarea secției încetează, iar curentul prin aceasta trebuie să se anuleze. Energia înmagazinată în câmpul magnetic al secției nu se poate anula brusc și din această cauză, nici curentul nu poate scăde brusc la zero în momentul când lamela este părăsită de perie. El continuă să se închidă prin aer, între lamela părăsită și perie, formând un arc electric în care se disipă într-un timp foarte scurt energia localizată în câmpul magnetic al secției. Succesiunea rapidă a fenomenelor, fac ca aceste arcuri electrice să apară ca niște scântei la colector, între lamele și peri. Cu cât energia înmagazinată în secțiile scurtcircuitate este mai mare, cu atât deteriorarea colectorului va fi mai probabilă și mai prematură.

În concluzie, periile sunt plasate pe colector în așa fel încât în timpul funcționării mașinii, să scurtcircuiteze secțiunile ale căror mănunchiuri se găsesc în axele neutre, adică în zonele în care câmpul de excitație este foarte slab sau chiar nul. Se spune că periile sunt plasate în *axa neutră*, deși după cum se vede din figura 3.24, ele sunt plasate din punct de vedere spațial în axa polilor de excitație. Această raportare a poziției periilor pe colector la axa polilor inductori este valabilă numai în cazul în care legăturile secțiilor la lamelele de colector sunt de lungimi egale.

Polaritatea periilor se stabilește prin convenție; peria din care curentul iese în exteriorul mașinii este considerată peria **pozitivă**, iar peria prin care curentul intră în mașină este considerată peria **negativă**.

La acest tip de înfășurare, numărul de căi de curent este egal cu numărul polilor. Notând cu a numărul de perechi de căi de curent, se poate scrie: $a = p$. Numărul de periile pe colector este egal cu numărul de poli.

b) Înfășurarea buclată multiplă

La acest tip de înfășurare pasul rezultat este $y = m$, m fiind *ordinul de multiplicitate* al înfășurării. Pașii parțiali y_1 și y_2 se calculează cu relațiile prezentate anterior. Numărul de perechi de căi de curent este $a = mp$. Înfășurarea buclată multiplă se poate închide o singură dată, sau de t ori, t fiind cel mai mare divizor comun dintre numărul de lamele de colector K și ordinul de multiplicitate t .

În cele ce urmează, se va reprezenta înfășurarea buclată multiplă cu următorii parametri:

$$Z = K = S = 18, p = 2, m = 2$$

Pasul de ducere: $y_1 = S / 2p \pm \varepsilon$. Rolul numărului subunitar ε este de a face ca pasul de ducere al înfășurării să devină număr întreg. Dacă raportul dintre S și $2p$ nu rezultă număr întreg, se apelează întotdeauna la ε . Pentru înfășurarea în discuție, se alege $\varepsilon = 0,5$. Pașii înfășurării vor fi:

$$y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon = \frac{18}{4} \pm \varepsilon = 4,5 \pm \varepsilon = 4,5 + 0,5 = 5; \quad y = m = 2; \quad y_2 = y - y_1 = -3.$$

Reprezentarea desfășurată este prezentată în figura 3.27. Schema echivalentă, steaua t.e.m. induse și poligonul t.e.m. sunt prezentate în figurile 3.28, 3.29 și 3.30. Înfășurarea se închide de două ori. Ea este constituită din două înfășurări buclate simple, distincte. Una are laturile de ducere ale secțiilor plasate în creștăturile pare, iar cealaltă în creștăturile impare.

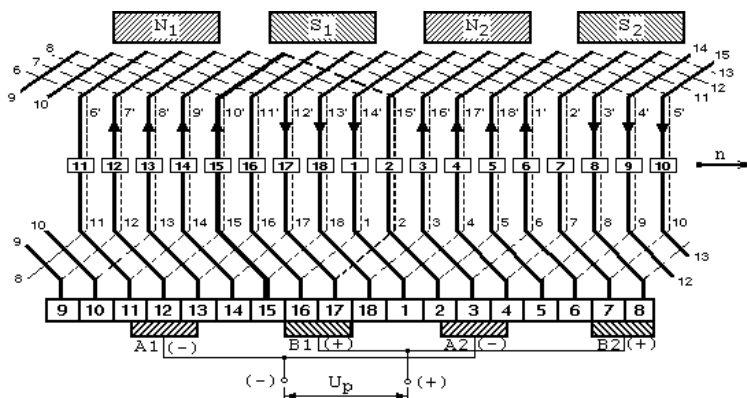


Fig. 3.27. Reprezentarea desfășurată a înfășurării buclate simple.

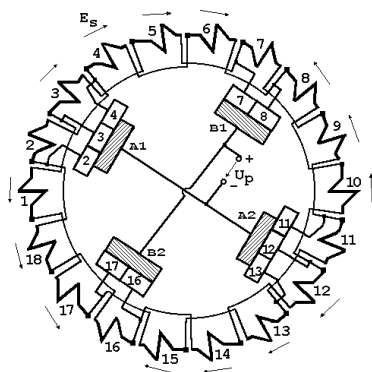


Fig. 3.28. Schema echivalentă a înfășurării buclate multiple.

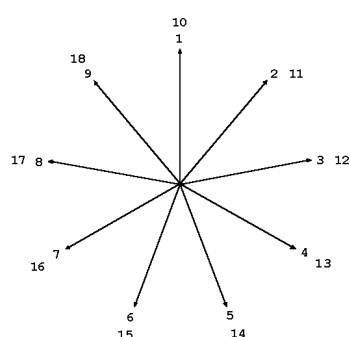


Fig. 3.29. Steaua tensiunilor la înfășurarea buclată multiplă.

Pentru ca cele două înfășurări să se afle în circuit tot timpul, este necesar ca periile să aibă o lățime b_{pe} mai mare sau cel puțin egală cu lățimea a două lamele de colector.

Se observă că în steaua tensiunilor electromotoare induse fiecare poziție este ocupată de câte doi fazori.

Poligonul t.e.m. reprezentat în figura 3.30 este format din două contururi poligonale suprapuse.

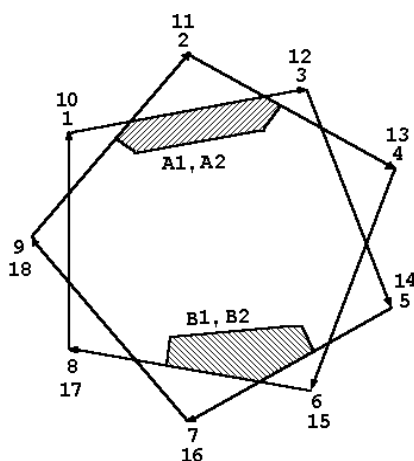


Fig. 3.30. Poligonul tensiunilor la înfășurarea buclată multiplă.

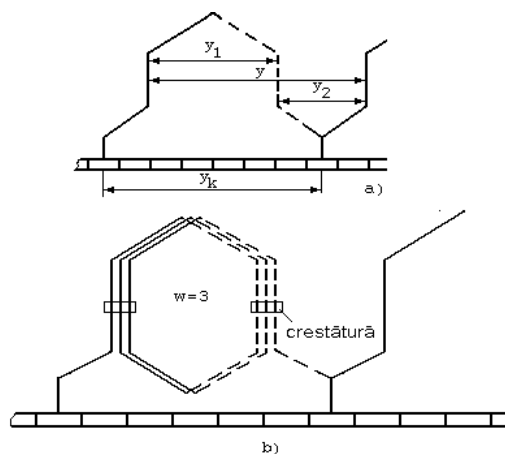


Fig. 3.31. Secțiuni la înfășurarea ondulată.

3.2.2.2.2. Înfășurarea ondulată

La înfășurarea ondulată, secțiile care se conectează în serie pentru a forma o cale de curent, au laturile sub perechi succesive de poli pentru un anumit sens de parcurgere a periferiei indusului. Cele două capete ale unei secții, se conectează la două lamele de colector distanțate la aproximativ 2τ (τ fiind pasul polar exprimat în număr de lamele de colector).

Pasul total $y = y_k = (K \pm m)/p$ este număr întreg. Din această cauză, înfășurările ondulate se pot executa numai pentru anumite numere de crestături, respectiv numere de lamele de colector.

Pasul de ducere este $y_1 = Z_e / 2p \pm \varepsilon$, iar pasul de întoarcere $y_2 = y - y_1$ va fi pozitiv, astfel încât la o parcurgere succesivă a secțiilor înseriate pe calea de curent se avansează în același sens pe periferia indusului (Fig. 3.31).

Caracteristic acestei înfășurări este $a=m$, deci numărul de căi de curent este egal cu ordinul de multiplicitate, indiferent de numărul de poli ai mașinii. Într-o cale de curent vor fi cuprinse toate secțiile situate sub polii de același nume. Cealaltă cale de curent va conține toate secțiile situate sub polii de nume contrar.

Ca și în cazul înfășurărilor buclate, secțiile care compun înfășurările ondulate pot fi formate dintr-o singură spiră (Fig. 3.31-a) sau din mai multe spire înseriate, conform figurii 3.31-b).

a) Înfășurarea ondulată simplă

Se caracterizează prin $m=1$. Conform celor precizate mai sus, la un număr par de perechi de poli p , numărul de lamele de colector K trebuie să fie impar, lucru posibil dacă u și Z sunt impare. Principiul de realizare al înfășurării este prezentat în figura 3.32, iar semnificația pașilor în figura 3.33. Aceasta din urmă, evidențiază particularitatea înfășurării ondulate în raport cu înfășurarea buclată. În primul caz, secțiile unei căi de curent sunt așezate în câmpul magnetic al tuturor perechilor de poli inductori. În cazul unei nesimetrii magnetice a polilor, t.e.m. induse în căile de curent sunt practic egale, ceea ce nu se întâmplă în cazul înfășurărilor buclate.

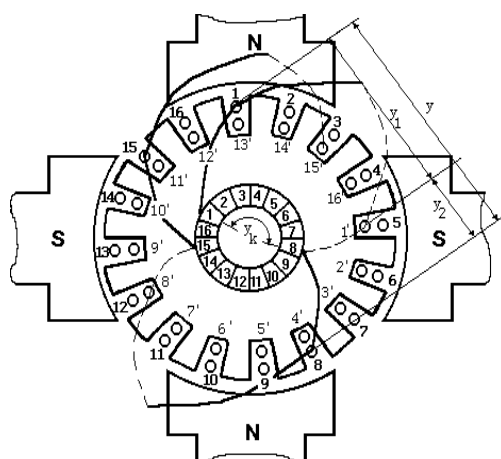


Fig. 3.32. Reprezentarea frontală a înfășurării ondulate simple.

Dacă polii inductori sunt identici din punct de vedere constructiv și excitați identic (cazul simetriei magnetice), nu există deosebiri între cele două tipuri de înfășurări.

Considerăm o înfășurare ondulată simplă, cu următorii parametri: $Z = K = S = 17$, $2p = 4$.

Pașii înfășurării vor fi:

$$y = y_k = \frac{K - 1}{2} = \frac{17 - 1}{2} = 8; \quad y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon = \frac{17}{4} - \frac{1}{4} = 4; \quad y_2 = y - y_1 = 4.$$

Exemplificarea semnificației pașilor din figura 3.33 corespunde altor valori ale pașilor decât cele de mai sus, pentru care se va prezenta întreaga înfășurare desfășurată în figura 3.34. Se pornește de la crestătura 1, prin care trece latura de ducere a secției 1, conectată la lamele de colector 1. Latura de întoarcere va trece prin crestătura

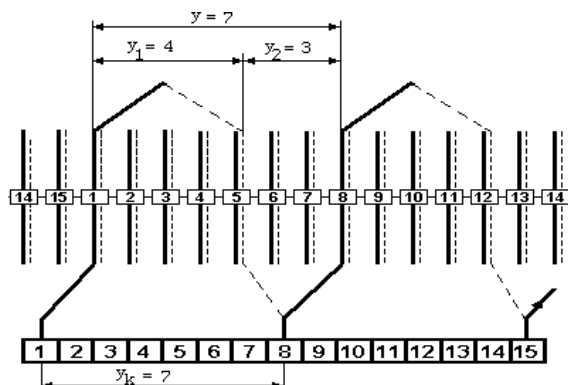


Fig. 3.33. Pașii înfășurării ondulate simple.

5 ($y_1=4$) și se va conecta la lamela de colec-tor 9 ($y_2=4$). După ce se parcurge periferia rotorului de două ori ($p=2$), se ajunge la lamela 17, distanțată cu o lamelă în spate ($m=1$). Ordinea de inseriere a secțiilor este:

1-9-17-8-18-7-15-6-14 -5-13-4-12-3-11-2-10

Așezarea periiilor pe colec-tor respectă condițiile arătate în paragraful "Poziția periiilor". În momentul prezentat în figura 3.34, există cinci secții scurtcircuitate de perii. Acestea sunt: 1-1', 2-2', 6-6', 10-10', 14-14'. Secțiile scurtcircuitate au laturile în zona neutră sau în zone unde câmpul magnetic are valori mici. Diferența față de înfășurarea buclată

constă în faptul că scurtcircuitarea se realizează prin intermediul a două perii de același semn.

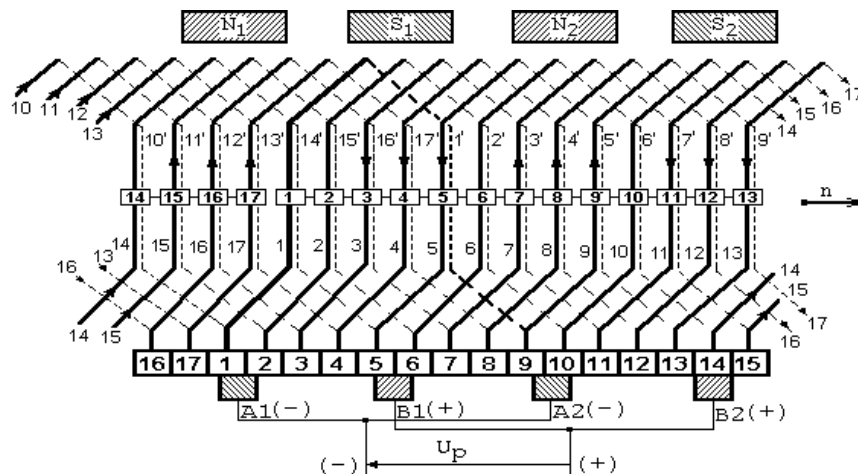


Fig. 3.34. Reprezentarea desfășurată a înfășurării ondulate simple.

Schema electrică a înfășurării este prezentată în figura 3.35. Din această figură, se poate constata că există numai două căi de curent, pentru care ar fi necesare numai două perii. Totuși se folosesc patru perii (în general numărul periiilor este egal cu numărul polilor), pentru a menține densitatea de curent în limite prescrise și a evita încălzirea excesivă a periiilor.

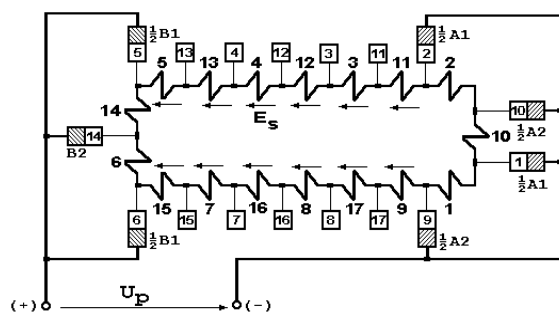


Fig. 3.35. Schema echivalentă a înfășurării ondulate simple.

b) Înfășurarea ondulată multiplă

La aceste înfășurări, $m \geq 2$, $a = m$. Se mai numesc și înfășurări serie-paralel. După ce se parcurge o dată circumferința indusului, se înscriază p secții și se ajunge înaintea lamelei de la care s-a pornit, sau după aceasta (după cum înfășurarea este încrucișată sau neîncrucișată) cu m lamele. Dacă y/m este număr întreg, după m parcur-uri înfășurarea se închide și rezultă $t = y/m$ înfășurări distincte. La înfășurarea ondulată multiplă, lățimea periei trebuie să fie mai mare sau cel puțin egală cu lățimea a m lamele de colec-tor, pentru ca într-un anumit moment, să se afle în circuit toate căile de curent.

3.2.3. LEGĂTURI ECHIPOTENȚIALE

3.2.3.1. Legături echipotențiale de speța întâi

Conform celor arătate în 3.2.2.2.1.a), înfășurările buclate simple au numărul de căi de curent egal cu numărul de poli inductori: $a = p$. Căile de curent sunt formate prin înscrierea secțiilor care au laturile plasate sub poli de același semn. Ele sunt conectate în paralel prin intermediul periiilor și al legăturilor exterioare dintre periiile de același semn. În cazul unor condiții identice, t.e.m. induse pe căile de curent sunt identice.

În realitate, datorită dimensiunii diferite a întrefierului de sub un pol sau altul determinată de montajul mașinii sau de uzura lagărelor, datorită neomogenității circuitului magnetic sau datorită anizotropiei diferite a

polilor, t.e.m. induse pe căile de curent ale mașinii pot avea valori diferite. Această inegalitate duce la apariția unor *curenți de circulație* care se închid prin porțiuni din înfășurare, perii și legăturile exterioare dintre perii. Curentul total se distribuie neuniform pe căile de curent ale înfășurării, producându-se astfel o încălzire suplimentară a acesteia. Pentru a evita închiderea curenților de circulație prin perii și legăturile exterioare dintre perii, înfășurarea indusului mașinii de curent continuu se echipează cu *legături echipotențiale de speța întâi*. Acestea sunt legături conductoare între puncte ale înfășurării care în mod normal ar avea același potențial. Ele se realizează între puncte ale înfășurării distanțate la dublul pasului polar: $\tau = K/p$, având rolul de a asigura căi de închidere pentru curenții de circulație în afara legăturilor dintre perii.

Pentru înfășurarea buclată simplă din figura 3.24, se poate prezenta schema electrică din figura 3.36, analogă cu schema din figura 3.25.

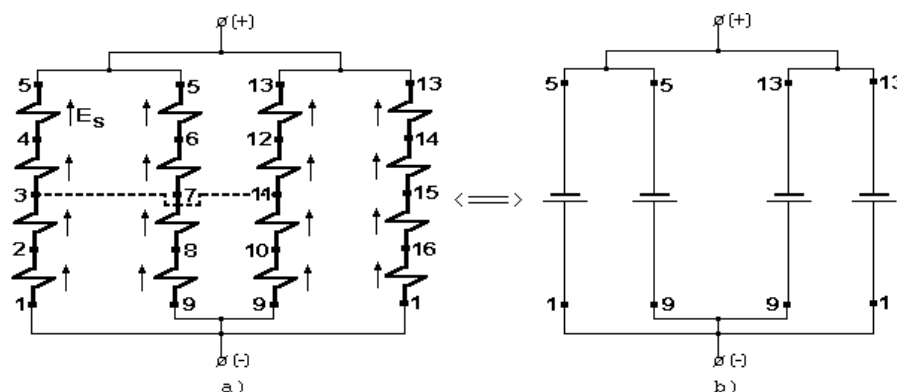


Fig. 3.36. Legăturile echipotențiale la înfășurarea buclată simplă.

La o mașină simetrică, pe cele patru brațe se induc tensiuni egale și în opoziție. Pe conturul închis se anulează două câte două, ca și cum patru surse de tensiune identice ar fi conectate în paralel (Fig. 3.36 b). Legătura echipotențială de speța întâi este linia întreruptă dintre punctele 3 și 11, care în mod normal ar trebui să se afle la același potențial. Legătura dintre punctele 3 și 11 este o legătură de egalizare a potențialului dintre aceste puncte, constituind o cale de închidere a curentului de circulație care evită legătura dintre periile de același semn. Curentul de circulație va apare numai în zonele în care înfășurarea este nesimetrică, prin aceasta înțelegând atât nesimetriile constructive ale înfășurării, cât și nesimetriile condițiilor electromagnetice în care se găsește aceasta.

Din numărul total de secții, aproximativ o treime sunt echipate cu legături echipotențiale de speța întâi. Legăturile se execută din conductor cu secțiunea cuprinsă între 0,3 și 0,5 din secțiunea conductorului înfășurării. Ele sunt plasate în zona frontală a înfășurării, între lamelele de colector corespunzătoare, situate la distanța K/p una față de cealaltă. Se mai pot plasa pe partea opusă colectorului, între muștele de legătură dintre conductoarele înfășurării, distanțate și acestea cu același pas K/p . Conexiunile echipotențiale de speța întâi se pot executa numai la înfășurările care satisfac condiția: $Z/p = \text{număr întreg}$. Deoarece înfășurările buclate simple se realizează numai pentru mașini care au numărul de creștături egal cu un multiplu al lui p , condiția devine restrictivă în cazul în care $p \geq 2$.

3.2.3.2. Legături echipotențiale de speța a doua

În cazul înfășurărilor multiple, peria trebuie să calce pe un număr de lamele de colector cel puțin egal cu ordinul de multiplicitate m . Se poate întâmpla ca peria să nu realizeze un contact electric bun cu toate lamelele. Din această cauză, în circuitul indusului vor rămâne numai o parte din căile de curent ale înfășurării, care vor trebui să suporte curentul total prin indus. Căile de curent rămase în circuit se vor încălzi, iar pierderile Joule în mașină vor fi mai mari.

Între lamela care nu realizează contactul electric bun și perie apare o tensiune egală cu tensiunea indusă în secție, fapt care are drept consecință producerea scânteilor la colector. Referitor la figura 3.27, dacă peria A1 face contact electric bun numai cu lamelele 11 și 12, între perie și lamela 13 va apare tensiunea indusă în secția 11-13. Acest lucru provoacă scântei în zona de contact imperfect dintre perie și lamela de colector.

Între puncte ale înfășurării care în mod normal se află la același potențial, se pot executa legături ca cele din figura 3.37, numite *legături ech-potențiale de speța a doua*. După cum se vede în figură, aceste legături se realizează între puncte ale capetelor de bobină aflate în părțile frontale opuse ale înfășurării.

Pentru ca în circuitul legăturilor echipotențiale de speța a doua să nu se inducă tensiuni, ele trebuie plasate în afara câmpului magnetic din întrefier. Practic, aceste legături sunt plasate în interiorul indusului.

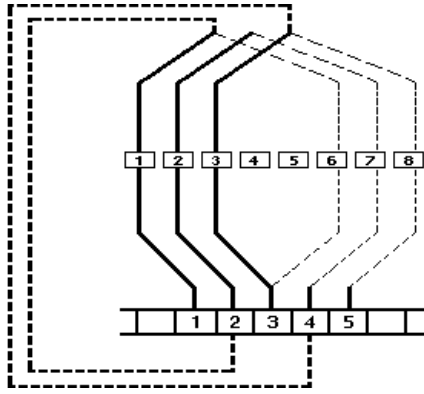


Fig. 3.37. Executarea legăturilor echipotențiale de speța a doua.

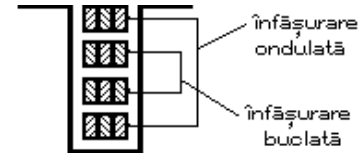


Fig. 3.38. Crestătura la înfășurarea Latour.

3.2.3.3. Înfășurări combinate

În scopul eliminării conexiunilor echipotențiale, au fost imaginate *înfășurări combinate*, formate în mod normal dintr-o înfășurare buclată simplă și o înfășurare ondulată multiplă, cu ordinul de multiplicare $m = p$. Ambele înfășurări sunt racordate la același colector, fiind așezate în aceleași crestături, conform figurii 3.38.

La extremitățile crestăturii se așează laturi de bobine aparținând înfășurării ondulate, iar la mijloc laturi de bobine aparținând înfășurării buclate. Există în principiu două tipuri de înfășurări combinate: *înfășurarea Latour (broască)* (Fig. 3.38) și *înfășurarea tip BBC*. În cele ce urmează se va prezenta numai înfășurarea Latour (Fig. 3.39).

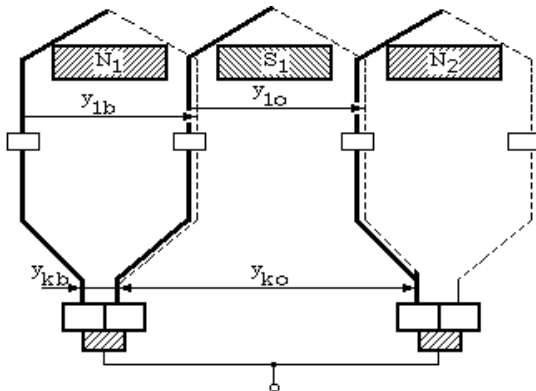


Fig. 3.39. Pașii înfășurării Latour.

Înfășurările combinate trebuie să îndeplinească condiția ca în interiorul conturului format de o secție a înfășurării buclate și o secție a înfășurării ondulate cu capetele distanțate la dublul pasului polar, tensiunea indusă rezultantă să fie nulă. Acest contur are rol de legătură echipotențială de speța întâi pentru înfășurarea buclată simplă și legătură echipotențială de speța a doua pentru înfășurarea ondulate multiplă.

Deoarece înfășurarea buclată simplă are $p = a$ perechi de căi de curent, pentru a putea lucra paralel cu înfășurarea ondulate și ambele să participe în mod egal la curentul rezultat, înfășurarea ondulate trebuie repetată de un număr de ori egal cu numărul căilor de curent al înfășurării buclate simple. Din figura 3.39 rezultă:

$$\begin{aligned} y_{1b} + y_{1o} &= \frac{K}{p} & y_{Kb} = y_b = y_{1b} + y_{2b} \\ y_{Kb} + y_{Ko} &= \frac{K}{p} & y_{Ko} = y_o = y_{1o} + y_{2o} \\ y_{Kb} + y_{Ko} &= \frac{K}{p} = y_{1b} + y_{1o} + y_{2b} + y_{2o} = \frac{K}{p} + y_{2b} + y_{2o} - y_{2b} = -y_{2o} \end{aligned} \quad (3.13)$$

În ecuația 3.13, indicele "b" corespunde înfășurării buclate, iar indicele "o" corespunde înfășurării ondulate, semnificația pașilor fiind cunoscută pentru ambele înfășurări.

Pașii de legătură (de întoarcere) ai celor două înfășurări trebuie să fie egali și de semn contrar.

Înfășurările combinate realizează o bună utilizare a materialului conductor, deoarece una din înfășurări joacă rol de legătură echipotențială pentru cealaltă și invers. Se folosesc la mașini de curent continuu de mare putere.

3.3. TENSIUNEA ELECTROMOTOARE INDUSĂ ÎNTR-O CALE DE CURENT (TENSIUNEA LA PERII)

Fie o mașină de curent continuu bipolară cu înfășurările de excitație alimentate de la o sursă de curent continuu. Curentul de excitație circulă prin cele două înfășurări de excitație în sensul arătat în figura 3.40.

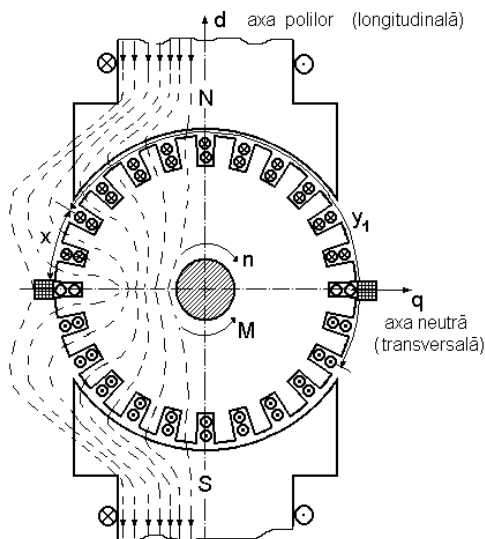


Fig. 3.40. Spectrul liniilor de câmp magnetic de excitație.

Solenția de excitație va produce un câmp magnetic al cărui spectru este evidențiat în figură. Liniile de câmp ies din polul nord, și intră în polul sud. Ele străbat miezul feromagnetic al polului nord, întrefierul, miezul feromagnetic al rotorului, din nou întrefierul, miezul feromagnetic al polului sud și se închid către polul nord prin carcasă.

Deoarece permeabilitatea miezului polar și al circuitului magnetic al rotorului este mult mai mare decât permeabilitatea aerului, liniile de câmp străbat întrefierul pe direcție radială.

Sub piesa polară, întrefierul este mic și aproximativ constant, dacă se face abstracție de existența creștăturilor, în intervalul dintre poli, având valoarea maximă în axa neutră. Din această cauză, câmpul magnetic inductor (creat de polii de excitație), este uniform și egal în valoare absolută sub cei doi poli de nume contrar și nul în axa neutră. Câmpul magnetic de sub polul nord se consideră pozitiv, iar cel de sub polul sud, negativ. Variația inducției magnetice în întrefier este prezentată în figura 3.41., în care x , reprezintă coordonata de-a lungul periferiei indusului.

Dacă se ține cont de existența creștăturilor, dependența $B_{\delta} = B_{\delta}(x)$, va fi diferită de cea prezentată în figura 3.41, deoarece inducția va fi mai mare în dreptul unui dinte și mai mică în dreptul creștăturii. În cele ce urmează, se va neglija influența danturării miezului magnetic al indusului asupra câmpului magnetic din întrefier.

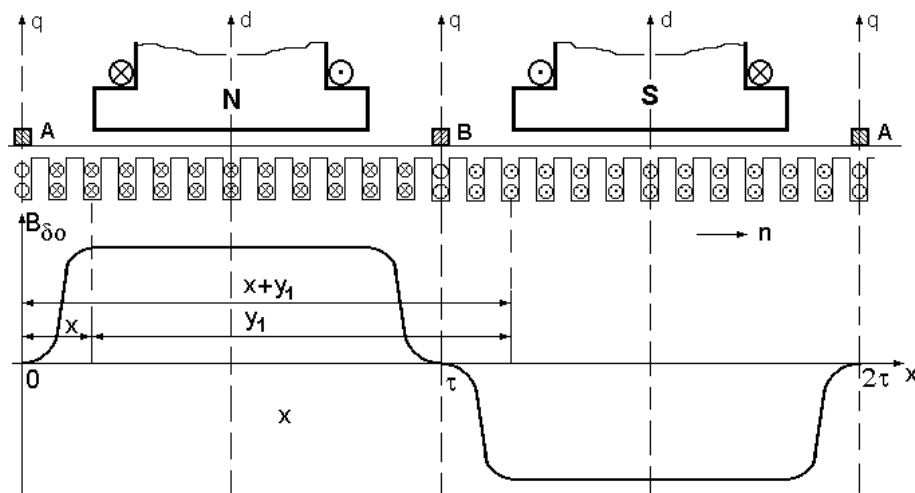


Fig. 3.41. Reprezentarea liniară a variației câmpului magnetic de excitație.

Indusul mașinii se rotește cu viteza constantă v [rot/min], în sensul indicat în figura 3.40. Din cele prezentate în subcapitolul 3.2, o secție cu w spire are mănunchiul de ducere plasat într-o creștătură, iar mănunchiul de întoarcere plasat în altă creștătură, distanța dintre cele două creștături fiind egală cu pasul de ducere y_1 , (Fig. 3.40 și Fig. 3.41). Secția se rotește odată cu indusul mașinii. În momentul în care secția are ambele mănunchiuri sub polul nord, fluxul fascicular are un anumit sens, iar când secția are ambele mănunchiuri sub polul sud, fluxul fascicular își schimbă sensul. Când secția are ambele mănunchiuri în axa neutră, fluxul fascicular este zero. Fluxul fascicular are o variație alternativă în timp. În spirele secției considerate se va induce o t.e.m. alternativă.

Conform figurii 3.41, se consideră momentul în care mănunchiul de ducere al secției se află la distanța x față de axa neutră. Mănunchiul de întoarcere a secției se va găsi la distanța $x+y_1$ față de axa neutră.

Pentru o singură spirală, fluxul fascicular se calculează cu relația:

$$\varphi = \int_x^{x+y_1} B_{\delta 0}(x) l dx, \quad (3.14)$$

în care:

- $B_{\delta 0}(x)$ - este inducția magnetică în întrefier, într-un punct de coordonată x față de axa neutră;
- l - lungimea indusului în sens axial;
- $l dx$ - elementul de arie, orientat spre interiorul rotorului.

Cele w spire ale secției considerate, sunt plasate în aceleași creștături. Ele ocupă aceeași poziție în câmpul inductor, fiecare fiind străbătută de același flux fascicular. Fluxul total, corespunzător celor w spire va fi :

$$\varphi_s = w \varphi \quad (3.15)$$

T.e.m. indusă în spirele secției va rezulta:

$$E_s = - \frac{d\varphi_s}{dt} = - w \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.16)$$

Ținând cont de (3.14):

$$\varphi = -w \frac{d}{dt} \int_x^{x+y_1} B_{\delta o}(x) dx \quad (3.17)$$

Deoarece indusul se rotește cu viteză periferică v [m/s], rezultă:

$$x = x_0 + v t \quad (3.18)$$

unde x_0 – coordonata inițială corespunzătoare momentului inițial t_0 . Se poate scrie:

$$E_s = l \frac{dx}{dt} [B_{\delta o}(x) - B_{\delta o}(x + y_1)] w = l v w [B_{\delta o}(x) - B_{\delta o}(x + y_1)] \quad (3.19)$$

Dacă înfășurarea este cu pas diametral, $y_1 = \tau$, rezultă:

$$B_{\delta o}(x + y_1) = B_{\delta o}(x + \tau) = -B_{\delta o}(x) \quad (3.20)$$

deoarece, conform figurii 3.41, dependența $B_{\delta o} = B_{\delta o}(x)$ este o funcție alternativă cu perioada 2τ . În final, rezultă:

$$E_s = 2 l v w B_{\delta o}(x) \quad (3.21)$$

Ecuația (3.21) arată faptul că t.e.m. indusă într-o secție depinde numai de valoarea inducției din dreptul laturii de ducere. Când latura de ducere se află în dreptul polului nord, tensiunea indusă este pozitivă, când se află în axa neutră tensiunea este zero, iar când se află în dreptul polului sud, tensiunea este negativă. Dacă $y_1 = \tau$, t.e.m. indusă variază la fel cu inducția magnetică, deoarece E_s depinde de $B_{\delta}(x)$, iar x variază proporțional cu timpul.

Majoritatea mașinilor de curent continuu îndeplinesc aceasta condiție. Scurtarea sau alungirea polului nu modifică cele spuse mai sus din punct de vedere calitativ. O scurtare exagerată a polului nu este permisă deoarece diminuează esențial t.e.m. medie pe o alternanță.

Dacă toate secțiile dintr-o cale de curent au același număr de spire w și același pas de ducere $y_1 = \tau$, t.e.m. indusă într-o cale de curent, este :

$$E = \sum_{i=1}^k E_{si} = 2 l v w \sum_{i=1}^k B_{\delta i}(x) \quad (3.22)$$

în care k este numărul de secții înseriate pe o cale de curent, secția curentă având indicele i , iar $B_{\delta i}$ inducția în dreptul laturii de ducere a secției i .

Inducția medie sub pol este:

$$B_{\delta med} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} B_{\delta o}(x) dx \quad (3.23)$$

Integrarea grafică se face conform figurii 3.42. Intervalul de integrare $(0, \tau)$, se împarte în k părți egale. Precizia este cu atât mai mare, cu cât k este mai mare.

Inducția medie pe pol va fi:

$$B_{\delta med} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k B_{\delta i} \quad (3.24)$$

unde $B_{\delta i}$ este ordonata funcției $B_{\delta}(x)$ corespunzătoare primului curent i .

T.e.m. indusă într-o cale de curent devine:

$$E = 2 l v w B_{\delta med} k \quad (3.25)$$

Pentru un k mai mare, deși tensiunile E_s induse în diferite secții sunt alternative în timp, t.e.m. indusă într-o cale de curent este practic constantă. Pentru un k mai mic, t.e.m. E prezintă pulsații, conform figurii

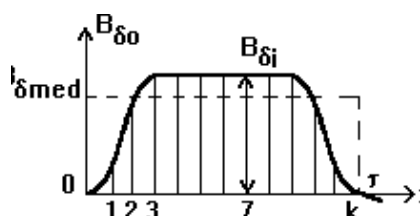


Fig. 3.42. Integrarea grafică pentru curba inducției B_{δ} .

3.43.

Mașina are $2a$ căi de curent. Numărul total de secții va fi $2ak$, iar numărul total de spire va fi $2akw$. Numărul total de conductoare va fi $N = 4akw$. Viteza de rotație periferică se poate exprima în funcție de viteza de rotație n :

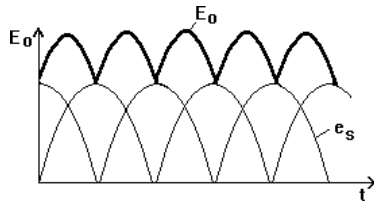
$$v = \frac{2 \pi n D}{60} \quad (3.26)$$

Dacă D este diametrul rotorului:

$$\pi D = 2 p \tau \quad (3.27)$$

T.e.m. se poate scrie sub forma:

$$E = \frac{p}{a} \frac{n}{60} N \tau l B_{\delta med} \quad (3.28)$$



dar:

$$\tau l B_{\delta med} = \Phi \quad (3.29)$$

Fig. 3.43. Pulsatia în timp a t.e.m. culeasă la perii.

în care p – reprezintă numărul perechilor de poli de excitație. În cele din urmă rezultă:

$$E = \frac{p}{a} \frac{n}{60} N \Phi \quad (3.30)$$

Dacă turația n este exprimată în $[s^{-1}]$, se obține:

$$E = \frac{p}{a} N n \Phi \quad (3.31)$$

Pentru o mașină dată, p , a , N , sunt mărimi constructive și deci constante. Rezultă:

$$E = K_e n \Phi \quad (3.32)$$

Tensiunea la perii depinde numai de viteza de rotație și fluxul inductor. Relația (3.30) arată faptul că E , nu depinde de forma câmpului inductor dacă $B_{\delta med}$ rămâne constantă.

3.4. CUPLUL ELECTROMAGNETIC AL MAȘINII DE CURENT CONTINUU

Interacțiunea dintre câmpul electromagnetic al mașinii și curentul care circulă prin înfășurarea indusului când mașina funcționează în sarcină, dă naștere unui cuplu electromagnetic care acționează asupra rotorului.

Dacă mașina are $2a$ căi de curent și fiecare cale de curent este străbătută de curentul I_a , curentul total prin mașină va fi:

$$I_A = 2 a I_a \quad (3.33)$$

Sensul curentului este cel prezentat în figura 3.40. O secție oarecare cu w spire, are latura de ducere la un moment oarecare t , în câmpul magnetic al polului nord la distanța x față de axa neutră, iar latura de întoarcere în câmpul magnetic al polului sud, la distanța $x + y_1$ față de axa neutră conform figurii 3.41.

Sensul pozitiv de parcurgere al spirei este chiar sensul curentului I_a care străbate secția. Energia de interacțiune dintre câmpul magnetic și secția considerată este dată de relația:

$$W = w I_a \varphi \quad (3.34)$$

Conform teoremei forțelor generalizate, cuplul electromagnetic este derivata energiei de interacțiune W în funcție de coordonata generalizată α , la curent constant. Pentru o singură secție, cuplul electromagnetic m_s va fi:

$$m_s = \left(\frac{\partial W}{\partial \alpha} \right)_{I = \text{const}} = R \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)_{I = \text{const}} \quad (3.35)$$

în care $\alpha = x/R$, R fiind raza rotorului. Rezultă:

$$m_s = R I_a l w [B_{\delta o}(x + y_1) - B_{\delta o}(x)] \quad (3.36)$$

Pentru $y_1 = \tau$, $B_{\delta o}(x + y_1) = -B_{\delta o}(x)$, de unde se obține:

$$m_s = -2 R I_a l w B_{\delta o}(x) \quad (3.37)$$

Semnul "-" indică faptul că sensul cuplului electromagnetic este contrar sensului pozitiv ales pentru coordonata generalizată α . Cuplul m_s variază în timp în funcție de poziția secției, dar își păstrează sensul. Când secția ajunge cu latura de ducere sub polul de nume contrar, sensul inducției $B_{\delta o}(x)$ se schimbă, dar și sensul curentului I_a care străbate secția se schimbă, cuplul electromagnetic păstrându-și sensul. El are o evoluție pulsatorie, între zero și o valoare maximă.

Deoarece pe calea de curent sunt înseriate k secții, cuplul electromagnetic corespunzător unei căi de curent va fi:

$$m_a = \sum_{i=1}^k m_s = -2 R I_a l w \sum_{i=1}^k B_{\delta oi}(x) \quad (3.38)$$

Acest cuplu este pulsatoriu în jurul unei valori medii, fiind cu atât mai constant cu cât numărul de secții k este mai mare.

Cuplul electromagnetic total, corespunzător celor $2a$ căi de curent va fi:

$$M = 2 a m_a = -4 a I_A R l w \alpha B_{\text{med}} . \quad (3.39)$$

Deoarece: $I_A = 2aI_a$, $2\pi R = 2p\tau$, $N = 4akw$, se obține în final:

$$M = -\frac{1}{2\pi} \frac{p}{a} N I_A \Phi . \quad (3.40)$$

Pentru o mașină dată, p , a , N , sunt constante, relația 3.40 putând fi scrisă sub forma:

$$M = k_m I_A \Phi . \quad (3.41)$$

Cuplul electromagnetic este proporțional cu curentul total prin indus I_A și cu fluxul Φ corespunzător unei perechi de poli de excitație.

Dacă mașina de curent continuu funcționează în regim de generator, cuplul electromagnetic are sens invers sensului de rotație al rotorului, care este antrenat de motorul primar. El are rol de frânare, opunându-se mișcării și are semn negativ. Dacă mașina de curent continuu funcționează în regim de motor, cuplul electromagnetic are același sens cu sensul de mișcare al rotorului, fiind pozitiv.

Cuplul electromagnetic se mai poate calcula însumând momentele date de forțele exercitate asupra conductoarelor parcurse de curent și plasate în creștăturile rotorice. Cu toate că metoda conduce la rezultate numerice bune, în orice mașină electrică cu creștături dințate, liniile de câmp trec în principal prin dinți, iar în creștăturile în care sunt plasate conductoarele înfășurării, inducția are o valoare relativ redusă. Forțele se exercită în principal asupra dinților. Cele expuse mai sus justifică alegerea metodei de deducere pentru formula cuplului.

Totuși, faptul că forțele electromagnetice se exercită în principal asupra dinților constituie un avantaj pentru înfășurările plasate în creștături care nu sunt supuse în acest fel unor eforturi mecanice deosebite.

Din relația 3.31:

$$\frac{p}{a} N \Phi = \frac{E}{n} . \quad (3.42)$$

Înlocuind în relația 3.40:

$$M = \frac{1}{2\pi} \frac{E}{n} I_A . \quad (3.43)$$

Dar puterea electromagnetică (interioară) a mașinii este $P_M = E I_A$ și dacă n este măsurat în $[s^{-1}]$ se poate scrie relația:

$$M = -\frac{1}{2\pi} P_M = \frac{P_M}{2\pi} = \frac{P_M}{\Omega} . \quad (3.44)$$

3.5. REACȚIA INDUSULUI LA MAȘINA DE CURENT CONTINUU

Mașina de curent continuu funcționează în gol când nu face schimb de energie (putere) cu o rețea exterioară. Curentul I_A prin indusul mașinii este zero. În mașină va exista numai câmpul magnetic inductor, produs de polii de excitație. La funcționarea în sarcină, mașina face schimb de energie pe la borne cu o rețea exterioară. Curentul prin indus I_A , va fi diferit de zero. Străbătând înfășurarea indusului, I_A va da naștere unui câmp electromagnetic propriu, numit *câmp de reacție al indusului*.

Prin *reacția indusului* se înțelege fenomenul de interacțiune dintre câmpul magnetic produs de curentul din indus și câmpul magnetic inductor (de excitație).

În studiul fenomenului de reacție al indusului, se vor prezenta separat câmpurile produse de cele două armături (inductor și indus), după care se va deduce câmpul magnetic rezultat în mașină, conform principiului suprapunerii efectelor. Acest principiu se poate aplica fără erori numai dacă se neglijează efectul saturației. Studiul reacției indusului se va face pentru cazul când mașina funcționează în regim de generator, după care se vor preciza particularitățile acestui fenomen la funcționarea în regim de motor.

3.5.1. CÂMPUL MAGNETIC INDUCTOR

La funcționarea în gol, $I_A = 0$. Curentul prin înfășurarea de excitație I_e este diferit de zero, și dă naștere unei solenații inductoare de mers în gol v_o , care la rândul ei produce câmpul de inducție B_{do} .

Considerăm o mașină bipolară (Fig. 3.44). Deoarece înfășurarea de excitație este de tip concentrat, distribuția solenației la periferia indusului, deci dependența $v_o = v_o(x)$ este de formă dreptunghiulară (Fig. 3.46).

Aproximăm întrefierul de sub întregul arc polar b_p ca fiind constant, ceea ce este caracteristic multor mașini de curent continuu. Curba inducției $B_{\delta 0} = B_{\delta 0}(x)$ are forma unui trapez curbiliniu.

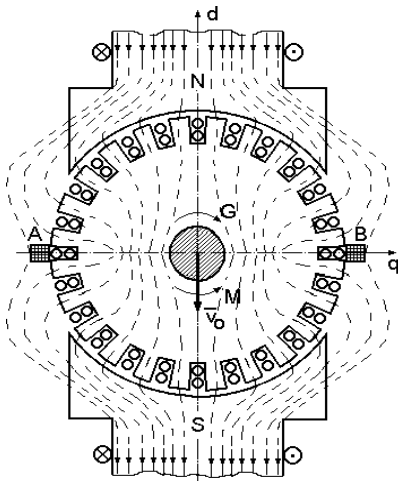


Fig. 3.44. Spectrul liniilor câmpului de excitație.

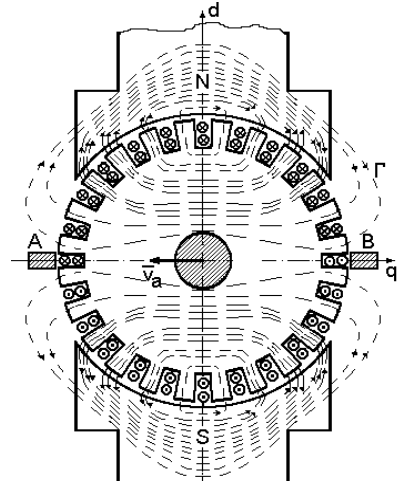


Fig. 3.45. Spectrul liniilor câmpului de reacție al indusului.

Fluxul magnetic inductor se distribuie simetric în raport cu axa polilor (axă longitudinală, sau axă d), ca în figura 3.44, în care M reprezintă sensul de rotație pentru regimul de motor și nu sensul cuplului electro-magnetic ca în figura 3.40.

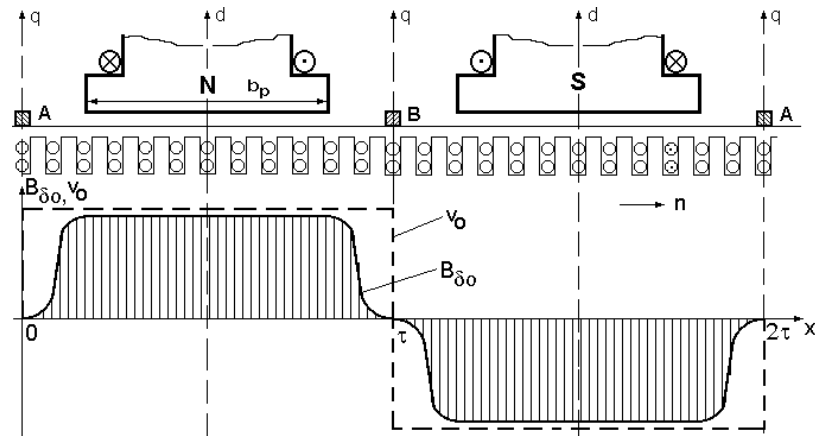


Fig. 3.46. Distribuția solenației de excitație în reprezentare liniară.

3.5.2. CÂMPUL MAGNETIC AL INDUSULUI

Presupunem că indusul mașinii este alimentat prin intermediul periilor, plasate în axa neutră (axa transversală, sau axă q). Inductorul nu este alimentat, iar rotorul se află în mișcare de rotație sau în repaus.

Conductoarele indusului fiind uniform repartizate pe periferie, liniile câmpului magnetic produs de cele două căi de curent se închid de-a lungul axei neutre, ca în figura 3.45. Linile de câmp străbat fierul rotorului, întrefierul de două ori, și fierul polului de excitație. Cele afirmate mai sus, conduc la concluzia că indusul mașinii de curent continuu poate fi considerat o bobină, a cărei axă magnetică corespunde cu axa periilor.

Fie un contur închis Γ , la distanța z de axa d (Fig. 3.47). Aplicând legea curentului total pe conturul Γ , dependența solenației indusului de coordonata z va fi:

$$v_a(z) = 2 z A, \quad (3.45)$$

în care A este **încărcarea liniară** a indusului, sau **numărul de amperi spire pe unitatea de lungime** a periferiei indusului.

$$A = \frac{N I_a}{\pi D}. \quad (3.46)$$

Relația 3.45 permite afirmația că solenația indusului este nulă în axa polilor, iar v_a depinde liniar de z . Dar $x = z + \tau/2$, ceea ce înseamnă că dependența $v_a = v_a(z)$ va fi aceeași cu dependența $v_a = v_a(x)$, ca în figura 3.47.

Pentru o pereche de poli:

$$v_a\left(\frac{\tau}{2}\right) = 2 A \frac{\tau}{2} = A \tau. \quad (3.47)$$

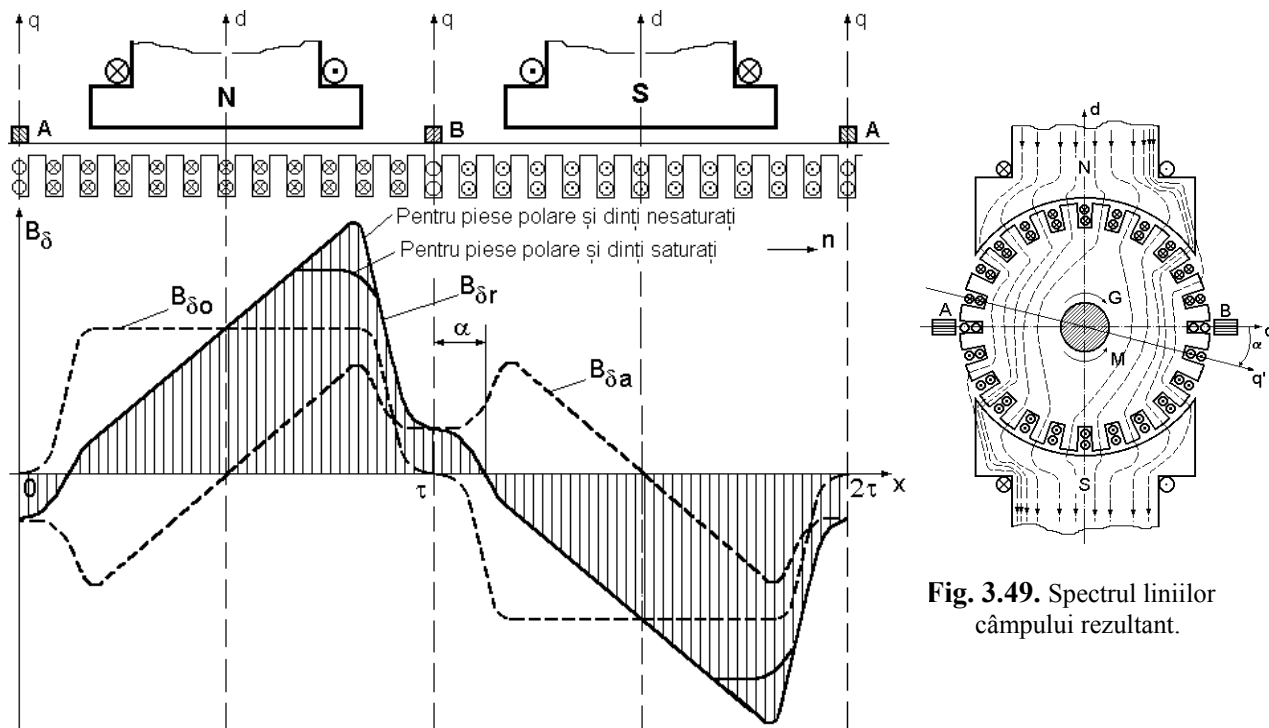


Fig. 3.48. Distribuția solenației rezultante în reprezentare liniară.

- pierderi mărite în fierul dinților și în jugul rotorului la mers în sarcină, deoarece pierderile în fier nu mai sunt proporționale cu pătratul inducției $B_{\delta o}$ ci cu pătratul valorii inducției din cornul piesei polare cu linii de câmp îndesite.

3.5.4. EFECTUL DEMAGNETIZANT AL REACȚIEI TRANSVERSALE A INDUSULUI

După cum am văzut, la mașina nesaturată, fluxul rezultant are aceeași valoare cu fluxul inductor. La mașina saturată, acest lucru nu mai este valabil.

Fie curba dependenței $B_{\delta} = B_{\delta}(v)$, conform figurii 3.50. Inducția din axa polară B_n , determinată de solenația v_o nu este afectată de curentul din indus, deoarece în această axă solenația indusului este nulă. Pe măsură ce ne îndepărtăm de axa d către cornul polar de ieșire, inducția crește până la valoarea B_e . Creșterea inducției în această zonă va fi:

$$\Delta B_e = B_e - B_n, \quad (3.49)$$

deoarece aici acționează solenația rezultantă:

$$v_o + v_a \left(\frac{b_p}{2\tau} \right) = v_o + A \frac{b_p}{2}. \quad (3.50)$$

Sub cornul polar de intrare acționează solenația:

$$v_o - v_a \left(\frac{b_p}{2\tau} \right) = v_o - A \frac{b_p}{2}, \quad (3.51)$$

căreia îi corespunde inducția B_i . Inducția scade în această zonă cu valoarea:

$$\Delta B_i = B_n - B_i.$$

Caracteristica de magnetizare $B_{\delta} = B_{\delta}(v)$ nefiind liniară, $\Delta B_e < \Delta B_i$, ceea ce înseamnă că sub cornul polar de ieșire inducția crește cu o cantitate mai mică (ΔB_e) decât cantitatea cu care scade (ΔB_i) sub cornul polar de intrare.

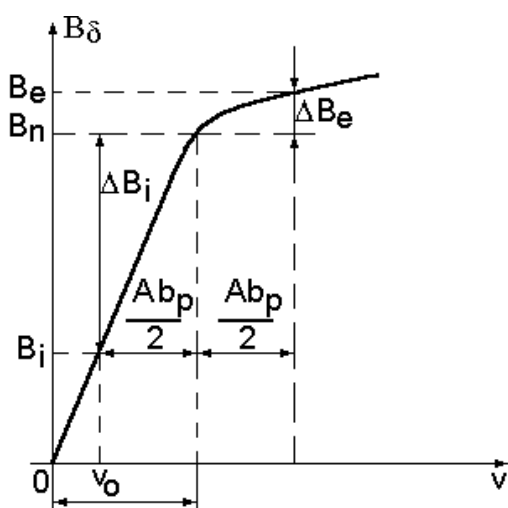


Fig. 3.50. Demonstrarea pe cale grafică a efectului demagnetizant al reacției transversale.

3.5.5. REACȚIA LONGITUDINALĂ A INDUSULUI

Presupunem că periile au fost decalate din axa neutră q în axa q' decalată cu unghiul α în sensul de mers, ca în figura 3.51

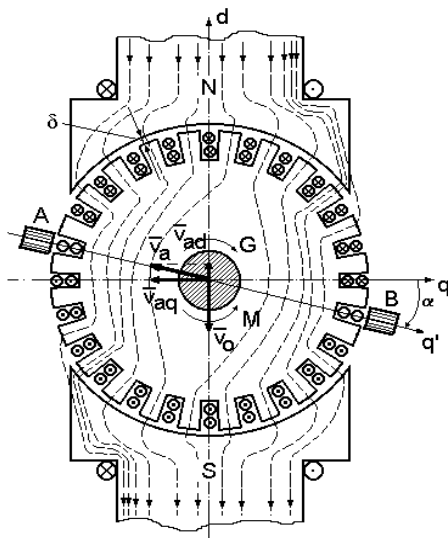


Fig. 3.51. Manifestarea reacției indusului la decalarea periiilor.

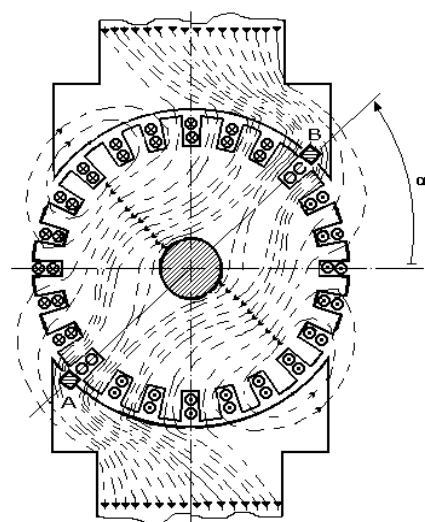


Fig. 3.52. Spectrul liniilor câmpului rezultat la decalarea periiilor.

Vectorul $\bar{v}_a$ se decalează cu unghiul α față de orizontală. Se descompune în componentele $\bar{v}_{ad}$ și $\bar{v}_{aq}$. Componenta $\bar{v}_{ad}$ se opune solenației inductoare $\bar{v}_o$, având un caracter demagnetizant. Decalarea periiilor cu unghiul α în sens invers sensului de mers va avea efect magnetizant. În practică, decalarea periiilor în sens invers sensului de mers nu este permisă, deoarece se înrăutățește accentuat procesul comutației. Efectul decalării periiilor se mai poate studia urmărind figurile 3.52 și 3.53.

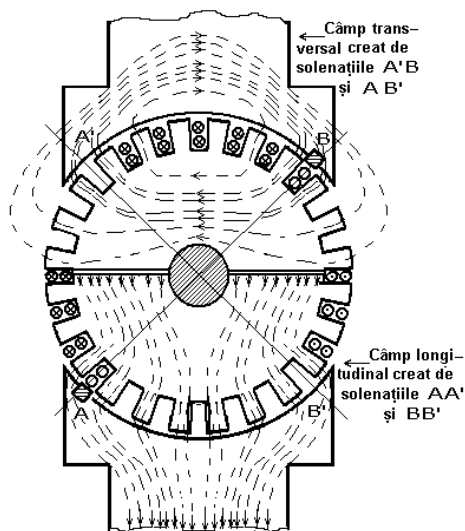


Fig. 3.53. Reprezentarea fictivă a câmpurilor de reacție pe cele două direcții.

Periile au fost decalate față de axa neutră geometrică cu unghiul α , rezultând un câmp de reacție al cărui spectru este prezentat în figura 3.52. Spectrul poate fi considerat ca fiind rezultatul suprapunerii a două categorii de linii de câmp, ca în figura 3.53. Considerăm axa AB' simetrică cu AB față de axa neutră geometrică.

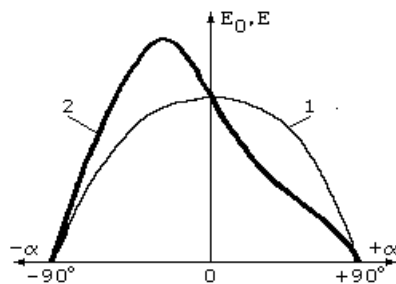


Fig. 3.54. Variația t.e.m. culeasă la perii la funcționarea în sarcină în cazul decalării periiilor.

Solenațiile din creștăturile cuprinse între arcele $A'B$ și AB' dau naștere unui câmp ale cărui linii se închid transversal prin piesa polară (Fig. 3.53 - partea superioară).

Solenațiile din creștăturile cuprinse între arcele AA' și BB' produc un câmp ale cărui linii se închid în lungul polilor, pe același drum cu liniile câmpului de excitație (Fig. 3.53 - partea inferioară).

Înseamnă că efectul decalării periiilor din axa neutră constă în apariția pe lângă câmpul de reacție transversală și a unui câmp de reacție longitudinală. Mărimea câmpului longitudinal depinde de mărimea unghiului α cu care sunt decalate periile.

La funcționarea mașinii ca generator, considerăm: $n=\text{const.}$, $I_a=\text{const.}$, $I_e=\text{const.}$, deci flux inductor constant și periile decalate cu unghiul α .

Conform figurii 3.54, t.e.m. E la mersul în sarcină se modifică în special datorită reacției longitudinale.

Curba 1 reprezintă variația $E_0 = E_0(\alpha)$, iar curba 2 reprezintă variația $E = E(\alpha)$. E_0 este t.e.m. indusă la gol, iar E reprezintă t.e.m. indusă în sarcină.

Decalarea periiilor din axa neutră într-un sens sau altul duce și la scăderea t.e.m. E_0 , dar această scădere este egală pentru o valoare diferită de valoarea dată unghiului α (curba 1 este simetrică).

Pentru $\alpha = 90^\circ$, $E_0 = 0$. La funcționarea în sarcină curba $E = E(\alpha)$ (curba 2) nu mai este simetrică, datorită reacției transversale.

3.5.6. REACȚIA INDUSULUI LA MOTOR

Semnul puterii electromagnetice P_M este diferit la generator față de motor. Dacă se dorește menținerea acelorași sensuri ale fluxului Φ și curentului I_a , cuplul electromagnetic nu-și schimbă semnul și sensul vitezei de rotație va fi diferit de la generator la motor. Altfel spus, rotorul motorului de curent continuu în care se păstrează sensurile fluxului și curentului în indus se rotește în sens invers față de generator.

La motor, reacția transversală a indusului va avea ca rezultat magnetizarea suplimentară a cornului polar de intrare și demagnetizarea cornului polar de ieșire. Axa neutră se deplasează în sens invers sensului de rotație.

Dacă periiile se decalează în sens invers sensului de mers, reacția longitudinală a indusului va fi demagnetizantă, iar dacă se decalează în același sens cu sensul de mers, va fi magnetizantă. Nici în cazul motorului nu este permisă decalarea cu efect magnetizant, deoarece se înrăutățește procesul comutației.

3.5.7. MIJLOACE DE ÎNLĂTURARE A EFECTELOR REACȚIEI INDUSULUI

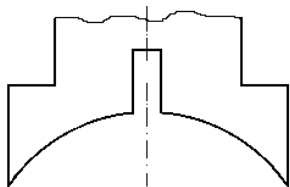


Fig. 3.55. Modificarea piesei polare pentru limitarea fluxului de reacție transversal.

Efectul demagnetizant al reacției indusului se compensează prin mărirea curentului de excitație.

Pentru a micșora câmpul produs de indus, deci pentru micșorarea fluxului transversal, se prevăd fante în polii principali (figura 3.55) pentru a mări reluctanța corespunzătoare acestui flux.

Tot pentru mărirea reluctanței, se mărește într-o oarecare măsură între-fierul sub cornul polar de ieșire.

Măsura cea mai eficientă constă în compensarea câmpului de reacție transversal printr-un câmp produs de o înfășurare suplimentară, numită *înfășurare de compensare*. Conform figurii 3.56, această înfășurare este plasată în creștături special practicate în piesele polare și este conectată în serie cu înfășurarea indusului, astfel încât solenația ei să fie în opoziție cu cea produsă de înfășurarea indusului și proporțională cu mărirea curentului de sarcină.

Înfășurarea de compensare duce la scumpirea mașinii, din care cauză aceasta se folosește numai la mașinile de mare putere care funcționează în condiții grele de încărcare.

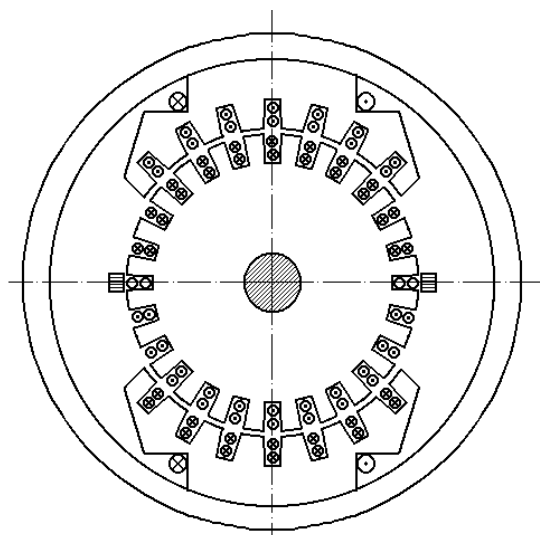


Fig. 3.56. Înfășurarea de compensare.

3.6. PROCESUL COMUTAȚIEI ÎN MAȘINILE DE CURENT CONTINUU

Când mașina de curent continuu funcționează, colectorul solidar cu rotorul se rotește cu turația n față de periiile fixe. Lamelele de colector defilează sub perii făcând în permanență contact electric cu acestea. În timpul acestei mișcări vor exista momente în care peria calcă pe două lamele la care sunt conectate capetele unei secții, scurtcircuitând-o. Regimul de scurtcircuit impune o anumită evoluție în timp a curentului prin secția respectivă și prin aceasta apariția unor fenomene complexe. Mișcarea relativă dintre lamele și perie face ca ulterior peria să facă contact numai cu una din cele două lamele la care este conectată secția, scurtcircuitarea acesteia încetând. Când scurtcircuitarea secției a încetat, ea se află deja în altă cale de curent a înfășurării indusului.

Totalitatea fenomenelor care apar datorită variației curentului prin secție la trecerea ei dintr-o cale de curent în alta, poartă numele de **comutație**.

În timpul comutației se desfășoară procese electrice, electromagnetice, termice și mecanice. Presupunând că sistemul perii - colector este corespunzător din punct de vedere mecanic, în cele ce urmează se va studia procesul electromagnetic care se desfășoară în secția în comutație, deoarece acesta este fundamental.

3.6.1. VARIAȚIA CURENTULUI ÎN SECȚIA ÎN COMUTAȚIE

Evoluția în timp a curentului în secția în comutație este prezentată în figura 3.57.

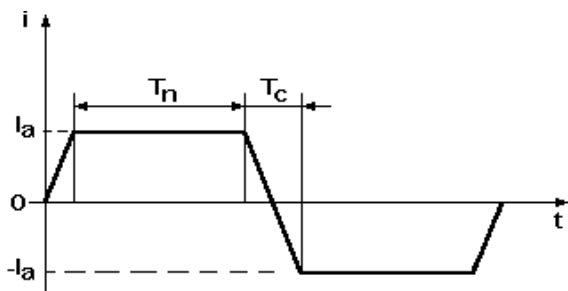


Fig. 3.57. Variația curentului în secția aflată în comutație.

Pe durata T_n , cât timp secția se află într-o anumită cale de curent, este parcursă de curentul I_a de un sens sau altul, în funcție de polaritatea polului sub care se află.

La trecerea dintr-o cale de curent în alta, sensul curentului I_a se schimbă. Schimbarea sensului curentului prin secție la trecerea dintr-o cale de curent în alta împreună cu totalitatea fenomenelor care însoțesc această schimbare, constituie *procesul comutației*.

Comutația se desfășoară pe durata T_c , numită *perioadă de comutație*. În intervalul T_c , lamelele de colector la care sunt legate capetele secției sunt scurtcircuitate de perie.

Pentru simplificare, se consideră lățimea periei b_{pe} egală cu lățimea unei lamele de colector:

$$b_{pe} = \frac{\pi D_k}{K}, \quad (3.52)$$

în care D_k reprezintă diametrul colectorului. În intervalul T_c , curentul evoluează de la valoarea I_a la valoarea $-I_a$. Viteza medie de variație a curentului este:

$$\left(\frac{di}{dt} \right)_{med} = \frac{2 I_a}{T_c}. \quad (3.53)$$

Dacă viteza liniară a colectorului este v_k , perioada de comutație va fi dată de relația:

$$T_c = \frac{b_{pe}}{v_k}. \quad (3.54)$$

În general, T_c ia valori cuprinse între 10^{-4} s și 10^{-3} s, ceea ce înseamnă conform (3.53) că viteza medie de variație a curentului în secție este foarte mare.

Cele trei etape principale în desfășurarea procesului de comutație sunt prezentate în figurile 3.58, 3.59, 3.60.

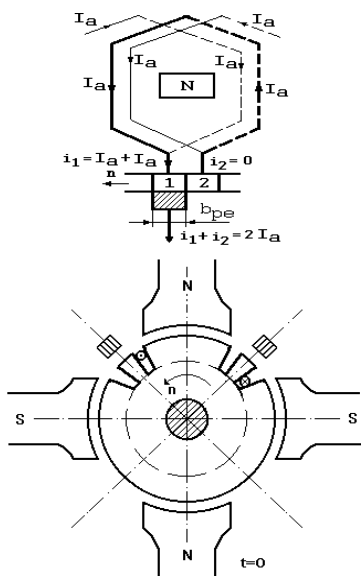


Fig. 3.58. Poziția secției înainte de comutație.

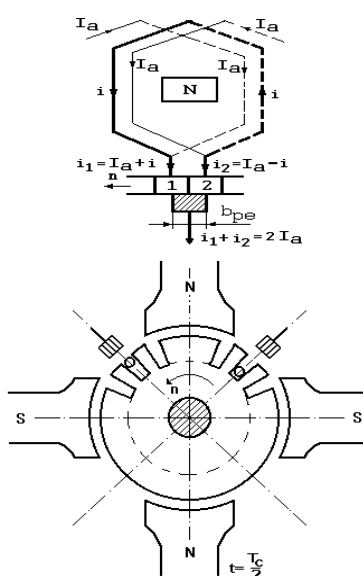


Fig. 3.59. Poziția secției în timpul comutației.

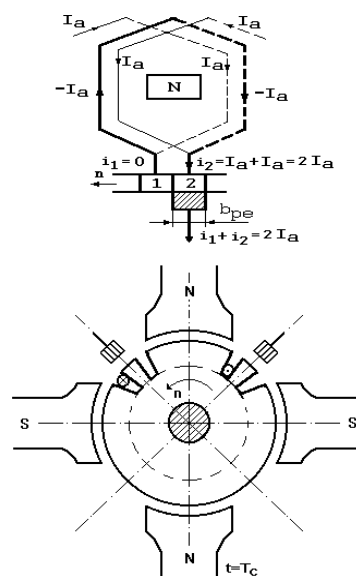


Fig. 3.60. Poziția secției la sfârșitul perioadei de comutație.

La momentul $t = 0$, $i_1 = 2I_a$, $i_2 = 0$, curentul prin secția în comutație circulă de la lamela 2 la lamela 1, iar curentul total prin perii $2I_a$ circulă numai prin lamela 1.

La $t = T_c/2$, $i_1 \neq 0$, $i_2 \neq 0$, $i_1 + i_2 = 2I_a$, curentul total prin perie circulă prin ambele lamele de colector. Cât timp peria calcă pe ambele lamele, secția respectivă nu face parte din nici o cale de curent și nu este străbătută de curentul I_a .

La $t = T_c$, $i_1 = 0$, $i_2 = 2I_a$, curentul prin secția conectată între lamelele 1 și 2 și-a schimbat sensul, circulând de la lamela 1 la lamela 2, iar curentul total prin perie $2I_a$ circulă numai prin lamela 2.

În general se poate scrie:

$$i_1 = I_a + i; i_2 = I_a - i. \quad (3.55)$$

3.6.2. T.E.M. INDUSE ÎN SECȚIA ÎN COMUTAȚIE

Deoarece indusul se rotește cu viteza periferică v , în secția în comutație se vor induce:

- t.e.m. de autoinducție: e_L ;
- t.e.m. de inducție mutuală: e_M ;
- t.e.m. datorată câmpului exterior din zona de comutație: e_k .

În perioada T_c în care se desfășoară procesul comutației, laturile secției se află în axa neutră, din care cauză câmpul magnetic inductor nu induce t.e.m. în aceasta.

3.6.2.1. T.e.m. de autoexcitație e_L

Variația curentului între I_a și $-I_a$ va produce o variație a fluxului de dispersie al secției și ca urmare, în secție se induce o t.e.m. de autoinducție e_L :

$$e_L = - \frac{d(L_s i)}{dt}, \quad (3.56)$$

$$L_s = 2 w^2 l \lambda', \quad (3.57)$$

unde L_s este inductanța proprie a secției în comutație, λ' este permeanța specifică a fluxului ei de dispersie, l este lungimea laturii active a secției, iar w numărul de spire al secției.

Dacă N este numărul total de conductoare al înfășurării, iar K numărul de secții, $w = N/2K$. (3.58)

Dacă se face abstracție de saturație, L_s va fi constantă. Ținând cont de (3.53) rezultă:

$$e_L = L_s \frac{2 I_a}{T_c} = 2 w^2 l \lambda' \frac{2 I_a}{T_c} = 2 w \frac{N}{2 K} \lambda' l \frac{2 I_a}{T_c}. \quad (3.59)$$

Conform (3.52) și (3.54):

$$T_c = \frac{b_{pe}}{v_k} = \frac{\pi D_k}{K} \frac{1}{\pi D_k n} = \frac{1}{K n}, \quad (3.60)$$

din care se deduce că:

$$T_c K = 1/n; \quad (3.61)$$

$$e_L = 2 w l \lambda' n N I_a. \quad (3.62)$$

Dacă D este diametrul indusului, viteza liniară a acestuia va fi:

$$v = \pi D n. \quad (3.63)$$

Ținând cont de expresia încărcării liniare A (relația 3.46), se poate scrie:

$$e_L = 2 w l \lambda' v A. \quad (3.64)$$

Expresia 3.64 poartă numele de **relația lui Pichermayer**.

3.6.2.2. T.e.m. de inducție mutuală e_L

În realitate, lățimea periei este mai mare decât lățimea unei lamele de colector. De obicei peria calcă pe 2-3 lamele de colector. Aceasta înseamnă că mai multe secții alăturate comută simultan. Dacă una din aceste secții este secția în studiu, celelalte secții alăturate, care comută simultan cu secția în studiu, vor induce t.e.m. de inducție mutuală e_M , care tind să întârzie variația curentului din secția considerată. În cele ce urmează se va neglija t.e.m. e_M .

3.6.2.3. T.e.m. datorate câmpului exterior e_k

Dacă periele sunt plasate (calate) în axa neutră, laturile secției în comutație se află în câmpul magnetic de reacție al indusului și al polilor auxiliari în cazul în care aceștia există. Notând cu $B_{\delta k}$ inducția din zona neutră, t.e.m. indusă de acest câmp exterior va avea expresia:

$$e_k = 2 w v l_k B_{\delta k}, \quad (3.65)$$

în care l_k este lungimea porțiunii din secție aflată sub influența cîmpului $B_{\delta k}$.

3.6.3. EXPRESIA CURENTULUI DE COMUTAȚIE " I "

În circuitul secție - conductoare de legătură la lamele - lamele - perie, rezistențele conductoarelor secției și a legăturilor la lamele sunt mult mai mici decât rezistența contactului perie - lamelă . Din această cauză, primele două se neglijează. Rezistențele de contact între perie și lamelele 1 și 2 sunt r_{pe1} și r_{pe2} . Aplicând teorema a doua a lui Kirchhoff în circuitul secției care comută, (figura 3.59) se poate scrie:

$$e_L + e_k = r_{pe1} i_1 - r_{pe2} i_2 \quad (3.66)$$

Deși tensiunile e_L și e_k sunt dependente de valoarea curentului care circulă prin secție, se vor considera constante.

Lățimile de perie în contact cu lamelele de colector sunt:

$$\begin{aligned} b_{pe1} &= v_k (T_c - t) \\ b_{pe2} &= v_k t \end{aligned} \quad (3.67)$$

În (3.67), t reprezintă timpul scurs din momentul intrării lamelei 2 sub perie. Dacă presupunem că rezistențele r_{pe1} și r_{pe2} nu depind de densitatea de curent în contact, aceste rezistențe vor fi invers proporționale cu suprafețele de contact și implicit cu lățimile b_{pe1} și b_{pe2} , iar rezistența de contact a întregii perii b_{pe} va fi invers proporțională cu lățimea periei b_{pe} . Va rezulta:

$$\begin{aligned} \frac{r_{pe1}}{r_{pe}} &= \frac{b_{pe}}{b_{pe1}} = \frac{v_k T_c}{v_k (T_c - t)} = \frac{T_c}{T_c - t} ; & r_{pe1} &= r_{pe} \frac{T_c}{T_c - t} \\ \frac{r_{pe2}}{r_{pe}} &= \frac{b_{pe}}{b_{pe2}} = \frac{v_k T_c}{v_k t} = \frac{T_c}{t} ; & r_{pe2} &= r_{pe} \frac{T_c}{t} \end{aligned} \quad (3.68)$$

Înlocuind relațiile (3.55) și (3.68) în (3.66), se obține:

$$e_L + e_k = (I_a + i) r_{pe} \frac{T_c}{T_c - t} - (I_a - i) r_{pe} \frac{T_c}{t} \quad (3.69)$$

de unde rezultă expresia curentului din secțiunea aflată în comutație:

$$i = I_a \left(1 - \frac{2t}{T_c} \right) + \frac{e_L + e_k}{r_{pe} \left(\frac{T_c}{t} + \frac{T_c}{T_c - t} \right)} = i_l + i_k \quad (3.70)$$

Conform relației 3.70, curentul de comutație i este format din doi curenți: curentul i_l , care variază liniar în timp și curentul i_k care nu variază liniar în timp, numit *curent suplimentar de comutație*, curenți care au expresiile:

$$i_l = I_a \left(1 - \frac{2t}{T_c} \right); \quad i_k = \frac{e_l + e_k}{r_{pe} \left(\frac{T_c}{t} + \frac{T_c}{T_c - t} \right)} \quad (3.71)$$

3.6.3.1. Comutația liniară ideală

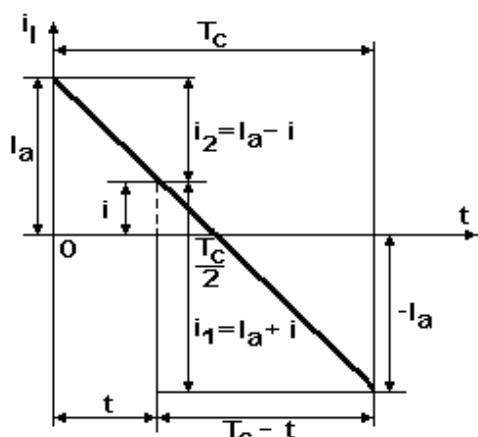


Fig. 3.62. Variația curentului în secția în comutație la comutația liniară.

Variația în timp a curentului i_l este prezentată în figura 3.62. La $t = 0$, $i = I_a$, întreg curentul trece prin lamela 1.

$$i_l = I_a + i = 2 I_a \quad (3.72)$$

La momentul $t = T_c$, $i = -I_a$, $i_l = 0$,

$$i_l = -I_a - i = -2 I_a \quad (3.73)$$

În cazul în care $i = i_l$, deci curentul prin secția în comutație variază liniar în timp, fenomenul comutației se desfășoară în condiții optime. Acest lucru se întâmplă în cazul în care $e_l + e_k = 0$ (conform 3.70).

Notând cu l_{pe} lungimea periei în sens axial, suprafețele de contact ale periei cu lamelele de colector vor fi:

$$\begin{aligned} s_{pe1} &= b_{pe1} l_{pe} = v_k (T_c - t) l_{pe} \\ s_{pe2} &= b_{pe2} l_{pe} = v_k t l_{pe} \end{aligned} \quad (3.74)$$

Suprafața periei este: $s_{pe} = b_{pe} l_{pe}$;

$$\frac{s_{pe1}}{s_{pe}} = \frac{v_k (T_c - t) l_{pe}}{v_k T_c l_{pe}} = \frac{T_c - t}{T_c} \quad (3.75)$$

$$\frac{s_{pe2}}{s_{pe}} = \frac{v_k t l_{pe}}{v_k T_c l_{pe}} = \frac{t}{T_c} .$$

Se obține:

$$s_{pe1} = s_{pe} \frac{T_c - t}{T_c}; \quad s_{pe2} = s_{pe} \frac{t}{T_c} . \quad (3.76)$$

Dacă $i = i_l$, $i_k = 0$, rezultă pentru densitățile de curenți dintre perie și lamelele de colector:

$$j_{pe1} = \frac{i_l}{s_{pe1}} = \frac{I_a + i}{s_{pe} \frac{T_c - t}{T_c}} = \frac{I_a + I_a \left(1 - \frac{2t}{T_c}\right)}{s_{pe} \frac{T_c - t}{T_c}} = \frac{2 I_a}{s_{pe}} . \quad (3.77)$$

$$j_{pe2} = \frac{i_2}{s_{pe2}} = \frac{I_a - i}{s_{pe} \frac{t}{T_c}} = \frac{I_a - I_a \left(1 - \frac{2t}{T_c}\right)}{s_{pe} \frac{t}{T_c}} = \frac{2 I_a}{s_{pe}} . \quad (3.78)$$

Relațiile 3.77 și 3.78 demonstrează faptul că în cazul comutației liniare, densitatea de curent sub perie este constantă, lamela de colector părăsind peria fără a se produce arcul de întrerupere a curentului. Prin limitarea densității de curent sub perie la valoarea corespunzătoare mărcii de perie, mașina funcționează practic fără scânteii la colector.

3.6.3.2. Comutația curbilinie

Curentul i_k variază în timp conform figurii 3.62. La $t = 0$, $i_k = 0$ și la $t = T_c$, $i_k = 0$. Curentul i_k este maxim la $t = T_c/2$, având valoarea:

$$i_k \left(\frac{T_c}{2} \right) = \frac{e_l + e_k}{4 r_{pe}} . \quad (3.79)$$

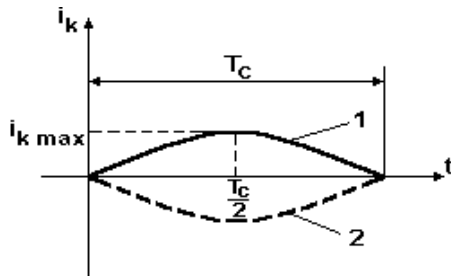


Fig. 3.63. Curentul de scurtcircuit în secția aflată în comutație.

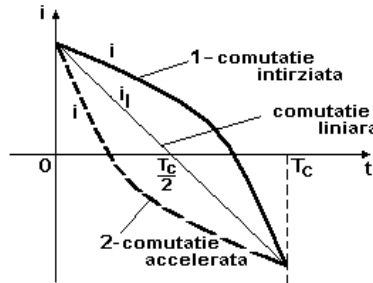


Fig. 3.64. Curentul în comutația curbilinie.

Semnul curentului i_k depinde de semnul sumei $e_l + e_k$. Dacă $e_l + e_k > 0$, se obține curba 1, iar dacă $e_l + e_k < 0$, se obține curba 2.

Curentul de comutație i (relația 3.70) se determină prin însumarea punct cu punct pe ordonată $i_l = i_l(t)$ (fig.3.62) și $i_k = i_k(t)$ (fig.3.63), rezultând curbele $i = i(t)$ (fig. 3.64).

Dacă $i_k > 0$, curba 1, curentul i trece prin zero pentru $t > T_c/2$, având un caracter întârziat, iar dacă $i_k < 0$, curba 2, curentul i trece prin zero pentru $t < T_c/2$, comutația având un caracter accelerat.

Din relațiile 3.77 și 3.78 rezultă că în cazul comutației întârziate, $j_{pe1} > j_{pe2}$, densitatea de curent crește sub muchia de ieșire a periei. Fenomenul este același ca la întreruperea unui circuit cu un pronunțat caracter inductiv, când între contactele care se îndepărtează ale întrerupătorului, apare arcul electric. Există pericolul apariției scânteilor între muchia periei și lamela care părăsește peria.

Când $i_k < 0$, $j_{pe1} < j_{pe2}$, există condiții de apariție a scânteilor între muchia periei și lamela de colector care intră sub aceasta.

3.6.4. INFLUENȚA CURENTULUI DIN SECȚIA ÎN COMUTAȚIE ASUPRA CÂMPULUI MAGNETIC PRINCIPAL AL MAȘINII

În unele cazuri, curenții din secțiile în comutație au o influență notabilă asupra câmpului magnetic principal din mașină.

În cazul comutației liniare, curentul din secția în comutație k este zero pentru $t = T_c/2$, în circuitul magnetic limitat de două axe d consecutive, solenația rezultantă a indusului fiind nulă - figura 3.65,a). La comutația întârziată, conductorul k este străbătut de curentul i , care își păstrează sensul pe care-l avea când secția făcea parte din calea de curent care vine către perie (din dreapta axei q) - figura 3.65,b). Solenația indusului are efect demagnetizant, deoarece fluxul produs de acest curent, Φ_c , se opune fluxului principal Φ . Când comutația este accelerată - figura 3.65,c), efectul solenației curentului din secția în comutație k este magnetizant.

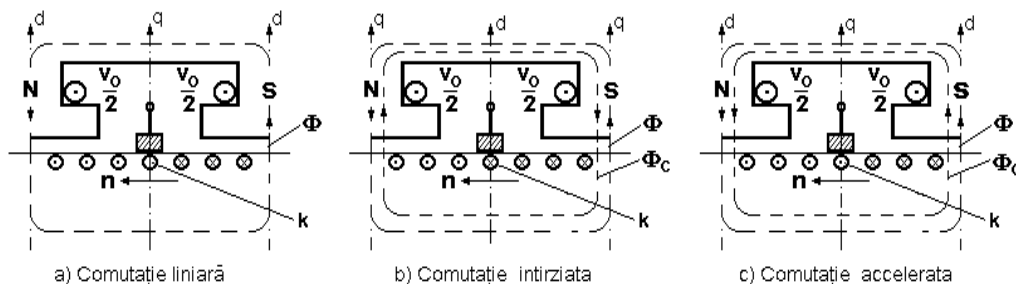


Fig. 3.65. Influența curentului i asupra câmpului inductor.

3.6.5. MIJLOACE DE AMELIORARE A COMUTAȚIEI

Pentru a obține o comutație cât mai bună, apropiată de comutația liniară ideală, este necesar ca valoarea curentului i_k să fie cât mai mică. Reducerea valorii curentului suplimentar de comutație i_k se poate face prin:

- micșorarea t.e.m. de autoinducție e_L ;
- producerea în zona de comutație a unui câmp magnetic de comutație de o astfel de mărime și sens, în-cât să dea naștere unei t.e.m. e_k care să compenseze cât mai bine t.e.m. e_L ;
- creșterea rezistenței circuitului secției în comutație prin alegerea unor perii cu rezistență de contact mare.

3.6.5.1. Micșorarea t.e.m. de autoinducție e_L .

Relația lui Pichermayer (3.65) indică modalitățile prin care se poate reduce t.e.m. e_L :

- micșorarea pe cât posibil a numărului de spire w ale secției, cazul ideal fiind $w = 1$;
- micșorarea permeanței λ' prin folosirea creștăturilor deschise, de adâncime cât mai mică pentru armătura rotorică.

Viteza periferică a indusului v , încărcarea liniară A și lungimea indusului l nu se pot micșora, deoarece aceasta ar impune creșterea gabaritului mașinii și a prețului de cost la valori inacceptabile.

3.6.5.2. Polii auxiliari

Producerea în zona de comutație a unui câmp magnetic de comutație care să producă t.e.m. e_k cu rolul de a compensa t.e.m. e_L revine în sarcina *polilor auxiliari*. Aceștia se plasează între polii principali, pe axa neutră geometrică. Folosirea polilor auxiliari implică calarea periiilor pe axa neutră.

Polii auxiliari au și rolul de a compensa câmpul reacției transversale a indusului. Pentru a îndeplini aceste deziderate, polaritatea lor trebuie să fie aceeași cu polaritatea polilor principali către care se îndreaptă rotorul în cazul generatorului, iar la motor polaritatea lor trebuie să fie aceeași cu a polilor principali de care se depărtează rotorul.

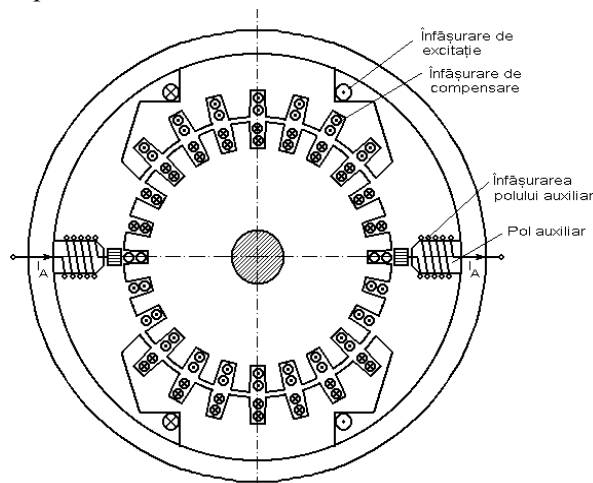


Fig. 3.66. Dispunerea polilor auxiliar.

Compensarea t.e.m. e_L de către t.e.m. e_k produsă de către polii auxiliari, trebuie să aibă loc la orice sarcină (orice valoare a curentului I_A). Din această cauză, polii auxiliari se conectează în serie cu indusul, inducția în zona de comutație fiind proporțională cu încărcarea liniară A :

$$B_k = \frac{1}{e_k} \lambda' A \quad (3.80)$$

Pentru păstrarea proporționalității între B_k și A , deci pentru evitarea saturării circuitului magnetic al polilor auxiliari, se mărește întrefierul în dreptul acestora în raport cu întrefierul din dreptul polilor principali.

O problemă importantă este limitarea scăpărilor polilor auxiliari. Aceasta se realizează în principal prin:

- realizarea a două întrefieruri, unul între polul auxiliar și indus și altul între indus și carcasă, prin introducerea în această zonă de adaosuri din materiale nemagnetice;
- plasarea bobinelor polilor auxiliari cât mai aproape de indus.

Dacă polii auxiliari sunt prea puternici, comutația devine accelerată, apărând scântei sub muchia de intrare a periei. Întrefierul dintre aceștia și indus trebuie mărit prin reducerea numărului de adaosuri nemagnetice. Dacă polii sunt prea slabi, comutația este întârziată și pentru ameliorarea ei se procedează la mărirea numărului de adaosuri nemagnetice. În cazul în care mașina nu are înfășurare de compensare, numărul de spire al polilor auxiliari este mai mare. Înfășurările polilor auxiliari se înseriază cu înfășurările de compensare pentru fiecare pereche de poli.

În mod obișnuit, **numărul polilor auxiliari este egal cu numărul polilor principali**. La mașinile de mică putere, numărul lor se poate reduce la jumătate.

3.6.5.3. Rolul periiilor în procesul comutației

Dacă se dorește o comutație bună, trebuie să se folosească perii care permit obținerea unei rezistențe de contact mari. Acestea sunt așa-numitele perii dure, confecționate din cărbune - grafită, grafită sau electrografită. Periiile dure permit obținerea unei densități mici de curent. Folosirea lor la mașinile de curent continuu conduce la necesitatea creșterii suprafeței de contact și prin aceasta la creșterea lungimii colectorului.

În mod obișnuit la mașinile de curent continuu se folosesc perii de grafită. La cele de tensiune joasă – până la 30 V - se folosesc perii din cupru sau bronz-grafită.

Rezistența de contact perie - colector și implicit căderea de tensiune pe acest contact depinde de:

- materialul din care sunt confecționate periiile și respectiv lamelele de colector;
- densitatea de curent sub perii;
- sensul curentului, de la perie la colector sau invers. Dacă curentul circulă de la perie la colector, rezistența de contact este mai mică deci și căderea de tensiune pe contact este mai mică;
- temperatura suprafeței de contact;
- presiunea specifică pe perie;
- viteza periferică a colectorului;
- factori de natură mecanică.

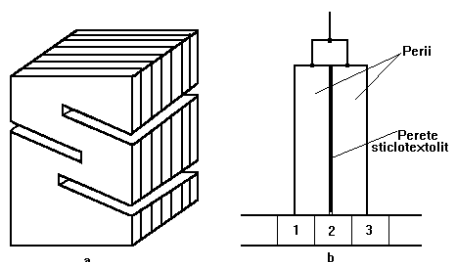


Fig. 3.67. Modificări constructive ale periiilor.

$$\Delta U_{pe} = I r_{pe} = j_{pe} s_{pe} \frac{\rho_{pe}}{s_{pe}} = j_{pe} \rho_{pe} \quad (3.81)$$

Pentru o plajă largă de valori ale curentului, căderea de tensiune pe contactul perie-colector este constantă, proporțională cu produsul densității de curent j_{pe} și rezistivitatea specifică ρ_{pe} .

Creșterea rezistenței periiilor se face prin folosirea periiilor crestate (Fig. 3.67, a) sau realizarea periiilor din mai multe straturi izolate între ele (Fig. 3.67, b).

La mașinile de puteri mari, în scopul îmbunătățirii comutației se folosesc și alte mijloace, cum ar fi: re-alizarea înfășurării indusului în trepte, amortizoare de crestătură, bariere și ecrane împotriva

cercului de foc la colector.

3.7. GENERATOARE DE CURENT CONTINUU

Din punctul de vedere al conversiei de energie pe care o efectuează, mașina de curent continuu poate funcționa în trei regimuri: regim de *generator*, de *motor* și de *frână*. În regim de generator, mașina de curent continuu este un convertor mecano-electric de energie, transformând energia mecanică pe care o primește pe la arbore de la un motor de antrenare, în energie electrică de curent continuu pe care o cedează pe la borne unei sarcini.

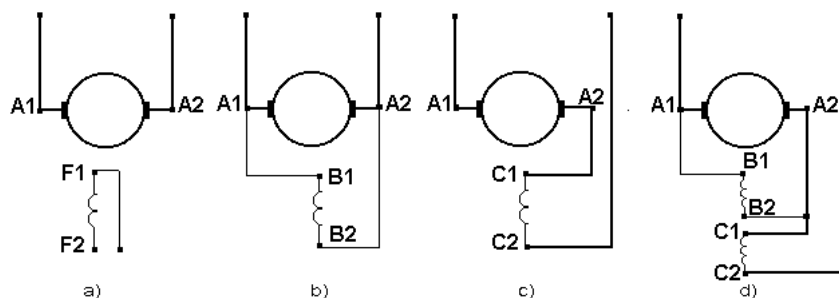


Fig. 3.68. Modalități de excitație la generatoarele de curent continuu.

Din punct de vedere al excitației, generatoarele de curent continuu pot fi: **generatoare cu excitație separată** (Fig. 3.68,a) la care înfășurarea de excitație este conectată la o sursă exterioară de tensiune continuă și **generatoare cu autoexcitație**, care după modul de conectare la bornele mașinii a înfășurărilor de excitație pot fi cu: excitație **paralel (derivație)** (Fig. 3.68,b), **serie** (Fig. 3.68,c) și **mixtă** (Fig. 3.68,d).

Se pot folosi în funcție de scopul urmărit și generatoare cu înfășurări de excitație atât derivație cât și excitație separată.

Puterea electrică de excitație reprezintă 25% din puterea nominală a mașinii. La mașina cu excitație derivație, curentul de excitație I_e reprezintă de asemenea, câteva procente din curentul nominal al mașinii. La această valoare a curentului I_e , pentru producerea solenației de magnetizare, înfășurarea de excitație se realizează dintr-un număr mare de spire cu secțiune redusă, având prin urmare o rezistență importantă.

La mașinile cu excitație serie, înfășurarea de excitație este străbătută de curentul din indus, din care cauză se realizează dintr-un număr mic de spire, cu secțiune mare, deci va prezenta o rezistență redusă.

3.7.1. BILANȚUL PUTERILOR. ECUAȚIA DE TENSIUNI A GENERATORULUI DE CURENT CONTINUU

Considerăm o mașină de c.c. antrenată de un motor primar (motor Otto, Diesel, turbină cu abur, turbină hidraulică) în sensul arătat în figura 3.69, cu viteza unghiulară Ω constantă.

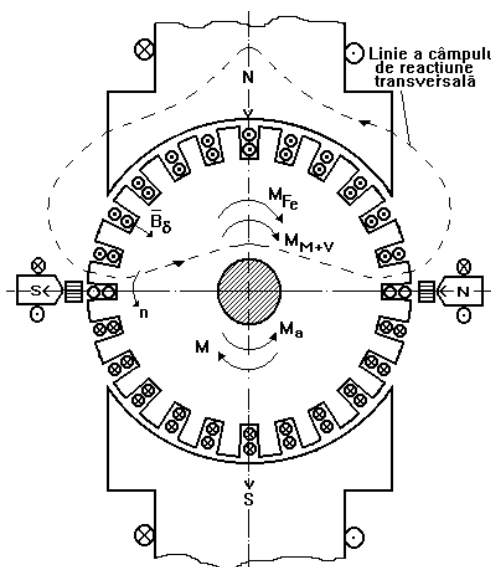


Fig. 3.69. Schema de principiu a generatorului de curent continuu.

Pentru aceasta, motorul primar (de antrenare) dezvoltă cuplul mecanic activ M_a cu același sens ca și viteza de rotație.

Înfășurarea de excitație a mașinii este alimentată de la o sursă de c.c. (care poate fi un redresor, acumulator, un alt generator de c.c. sau chiar mașina de c.c. considerată) de tensiune U_e .

Prin înfășurare va trece curentul de excitație I_e .

În secțiile înfășurării rotorice, învârtite în câmpul magnetic al polilor de excitație se vor induce t.e.m. și între bornele A, B ale mașinii va apărea o tensiune U_o , egală cu t.e.m. E indusă într-o cale de curent (figura 3.70).

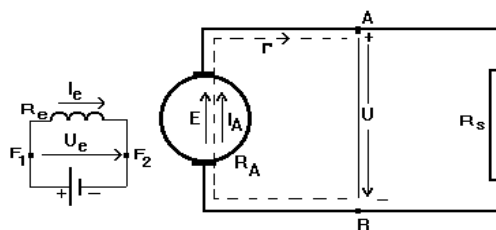


Fig. 3.70. Generator cu excitație separată.

Dacă la bornele A, B se conectează o rezistență de sarcină R_s , t.e.m. E va da naștere unui curent I_A prin înfășurarea rotorică în același sens cu E .

Sensul lor comun este evidențiat în figura 3.70.

Curentul I_A care străbate înfășurarea rotorică, dă naștere unui câmp magnetic de reacție transversală, dacă periiile sunt calate în axa neutră. Câmpul magnetic de reacție se compune cu câmpul magnetic de excitație, dând naștere unui câmp magnetic rezultat în întrefier.

Fluxul Φ al unui pol în câmpul rezultat poate diferi cu câteva procente de fluxul Φ_o al polului de excitație la mersul în gol al mașinii (fără curent în înfășurarea rotorică), când piesele polare și dinții rotorului se saturează din cauza reacției transversale a indusului.

Fluxului Φ_o de mers în gol îi corespunde conform relației 3.81 tensiunea la perii E_o , iar fluxului rezultat Φ , tensiunea E . La funcționarea în sarcină, tensiunea indusă E va fi diferită de tensiunea E_o la mersul în sarcină prin câteva procente. În cele ce urmează acest efect se va neglija, considerând că E este aproximativ egală cu E_o .

Din puterea mecanică $P_1 = M_a \cdot \Omega$ pe care mașina o primește pe la arbore de la motorul primar, o parte servește la acoperirea pierderilor mecanice și de ventilație p_{M+V} și pierderilor în fier p_{Fe} . Acestor puteri le corespund cuplurile:

$$M_{M+V} = p_{M+V} \Omega ; \quad M_{Fe} = p_{Fe} \Omega \quad (3.82)$$

Pierderile mecanice și de ventilație p_{M+V} sunt produse de frecările părților aflate în mișcare (frecări în lagăre, frecările dintre perii și colector) și frecările dintre acestea și aer, în special frecarea ventilatorului cu aerul. Pierderile mecanice sunt proporționale cu viteza de rotație, iar pierderile de ventilație cu pătratul acestei viteze. Dacă mașina funcționează cu viteză constantă, aceste pierderi sunt constante.

Pierderile în fier au loc numai în indus, deoarece numai în armătura rotorică variază fluxul magnetic. Sunt determinate de variația în timp a câmpului magnetic în miezul feromagnetic al rotorului, deoarece acesta este supus unui ciclu de magnetizare cu frecvența $f = \frac{n}{60}$. În jugul și dinții rotorului apar pierderi prin histerezis și curenți turbionari. Pierderile produse de fundamentală câmpului B_s din întrefier sunt *pierderi principale* în fier, iar cele produse de armonicile superioare sunt *pierderi suplimentare* în fier. În piesele polare, câmpul magnetic este pulsatoriu datorită danturării indusului.

Variația pulsatorie a câmpului în piesele polare, produce o categorie de pierderi numite *pierderi de suprafață*, care intră și ele în categoria pierderilor în fier. Atât pierderile prin histerezis cât și pierderile prin curenți turbionari depind de pătratul inducției, deci de pătratul t.e.m. induse E . Dacă mașina funcționează la tensiune constantă, pierderile în fier pot fi considerate constante, independente de mărimea sarcinii.

Cea mai mare parte din puterea mecanică P_1 se transformă în putere electromagnetică $P_M = EI_A$, căreia îi corespunde cuplul electromagnetic M (relația 3.40).

Din puterea electromagnetică P_M , o parte p_j acoperă pierderile Joule în circuitul indusului (indus, poli auxiliari, înfășurări de compensare, înfășurări de excitație serie).

$$p_j = \Sigma r_a I_A^2, \quad (3.83)$$

în care Σr_a reprezintă rezistența totală din circuitul indusului cu componentele menționate mai sus. O altă parte din puterea electromagnetică acoperă pierderile p_{cp} în contactul perie - colector.

$$p_{cp} = \Delta U_{pe} I_A, \quad (3.84)$$

în care ΔU_{pe} reprezintă căderea de tensiune pe contactele perie - colector ale mașinii. În general, $\Delta U_{pe} = 0,4 - 2,4V$, dar plaja de variație depinde de materialul periilor, de densitatea de curent sub perie și de starea suprafețelor în contact.

Cea mai mare parte din puterea electromagnetică P_M se transformă în putere electrică utilă $P_2 = UI_A$ cedată sarcinii pe la borne. Din cele arătate se pot scrie ecuațiile care definesc bilanțul puterilor pentru generatorul de curent continuu cu excitație separată:

$$\begin{aligned} P_M &= P_1 - p_{M+V} - p_{Fe} \\ P_2 &= P_M - p_j - p_{cp} \\ P_2 &= P_1 - p_{M+V} - p_{Fe} - p_j - p_{cp} \end{aligned} \quad (3.85)$$

La acest tip de generator, puterea necesară circuitului de excitație p_{ex} este furnizată de o sursă independentă, care alimentează acest circuit. Bilanțul energetic al generatorului de curent continuu cu excitație separată se poate reprezenta grafic prin diagrama din figura 3.71.

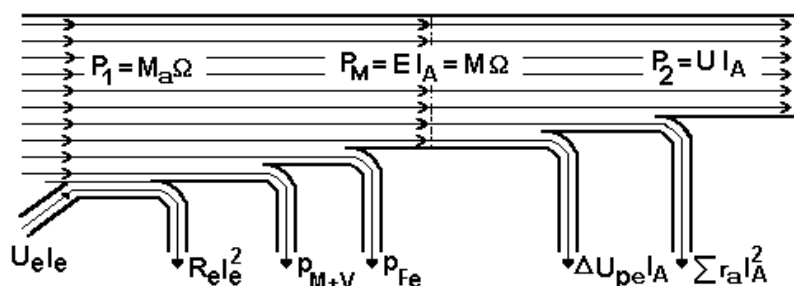


Fig. 3.71. Diagrama de bilanț energetic la generatorul de curent continuu.

Conform relațiilor 3.85, se poate scrie:

$$UI_A = EI_A - \Sigma r_a I_A^2 - \Delta U_{pe} I_A, \quad (3.86)$$

în care, împărțind membru cu membru cu I_A :

$$U = E - \Sigma r_a I_A - \Delta U_{pe}, \quad (3.87)$$

Se notează cu:

$$R_A = \Sigma r_a + \frac{\Delta U_{pe}}{I_A}, \quad (3.88)$$

rezistența totală a circuitului indusului. În final se obține:

$$\boxed{U = E - R_A I_A} \quad (3.89)$$

Ecuția 3.89 reprezintă ecuația de funcționare a generatorului de curent continuu în regim staționar.

În regim de generator, asupra mașinii acționează cuplurile:

- a) cuplul activ M_a datorită motorului primar, care impune sensul de rotație;
- b) cuplul M_{M+V} corespunzător pierderilor p_{M+V} în sens invers cuplului activ;
- c) cuplul M_{Fe} corespunzător pierderilor în fier p_{Fe} de asemenea în sens invers cuplului activ;
- d) cuplul electromagnetic M , dat de relația 3.40, în sens invers sensului cuplului activ;

Ecuția de mișcare a rotorului va fi:

$$M_a - M_{M+V} - M_{Fe} - M = J \frac{d\Omega}{dt}, \quad (3.90)$$

în care J este momentul de inerție al grupului motor de antrenare – generator.

Dacă Ω este constant, ecuația de mișcare devine:

$$M_a = M_{M+V} + M_{Fe} + M. \quad (3.91)$$

3.7.2. CARACTERISTICILE GENERATOARELOR DE CURENT CONTINUU

Funcționarea mașinii de c.c. în regim de generator este definită de un număr de mărimi ca: tensiunea la perii E , tensiunea la borne U , curentul care circulă prin înfășurarea indusului I_A , curentul din înfășurarea de excitație I_e , turația n .

Prin **caracteristică** a mașinii se înțelege funcția care descrie dependența dintre două din mărimile enunțate mai sus, celelalte rămânând constante.

Caracteristicile mașinii de c.c. se determină de obicei direct la platformele de încercări. La mașinile de foarte mare putere, încercările în sarcină sunt greu de realizat căci impun folosirea la platformele de încercări a unor consumatori de foarte mare putere. Pe lângă aceasta, încercările în sarcină consumă o mare cantitate de energie. Din această cauză, se recurge la predeterminarea caracteristicilor în sarcină folosind caracteristica de mers în gol și caracteristica de scurtcircuit.

3.7.2.1. Caracteristicile generatorului de c.c. cu excitație separată

Schema electrică folosită pentru determinarea directă la platforma de încercări a acestor caracteristici este prezentată în figura 3.72.

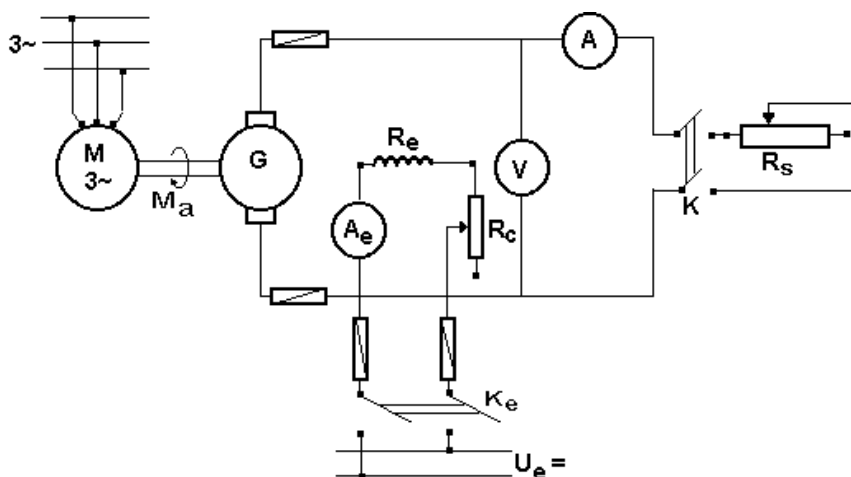


Fig. 3.72. Schema generatorului de curent continuu cu excitație separată.

1) **Caracteristica de mers în gol:** $E = E(I_e)$, pentru $I_A = 0$ și $n = \text{constant}$ ($=n_n$). Comutatorul K este deschis.

Închizând întrerupătorul K_e , prin înfășurarea de excitație se va stabili curentul I_e , care se poate modifica cu reostatul de câmp R_c . La mersul în gol:

$$E = \frac{p}{a} N n \Phi = K_e \Phi. \quad (3.91)$$

Pentru o mașină dată, care funcționează la $n = \text{const.}$, K_e este constantă. Dependența $E = E(I_e)$ descrie la o altă scară dependența $\Phi = \Phi(I_e)$, din caracteristica de magnetizare a mașinii (figura 3.73). Dacă mașina a mai funcționat, deci prin înfășurarea de excitație a trecut un curent de excitație I_e , circuitul magnetic al polilor de excitație păstrează un magnetism remanent. La $I_e = 0$, datorită magnetismului remanent, va apărea o tensiune

E_{rem} de valoare redusă (3-8)% din U_n . La creșterea curentului I_e , Φ și respectiv E cresc la început liniar în funcție de acesta. Din cauza saturării circuitului magnetic al mașinii, pe măsură ce I_e crește, Φ și E nu mai cresc liniar cu I_e , ci din ce în ce mai puțin. Constanta de mers în gol se determină până la valori E care depășesc cu 20÷50% tensiunea nominală a mașinii U_n . Prin aceasta se verifică și rigiditatea dielectrică a izolației între spirele înfășurării indusului.

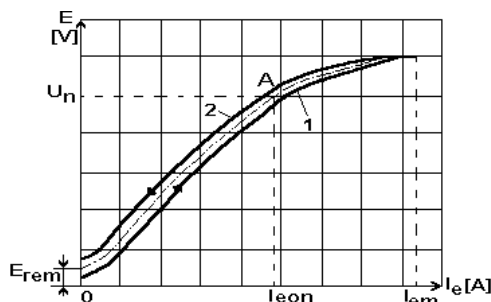


Fig. 3.72. Caracteristica de mers în gol a generatorului cu excitație separată.

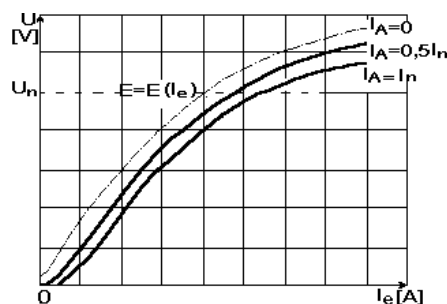


Fig. 3.74. Caracteristica în sarcină a generatorului cu excitație separată.

În următoarea fază, se micșorează curentul I_e . Se observă că se descrie o ramură descendentă a caracteristicii de mers în gol (2) ce diferă de ramura ascendentă (1), aceasta datorită fenomenului de histerezis. În practică se consideră ca fiind caracteristica de mers în gol a mașinii, curba medie pe ordonată între cele două ramuri 1 și respectiv 2, din curba întreruptă.

Punctul de funcționare A se alege în cotul de saturație. Dacă punctul de funcționare A ar fi folosit pe porțiunea liniară a caracteristicii, la variații mici ale curentului de excitație, s-ar obține variații mari ale t.e.m. induse E și deci ale tensiunii U la bornele mașinii. Plasarea punctului A după cot, în zona saturată implică variații mari ale curentului de excitație pentru a se obține modificări mici ale tensiunii la borne.

2) **Caracteristica în sarcină $U = U(I_e)$** , la $n = \text{const.}$ (n_n) și $I_A = \text{const.}$ Această caracteristică descrie modul în care variază tensiunea la borne în funcție de I_e , pentru o anumită sarcină constantă. Întrerupătorul K se închide pe rezistența de sarcină R_s reglabilă. Pentru diferite valori ale sarcinii - uzual 2/3, 3/4, 4/4 și 5/4 din curentul nominal - se obține o familie de curbe aproape paralele între ele și cu $E = E(I_e)$, conform figurii 3.74.

3) **Caracteristica externă $U = U(I_A)$** pentru $n = \text{const.}$ (n_n) și $I_e = \text{const.}$

Caracteristica externă (figura 3.75) pune în evidență capacitatea generatorului de a-și menține tensiunea la borne între anumite limite acceptate de receptor când curentul de sarcină variază, iar curentul de excitație rămâne constant.

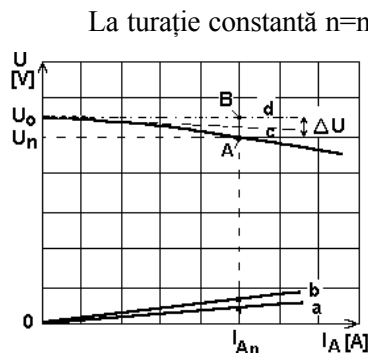


Fig. 3.75. Caracteristica externă a generatorului cu excitație separată.

Care reprezintă dependența $E = E(I_A)$, numită caracteristica **internă** a mașinii. Curba d reprezintă dependența $E_o = E_o(I_A) = \text{constant}$, deoarece $I_e = \text{constant}$. La aceeași sarcină, E diferă foarte puțin de E_o , din cauza reacției indusului.

Variația de tensiune se exprimă în procente din tensiunea nominală:

$$\frac{\Delta U}{U_n} [\%] = \frac{U_o - U_n}{U_n} 100 .$$

Pentru generatoarele de putere medie, valoarea acestui parametru este cuprinsă între 5% și 10%.

4) **Caracteristica de reglaj $I_e = I_e(I_A)$** pentru $n = \text{const.}$ (n_n) și $U = \text{const.}$ (în mod obișnuit se trasează la U_n), demonstrează modul de variație a curentului de excitație în funcție de curentul de sarcină I_A , astfel ca tensiunea la bornele generatorului să rămână constantă (figura 3.76).

Deoarece la creșterea curentului de sarcină tensiunea la borne scade (conform celor arătate la caracteristica externă), pentru a păstra această tensiune constantă, curentul de excitație trebuie mărit în scopul compensării reacției indusului și a căderilor rezistive de tensiune.

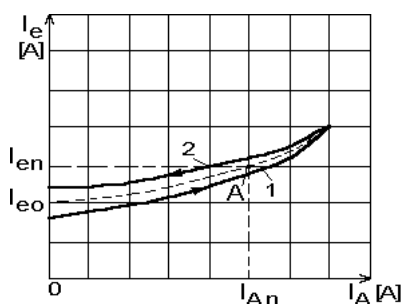


Fig. 3.76. Caracteristica de reglaj a generatorului cu excitație separată.

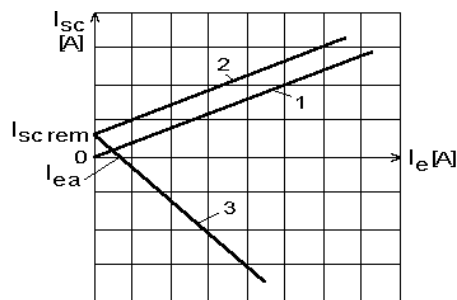


Fig. 3.77. Caracteristica de scurtcircuit a generatorului cu excitație separată.

Pentru ridicarea acestei caracteristici, se modifică rezistența de sarcină R_s de la valoarea $R_s = \infty$ (K deschis) corespunzătoare regimului de funcționare în gol ($I_e = I_{eo}$, $I_A = 0$), până la o valoare a curentului de sarcină ce depășește cu $15 \div 29\%$ curentul nominal I_{An} , obținându-se curba 1. Apoi se fac determinările în sens invers micșorând curentul de sarcină până când $I_A = 0$, obținându-se curba 2. Diferența dintre cele două curbe se datorează fenomenului de histererezis. Se consideră caracteristică de reglaj curba medie pe ordonată (curba trasată cu linie întreruptă).

5) Caracteristica de scurtcircuit $I_{sc} = I_{sc}(I_e)$ pentru $n = \text{const.}(n_n)$ și $U = 0$.

Deoarece $U = 0$, rezultă $I_{sc} = E_{sc} / R_A$. Pentru valori ale curentului de scurtcircuit de până la $2,5I_{An}$, tensiunea E este foarte mică, deoarece R_A este la rândul ei mică. Mașina este nesaturată deoarece E este proporțională cu I_e . Punctul de funcționare se găsește pe porțiunea liniară a caracteristicii de mers în gol. Aceasta explică forma liniară a caracteristicii de scurtcircuit.

Ținând cont de faptul că mașina ar putea prezenta magnetism remanent, se deosebesc trei situații (Fig. 3.77):

- mașina nu prezintă magnetism remanent - dreapta 1;
- mașina prezintă magnetism remanent, iar fluxul magnetic inductor are același sens cu fluxul remanent - dreapta 2;
- mașina prezintă magnetism remanent, iar fluxul magnetic inductor are sens invers față de fluxul remanent - dreapta 3. Va exista o valoare a curentului de excitație I_{ea} pentru care se anulează curentul prin indus.

Deoarece caracteristica de scurtcircuit este o dreaptă, pentru ridicarea ei este suficientă o singură determinare în cazul lipsei magnetismului remanent și două determinări în caz contrar.

Predeterminarea caracteristicilor de funcționare

Predeterminarea caracteristicilor de funcționare se referă la mașinile de foarte mare putere din motivele deja menționate. Pentru aceasta se folosește caracteristica de mers în gol și o încercare în scurtcircuit.

Se construiește triunghiul de scurtcircuit reprezentând în același sistem de axe caracteristica de mers în gol 1 și caracteristica de scurtcircuit 2 (figura 3.78). Pentru determinarea caracteristicii de scurtcircuit se face o singură determinare pentru $I_{sc} = I_{An}$. Tensiunii E_{sc} din caracteristica de mers în gol 1 îi corespunde curentul I_{eosc} . Din caracteristica de scurtcircuit, curentului I_{sc} îi corespunde curentul de excitație $I_{esc} > I_{eosc}$. Curentul de excitație suplimentar $I_{es} = I_{esc} - I_{eosc}$ este necesar pentru compensarea efectului demagnetizant al reacției indusului.

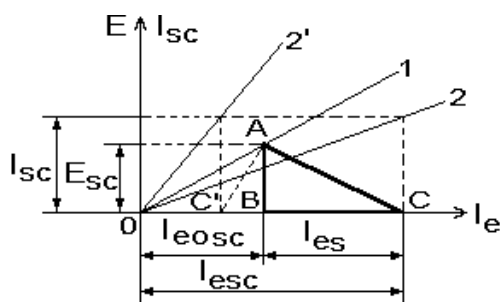


Fig. 3.78. Predeterminarea caracteristicilor de funcționare.

Triunghiul ABC se numește *triunghi de scurtcircuit*. Latura AB reprezintă căderea ohmică de tensiune pe rezistența totală R_A a indusului. Latura BC reprezintă la scara curentului de excitație măsura efectului demagnetizant a reacției indusului, adică arată cu cât trebuie mărit curentul de excitație pentru a compensa căderea de tensiune determinată de reacția indusului. Laturile triunghiului de scurtcircuit sunt proporționale cu valoarea curentului din indus în domeniul în care caracteristicile 1 și 2 rămân liniare, fapt real atât timp cât curentul din indus nu depășește cu mult curentul nominal.

Dacă caracteristica de scurtcircuit este 2' pentru care $I_{esc} < I_{eosc}$, înseamnă că periile sunt deplasate din axa neutră în așa

fel încât reacția indusului este magnetizantă. Triunghiul de scurtcircuit devine ABC' , caz în care încercarea în scurtcircuit este periculoasă deoarece curentul I_{sc} are tendința să crească în permanență. Când mașina lucrează saturat, pe lângă reacția longitudinală cu efect magnetizant sau demagnetizant, apare și reacția transversală a indusului care determină alungirea laturii BC .

Dacă periile sunt plasate în axa neutră nu există reacție longitudinală, iar reacția transversală este complet anihilată de o înfășurare de compensare, latura BC dispare, rămânând numai căderea ohmică de tensiune reprezentată de latura AB .

Caracteristica de sarcină $U = U(I_e)$ la $n = \text{const.}(n_n)$ și $I_A = \text{const.}$, se predetermină din caracteristica de mers în gol $E = E(I_e)$, dacă se translează triunghiul de scurtcircuit construit pentru $I_{sc} = I_A = \text{const.}$ paralel cu el însuși astfel încât vârful A să descrie caracteristica de mers în gol.

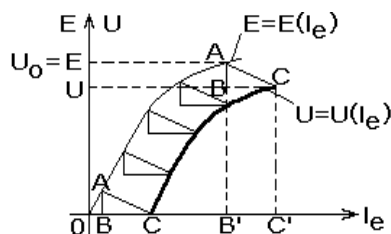


Fig. 3.79. Predeterminarea caracteristicii de sarcină.

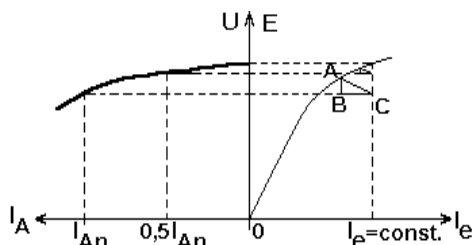


Fig. 3.80. Predeterminarea caracteristicii externe la generatorul cu excitație separată.

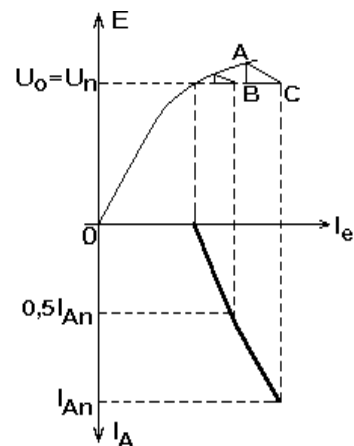


Fig. 3.81. Predeterminare caracteristicii de reglaj.

Vârful C (Fig. 3.79) descrie caracteristica de sarcină. În acest fel, caracteristica de mers în gol apare ca un caz particular al caracteristicii de sarcină, pentru $I_A = 0$.

Caracteristica $U = U(I_A)$ se predetermină construind pentru fiecare valoare a curentului I_A câte un triunghi de scurtcircuit (obișnuit, $I_A = 2/4, 3/4, 4/4, 5/4$ din I_A). Vârful A al fiecărui triunghi de scurtcircuit se plasează pe caracteristica de mers în gol (figura 3.80). Vârful C rămâne în permanență pe verticala $I_e = \text{const.}$ Ordonata vârfului C reprezintă tensiunea U la bornele mașinii, corespunzătoare curentului I_A (sarcinii) pentru care a fost trasat triunghiul de scurtcircuit respectiv. Caracteristica externă $U = U(I_A)$ rezultă în cadranul II.

Caracteristica de reglaj $I_e = I_e(I_A)$ se predetermină tot din caracteristica de mers în gol și triunghiurile de scurtcircuit construite pentru diferite valori ale curentului de sarcină I_A (figura 3.81). Triunghiurile se plasează astfel încât latura BC rămâne în permanență pe dreapta $U = \text{const.}$, iar vârful A pe caracteristica de mers în gol. Vârful C determină mărimea curentului de excitație corespunzător sarcinii respective pentru a menține tensiunea la bornele mașinii constantă. Prin această construcție, caracteristica de reglaj rezultă în cadranul IV.

Metodele de predeterminare a caracteristicilor de funcționare a mașinii la sarcină variabilă sunt importante pentru proiectanți. Prin simple construcții grafice, aceștia au posibilitatea de a aprecia efectul reacției indusului și pot prevedea măsuri de eliminare sau diminuare a acestuia pentru ca mașina să poată funcționa în parametrii impuși de standarde.

3.7.2.2. Caracteristicile generatorului de curent continuu cu excitație derivație

La generatorul de curent continuu cu excitație derivație, înfășurarea de excitație este conectată în paralel cu înfășurarea indusului, nemaifiind necesară o sursă de energie suplimentară ca în cazul generatorului de curent continuu cu excitație separată (figura 3.82).

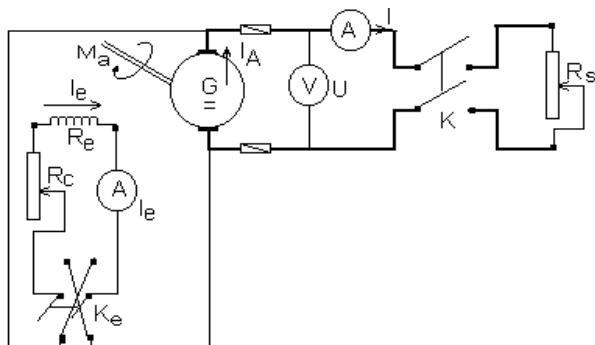


Fig. 3.82. Schema generatorului de curent continuu cu excitație derivație.

Curentul I_e care străbate înfășurarea de excitație reprezintă (2-5)% din curentul nominal.

Fenomenul apariției tensiunii U la bornele generatorului cu excitație derivație poartă numele de *autoexcitație*. Considerăm că rotorul generatorului din figura 3.82 este rotit de către motorul primar cu viteză constantă (n_n).

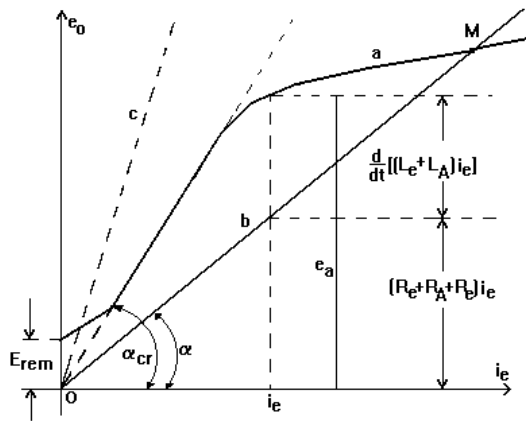
Înterupătorul in-versor k_e , care conectează înfășurarea de excitație la bornele indusului se închide pe una din cele două poziții. Înterupătorul k este deschis. Dacă înainte de închiderea înterupătorului k_e , tensiunea electromotoare indusă E era nulă, după închiderea lui k_e , curentul I_e va fi și el nul, câmpul inductor din

mașină va lipsi și tensiunea electromotoare E va rămâne zero iar mașina nu se va autoexcita.

Dacă în mașină există un câmp magnetic remanent, fluxul remanent Φ_{rem} va da naștere unei t.e.m. E_{rem} . Deoarece $E_{rem} = (5 - 10)\%$ din tensiunea nominală, la închiderea întrerupătorului k_e curentul care va circula prin înfășurarea de excitație va fi și el mic. Acest curent de excitație mic va produce un câmp magnetic de excitație de același sens sau de sens contrar cu câmpul remanent, în funcție de sensul curentului care circulă prin înfășurarea de excitație, în ultimă instanță în funcție de poziția pe care se închide întrerupătorul inversor k_e . În cazul în care curentul de excitație are un asemenea sens încât câmpul creat de el întărește câmpul remanent, fluxul polilor de excitație crește, t.e.m. indusă se mărește, curentul de excitație crește și el, fluxul de excitație crește din nou, t.e.m. indusă crește și ea, ș.a.m.d. Prin urmare, dacă în mașină există un câmp remanent și înfășurarea de excitație se conectează corect în paralel cu indusul, este posibilă autoexcitarea generatorului. Dacă maina prezintă câmp magnetic remanent, dar conectarea înfășurării de excitație în paralel cu indusul se face astfel încât curentul de excitație dă naștere unui câmp inductor care se opune câmpului remanent, procesul de autoexcitare nu mai are loc.

Problema care se pune este când se oprește procesul de autoexcitare. Se notează cu e , t.e.m. instantanee la un moment oarecare t , din intervalul în care se desfășoară procesul de autoexcitare și cu i_e curentul respectiv din circuit. Rezistența R_e este rezistența înfășurării de excitație, R_c rezistența reostatului de câmp, L_e inductanța înfășurării de excitație și L_A inductanța înfășurării indusului. Aplicând legea inducției electromagnetice pe circuitul format de înfășurarea rotorului și înfășurarea de excitație, se obține :

$$e = (R_e + R_c + R_A) i_e + \frac{d}{dt} [(L_e + L_A) i_e] . \quad (3.93)$$



La o t.e.m. e dată, corespunde un anumit curent de excitație i_e care verifică ecuația de mai sus. Dar la un anumit curent de excitație i_e , corespunde o anumită t.e.m. e ca la generatorul cu excitație separată, conform dependenței $e = e(i_e)$ dată prin caracteristica de mers în gol (curba a din figura 3.83). Între e și i_e există deci o dublă dependență.

Dacă R_c se păstrează constantă, R_e și R_A sunt constante pentru o mașină dată și căderea de tensiune $(R_e + R_c + R_A)i_e$ variază liniar cu curentul de excitație. Această cădere de tensiune se reprezintă grafic printr-o dreaptă, numită dreapta excitației (curba b din figura 3.83). Panta acestei drepte este

$$\operatorname{tg} \alpha = (R_e + R_c + R_A) K , \quad (3.94)$$

Fig. 3.83. Explicația grafică a amorsării generatorului de curent continuu cu excitație derivație.

în care K este un factor de proporționalitate.

Fiecărei valori R_c a rezistenței reostatului de câmp îi corespunde în figura 3.83 o dreaptă ce trece prin origine, dar

de pantă diferită.

În regim staționar, expresia $(R_e + R_c + R_A)i_e$ este egală cu t.e.m. e .

Segmentul pe ordonată între caracteristica a de mers în gol, $e = e(i_e)$ și dreapta b va fi diferența:

$$e - (R_e + R_c + R_A) i_e = \frac{d}{dt} [(L_e + L_A) i_e] . \quad (3.95)$$

Acest segment poate fi considerat ca o măsură a intensității procesului de autoexcitare.

Procesul se termină când:

$$e - (R_e + R_c + R_A) i_e = 0 , \quad (3.96)$$

iar curentul i_e și respectiv t.e.m. e nu mai variază în timp. Altfel spus, procedeul de autoexcitare se încheie în momentul în care e și i_e au atins valorile corespunzătoare punctului M de intersecție între curbele a și b din figura 3.83.

Procesul de autoexcitare este convenabil pentru funcționarea generatorului, deci punctul M se află în zona cotului de saturare al caracteristicii de mers în gol, sau după acesta. Acest lucru se întâmplă dacă rezistența reostatului R_c are o astfel de valoare, încât dreapta b are o pantă mai mică decât panta corespunzătoare porțiunii liniare a caracteristicii $e = e(i_e)$, $\operatorname{tg} \alpha_{cr}$.

$$K (R_e + R_c + R_A) < \operatorname{tg} \alpha_{cr} . \quad (3.97)$$

Dacă R_c are o valoare mare (curba c din figura 3.83), punctul de intersecție M poate coborî în zona t.e.m. foarte mici, de ordinul de mărime al tensiunii remanente, ceea ce nu permite funcționarea normală a generatorului. Există o valoare critică a reostatului de câmp R_{cr} care satisface relația:

$$K (R_c + R_e + R_A) = \operatorname{tg} \alpha_{cr} . \quad (3.98)$$

Dacă $R_c < R_{cr}$, generatorul se autoexcită, iar dacă $R_c > R_{cr}$, funcționarea normală a generatorului nu mai poate avea loc. Valoarea rezistenței critice R_{cr} depinde de viteza de rotație a mașinii, care dictează pante, respectiv porțiuni liniare ale caracteristicii de mers în gol.

În concluzie, pentru ca generatorul de curent continuu cu excitație derivație să se autoexcite la mersul în gol, trebuie îndeplinite trei condiții:

- existența unui câmp remanent al polilor de excitație. În caz contrar, el trebuie produs prin alimentarea înfășurării polilor de la o sursă oarecare de curent continuu;
- conectarea corectă a înfășurării de excitație în paralel cu înfășurarea indusului;
- fixarea unei valori a rezistenței reostatului de câmp sub valoarea critică corespunzătoare vitezei la care este antrenat rotorul.

Când întrerupătorul K este închis, prin rezistența de sarcină R_s , circulă curentul I:

$$I_A = I_c + I . \quad (3.99)$$

Curentul de excitație:

$$I_e = \frac{U}{R_c + R_e} , \quad (3.100)$$

este determinat de valoarea tensiunii de la bornele generatorului.

Bilanțul puterilor este analog cu cel de la generatorul cu excitație separată, cu precizarea că, puterea $p_{ex} = U I_c$ necesară acoperirii pierderilor în înfășurarea de excitație este preluată din puterea electromagnetică $P_M = E I_A$.

1) Caracteristica de mers în gol $U_0 = U_0(I_c)$, la $I = 0$, $n = \text{const.}$ (n_n). Definirea în acest mod a caracteristicii de mers în gol este necesară, deoarece dacă am impune $I_A = 0$, aceasta ar determina și $I_c = 0$, deci generatorul nu ar funcționa. În mod normal curentul I_c este foarte mic (câteva procente) din curentul nominal. Căderile de tensiune din înfășurările rotorului, a polilor auxiliari, de compensare și pe contactele perie - colector se pot neglija.

Tensiunea U_0 de mers în gol este aproximativ egală cu E . Din această cauză caracteristica de mers în gol a generatorului cu excitație derivație definită mai sus coincide practic cu cea de la generatorul cu excitație separată, prezentând și aceeași alură (figura 3.73).

2) Caracteristica externă $U = U(I)$, pentru $R_c = \text{const.}$ și $n = \text{const.}$ (n_n). Curentul I_c este impus de tensiunea la borne U și nu mai poate fi menținut constant dacă R_c se menține constantă, conform relației 3.100.

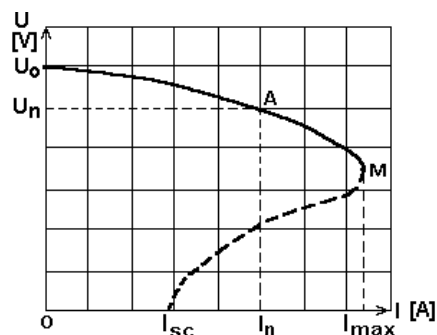


Fig. 3.84. Caracteristica externă a generatorului cu excitație derivație.

La generatorul cu excitație derivație, tensiunea la borne scade pe măsură ce crește curentul de sarcină nu numai din cauza reacției indusului și a căderilor rezistive de tensiune din circuitul rotoric ci și din cauza micșorării curentului de excitație I_c pe măsură ce tensiunea la borne scade. Alura caracteristicii externe este necorespunzătoare, conform figurii 3.84.

La micșorarea rezistenței R_s , curentul crește până la valoarea limită I_{max} care este $(1 - 2.5)I_n$, după care mașina se dezexcită și curentul scade rapid (porțiunea trasată cu linie întreruptă). Punctul M corespunde unei rezistențe R_s care face ca panta drepte de excitație să devină mai mare ca panta critică, generatorul se dezexcită și curentul scade la valoarea $I_{sc} = E_{rem} / R_A$, destul de mică. Această formă a caracteristicii se obține prin variații lente a sarcinii, neputându-se trage concluzia că un regim de scurtcircuit brusc la bornele generatorului nu ar fi periculos. În realitate, la scurtcircuitul brusc, curentul este tot atât de mare ca la generatorul cu excitație separată, deoarece în primele momente ale scurtcircuitului, curentul de excitație și t.e.m. indusă nu se modifică datorită inerției magnetice a înfășurării de excitație.

Variația de tensiune de la mersul în gol la mersul în sarcină nominală poate atinge valori cuprinse între (25 - 40) %.

3) Caracteristica de reglaj $I_c = I_c(I)$ pentru $n = \text{const.}$ (n_n) și $U = \text{const.}$ (U_n), nu se deosebește ca alură de caracteristica de reglaj a generatorului cu excitație separată. Deosebirea constă în faptul că la generatorul derivație creșterea curentului de excitație pentru a menține tensiunea U la bornele mașinii constantă este mai mare la același curent de sarcină, deoarece căderea de tensiune în sarcină este mai mare.

3.7.2.3. Caracteristicile generatorului de curent continuu cu excitație serie

Schema electrică a generatorului cu excitație serie este prezentată în figura 3.85.

Înfășurarea de excitație este conectată în serie cu înfășurarea indusului. Din această cauză $I_e = I_A$. Pentru ca procesul de autoexcitare să aibă loc, trebuie închis întrerupătorul k . Spre deosebire de generatorul derivație, autoexcitarea generatorului serie nu se poate produce în regim de funcționare în gol.

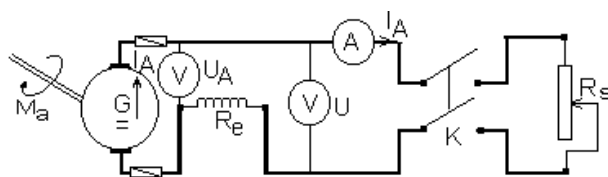


Fig. 3.85. Schema generatorului cu excitație serie.

Apariția fenomenului de autoexcitare impune existența a trei condiții:

- existența unui câmp remanent în mașină;
- conectarea înfășurării de excitație în așa fel încât curentul care o parcurge (același cu curentul de sarcină) să producă un câmp magnetic indus în același sens cu câmpul magnetic remanent;
- rezistența de sarcină trebuie să fie mai mică decât valoarea R_{cr} care satisface relația:

$$k(R_A + R_e + R_{scr}) = \operatorname{tg} \alpha_{cr} \quad (3.101)$$

1) **Caracteristica de mers în gol** nu are sens, deoarece dacă $I_A = 0$ și $I_e = 0$, tensiunea la bornele generatorului fiind egală cu E_{rem} . Pentru a obține informații asupra magnetizării mașinii, se poate ridica o caracteristică de mers în gol alimentând înfășurarea de excitație de la o sursă de tensiune separată. Se va obține o caracteristică de mers în gol asemănătoare cu cea a generatorului cu excitație separată.

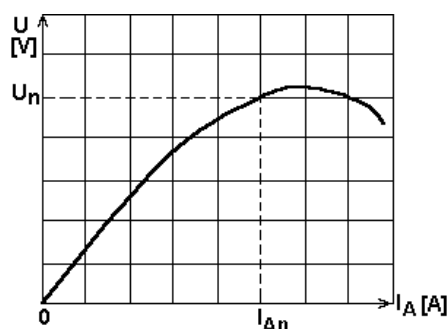


Fig. 3.86. Caracteristica externă a generatorului cu excitație serie.

2) **Caracteristica externă $U = U(I_A)$** , la $n = \text{const.}(n_n)$ dar la $I_e = I_A = \text{variabil}$. Când I_A ia valori între 0 și I_{An} tensiunea U la bornele mașinii crește aproximativ liniar cu curentul de sarcină. La curenți mai mari de $1,5I_{An}$, tensiunea scade datorită saturației circuitului magnetic și a efectului pronunțat al reacției indusului (Fig. 3.86).

Este singura caracteristică externă care pleacă din zero.

Deoarece curentul de sarcină este și curent de excitație, tensiunea la borne variază în limite largi cu valoarea curentului de sarcină. Din această cauză, generatorul serie nu poate fi folosit ca sursă de tensiune constantă. La $R_s > R_{scr}$ generatorul serie se dezexcită, lăsând eventualele receptoare nealimentate. La scurtcircuit pot apărea curenți

foarte periculoși pentru mașină.

Generatoarele serie nu se construiesc ca surse de tensiune continuă. Studiul lor se face deoarece în anumite scheme de frânare electrică motoarele serie de tracțiune trec în regim de generator debitând putere pe o rezistență de sarcină constantă.

3.7.2.4. Caracteristicile generatorului de curent continuu cu excitație mixtă

Pentru ridicarea caracteristicilor generatoarelor cu excitație mixtă se folosește schema din figura 3.87.

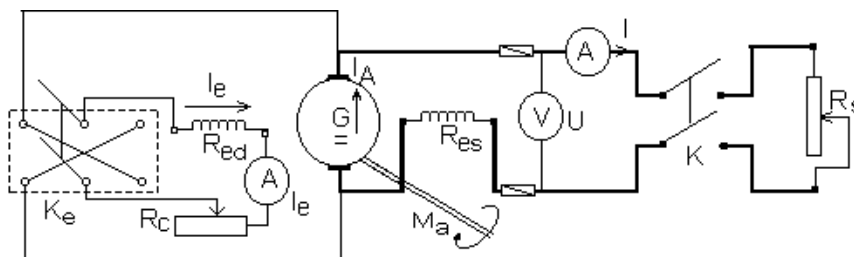


Fig. 3.87. Schema generatorului de curent continuu cu excitație mixtă.

Generatorul are două înfășurări de excitație: o înfășurare de excitație derivație și o înfășurare de excitație serie. De obicei înfășurarea derivație constituie înfășurarea de excitație de bază, cea serie fiind folosită pentru modificarea caracteristicii externe.

Dacă fluxurile celor două înfășurări de excitație au același sens, generatorul are excitație *adițională*. În caz contrar, generatorul are excitație *diferențială*.

1) **Caracteristica de mers în gol** este identică cu caracteristica la gol a unui generator derivație, deoarece înfășurarea de excitație serie nu este parcursă de curent.

2) **Caracteristica externă** se poate modifica în raport cu caracteristica externă a unui generator derivație (fig. 3.88,a) în funcție de ponderea și sensul înfășurării de excitație serie. Dacă se dorește ca la curentul de sarcină nominal I_n tensiunea la bornele generatorului să fie la valoarea nominală U_n ca la mersul în gol, înfășurarea de excitație serie se dimensionează corespunzător și se conectează adițional (Fig. 3.88,b), realizându-se o *compundare normală*.

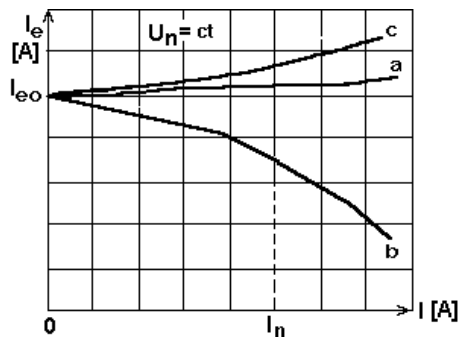


Fig. 3.88. Caracteristicile externe ale generatorului cu excitație mixtă.

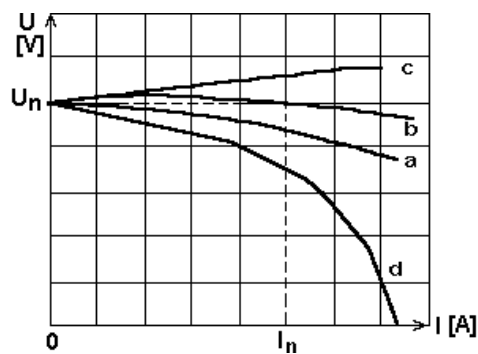


Fig. 3.89. Caracteristicile de reglaj ale generatorului cu excitație mixtă.

Dacă se mărește numărul de spire al înfășurării serie se obține o supracompundare (Fig. 3.88,c), tensiunea la bornele generatorului crește odată cu mărirea sarcinii dacă circuitul magnetic nu este saturat. Fenomenul se datorează creșterii fluxului rezultat. Dacă înfășurările de excitație se conectează diferențial caracteristica externă devine căzătoare (Fig. 3.88,d) deoarece fluxul rezultat scade odată cu creșterea curentului de sarcină. Alina unei astfel de caracteristici recomandă utilizarea generatorului cu excitație mixtă la sudarea electrică.

3) Caracteristica de reglaj are sens pentru generatoarele compundate normal. Alina caracteristicilor de reglaj (Fig. 3.89) este influențată puternic de modul de conectare al celor două înfășurări de excitație (montaj derivație -a pentru comparație, adițional -b sau diferențial -c). La montaj adițional (b), pentru a menține tensiunea la borne constantă, odată cu creșterea sarcinii este necesară reducerea curentului de excitație. La sarcini mici, când solenația creată de înfășurarea serie provoacă o creștere nesemnificativă a solenației rezultante, pentru menținerea constantă a tensiunii nominale curentul de excitație se reduce puțin în timp ce la valori mari ale curentului de sarcină reducerea curentului de excitație devine semnificativă.

3.3.2.5. Generatoare de curent continuu pentru sudare

Generatoarele de curent continuu pentru sudare, numite și convertizoare de sudură, trebuie să posede o caracteristică externă căzătoare pentru a putea asigura stabilitatea arcului electric și controlul curentului de sudură. Caracteristicile externe căzătoare pot fi obținute ca la generatorul cu excitație mixtă diferențială. Schema de principiu a convertizorului de sudură este dată în figura 3.90 -a).

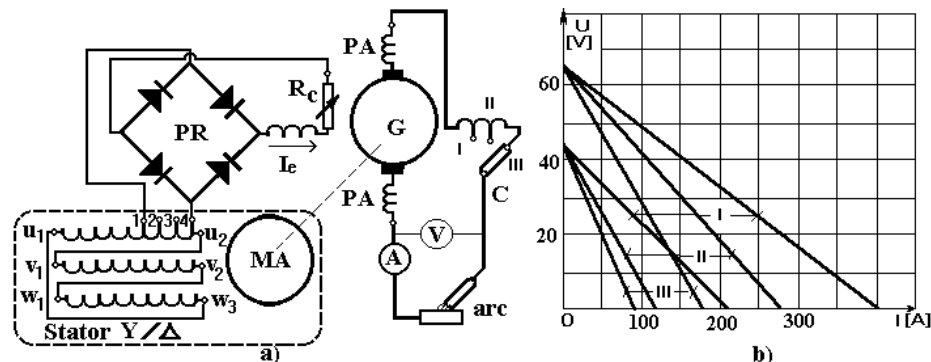


Fig. 3.90. Schema și caracteristicile convertizorului de sudură.

Convertizorul de sudură este antrenat cu ajutorul unui motor asincron **MA** la care pornirea se face după o schemă stea-triunghi. Înfășurarea de excitație separată este alimentată prin intermediul punții redresoare **PR** de la prizele 1,2,3,4 ale înfășurării statorice a motorului de antrenare, iar curentul de excitație se reglează cu ajutorul reostatului de câmp **R_c** de construcție circulară. Consumul realizat de înfășurarea de excitație separată este redus încât gradul de nesimetrie introdus în înfășurarea motorului de antrenare este nesemnificativ.

Înfășurarea de excitație serie este realizată cu prize ce permit introducerea sau scoaterea din circuit unui anumit număr de spire, prin intermediul comutatorului **C**, încât efectul înfășurării serie să fie mai pronunțat (poziția III), mijlociu pentru poziția II, sau eliminat pentru poziția I când înfășurarea de excitație serie este scoasă complet din circuit. Pentru poziția **I**, se obține curentul de scurtcircuit cel mai mare, înclinarea caracteristicii externe fiind determinată numai de efectul demagnetizant al reacției longitudinale a indusului, efect realizat prin deplasarea perii față de axa transversală. Pentru poziția **III**, se obține curentul de scurtcircuit cel mai mic, înclinarea mare a caracteristicii externe fiind determinată de această dată și de influența înfășurării de excitație serie (Fig. 3.90-b). Prin modificarea curentului de excitație se schimbă poziția vârfului fascicolului caracteristicilor externe.

3.8. MOTOARE DE CURENT CONTINUU

3.8.1. CONSIDERAȚII GENERALE. ECUAȚIA DE TENSIUNI. BILANȚUL PUTERILOR.

Mașina de curent continuu funcționează în regim de motor, dacă primește putere electrică la borne și dezvoltă putere mecanică la arbore. Cuplul mecanic la arbore ia naștere numai în cazul în care excitația produce fluxul Φ în întrefier iar indusul este parcurs de curent. Cuplul electromagnetic are o expresie similară cu cea dedus la generator:

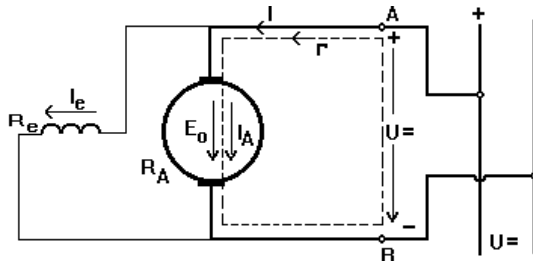


Fig. 3.91. Schema electrică de principiu la un motor cu excitație derivație.

$$M = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{a} N I_A \Phi, \quad (3.102)$$

și ținând cont că p , a , N sunt constante pentru o mașină dată, relația devine:

$$M = K_m I_A \Phi. \quad (3.102')$$

După modul cum se realizează excitația, motoarele se clasifică în: *motoare cu excitație derivație (paralel)*, *cu excitație serie* și *mixtă (compund)*. Tensiunea electromotoare indusă pe o cale de curent este:

$$E_o = - \frac{p}{a} \frac{n}{60} N \Phi. \quad (3.103)$$

Semnul minus al t.e.m. induse arată că E_o se opune curentului I_A absorbit de indus (sensul t.e.m. într-o latură a unei secții coincide cu sensul produsului vectorial dintre viteza tangențială și inducția de sub un pol de excitație).

Fenomenul se poate înțelege ușor dacă se exemplifică pe o mașină de curent continuu *funcționarea reversibilă* conform figurii 3.92.

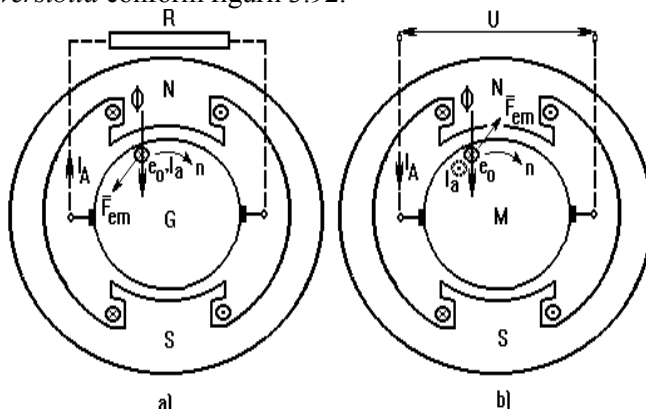


Fig. 3.92. Principiul reversibilității mașinii de curent continuu.

În scopul determinării sensului t.e.m. induse se utilizează metoda clasică a *regulii palmei drepte* iar pentru determinarea sensului forței electromagnetice se aplică *regula palmei stângi*, în ambele regimuri de funcționare. În cazul funcționării ca generator (Fig. 3.92-a) se constată că sensul tensiunii electromotoare induse în conductoarele unei căi de curent coincide cu sensul curentului I_A ce străbate conductoarele înseriate în calea de curent respectivă, în timp ce sensul forței electromagnetice este contrar sensului vitezei de rotație n a rotorului, sens impus de motorul de antrenare. Se reține faptul că la generator cuplul electromagnetic se manifestă ca un cuplu rezistent sau de frânare. În cazul funcționării mașinii în regim de motor, pentru a obține un cuplu electromagnetic activ (în același sens cu sensul de rotație) este necesar ca sensul curentului ce străbate înfășurarea indusului să se schimbe față de cel de la generator (Fig. 3.92-b). Se constată că t.e.m. indusă devine de sens contrar curentului prin indus, fapt pentru care unii autori folosesc și noțiunea de tensiune contraelectromotoare. Pentru a evita eventuale confuzii, se folosește frecvent ca ecuație de tensiuni pentru motor relația:

$$U = K_e n \Phi + R_A I_A. \quad (3.104)$$

Bilanțul energetic al motorului de curent continuu cu excitație separată se poate reprezenta grafic prin diagrama din figura 3.93. Pierderile reprezentate în această figură au semnificația dată în capitolul 3.7.1.

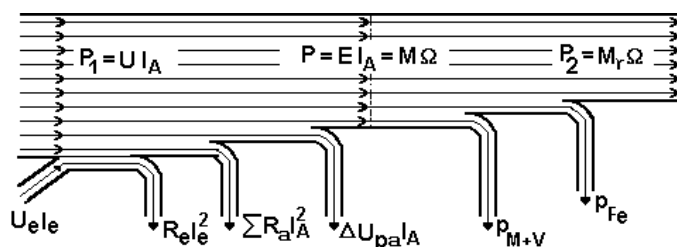


Fig. 3.93. Bilanțul de puteri la motorul cu excitație separată.

Puterea absorbită de motor P_1 este în cazul motorului, putere electrică din care se acoperă pierderile prin efect electrocaloric în înfășurarea indusului și pierderile la contactul perie colector, obținându-se puterea electromagnetică P care se transferă prin întrefier. Din această putere se scad pierderile mecanice și prin ventilație, precum și pierderile în fier, obținându-se puterea mecanică P_2 ce este furnizată la arborele motor pentru a acționa mașina de lucru.

Funcționarea unui motor de curent continuu este definită de caracteristicile de pornire, funcționare, frânare și de reglare a turației.

În procesul pornirii interesează modul de variație în timp al curentului absorbit, cuplului electromagnetic dezvoltat, vitezei de rotație precum și duratei pornirii din punct de vedere al eficienței.

În procesul funcționării în regim staționar a motoarelor de curent continuu interesează modul de variație a vitezei n , cuplului M , randamentului η funcție de puterea la arbore la care se adaugă caracteristica mecanică $n = (M)$ și caracteristica de turație $n = (I)$.

Caracteristicile de reglare precum și caracteristicile de frânare se deduc prin aplicarea diferitelor metode de tratate la capitolele consacrate.

În cadrul metodelor de reglare a vitezei motoarelor de curent continuu se vor distinge caracteristici funcție de metodele folosite pentru diversele tipuri de motoare (cu excitație separată, serie și paralel).

În categoria caracteristicilor de frânare se determină, în general, modul de variație al vitezei de rotație în funcție de valoarea cuplului de frânare (de natură electromagnetică, mecanică sau mixtă).

3.8.2. PORNIREA MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU

Principalele aspecte legate de pornirea motoarelor de curent continuu se referă la limitarea curentului la pornire la valori care să nu pună în pericol înfășurarea indusului și existența unui cuplu electromagnetic de pornire, suficient de mare, care să asigure autonomia pornirii. Din expresia cuplului electromagnetic se constată că reducerea curentului prin indus micșorează valoarea cuplului la pornire, reducere care nu poate fi compensată de creșterea fluxului de excitație decât până în momentul apariției saturației circuitului magnetic.

În practică se utilizează următoarele metode de pornire a motoarelor de curent continuu:

A - conectarea directă la rețea;

B - pornirea cu reostat de pornire;

C - pornirea cu tensiune redusă.

Sunt situații în care este posibilă aplicarea combinată a ultimelor metode.

A. Pornirea motoarelor de curent continuu prin conectarea directă la rețea

Pornirea motoarelor de curent continuu prin conectarea directă la rețea este cea mai simplă metodă de pornire care necesită aparatură puțină și ieftină, în schimb se pot înmulți numărul defectelor care pot apare datorită șocului mare de curent absorbit din rețea în momentul conectării motorului:

- solicitarea exagerată a mecanismului de cuplare cu mașina de lucru, datorită existenței unui cuplu de accelerare ridicat;
- pe colectorul motorului poate apare cercul de foc;
- căderea importantă de tensiune în rețeaua de alimentare perturbă buna funcționare a celorlalți receptori conectați la rețea;
- funcționarea aparaturii de protecție și de măsură din circuitul indusului se complică;
- în cazul în care durata pornirii este mai mare (instalație cu inerție mare sau prezența unui cuplu rezistent la arborele mașinii de lucru) există riscul încălzirii exagerate a înfășurării motorului.

Șocul de curent la pornire prin conectarea directă la rețea a motorului de curent continuu se explică ușor cu ajutorul relației (3.104) din care se deduce expresia curentului prin indus:

$$I_A = \frac{U - K_e n \Phi}{R_A} \quad (3.105)$$

Deoarece în momentul pornirii viteza este nulă și tensiunea electromotoare devine nulă iar curentul prin indus atinge valoarea maximă:

$$I_{A \text{ p max}} = \frac{U}{R_A} \approx (10 \dots 20) I_{AN} \quad (3.106)$$

valoare a curentului prin indus stabilită numai dacă rotorul nu începe să se rotească. În situația în care rotorul începe să se rotească înainte de atingerea valorii maxime de către curent, apare t.e.m. indusă care determină atingerea unei valori mai mici I_p care descrește exponențial până la valoarea I_f în timp ce viteza se stabilizează la valoarea n_f (Fig. 3.94). Durata pornirii t_p este de ordinul zecimilor de secundă (la pornirea în sarcină valoarea se dublează) ceea ce face ca încălzirea înfășurării indusului să fie neglijabilă.

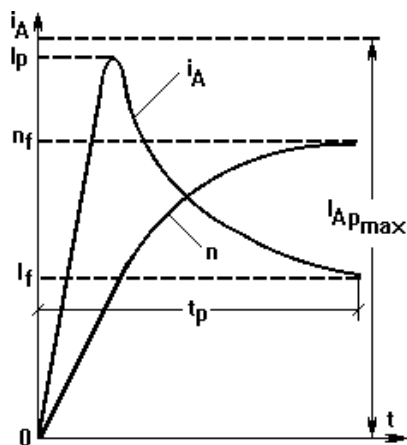


Fig. 3.94. Variația curentului și a vitezei la pornirea directă.

În figura 3.95 se prezintă schema de principiu a pornirii automatizate reversibile utilizându-se butoanele de comandă S1 (pornire stânga), S2 (pornire dreapta) și S3 (oprire indiferent de sens) precum și două contactoare K1 (pornire stânga), K2 (pornire dreapta), la un motor cu excitație separată.

Pentru alimentarea părții de comandă a schemei se închide întrerupătorul Q, fiind alimentată și înfășurarea de excitație $E_1 - E_2$ din câmpul 4, protejată prin siguranțele fuzibile F3 și F4.

Pentru a realiza pornirea spre stânga se apasă pe butonul S1 din câmpul 5, alimentându-se astfel bobina contactorului K1, care acționează și închide contactele sale principale din câmpul 2 punând sub tensiune indusul motorului care începe să se rotească spre stânga. În același timp contactorul K1 acționează și cele două contacte auxiliare din câmpul 6 și respectiv 7. Sub bobinele contactoarelor K1 și K2 se indică cu linie mai groasă circuitele în care sunt plasate contactele principale ale contactorului respectiv și cu linie mai subțire contactele auxiliare. Contactul normal deschis este reprezentat printr-o linie simplă în

timp ce contactul normal închis este reprezentat printr-o linie tăiată. Contactul auxiliar K1 din câmpul 6, numit și *contact de automenținere*, permite alimentarea bobinei contactorului K1 și după ce butonul S1 nu mai este acționat și revine în poziția normal. Contactul auxiliar normal închis K1 din câmpul 7 se deschide când bobina contactorului K1 este alimentată și în același timp împiedică alimentarea bobinei contactorului K2.

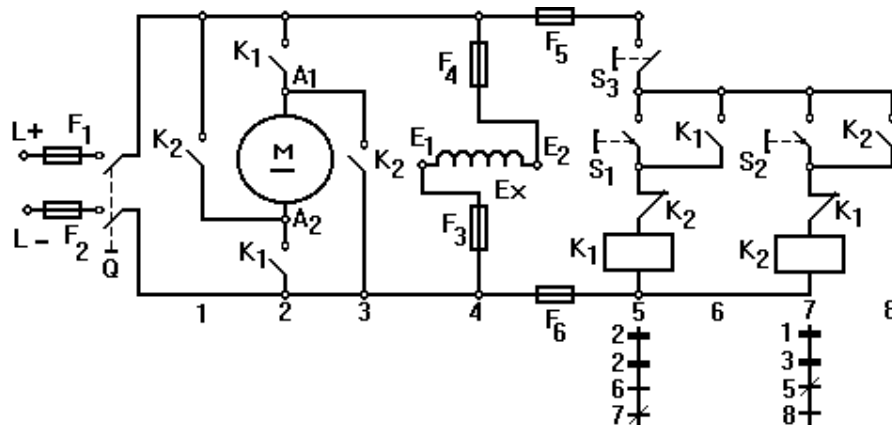


Fig. 3.95. Schema electrică a pornirii directe reversibile.

Pentru schimbarea sensului de rotație, se apasă mai întâi pe butonul de oprire S3, readucându-se instalația în poziție de repaos deoarece se întrerupe alimentarea motorului prin întreruperea alimentării bobinei contactorului K1 din câmpul 5. În continuare se apasă butonul S2 făcând posibilă alimentarea bobinei contactorului K2 care își închide contactele principale K2, plasate în câmpurile 1 și 3 și contactul de autoblocare K2 din câmpul 8. În același timp se deschide contactul auxiliar K2 din câmpul 5 fapt ce împiedică alimentarea bobinei contactorului K1 și eliminarea posibilității efectuării unei manevre greșite. La indusul motorului se va aplica o tensiune de polaritate inversă determinând schimbarea sensului de rotație întrucât sensul curentului prin înfășurarea de excitație rămâne neschimbat.

B. Pornirea motoarelor de curent continuu cu reostat de pornire

Metoda pornirii motoarelor de curent continuu cu reostat de pornire se folosește pentru limitarea curentului absorbit de la rețea la valori impuse, care să nu perturbe buna funcționare a celorlalți receptori. Din considerente termice legate de îmbătrânirea izolației precum și funcție de valoarea căderii de tensiune în rețea, provocată de șocul de curent din momentul pornirii, se consideră că valoarea reostatului de pornire R_p poate fi aleasă astfel încât curentul prin indus, în momentul pornirii, să nu depășească valoarea stabilită prin relația:

$$I_{Ap} = \frac{U}{R_A + R_p} \approx (1,5 \dots 2,0) I_{AN} \quad (3.107)$$

În figura 3.96 este prezentată schema de pornire a unui motor cu excitație derivație, la care se fac precizări importante pentru valoarea reostatului de pornire R_p și reostatului de câmp R_c în momentul pornirii (**reostatul de pornire R_p este pus pe valoarea maximă pentru a limita curentul de pornire ce parcurge indusul, iar reostatul de câmp este pus pe valoare minimă pentru a asigura un cuplu electromagnetic maxim prin valoarea fluxului creat de curentul ce parcurge înfășurarea de excitație**).

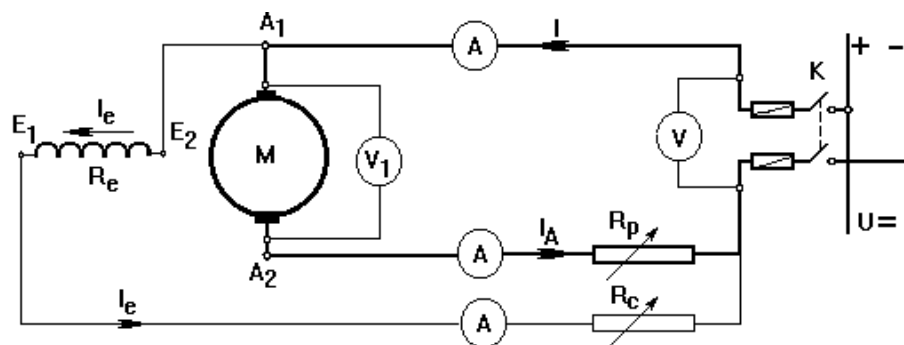


Fig. 3.96. Schema de principiu pentru pornirea motoarelor cu excitație derivație.

În practică sunt situații în care înfășurarea de excitație derivație este legată în paralel direct cu indusul (după reostatul de pornire), conform figurii 3.97, ceea ce determină alimentarea acesteia de la o tensiune foarte mică egală cu căderea de tensiune pe indus.

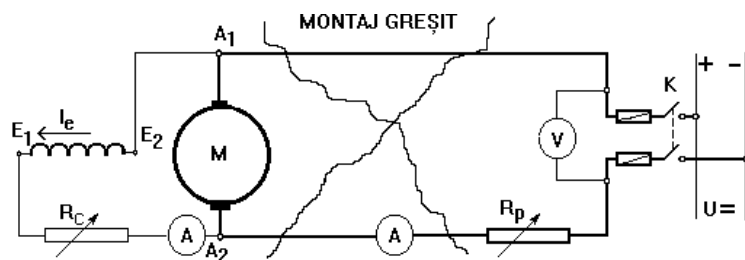


Fig. 3.97. Schema greșită pentru pornirea motoarelor cu excitație derivație.

Cea mai mare parte din tensiunea rețelei, aplicate motorului la pornire, se repartizează pe reostatul de pornire a cărui valoare este mult mai mare decât rezistența indusului. În această situație, datorită faptului că valoarea fluxului de excitație se reduce simțitor, cuplul electromagnetic de pornire se asigură prin creșterea exagerată a curentului din indus și în consecință, schema trebuie deconectată de la rețea.

În figura 3.98 se prezintă schema pentru pornirea manuală cu un reostat de pornire în patru trepte legate în serie, scoțându-se prize legate la contacte dispuse pe un sector circular pe care calcă un cursor legat la borna L. Pentru alimentarea permanentă a înfășurării de excitație reostatul de pornire este prevăzut cu un contact continuu sub formă de sector circular, legat la borna M la care se racordează înfășurarea de excitație iar indusul se leagă la borna R care reprezintă începutul reostatului de pornire.

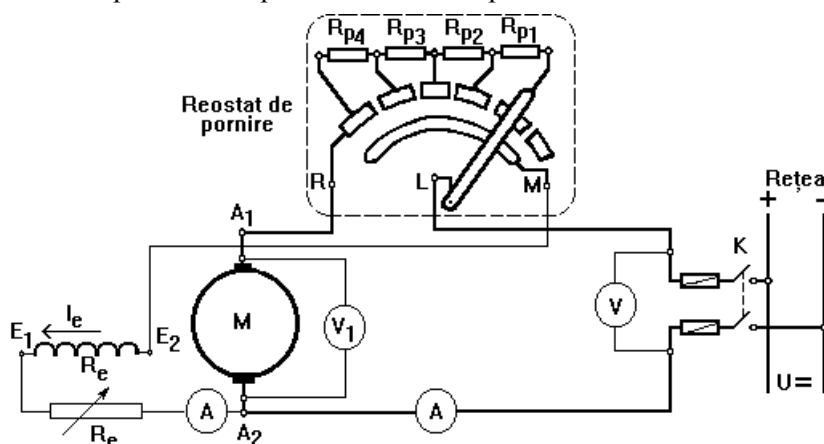


Fig. 3.98. Schema pentru pornirea motoarelor cu excitație derivație cu reostat manual cu patru trepte de rezistență.

Pornirea motorului cu excitație derivație utilizând un reostat de pornire cu mai multe trepte poate fi explicată cu ajutorul caracteristicii $n = f(I_A)$ dedusă cu ajutorul relației:

$$I_A = \frac{U - K_e n \Phi}{R_A + R_p}, \quad (3.108)$$

și reprezentată în figura 3.99.

Caracteristicile $n = f(I_A)$, obținute din relația (3.108) pentru diverse valori ale rezistenței de pornire, se numesc *caracteristici artificiale* iar caracteristica corespunzătoare rezistenței indusului se numește *caracteristică naturală*.

Toate caracteristicile converg în punctul n_0 (*viteză de mers în gol*) a cărei valoare se determină din relația (3.108) pentru $I_A = 0$ și rezultă:

$$n_0 = \frac{U}{K_e \Phi} \quad (3.109)$$

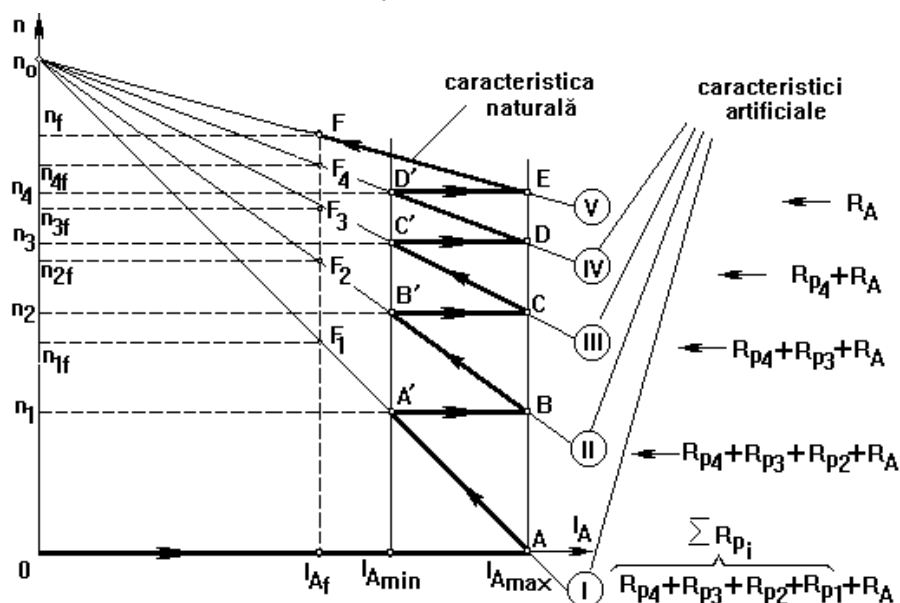


Fig. 3.99. Caracteristicile $n = f(I_A)$ pentru diverse valori ale reostatului de pornire.

Dacă viteza este nulă și se neglijează regimul tranzitoriu electric, curentul prin înfășurarea indusului este:

$$I_{A \max} = \frac{U}{R_A + R_p} \quad (3.110)$$

situație marcată prin punctul A de pe caracteristica I. Pe măsură ce rotorul accelerează curentul scade către valoarea finală I_{Af} iar când a ajuns la o valoare minimă de $(1,1-1,25)I_N$, corespunzătoare punctului A', se scurtcircuitează rezistența R_{p1} , iar punctul de funcționare se mută pe caracteristica II, în B la care corespunde viteza n_1 . Treptele de rezistență sunt astfel calculate, încât în momentul scoaterii lor din circuit (sau scurtcircuitării, dacă pornirea se face prin folosirea contactorilor conform schemei de principiu din figura 3.100), curentul prin indus se modifică de la valoarea I_{Amin} la valoarea I_{Amax} .

Procesul de pornire continuă până sunt scoase din circuit toate treptele reostatului de pornire iar punctul de funcționare se stabilește în F, pe caracteristica naturală. Este sugestivă, pentru procesul de pornire, variația în timp a curentului prin indus și a vitezei de rotație la pornirea cu reostat dacă se stabilesc relațiile analitice care justifică teoretic caracteristicile din figura 3.101.

În acest scop trebuie să se stabilească pe cale analitică, variația vitezei și curentului în timpul pornirii. Pentru aceasta se utilizează ecuația de tensiuni a motorului precum și expresia cuplului electromagnetic:

$$U = K_e n \Phi + R_A I_A ; \quad M = K_m I_A \Phi \quad (3.111)$$

la care se atașează ecuația de mișcare, neglijându-se regimul tranzitoriu electromagnetic deoarece se consideră fluxul de excitație constant:

$$M - M_r = J \frac{d\Omega}{dt} = 2 \pi J \frac{dn}{dt} \quad (3.112)$$

Eliminând I_A și M din relațiile (3.111) și (3.112) se obține o ecuație diferențială pentru viteza de rotație:

$$n = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{2\pi J R_A}{K_e K_m \Phi^2} \frac{dn}{dt} - \frac{R_A M_r}{K_e K_m \Phi^2} \quad (3.113)$$

în care se fac notațiile:

$$n_0 = \frac{U}{K_e \Phi} ; \quad T = \frac{2\pi J R_A}{K_e K_m \Phi^2} ; \quad \Delta n_r = \frac{R_A M_r}{K_e K_m \Phi^2} ;$$

în care: n_0 – viteza de mers în gol; T – constanta electromecanică de timp; Δn_r – căderea de viteză corespunzătoare cuplului rezistent M_r de valoare constantă.

Cu aceste notații, relația (3.113) devine:

$$T \frac{dn}{dt} + n = n_0 - \Delta n_r, \quad (3.114)$$

și are soluția generală de forma:

$$n = n_0 - \Delta n_r + k e^{-t/T}, \quad (3.115)$$

în care constanta de integrare k se determină din condiții initiale. Dacă la $t=0$, viteza de rotație are o valoare inițială n_i iar relația (3.115) devine:

$$n = n_0 - \Delta n_r + (n_i - n_0 + \Delta n_r) e^{-t/T}. \quad (3.116)$$

Dacă se particularizează expresia vitezei la pornire ($t=0$, $n_i=0$) se obține

$$n = (n_0 - \Delta n_r) (1 - e^{-t/T}) = n_f (1 - e^{-t/T}). \quad (3.117)$$

Din relația (3.117) se observă că viteza variază exponențial către valoarea finală, mărimea constantei electromecanice de timp fiind determinată și de valoarea momentului de inerție J . Timpul t_p după care motorul atinge turația finală este de $(4-5)T$. Când pornirea se face cu ajutorul reostatului de pornire, prin modificarea valorii acestuia se modifică și valoarea constantei electromecanice de timp. Dacă se notează cu i numărul de trepte de la reostatul de pornire, atunci pentru intervalul (n_{i-1}, n_i) viteza se determină cu relația:

$$n = n_{fi} (1 - e^{-t/T_i}) + n_{i-1} e^{-t/T_i}, \quad (3.117')$$

unde T_i se calculează cu aceeași relație numai că în locul rezistenței indusului se ia în considerare valoarea:

$$R_A + R_p - \sum_{i=1}^{i-1} R_{pi}. \quad (3.118)$$

Curba de variație a vitezei de rotație se compune din porțiuni succesive de exponențiale de la valoarea inițială zero până la viteza finală.

Modul de variație a curentului prin indus se determină înlocuind în relația (3.112) expresia cuplului electromagnetic dedus cu relația (3.102):

$$K_m I_A \Phi - M_r = 2\pi J \frac{dn}{dt}. \quad (3.119)$$

Din relația (3.112) se deduce derivata vitezei:

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{k}{T} e^{-t/T}, \quad (3.120)$$

care se înlocuiește în relația (3.119) și se obține:

$$I_A = -k' e^{-t/T} + I_f, \quad (3.121)$$

în care s-au făcut notațiile:

$$k' = \frac{2\pi J k}{T K_m \Phi}; \quad I_f = \frac{M_r}{K_m \Phi}. \quad (3.122)$$

În relația (3.121) se pun condițiile inițiale (la $t=0$; $I_A = I_{Amax}$) și se obține:

$$I_A = I_{Amax} e^{-t/T} + I_f (1 - e^{-t/T}). \quad (3.123)$$

Ca și în cazul vitezei, constanta electromecanică de timp se calculează în funcție de valoarea reostatului de pornire ce se află în circuit în acel moment.

Comanda automată a pornirii poate fi realizată în funcție de viteză, în funcție de curent și în funcție de timp.

a) - Comanda automată a pornirii motoarelor cu excitație derivație în funcție de viteză

Pentru comanda automată a pornirii motoarelor cu excitație derivație în funcție de viteză este necesară măsurarea vitezei urmată de acționarea aparatului corespunzător. Viteza poate fi apreciată indirect, prin t.e.m. indusă în înfășurarea rotorului, dacă se ține cont că fluxul de excitație se menține constant. În figura 3.102 este prezentată schema sistemului de comandă automată a pornirii, în funcție de viteza motoarelor cu excitație derivație, când se folosesc patru trepte de rezistență la reostatul de pornire.

Schema cuprinde: siguranțele fuzibile F1, F2, F3 pentru protecția circuitelor de forță și de comandă, un releu termic F4 pentru protecția motorului la suprasarcină, un întrerupător Q cu rol de separator care se manevrează numai când motorul este în repaus, două butoane de comandă cu revenire în poziție normală (S1 pentru comanda pornirii și S2 pentru oprire), un contactor de linie K bifazat, cu un contact auxiliar de autoblocare și patru contactoare de scurtcircuitare K1, K2, K3, K4.

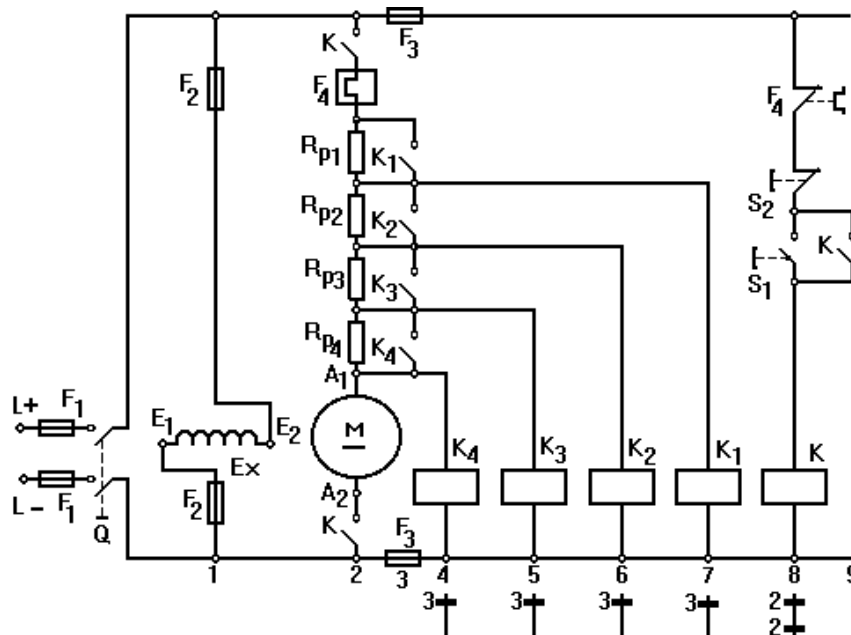


Fig. 3.102. Schema de pornire în trepte de viteză a motorului cu excitație separată.

Prin închiderea întrerupătorului Q se realizează alimentarea înfășurării de excitație și pregătirea schemei de comandă pentru funcționare. Alimentarea bobinei contactorului K din câmpul 8 se realizează prin apăsarea butonului de pornire S1 și prin anclanșare se închide contactul de automenținere K din câmpul 9, alimentând în continuare bobina contactorului K, după revenirea în poziția normal deschis a butonului S1. Concomitent se închid și contactele K, din câmpul 2, alimentându-se indusul motorului care va fi parcurs de curentul I_{Amax} (punctul A) și va începe să se rotească datorită prezenței cuplului electromagnetic. Curentul prin indus va scădea exponențial până în A' conform relației (3.123) la valoarea I_{Amin} iar viteza va atinge valoarea n_1 pentru care tensiunea la bornele contactorului K1 (numit și contactor de accelerare) devine:

$$U_{K1} = K_e n_1 \Phi + (R_A + R_{p4} + R_{p3} + R_{p2} + R_{p1}) I_{Amin} \quad (3.124)$$

Această tensiune este egală cu tensiunea de anclanșare a contactorului K1 care își închide contactul K1, din câmpul 3, scurtcircuitând rezistența R_{p1} care este calculată în așa fel încât curentul prin indus (după scurtcircuitare) să atingă din nou valoarea I_{Amax} . Punctul de funcționare se mută pe altă caracteristică, din A' în B, rotorul accelerează până la viteza n_2 , determinând scăderea curentului (după aceeași lege exponențială, dar cu altă constantă de timp) prin indus până la valoarea I_{Amin} (punctul B'). Corespunzător vitezei n_2 se obține la bornele contactorului K2 tensiunea de anclanșare:

$$U_{K2} = K_e n_2 \Phi + (R_A + R_{p4} + R_{p3} + R_{p2}) I_{Amin} \quad (3.125)$$

Contactorul K2 își închide contactul K2, din câmpul 3, scurtcircuitând rezistența R_{p2} care este calculată în așa fel încât curentul prin indus să atingă din nou valoarea I_{Amax} . Punctul de funcționare se mută pe altă caracteristică din B' în C, rotorul accelerează până la viteza n_3 determinând scăderea curentului (după aceeași lege exponențială dar cu altă constantă de timp) prin indus până la valoarea I_{Amin} (punctul C'). Corespunzător vitezei n_3 se obține la bornele contactorului K3, tensiunea de anclanșare:

$$U_{K3} = K_e n_3 \Phi + (R_A + R_{p4} + R_{p3}) I_{Amin} \quad (3.126)$$

care determină închiderea contactului, K3 din câmpul 3, scurtcircuitând rezistența R_{p3} .

Procesul decurge asemănător până se scurtcircuitează și ultima treapă de rezistență R_{p4} după care punctul de funcționare se stabilizează în F pentru care valoarea curentului prin indus este determinată de mărirea cuplului rezistent M_r de la arborele motor. Pentru această valoare viteza rotorului se stabilizează la valoarea n_r , corespunzător relației (3.117).

Comanda pornirii automate în funcție de viteză se aplică la mașinile de puteri reduse, schema prezentând avantajul utilizării numai a contactoarelor de accelerare fără alte relee. Principalul dezavantaj al metodei constă în dificultățile de reglare corespunzătoare a tensiunilor de anclanșare a contactelor de accelerare, datorită variației importante a valorii rezistențelor de pornire de la starea rece la starea caldă, după un număr de porniri. Deoarece rezistențele de pornire se calculează pentru un regim de funcționare de scurtă durată se reduce prețul de cost și gabaritul acestora.

b) - Comanda automată a pornirii motoarelor cu excitație derivație în funcție de curent

Această metodă se utilizează pentru a se asigura cu precizie valorile limită între care trebuie să se modifice curentul prin indus la pornire. Schema de pornire este dată în figura 3.103.

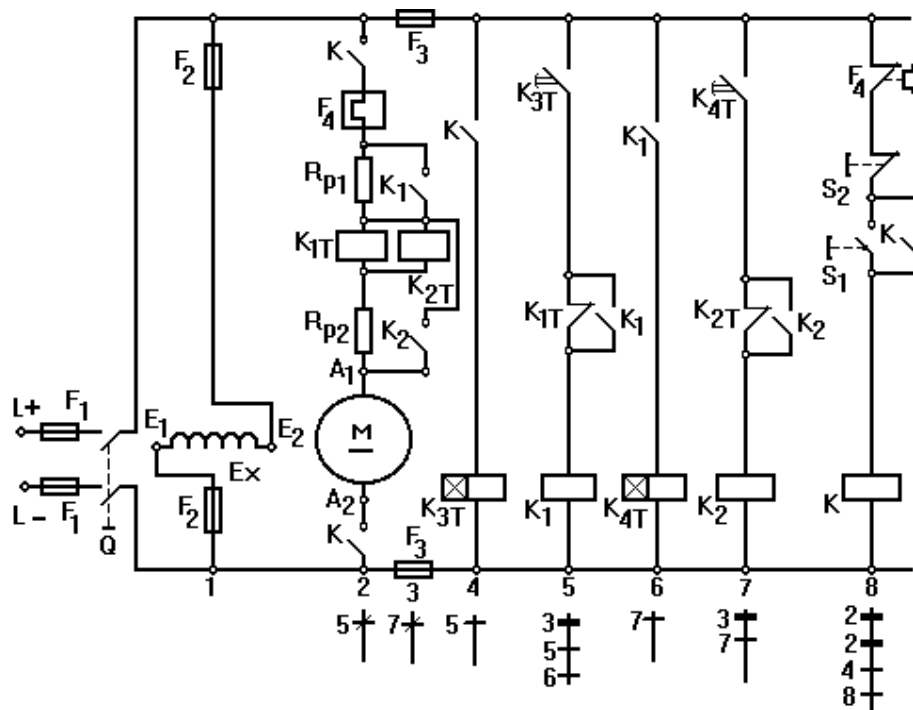


Fig. 3.103. Schema de pornire în funcție de curent a motorului cu excitație separată.

Schema, concepută pentru două trepte de rezistență, cuprinde: siguranțele fuzibile F1, F2, F3 pentru protecția circuitelor de forță și de comandă, un releu termic F4 pentru protecția motorului la suprasarcină, un întrerupător Q cu rol de separator care se manevrează numai când motorul este în repaus, două butoane de comandă cu revenire în poziție normală (S1 pentru comanda pornirii și S2 pentru oprire), un contactor de linie K bifazat, cu un contact auxiliar de autoblocare, două contactoare de accelerare K1, K2, două rele de curent K1T, K2T și două rele K3T, K4T cu temporizare la acționare.

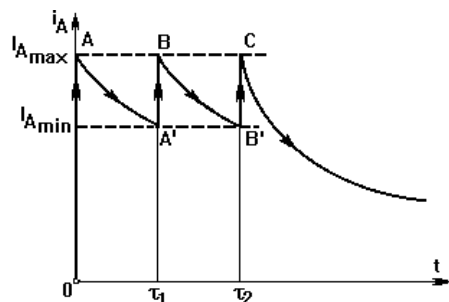


Fig. 3.104. Variația curentului prin indus la pornirea în funcție de curent.

Se închide întrerupătorul Q și prin acționarea butonului S1 contactorul K anclanșează alimentând indusul prin închiderea contactelor K din câmpul 3. Curentul crește brusc la valoarea I_{Amax} (Fig. 3.104), prin indusul înseriat cu cele două rezistențe R_{p1} și R_{p2} , provocând declanșarea acestuia și deschiderea contactului său K1T din câmpul 5. În felul acesta se împiedică alimentarea contactorului de accelerare K1.

Simultan, contactorul K își închide contactul din circuitul 4, asigurând astfel alimentarea releului K3T. Temporizarea necesară închiderii contactului K3T din circuitul 5 se alege ceva mai mare decât timpul propriu de acționare a releului K1T dar mai mică decât timpul τ_1 când curentul prin indus atinge valoarea I_{Amin} . La momentul τ_1 contactul cu temporizare K3T din câmpul 5 este închis. Releul K1T este reglat astfel încât curentul său de revenire să fie chiar I_{Amin} , valoare la care acest releu declanșează și contactul său din câmpul 5 se închide determinând alimentarea bobinei contactorului de accelerare K1 și implicit scurtcircuitarea rezistenței R_{p1} prin închiderea contactului K1 din câmpul 3. Contactorul K1 își închide contactul de autoblocare din câmpul 5 și contactul din câmpul 6 care permite alimentarea releului K4T. Curentul ce parcurge înfășurarea indusului crește din nou la valoarea I_{Amax} și străbate bobina releului de curent K2T (deoarece rezistența proprie a acestuia este mult mai mică față de rezistența rezultantă $R_{p1} + R_{K1T}$) care anclanșează și deschide contactul său normal închis din câmpul 7. În acest fel se împiedică alimentarea bobinei contactorului de accelerare K2. Releul K4T își închide cu temporizare contactul K4T din câmpul 7, mai înainte de momentul τ_2 când curentul scade din nou la valoarea I_{Amin} și determină declanșarea releului K2T, al cărui contact K2T din câmpul 7 se închide ca în poziția inițială. Bobina contactorului de accelerare K2 va fi pusă sub tensiune și prin anclanșare asigură scurtcircuitarea rezistenței R_{p2} deoarece se închide contactul K2 din câmpul 3. Prezența unui număr mai mare de rele și contacte la o pornire cu două trepte de rezistență, comparativ cu pornirea în funcție de viteză cu patru trepte de rezistență reduce siguranța în funcționare și conduce la un preț de cost mai ridicat.

b) - Comanda automată a pornirii motoarelor cu excitație derivație în funcție de timp
 Pornirea motoarelor cu excitație derivație în funcție de timp este ilustrată în figura 3.105.

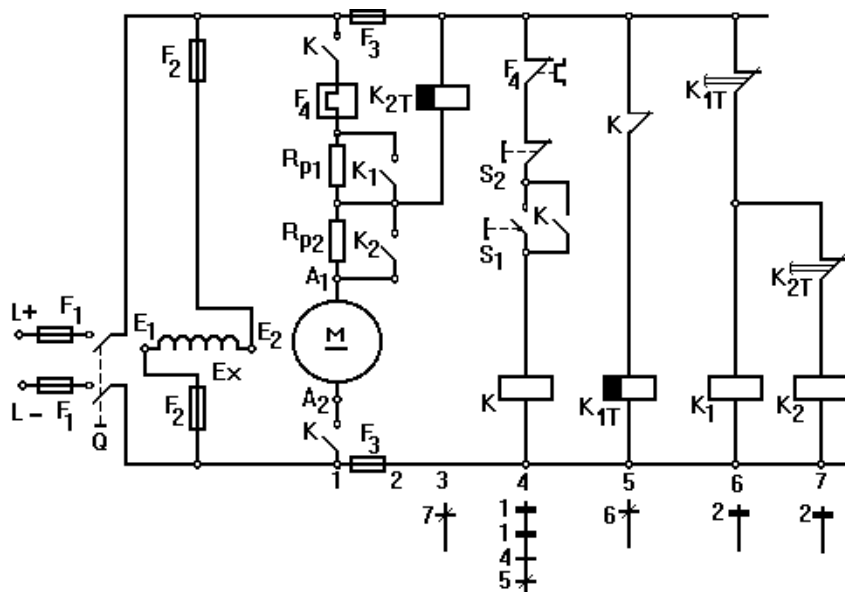


Fig. 3.105. Schema de pornire în funcție de timp a motorului cu excitație separată.

Schema din figura 3.105 este concepută pentru două trepte de rezistență și este alcătuită din: siguranțele fuzibile F1, F2, F3 pentru protecția circuitelor de forță și de comandă, un releu termic F4 pentru protecția motorului la suprasarcină, un întrerupător Q cu rol de separator care se manevrează numai când motorul este în repaus, două butoane de comandă cu revenire în poziție normală (S1 pentru comanda pornirii și S2 pentru oprire), un contactor de linie K bifazat cu un contact auxiliar de autoblocare, două contactoare de accelerare K1, K2 și două relee de timp K1T, K2T.

Temporizarea releului K1T se fixează egală cu diferența dintre timpul necesar menținerii primei trepte de rezistență R_{p1} și timpul propriu de anclanșare a contactorului K1:

$$t_{K1T} = t_1 - t_{K1} \quad (3.127)$$

Similar se determină și temporizarea releului K2T, ca diferență între timpul necesar menținerii celei de a doua trepte de rezistență R_{p2} și timpul propriu de anclanșare a contactorului K2:

$$t_{K2T} = t_2 - t_{K2} \quad (3.128)$$

Alimentarea schemei se realizează prin închiderea întrerupătorului Q când se deschide contactul normal închis K1T din câmpul 6, iar contactul K2T din câmpul 7 rămâne închis. Acest lucru se datorează faptului că bobina releului K1T este alimentată (contactul normal închis K din câmpul 7 permite acest lucru deoarece bobina contactorului K din câmpul 4 nu este alimentată).

Alimentarea indusului se face, ca și în cazul schemelor anterioare, prin apăsarea butonului de pornire S1 care determină anclanșarea contactorului K astfel încât indusul înseriat cu cele două rezistențe R_{p1} și R_{p2} va primi tensiunea rețelei. Prin deschiderea contactului K din câmpul 5, bobina releului K1T nu mai este alimentată și începe temporizarea la închidere cu care va acționa contactul K1T (din câmpul 6). În același timp, bobina releului K2T este alimentată cu tensiune, producându-se deschiderea contactului K2T (din câmpul 7) ceea ce face imposibilă alimentarea bobinei K2 când se închide contactul K1T (din câmpul 6) după temporizarea impusă prin relația (3.127). Odată cu închiderea contactului K1T se alimentează bobina contactorului K1 care își închide contactul K1 (din câmpul 2) scurtcircuitând rezistența R_{p1} iar bobina releului K2T (din câmpul 3) rămâne nealimentată. Contactul K2T (din câmpul 7) se va închide cu temporizarea impusă de relația (3.128) realizându-se astfel alimentarea bobinei contactorului K2 și scurtcircuitarea rezistenței R_{p2} prin închiderea contactului K2.

Pentru eliminarea supratensiunilor care pot apare la întreruperea înfășurării de excitație [14] sau la dispariția tensiunii de alimentare poate fi folosită una din schemele prezentate în figura 3.106.

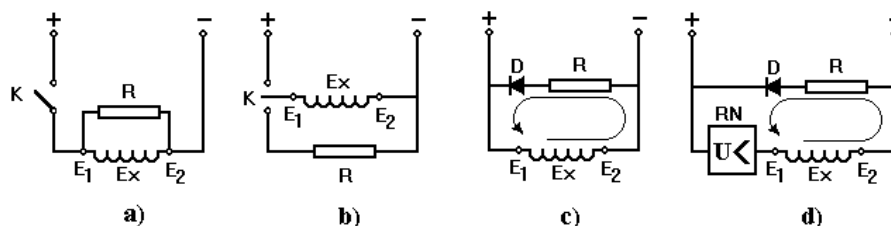


Fig. 3.106. Modele de protecție la supratensiuni a înfășurării de excitație.

În figura 3.106-a) se prezintă o schemă simplă în care înfășurarea de excitație este conectată permanent cu o rezistență R a cărei valoare este de trei până la cinci ori mai mare decât rezistența înfășurării de excitație și prin urmare apare dezavantajul creat de existența unor pierderi suplimentare prin efect electrocaloric în această rezistență. Pentru a reduce pierderile în rezistența R se introduce un comutator K (Fig. 3.106-b) cu două poziții, dar care nu protejează înfășurarea de excitație la dispariția tensiunii de alimentare. Prin introducerea unei diode D în serie cu rezistența R (Fig. 3.106-c) se crează posibilitatea, ca la dispariția tensiunii de alimentare, curentul ce apare datorită t.e.m. induse în înfășurarea de excitație să se stabilească pe traseul indicat în figură.

Pentru asigurarea protecției la întreruperea înfășurării de excitație se înserează cu aceasta un releu de nul RD ca în figura 3.106 -c).

Pornirea motoarelor de curent continuu cu excitație serie prezintă unele particularități față de pornirea motoarelor de curent continuu cu excitație derivație datorită faptului că înfășurarea de excitație serie este parcursă de același curent care străbate și indusul.

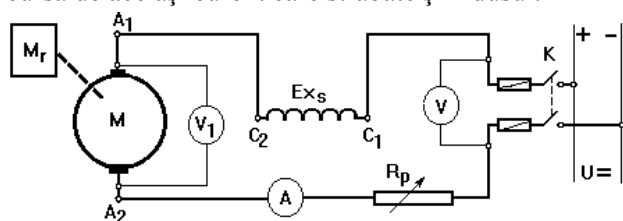


Fig. 3.107. Schema de pornire a motorului cu excitație serie.

Din acest motiv nu se mai justifică utilizarea reostatului de câmp (Fig. 3.107) iar motorul **nu poate fi pornit decât cu sarcină (un cuplu rezistent M_r) la arbore, pentru a evita ambalarea rotorului**. La aceeași concluzie se ajunge dacă se determină modul de variație a vitezei de rotație în funcție de curentul de sarcină I (Fig. 3.108), dedus cu ajutorul relației:

$$n = \frac{U - (R_A + R_e) I}{K_e \Phi} \quad (3.129)$$

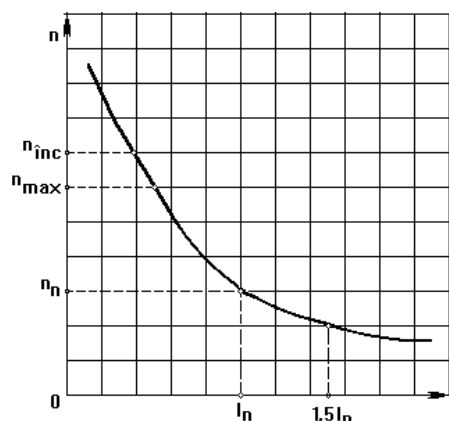


Fig. 3.108. Dependența vitezei în funcție de curent la motorul serie.

Dacă se menține constantă tensiunea de alimentare, atunci variația fluxului de excitație în funcție de curentul de sarcină este liniară pentru sarcini reduse iar la sarcini mari fluxul rămâne aproape constant, deoarece intervine saturația. Când curentul de sarcină crește, numărătorul scade puțin în schimb numitorul fracției din relația (3.129) crește sensibil, ceea ce face ca viteza să scadă apreciabil încât dependența vitezei în funcție de curentul de sarcină să fie aproape o hiperbolă echilateră. În timp ce la sarcini mici viteza crește foarte mult, la sarcini mari viteza se stabilizează deoarece fluxul se menține constant datorită manifestării saturației.

Pornirea motoarelor de curent continuu cu excitație mixtă se desfășoară ca și la motoarele cu excitație derivație, conform schemei din figura 3.109.

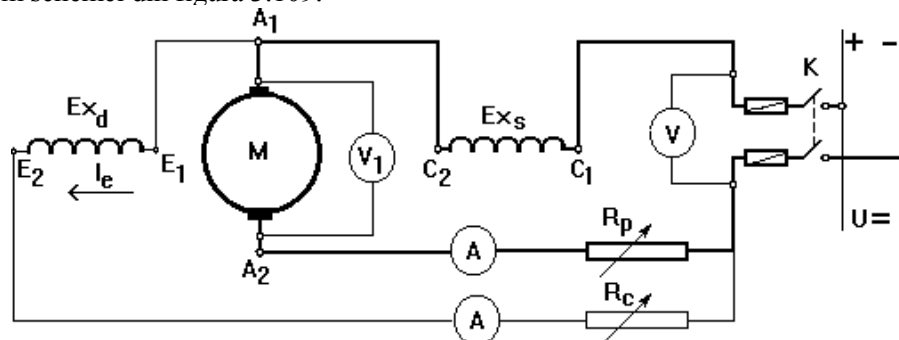


Fig. 3.109. Schema de pornire a motorului cu excitație mixtă.

Singura precauțiune care se ia în cazul montajului mixt diferențial este ca sarcina la arbore în momentul pornirii să fie cât mai mică, în scopul evitării zonei de funcționare instabilă când se manifestă și fenomenul de pompaj (un regim de funcționare pendular, pentru viteză curent și cuplu, provocat de tendința de anulare a fluxului resultant).

C. Pornirea motoarelor de curent continuu cu tensiune redusă

La instalațiile de mare putere nu se mai poate aplica metoda de pornire cu reostat întrucât pierderile de energie sunt însemnate, în special la pornirile repetate cu o frecvență ridicată și în același timp dimensiunile reostatului devin apreciabile.

În aceste cazuri se recurge la pornirea cu tensiune redusă. Un asemenea sistem de pornire necesită surse cu posibilități de reglare a tensiunii în limite largi în care se încadrează sistemul *generator-motor* (cunoscut și sub denumirea de grupul Ward-Leonard) și *convertor electronic-motor* cu precizarea că aceste sisteme servesc și ca metode de reglare a vitezei. În prezent a obținut o mare răspândire sistemul de convertor electronic-motor.

Convertizoarele cu tranzistoare și tiristoare au înlocuit rapid celelalte tipuri de elemente de execuție (grupul generator-motor, amplificatorul magnetic), datorită unor avantaje certe cum ar fi: coeficient de amplificare în putere foarte ridicat de ordinul 10^8 - 10^9 , inerție redusă (practic neglijabilă), preț de cost din ce în ce mai scăzut. Gama sistemelor de convertizoare s-a diversificat foarte mult plecând de la convertizoarele monofazate, cu redresarea unei singure alternanțe sau ambelor alternanțe, până la convertizoarele trifazate în diverse variante: convertizor cu redresarea unei singure alternanțe cu funcționare în două și în patru cadrane, convertizor cu redresarea ambelor alternanțe.

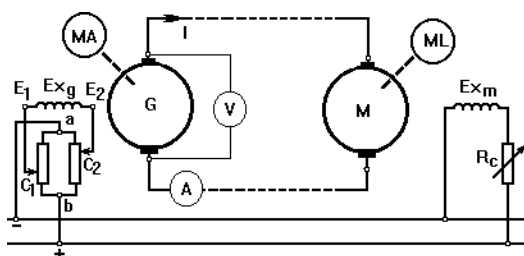


Fig. 3.110. Schema de principiu a grupului generator-motor.

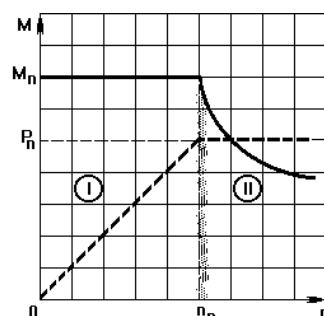


Fig. 3.111. Variația cuplului și puterii.

Se prezintă grupul generator-motor de construcție clasică, a cărei schemă de principiu este dată în figura 3.110. Grupul generator-motor este compus dintr-un generator de curent continuu cu excitație separată a căruindus este conectat electric la bornele motorului de curent continuu cu excitație separată. Dacă între motorul de antrenare MA și generatorul cu excitație separată G se montează un volan V, atunci grupul este numit Ward Leonard-Ilgner (Fig. 3.112).

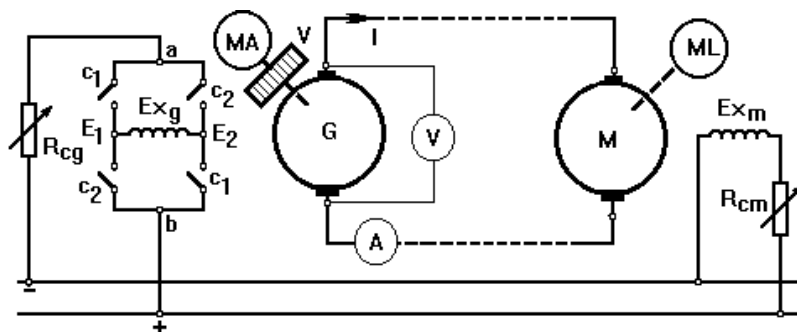


Fig. 3.112. Schema de principiu a grupului Ward Leonard – Ilgner.

Înfășurarea de excitație a generatorului este alimentată printr-un sistem care permite cu ușurință inversarea polarității tensiunii de alimentare, precum și valoarea acesteia. În figura 3.110, înfășurarea de excitație este alimentată de la cursorii C_1 și C_2 de la două reostate identice, legate în paralel în punctele **a** și **b** la care se aplică tensiunea de alimentare. La pornire, cele două cursori se află în poziție mediană încât înfășurarea de excitație nu este alimentată. În situația în care cursorul C_1 se deplasează ușor spre punctul **a**, iar cursorul C_2 execută o mișcare similară spre punctul **b**, tensiunea aplicată înfășurării de excitație va avea polaritatea + la borna E_1 și polaritatea - la borna E_2 . Polaritatea tensiunii se schimbă, dacă cursorii se deplasează în sens contrar față de situația precedentă, determinând inversarea sensului de rotație.

În figura 3.112, înfășurarea de excitație este alimentată prin intermediul a două perechi de contactoare electrice sau electronice montate în punte. Pornirea până la viteza nominală se face la cuplu constant în raport cu viteza, iar la viteze superioare vitezei nominale se preferă menținerea constantă a puterii în timp ce cuplul electromagnetic se reduce după o lege de tip hiperbolic (Fig. 3.111). Grupul generator-motor prezintă mai multe avantaje (eliminarea reostatului de pornire, posibilitatea reversării cu ușurință a sensului de rotație și reglarea

vitezei în limite largi), dar și dezavantajul prezenței a trei mașini rotative (două mașini fiind necesare pentru reglarea tensiunii în limite largi).

3.8.3. CARACTERISTICILE DE FUNCȚIONARE LA MOTOARELE DE CURENT CONTINUU

Caracteristicile de funcționare în regim staționar ale motoarelor de curent continuu reflectă modul de variație a vitezei n , cuplului M , randamentului η funcție de puterea la arbore P_2 la care se adaugă *caracteristica mecanică*, $n = f(M)$, ca fiind cea mai semnificativă caracteristică pentru fiecare motor în parte. Pentru ridicarea caracteristicilor de funcționare este necesar ca motorul să fie cuplat cu o frână electromagnetică sau un dinam-frână, pentru determinarea cuplului la arbore și cu un tahogenerator pentru măsurarea vitezei. Se prezintă în continuare principalele caracteristici de funcționare pentru tipurile de motoare semnificative.

A. Motorul cu excitație derivație (sau separată).

a) - Caracteristica de viteză $n = f(P_2)$ se determină din relația:

$$n = \frac{U - R_A I_A}{K_e \Phi} = n_0 - I_A \frac{R_A}{K_e \Phi}, \quad (3.130)$$

în care n_0 este viteza de mers în gol ideal obținută pentru $I_A = 0$.

Caracteristica are o pantă ușor căzătoare la creșterea puterii P_2 (deci a lui I_A) și este reprezentată în figura 3.113 prin curba (1). În situația în care reacția demagnetizantă a indusului se manifestă puternic la creșterea sarcinii fluxul rezultat poate să scadă mai repede decât creșterea căderii ohmice de tensiune $R_A I_A$, de la numărător și în acest caz viteza începe să crească odată cu mărirea sarcinii (curba 2).

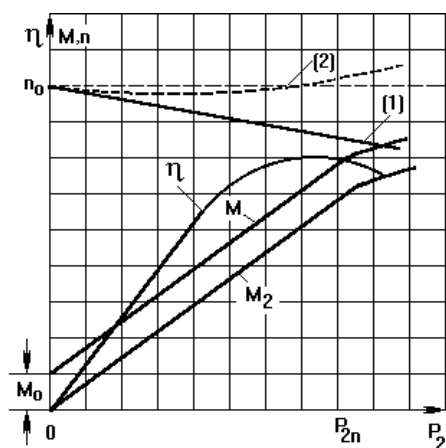


Fig. 3.113. Caracteristici de funcționare la motorul cu excitație derivație.

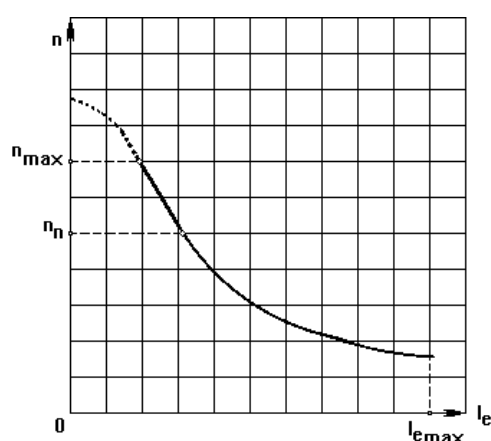


Fig. 3.114. Caracteristica $n = n(I_c)$ la funcționarea la gol a motorului cu excitație derivație.

b) - Variația cuplului electromagnetic în funcție de puterea mecanică la arbore se deduce cu ușurință dacă se ține cont de bilanțul de puteri la motorul cu excitație separată, reprezentat în figura 3.93. La mersul la gol cuplul electromagnetic este echilibrat de cuplul de mers în gol corespunzător pierderilor mecanice și prin ventilație precum și pierderilor în fier, în situația în care se consideră constante, tensiunea de alimentare și viteza de rotație:

$$M = M_0 + M_r; \quad M_0 = M_{m+v} + M_r. \quad (3.131)$$

c) - Variația cuplului la arbore în funcție de puterea mecanică utilă se deduce în aceleași condiții impuse și la cuplul electromagnetic, conform relației:

$$M_2 = M_r = \frac{P_2}{\Omega} = k \frac{P_2}{n} = k' P_2, \quad (3.132)$$

și reprezintă o dreaptă ce trece prin origine și se înclină la puteri mari datorită saturației.

d) - Caracteristica randamentului are alura asemănătoare cu cea de la randamentul transformatoarelor.

e) - Caracteristica vitezei la mersul la gol este reprezentată în figura 3.114 pentru o tensiune constantă și egală cu cea nominală, care se aplică motorului (cuplul rezistent la arbore este nul). Deoarece pierderile la mersul în gol sunt mici cuplul dezvoltat de motor este redus și prin urmare curentul prin indus are o valoare mică. În acest caz numărătorul expresiei (3.130) poate fi considerat constant iar viteza de rotație variază invers proporțional cu fluxul inductor, după o hiperbolă echilateră.

Întrucât viteza de rotație poate atinge valori periculoase la reducerea curentului de excitație, caracteristica se ridică până la viteza maximă indicată de fabrica constructoare. Trasarea caracteristicii în zona punctată poate conduce la deteriorarea indusului asupra căruia se manifestă forțe centrifuge importante.

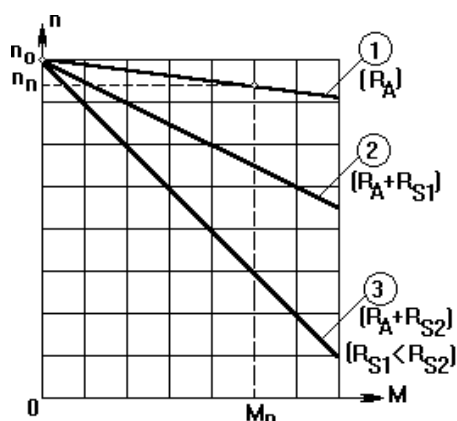


Fig. 3.115. Caracteristica mecanică a motorului cu excitație derivație.

f) - Caracteristica mecanică reprezintă dependența $n=f(M)$ când tensiunea de alimentare este egală cu tensiunea nominală și se menține constantă, iar curentul de excitație corespunzător se menține și el constant.

Expresia analitică a caracteristicii mecanice se deduce cu ușurință dacă în relația (3.130) se introduce expresia curentului prin indus obținută din relația (3.102):

$$n = n_0 - M \frac{R_A}{K_e K_m \Phi^2} \quad (3.133)$$

Se constată cu ușurință că dependența $n=f(M)$ este o dreaptă cu panta puțin căzătoare (Fig.3.115-caracteristica 1) și se numește *caracteristică mecanică naturală*. Deoarece viteza variază în limite strânse, la modificarea cuplului electromagnetic în limite largi, caracteristica mecanică a acestui tip de motor se mai numește și *caracteristică rigidă (dură)* sau *caracteristică mecanică tip derivație*. În relația (3.133), se definește căderea de viteză:

$$\Delta n = M \frac{R_A}{K_e K_m \Phi^2} \quad (3.134)$$

Cuplul de pornire se determină din relația (3.133) pentru $n = 0$:

$$M_p = n_0 \frac{K_e K_m \Phi^2}{R_A} \quad (3.135)$$

iar caracteristica mecanică naturală capătă o altă formă uzuală:

$$n = n_0 \left(1 - \frac{M}{M_p} \right) \quad (3.136)$$

Caracteristica mecanică a motorului cu excitație derivație poate fi modificată prin înserierea unor rezistențe suplimentare în circuitul indusului, fapt ce determină mărirea căderii de viteză și obținerea unui fascicol de caracteristici mecanice (2, 3), convergente în punctul n_0 de pe ordonată. Aceste caracteristici se numesc *caracteristici mecanice artificiale*. Dacă se neglijează curentul de excitație, se poate considera curentul absorbit din rețea aproximativ egal cu valoarea curentului ce parcurge indusul, încât caracteristicile de turație (Fig. 3.99) se identifică, la o anumită scară, cu cele mecanice.

B. Motorul cu excitație serie

Curbele caracteristice pentru acest tip de motor sunt reprezentate în figura 3.116.

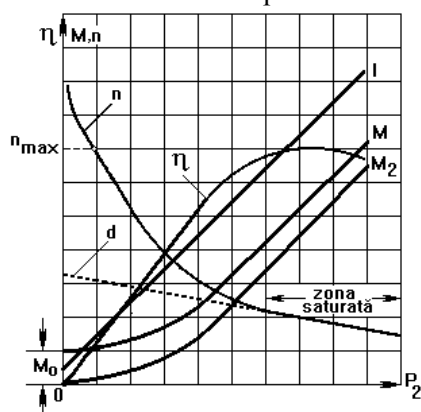


Fig. 3.116. Caracteristici de funcționare ale motorului cu excitație serie.

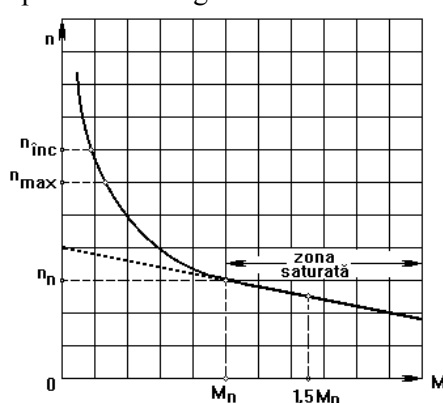


Fig. 3.117. Caracteristica mecanică a motorului cu excitație serie.

a) - Caracteristica $n=f(P_2)$ se determină tot pe baza relației (3.130) în care se iau în considerare două cazuri limită:

- la sarcini mici se poate neglija căderea de tensiune pe indus și dacă se consideră tensiunea rețelei constantă, curentul de sarcină fiind proporțional cu fluxul, în lipsa saturației, atunci viteza se va modifica în funcție de curent după o hiperbolă echilaterală; același mod de variație se va manifesta și funcție de puterea P_2 .

- la sarcini mari intervine saturația și fluxul se menține aproape constant la variația sarcinii încât caracteristica $n=f(P_2)$ va deveni o dreaptă d (zona plină).

b) - Variația curentului de sarcină în funcție de puterea mecanică se face după o dreaptă ce pleacă din valoarea curentului de mers în gol.

c) - Caracteristica randamentului are alura asemănătoare cu cea de la randamentul motorului cu excitație derivație

d) - Forma curbei $M=f(P_2)$ este condiționată de asemenea de modul în care se modifică fluxul cu sarcina. Când nu intervine saturația, cuplul electromagnetic se modifică cu pătratul curentului de sarcină încât caracteristica este un arc de parabolă ce pleacă din punctul M_0 și se continuă cu o dreaptă pentru cazul în care apare saturația (la sarcini mari când fluxul este constant).

e) - Forma curbei $M_2=f(P_2)$ se obține prin translarea curbei $M=f(P_2)$ în origine cu mărimea cuplului de mers în gol M_0 .

f) - Caracteristica mecanică reprezintă dependența $n=f(M)$ când tensiunea de alimentare este egală cu tensiunea nominală și se menține constantă, fiind cea mai semnificativă pentru motorul cu excitație serie (Fig. 3.117).

Ecuția caracteristicii mecanice naturale se determină din relația (3.130) separat pentru mașina nesaturată și saturată. La sarcini mici, când nu intervine saturația, se poate considera cuplul electromagnetic de forma:

$$M = K_m I_A \Phi = K I_A^2, \quad (3.317)$$

iar la sarcini mari, când intervine saturația, cuplul electromagnetic devine de forma:

$$M = K_m I_A \Phi = K' I_A^2. \quad (3.138)$$

Aceste două expresii ale cuplului electromagnetic vor determina forme diferite pentru caracteristica mecanică naturală. În regimul nesaturat se obține forma finală a caracteristicii mecanice naturale, prin înlocuirea curentului prin indus, dedus din relația (3.137), în relația (3.130):

$$n = \frac{U - (R_A + R_e) K_1 \sqrt{M}}{K_2 \sqrt{M}}, \quad (3.139)$$

iar pentru regimul saturat, se obține forma finală a caracteristicii mecanice naturale prin înlocuirea curentului prin indus, dedus din relația (3.138), în relația (3.130):

$$n = \frac{U - (R_A + R_e) K_1' M}{K_2' M}. \quad (3.140)$$

În zona nesaturată caracteristica mecanică naturală variază după o hiperbolă echilaterală în timp ce pentru zona saturată dependența vitezei în funcție de cuplul electromagnetic devine liniară. Se constată o variație în limite largi a vitezei, odată cu modificarea cuplului electromagnetic, ceea ce determină o *caracteristică mecanică elastică (moale)* numită și *caracteristică tip serie*.

La turații mici motorul serie dezvoltă un cuplu electromagnetic important găsindu-și utilizarea în acționări electrice cu porniri grele și în special în tracțiunea electrică. Deoarece la sarcini mici turația poate atinge valori ridicate, periculoase pentru rotor, **motorul serie nu trebuie lăsat să funcționeze în gol.**

C. Motorul cu excitație mixtă

Motorul cu excitație mixtă are două înfășurări de excitație (una legată în serie cu indusul și a doua în

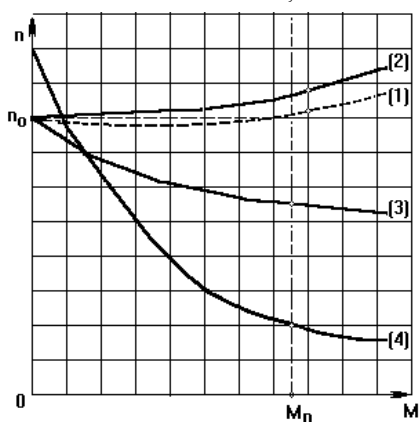


Fig. 3.118. Caracteristicile mecanice ale motorului cu excitație mixtă.

paralel. După modul de conectare a înfășurărilor de excitație și după ponderea solenației create de fiecare la obținerea solenației totale, motorul cu excitație mixtă poate asigura caracteristici mecanice foarte variate.

Expresia vitezei de rotație se poate scrie sub forma:

$$n = \frac{U - R_A I_A}{K_e (\Phi_d \pm \Phi_s)}, \quad (3.141)$$

de unde rezultă forma caracteristicilor mecanice prezentate în figura 3.118.

În cazul unui montaj mixt diferențial la care predomină amperspirele înfășurării derivație se obține caracteristica mecanică dură (1), iar când predomină amperspirele înfășurării serie, viteza crește la majorarea cuplului rezistent (2).

În cazul unui montaj mixt adițional, la care predomină amperspirele înfășurării derivație, se obține caracteristică mecanică tip derivație mai elastică (3), iar când predomină amperspirele înfășurării serie, caracteristica de tip serie este corectată prin limitarea vitezei la cupluri reduse (4).

3.8.4. REGLAREA VITEZEI MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU

Pentru determinarea modalităților de reglare a vitezei motoarelor de curent continuu se analizează expresia vitezei folosind relația cunoscută:

$$n = \frac{U - R_A I_A}{K_e \Phi} \quad (3.142)$$

Presupunând că valoarea cuplului rezistent la arborele motorului se menține constantă se disting următoarele posibilități de reglare a vitezei:

- 1 - prin variația fluxului de excitație;
- 2 - prin variația tensiunii aplicate la bornele indusului, dar tensiunea de alimentare U rămâne constantă;
- 3 - prin variația tensiunii U a sursei de alimentare.

Motoarele de curent continuu au posibilități de reglare în limite largi încât se preferă utilizarea lor la unele acționări reglabile.

3.8.4.1. Reglarea vitezei motoarelor de curent continuu prin variația fluxului de excitație

Din analiza relației generale a vitezei (3.142) se constată că prin modificarea fluxului inductor este posibilă obținerea unor viteze superioare vitezei de mers la gol (obținută prin menținerea constantă a tensiunii de alimentare).

Variația fluxului inductor se execută prin procedee diferite impuse de tipul excitației motorului de curent continuu.

A. Motorul cu excitație derivație

Variația fluxului inductor la motorul cu excitație derivație, se efectuează prin modificarea curentului de excitație cu ajutorul reostatului de câmp.

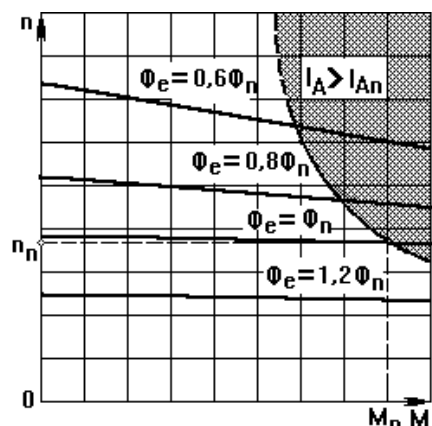


Fig. 3.119. Caracteristicile mecanice ale motorului cu excitație derivație la modificarea fluxului inductor.

indus să fie depășită solicitând din punct de vedere termic înfășurarea indusului. În figura 3.119 este hășurat domeniul interzis pentru funcționarea motorului. Metoda de reglare a vitezei prin modificarea fluxului de excitație se folosește de obicei pentru obținerea unor viteze superioare vitezei nominale. Se pot obține și viteze inferioare vitezei nominale, prin creșterea curentului de excitație, dar această variantă are caracter limitat din cauza saturației care nu permite creșterea fluxului și în plus creșterea curentului de excitație conduce la încălzirea înfășurării de excitație.

B. Motorul cu excitație serie

Motorul cu excitație serie având particularitatea cunoscută privind excitarea produsă de curentul de sarcină nu permite decât slăbirea câmpului de excitație prin șuntarea acesteia cu o rezistență suplimentară R_s (Fig. 3.120).

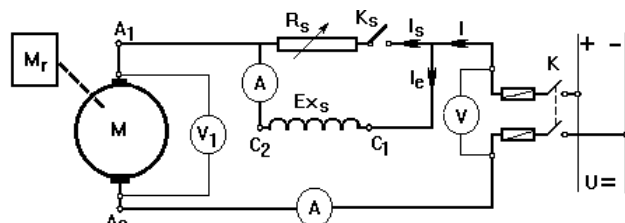


Fig. 3.120. Schema pentru șuntarea înfășurării de excitație la motorul serie.

Din relația (3.143), se constată că prin modificarea fluxului inductor se obțin alte viteze de mers în gol (Fig. 3.119) și în același timp se modifică și căderea de viteză:

$$n = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{R_A M}{K_e K_m \Phi^2} = n_0 - \Delta n \quad (3.143)$$

Caracteristicile mecanice artificiale, obținute pentru fluxuri mai mici decât fluxul nominal vor fi situate deasupra caracteristicii naturale și vor avea pante diferite, (deoarece căderea de viteză variază invers proporțional cu pătratul fluxului inductor) în timp ce pentru fluxuri mai mari decât fluxul nominal, caracteristicile artificiale se situează sub caracteristica naturală și sunt aproape paralele.

Deoarece cuplul rămâne constant, odată cu modificarea fluxului inductor se modifică și curentul ce străbate indusul; dacă fluxul se slăbește simțitor, este posibil ca valoarea nominală a curentului prin indus să fie depășită solicitând din punct de vedere termic înfășurarea indusului. În figura 3.119 este hășurat domeniul interzis pentru funcționarea motorului. Metoda de reglare a vitezei prin modificarea fluxului de excitație se folosește de obicei pentru obținerea unor viteze superioare vitezei nominale. Se pot obține și viteze inferioare vitezei nominale, prin creșterea curentului de excitație, dar această variantă are caracter limitat din cauza saturației care nu permite creșterea fluxului și în plus creșterea curentului de excitație conduce la încălzirea înfășurării de excitație.

În funcție de valoarea rezistenței de șuntare în comparație cu rezistența înfășurării de excitație se stabilește curentul de excitație. Cu cât valoarea șuntului este mai mică, cu atât mai mică va fi valoarea curentului de excitație, iar caracteristicile mecanice se vor situa mai sus față de caracteristica naturală și vor păstra paralelismul cu aceasta (Fig. 3.121).

Metoda de reglare a vitezei motorului cu exci-

tație serie prezintă următoarele aspecte:

- la slăbirea fluxului inductor prin șuntarea înfășurării de excitație, crește puterea absorbită de la rețea, la cuplu constant, prin creșterea puterii utile dezvoltată la arbore;

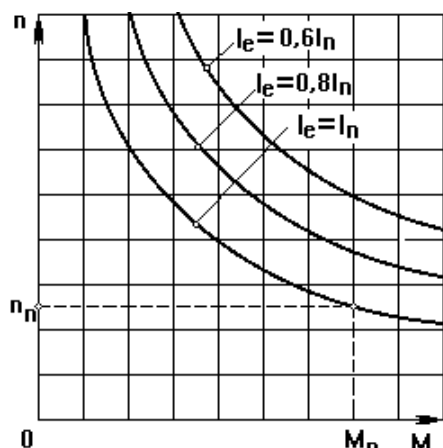


Fig. 3.121. Caracteristicile mecanice obținute prin șuntarea excitației la motorul serie.

- randamentul este afectat în mică măsură față de metoda precedentă;

- la slăbirea fluxului peste o anumită valoare funcționarea poate deveni instabilă iar comutația se înrăutățește prin creșterea simultană a curentului prin indus și vitezei acestuia.

3.8.4.2. Reglarea vitezei motoarelor de curent continuu prin variația tensiunii aplicate la bornele indusului

Dacă tensiunea rețelei U este constantă iar fluxul se menține constant, viteza de rotație poate fi modificată prin introducerea unor rezistențe suplimentare, în serie cu indusul.

A. Motorul cu excitație derivație

Expresia vitezei care se folosește la explicarea reglării vitezei motoarelor de curent continuu cu excitație derivație prin variația tensiunii aplicate la bornele indusului este de forma:

$$n = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{(R_A + R_R)M}{K_e K_m \Phi^2}, \quad (3.144)$$

în care R_R este rezistența suplimentară legată în serie cu indusul. Această rezistență se dimensionează termic pentru o perioadă mare de funcționare. Datorită pierderilor prin efect electrocaloric pe rezistențele de reglare, această metodă nu este eficientă.

Pentru $R_R = 0$ se obține caracteristica mecanică naturală 1, pe care se stabilește un punct de funcționare corespunzător unui cuplu rezistent M_r . La acest cuplu va corespunde viteza n_1 (figura 3.122).

Dacă se menține constant cuplul rezistent la arbore și se leagă, în serie cu indusul, o rezistență suplimentară R_{R1} , punctul de funcționare se mută pe caracteristica artificială 2 iar viteza rotorului scade la valoarea n_2 . În funcție de numărul de trepte ale reostatului de reglare se obțin viteze din ce în ce mai mici. Se face precizarea că reostatul de reglare poate fi folosit și ca reostat de pornire, însă reciproca nu este valabilă.

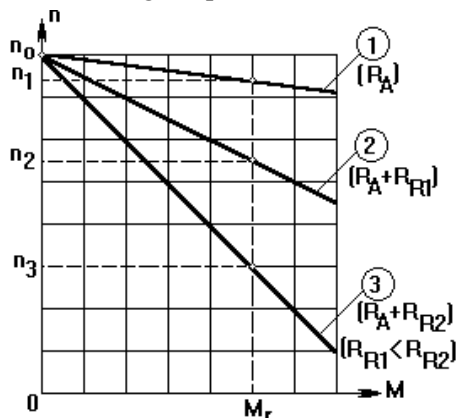


Fig. 3.122. Caracteristicile mecanice obținute la un motor derivație prin înserierea cu indusul a unor rezistențe

B. Motorul cu excitație serie

La motorul cu excitație serie se manifestă o particularitate legată de faptul că la reglarea vitezei de rotație prin introducerea unor rezistențe suplimentare, în serie cu indusul, odată cu modificarea curentului prin indus variază și curentul de excitație. și în această situație, forma caracteristicilor de reglare este impusă de gradul de saturație al circuitului magnetic.

În figura 3.123 sunt reprezentate caracteristicile mecanice obținute prin înserierea unor rezistențe de reglaj cu indusul, în situația în care se menține constantă tensiunea de alimentare.

În cazul motorului nesaturat, relația (3.139) devine:

$$n = \frac{U - (R_A + R_e + R_r) K_I \sqrt{M}}{K_2 \sqrt{M}}, \quad (3.145)$$

iar în cazul motorului saturat, relația (3.140) devine:

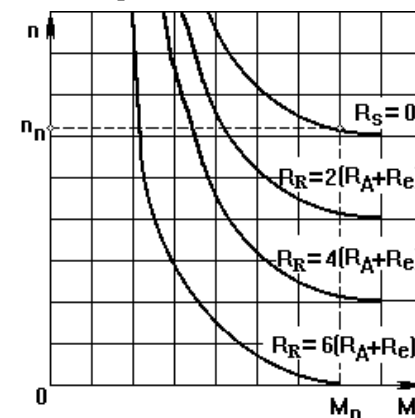


Fig. 3.123. Caracteristicile mecanice obținute la un motor serie prin înserierea cu indusul a unor rezistențe.

$$n = \frac{U - (R_A + R_e + R_R) K_1' M}{K_2' M} \quad (3.146)$$

Din figura 3.123 se constată că prin acest procedeu de reglare a vitezei, se obțin caracteristici mecanice foarte căzătoare la cupluri mici iar la cupluri mari scăderea vitezei se face mai lent, la creșterea cuplului rezistent.

Și în acest caz reglarea vitezei este însoțită de pierderi prin efect electrocaloric, dar în tracțiunea electrică, căldura degajată este utilizată iarna pentru încălzirea vagoanelor.

3.8.4.3. Reglarea vitezei motoarelor de curent continuu prin variația tensiunii de alimentare

Așa cum s-a arătat la pornirea cu tensiune redusă, metoda de pornire și reglare a vitezei necesită surse cu posibilități de reglare a tensiunii în limite largi în care se încadrează sistemele: generator-motor (cunoscut și sub denumirea de grupul Ward-Leonard) și *convector electronic-motor*.

Grupul generator-motor se utilizează pentru acționarea mașinilor de lucru care necesită reglarea vitezei în limite largi, frânări și reversări frecvente (mașini-unelte mari, laminoare reversibile, macarale-portal, mașini de fabricat hârtie, ascensoare de mare viteză, industria textilă etc.).

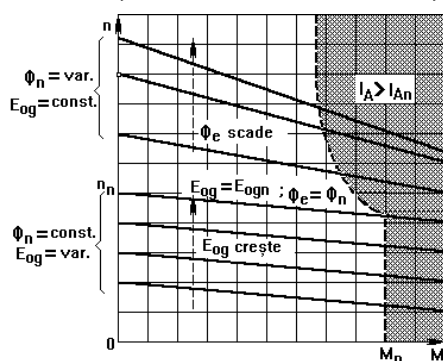


Fig. 3.124. Caracteristicile mecanice obținute la un grup generator-motor.

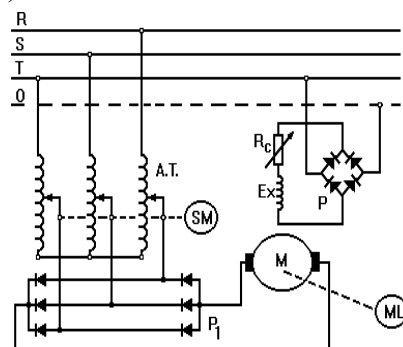


Fig. 125. Schemă modulară pentru reglarea vitezei prin tensiune.

Caracteristicile mecanice prezintă două zone (figura 3.124). Prima zonă corespunde motorului cu excitație separată alimentat cu tensiune variabilă, obținându-se caracteristici mecanice artificiale sub formă de drepte paralele cu caracteristica mecanică naturală și situate sub aceasta. Cea de a doua zonă corespunde reglării vitezei motorului cu excitație separată prin reducerea fluxului inductor. Se obțin caracteristici a căror rigiditate scade odată cu reducerea fluxului inductor. Aceleași tipuri de caracteristici se obțin cu sisteme modulare de o anumită putere (figura 3.125). Când puterea instalată depășește puterea unui modul, se folosesc mai multe module în paralel. Tensiunea aplicată indusului se modifică cu ajutorul unui autotransformator trifazat și redresată cu ajutorul unei punți redresoare duble. Cursorul autotransformatorului este deplasat cu un servomotor care aduce tensiunea la zero, pentru a asigura o nouă pornire, (pornirea următoare nu poate fi declanșată până când reostatul de câmp nu este adus pe poziție minimă).

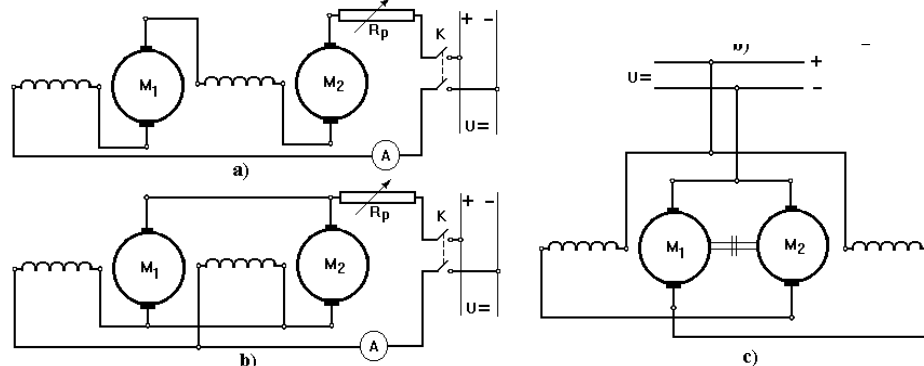


Fig. 126. Scheme de conectare pentru motoarele cu excitație serie în vederea reglării vitezei de rotație în domeniul tracțiunii.

La motoarele serie cu care sunt prevăzute mijloacele de transport tensiunea de alimentare se reglează prin conectarea în serie (Fig. 3.126-a) sau paralel (Fig. 3.126-b); când sunt cuplate și mecanic se încrucișează excitațiile (c).

3.8.5. FRÂNAREA MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU

În acționările electrice, frânarea electrică se folosește în mai multe scopuri: pentru micșorarea vitezei unui sistem sau oprirea acestuia; pentru menținerea în repaus a unui sistem aflat sub acțiunea unor cupluri exterioare; pentru menținerea constantă a vitezei unui sistem supus acțiunii unor cupluri datorate forțelor de gravitație sau forțelor de inerție.

Se disting două categorii de metode de frânare: una prin trecerea motorului în regim de generator și a doua categorie o constituie frânarea propriu-zisă. Metodele de frânare care se folosesc în mod frecvent sunt:

A - Frânarea în regim de generator cu recuperarea energiei.

B - Frânarea dinamică (reostatică).

C - Frânarea propriu-zisă prin inversarea polarității tensiunii.

D - Frânarea propriu-zisă prin inversarea sensului de rotație.

A - *Frânarea în regim de generator cu recuperarea energiei*

Acest procedeu de frânare este caracteristic vehiculelor cu tracțiune electrică (locomotive electrice sau diesel-electrice, tramvaie, troleibuze etc.).

Caracteristica mecanică la frânarea în regim de generator cu recuperarea energiei este prezentată în figura 3.127.

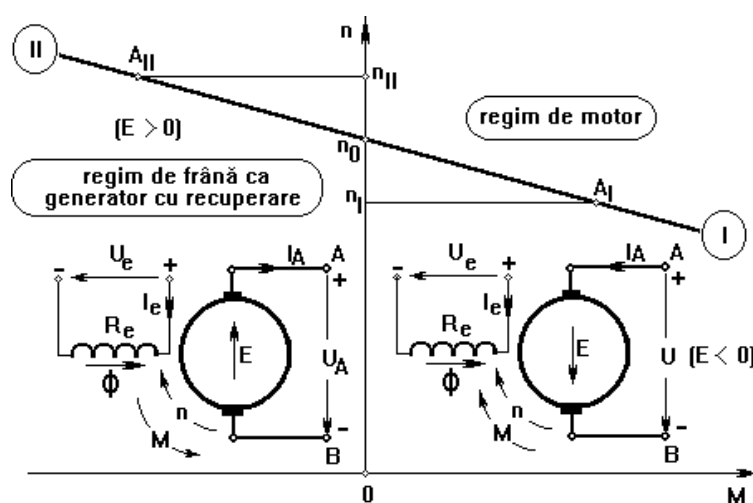


Fig. 3.127. Caracteristica mecanică la frânarea în regim de generator cu recuperarea energiei.

Se presupune că un vehicul care mergea pe un teren plat începe să coboare o pantă. Punctul de funcționare al motorului, când vehiculul rulează pe un teren plat se găsește în A_I , pe caracteristica I. Când vehiculul intră pe planul înclinat, datorită componentei paralele cu planul a forței gravitaționale începe să crească viteza motorului spre n_0 , ceea ce conduce la creșterea tensiunii electromotoare induse.

Conform relației:

$$I_A = \frac{U_A - K_e n \Phi}{R_A}, \quad (3.147)$$

curentul prin indus se anulează când tensiunea electromotoare devine egală cu tensiunea de alimentare. Viteza de rotație crește în continuare și depășește valoarea de mers în gol, astfel încât tensiunea electromotoare devine mai mare ca tensiunea de alimentare și curentul prin indus își schimbă sensul. Cuplul electromagnetic devine un cuplu de fânare opunându-se accelerării vehiculului pe panta de coborâre. Punctul de funcționare se stabilește în A_{II} , pe caracteristica mecanică II din cadranul II.

În orice punct de funcționare de pe caracteristica II motorul transformat în generator debitează energie electrică în rețea și astfel se realizează un cuplu electromagnetic de frânare care asigură o viteză constantă la coborârea pantei. Avantajul acestei metode constă în recuperarea energiei în zonele de pantă.

În traficul feroviar, la pante lungi pentru a evita creșterea tensiunii rețelei se face o coordonare de trafic (în timp ce un tren urcă panta altul o coboară).

La motorul cu excitație serie frânarea în regim de generator cu recuperarea energiei se realizează numai dacă se asigură alimentarea separată a excitației.

B-Frânarea dinamică (reostatică)

Acest procedeu de frânare se utilizează în tracțiunea electrică datorită faptului că asigură frânări rapide.

Caracteristicile mecanice corespunzătoare frânării dinamice sunt prezentate în figura 3.128.

Se consideră un motor cu excitație separată care are punctul de funcționare în A_I . Pentru realizarea frânării dinamice, se deconectează indusul de la rețea și se conectează pe o rezistență suplimentară R_s , înășurarea

de excitație rămânând alimentată cu tensiune. Datorită energiei cinetice înmagazinate indusul continuă să se rotească, iar mașina trece în regim de generator debitând energie electrică pe rezistența suplimentară, pe seama scăderii energiei potențiale a vehiculului. Punctul de funcționare se stabilește pe caracteristica III în A_{III} .

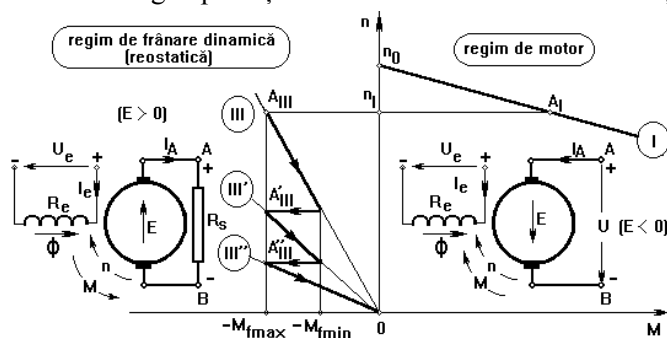


Fig. 3.128. Caracteristica mecanică la frânarea dinamică.

Deoarece cuplul de frânare se reduce odată cu scăderea vitezei pentru ca frânarea să se mențină eficientă se face micșorarea în trepte a rezistenței suplimentare, punctul de funcționare mutându-se pe caracteristicile III' și III''. Pentru deducerea expresiei analitice a caracteristicii mecanice se scrie ecuația de bază pentru tensiunea electromotoare indusă:

$$E = K_E n \Phi = (R_A + R_S) I_A \quad (3.148)$$

Expresia cuplului electromagnetic este dată de relația:

$$M = -K_m I_A \Phi = -K_m \Phi \frac{K_E n \Phi}{R_A + R_S} \quad (3.149)$$

Folosind cele două relații se stabilește că la frânarea dinamică, caracteristica mecanică este o dreaptă ce trece prin origine situată în cadranul II și care are expresia:

$$M = -\frac{K_E K_m \Phi^2}{R_A + R_S} n \quad (3.150)$$

Frânarea dinamică, numită și frânare reostatică este cu atât mai eficientă cu cât rezistența suplimentară este mai mică. În tracțiunea feroviară frânarea dinamică se execută pe baza unei scheme de comandă automată pentru a asigura securitatea traficului. Mecanicul este obligat să țină un contact închis de la maneta controlerului de comandă, contact care se deschide în cazul unui leșin sau infarct al mecanicului, iar trenul se oprește brusc.

C - Frânarea propriu-zisă prin inversarea polarității tensiunii

Această metodă de frânare se folosește de obicei la acționările reversibile (valțurile laminoarelor) care prin procesul tehnologic impus de deplasarea caiei solicită o frânare rapidă și o accelerare în sens invers. Se consideră un motor cu excitație separată funcționând în cadranul I, iar caracteristica de frânare se află în cadranele II și III, expresia caracteristicii fiind dedusă din relația (3.144):

$$n = -n_0 - \frac{R_A + R_S}{K_E K_m \Phi^2} M$$

Pentru ca punctul de funcționare să treacă pe caracteristica IV în A_{IV} (Fig.3.129), odată cu inversarea polarității tensiunii de alimentare este necesară și înserierea cu indusul a unei rezistențe R_S .

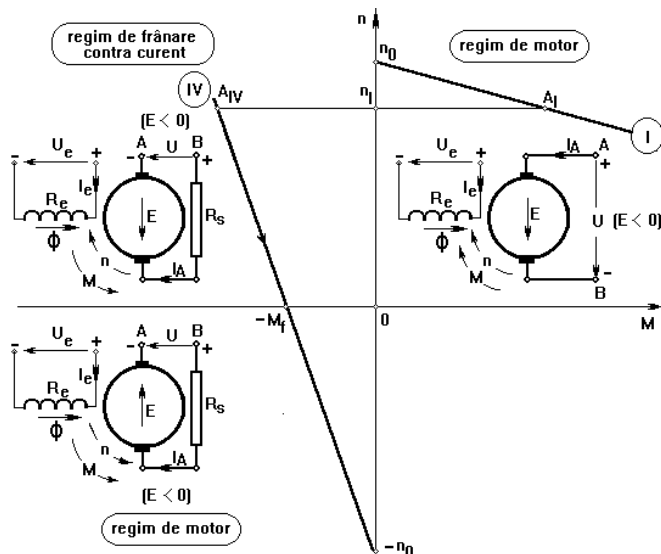


Fig. 3.129. Caracteristica mecanică la frânarea propriu-zisă prin inversarea polarității tensiunii de alimentare.

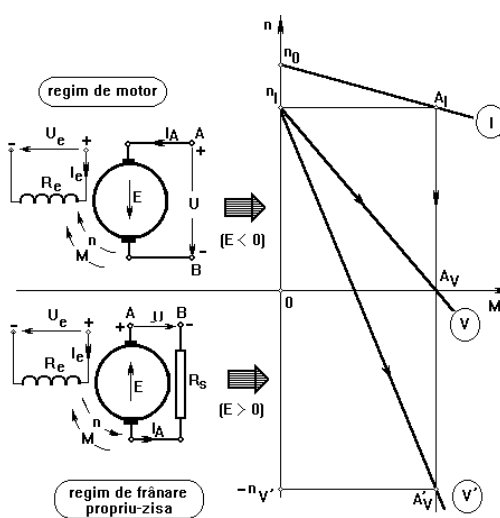


Fig. 3.130. Caracteristica mecanică la frânarea propriu-zisă prin majorarea lui R_S .

Viteza scade până în zero și apoi își schimbă sensul de rotație dacă motorul nu este deconectat de la rețea.

Frânarea propriu-zisă prin inversarea sensului de rotație

Acest procedeu de frânare este specific instalațiilor de ridicat.

Caracteristica mecanică, dedusă din relația (3.144) se găsește în cadranul IV și este prezentată în figura 3.130.

Ridicarea rapidă a sarcinii se efectuează cu viteza corespunzătoare punctului A_I . Se poate găsi o rezistență suplimentară pentru care greutatea să rămână în echilibru, (punctul A_V). Pentru valori mai mici ale rezistenței suplimentare greutatea este ridicată cu viteze mai mici. Dacă rezistența suplimentară are valoare mai mare, cuplul datorat forței gravitaționale învinge cuplul electromagnetic și greutatea începe să coboare (punctul V').

3.8.6. SERVOMOTOARE DE CURENT CONTINUU

Servomotoarele de curent continuu sunt în cele mai frecvente cazuri, elemente de execuție în sistemele de automatizare. În funcție de obiectivul reglajului, servomotoarele sunt puse să funcționeze în condiții foarte variate privind forma caracteristicilor referitoare la viteză, putere, tensiuni, condiții exterioare. Datorită acestui fapt, servomotoarele trebuie să posede o serie de calități, dintre care cele mai importante sunt:

- posibilitatea reglajului în limite largi al vitezei rotorului folosind co-manda prin modificarea tensiunii aplicate indusului sau înfășurării de excitație; liniaritatea caracteristicilor mecanice și de reglaj;
- absența autopornirii în lipsa semnalului de comandă;
- existența unui cuplu de pornire mare;
- capacitate de suprasarcină ridicată;
- putere de comandă mică;
- constantă electromecanică de timp redusă ceea ce determină o viteză de răspuns ridicată;
- stabilitatea funcționării pentru întreaga gamă de viteză;
- gabarit și greutate specifică mică.

Principalele dezavantaje ale servomotoarelor de curent continuu constau în prezența colectorului și a fenomenelor de comutație fapt ce limitează utilizarea acestora în medii explozive sau cu mult praf.

3.8.6.1. Construcția servomotoarelor de curent continuu

Din punct de vedere constructiv, servomotoarele de curent continuu cuprind aceleași elemente funcționale ca și mașinile clasice de curent continuu, particularitățile constructive fiind impuse de condițiile enumerate mai sus [28].

După tipul constructiv al rotorului, servomotoarele de curent continuu se împart în trei categorii:

- A) - cu rotor cilindric (prevăzut cu creștături sau fără creștături);
- B) - cu rotor în formă de pahar;
- C) - cu rotor disc (cu întrefier axial).

Servomotoarele de curent continuu folosesc, ca sistem de excitație, magneții permanenți și mai rar excitația electromagnetică. Sistemul de excitație cu magneți permanenți s-a impus datorită unor avantaje, cum ar fi: dimensiuni mai mici, randamente superioare și eliminarea problemelor ridicate de încălzire. Servomotoarele cu excitație electromagnetică, se construiesc în general, pentru puteri mai mari. Uneori se recurge la o soluție hibridă în care se folosesc ambele tipuri de excitație.

A) - servomotoare de curent continuu cu rotor cilindric.

Servomotoarele de curent continuu cu excitație realizată cu magneți permanenți se deosebesc constructiv funcție de materialele magnetice utilizate care au caracteristici magnetice diferite.

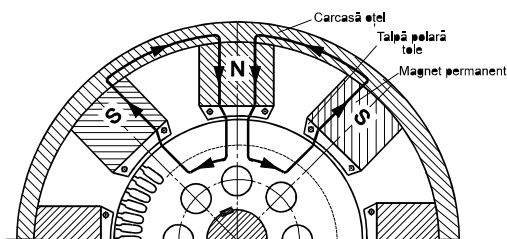


Fig. 3.131. Secțiune transversală printr-un servomotor cu poli realizați din magneți Alnico.

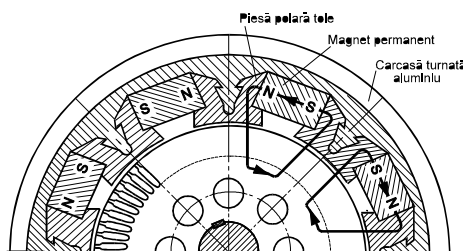


Fig. 3.132. Secțiune transversală printr-un servomotor cu magneți Alnico plasați între poli.

În cazul folosirii magneților de tip Alnico cu inducție remanentă mare și câmp coercitiv redus, poli se pot realiza din materialul magnetic permanent, (Fig. 3.131), iar pentru reducerea reacției indusului cu efect demagnetizant, se prevăd tălpi polare din oțel electrotehnic. Se face precizarea că notațiile înscrise pe fiecare pol definesc polaritatea acestuia. Magneții sunt lipiți cu rășini epoxidice de carcasa din oțel care servește la închiderea liniilor câmpului de excitație. Dezavantajul principal al acestei variante constructive constă în lungimea relativ mare a magneților datorită câmpului coercitiv redus, iar remagnetizarea se face cu ajutorul unor bobine plasate în jurul magneților permanenți.

În cazul folosirii materialelor de tip Alnico având inducții remanente scăzute, dar câmpuri coercitive și energii magnetice mai ridicate (Tyconal), magneții permanenți sunt dispuși pe corzile carcasi circulare (Fig. 3.132). În acest caz, carcasa servește numai ca suport mecanic, iar liniile câmpului magnetic nu se mai închid prin ea, fapt ce permite confecționarea acesteia din materiale nemagnetice (de exemplu aluminiu).

Întrefierul servomotorului se realizează cât mai mic posibil pentru a reduce volumul magneților permanenți, în schimb se accentuează efectul reacției indusului și al variației reluctanței circuitului magnetic datorită prezenței creștăturilor rotorice.

În cazul în care se utilizează ferite (prețul de cost fiind mai redus), magneții vor avea lungime mai mică datorită inducției remanente reduse și a câmpului coercitiv mai mare. Această soluție se aplică la mașini cu număr mare de poli (10-12), feritele fiind montate pe coardă (Fig. 3.133) sau între poli (Fig. 3.134).

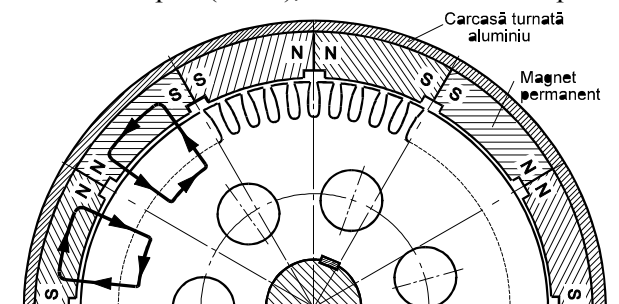


Fig. 3.133. Secțiune transversală printr-un servomotor cu excitație din ferite plasate pe coardă.

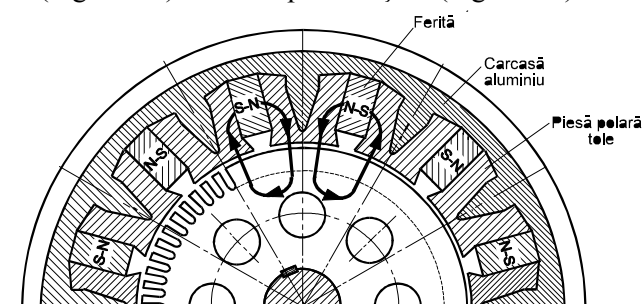


Fig. 3.134. Secțiune transversală printr-un servomotor cu magneți din ferite plasate între poli.

La toate variantele constructive prezentate, rotoarele servomotoarelor sunt prevăzute cu înfășurări introduse în creștături. Prezența creștăturilor provoacă oscilații ale cuplului electromagnetic între două limite impuse de valoarea fluxului polar care se modifică atunci când sub talpa polară intră o creștătură sau un dinte. Fenomenul este mai supărător la viteze reduse și poate fi eliminat dacă se adoptă o variantă constructivă cu rotor feromagnetic neted (Fig. 3.135).

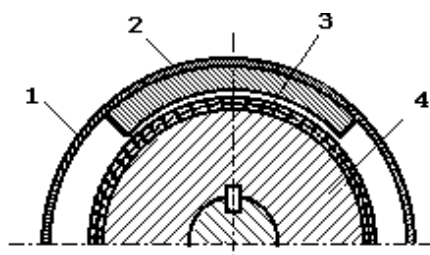


Fig. 3.135. Servomotor cu rotor neted.

Înfășurarea rotorică 3 se plasează la exteriorul rotorului 4, înglobată în rășini epoxidice și consolidată cu fibră de sticlă. Sistemul de excitație este realizat cu magneți permanenți 2, fixați de carcasa feromagnetică 1. Construcția prezintă un întrefier mărit ceea ce determină un gabarit mai mare față de servomotoarele cu rotor creștat.

B) - servomotoare de curent continuu cu rotor în formă de pahar

Pentru reducerea constantelor de timp și diminuarea efectelor negative provocate de prezența creștăturilor se recurge la servomotoare cu rotor neferomagnetic, în formă de pahar. În figura 3.136 se prezintă o secțiune longitudinală printr-un astfel de servomotor (1-carcasa feromagnetică, 2 - excitația din magnet permanent, 3 - rotorul în formă de pahar, 4 - statorul interior din material feromagnetic, 5 - scut, 6 - lagăr, 7 - ax, 8 - colector, 9 - perii, 10 - fereastră, 11 - înfășurare rotorică).

Înfășurarea rotorică se plasează pe un pahar neferomagnetic ce se rotește în întrefierul dintre cele două statoare. Paharul se realizează din rășini sau material plastic iar statorul interior servește la închiderea liniilor de câmp magnetic. Pentru obținerea unor constante de timp reduse aceste servomotoare se construiesc cu diametre

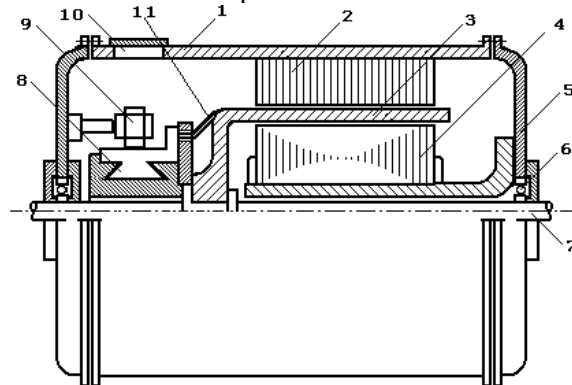


Fig. 3.136. Servomotor cu rotor în formă de pahar.

mici de 0,3-0,5 din lungime, momentul de inerție reducându-se de aproape zece ori față de construcțiile clasice. Deoarece rotorul nu mai conține fier se elimină pierderile prin histerezis și fenomenul de saturație precum și înțepenirile magnetice, iar constanta electrică este foarte redusă (de ordinul 0,1 ms). La construcțiile mai recente s-a renunțat la suportul neferomagnetic rotoric, înfășurările fiind consolidate cu ajutorul unor rășini încât rotorul capătă aspectul de coș sau coajă. Servomotoarele de curent continuu cu rotor în formă de pahar sunt folosite în aparatura profesională de redare și înregistrare a sunetelor, la acționarea perifericilor calculatoarelor etc.

C) - servomotoare de curent continuu cu rotor disc

Servomotoarele de curent continuu cu rotor disc (Fig. 3.137) au rotorul 1 sub formă de disc din fibre de sticlă pe care este dispusă o înfășurare 2 de tip ondulat, realizată din cupru prin ștanțare sau corodare. Magneții permanenți 3 se fixează prin lipire, pe cele două flanșe 7, ce constituie statorul. Magneții se succed alternativ pe fiecare flanșă (N,S,N,S.....) astfel încât polii magneților, așezați față în față pe cele două flanșe, să fie de semne contrare iar câmpul magnetic să se închidă axial (paralel cu axul 5, fixat în lagărele 4) prin întrefierul mașinii.

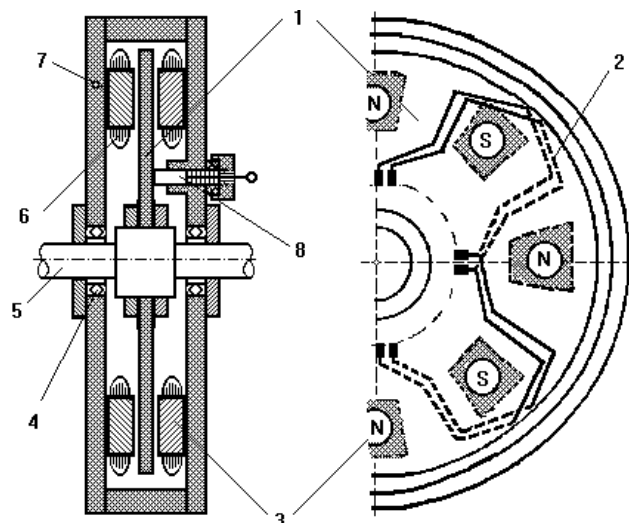


Fig. 3.137. Servomotor cu rotor în formă de disc.

La puteri mai mici, magneții permanenți sunt dispuși numai pe o flanșă, cealaltă folosind la închiderea câmpului magnetic.

În cazul în care servomotoarele sunt prevăzute cu magneți permanenți metalici, pe magneți se dispun înfășurările 6 care permit remagnetizarea acestora cu mașina în stare montată. Rotorul-disc trebuie să fie rezistent atât din punct de vedere termic cât și mecanic. La puteri mari se recurge la suprapunerea mai multor discuri, înfășurările conectându-se în serie.

Numărul de discuri suprapuse este însă limitat de creșterea întrefierului. Întrucât fierul este eliminat din construcția rotorului, influența fenomenului de reacție a indusului și de comutație este minimă. Înfășurările rotorice realizate pe baza tehnicii circuitelor imprimate, permit utilizarea unor densități de curent de

aproape zece ori mai mare decât decât densitatea de curent din înfășurările de construcție clasică. Acest

lu-cru face posibilă obținerea unor valori ridicate pentru cuplu impulsional.

Servomotoarele cu rotor disc au greutatea redusă și constante de timp mici ceea ce lărgeste domeniul de utilizare (calculatoare, medicină, industria chimică și textilă, acționarea avansului la mașini unelte).

Colectoarele servomotoarelor de curent continuu se execută din lamele de cupru electrotehnic, izolate între ele cu mică sau rășini polimerice și presate pe butuci din materiale plastice. La servomotoarele de viteză ridicată se folosesc inele de consolidare din textolit sau oțel. La mașinile cu întrefier axial, colectorul este de tip radial realizat fie din conductoarele înfășurării fie special construit și montat direct pe disc.

Periile se execută din bronz sau argint grafitat pentru micșorarea căderii de tensiune la trecerea curentului. Pentru reducerea uzurii conductoarelor active în cazul utilizării lor drept colector la mașinile cu întrefier axial, periile se confecționează din grafit pur. Susținerea periilor se face ca în cazul mașinilor clasice.

Lagărele servomotoarelor de curent continuu sunt realizate cu rulmenți. La viteze ridicate se preferă lagărele de alunecare de bronz, bronz-grafitat sau molibden. Întrucât ungerea lagărelor de alunecare ridică probleme, la viteze foarte ridicate se folosesc lagăre cu pernă de aer.

3.8.6.2. Caracteristicile servomotoarelor de curent continuu

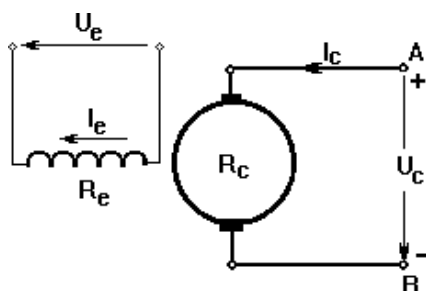


Fig. 3.138. Schema de principiu la reglajul prin indus.

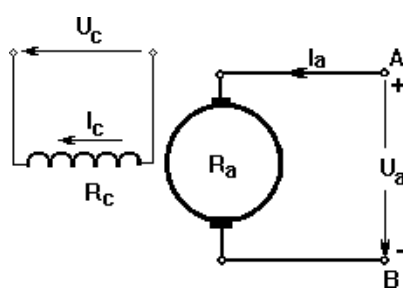


Fig. 139. Schema de principiu la reglajul prin excitație.

Servomotoarele de curent continuu transformă un semnal electric într-o mișcare de rotație, preferându-se o dependență liniară între cele două mărimi. În acest scop se preferă de regulă un servomotor cu excitație independentă, reglarea vitezei obținându-se prin variația tensiunii aplicate la perii (Fig. 3.138), menținându-se constantă tensiunea de excitație (*reglajul prin indus*) sau prin modificarea tensiunii de excitație (Fig.3.139), menținându-se constantă tensiunea la perii (*reglajul prin excitație*) [36].

a) Reglajul prin indus

Tensiunea aplicată indusului (Fig. 3.138) se consideră tensiune de comandă încât sistemul de ecuații diferențiale pentru servomotorul de curent continuu conține ecuațiile de tensiuni pentru circuitul inductor, circuitul indusului și ecuația de mișcare:

$$\begin{cases} -L_e \frac{di_e}{dt} = R_e i_e - u_e \\ -\alpha \Omega \psi_d - L_a \frac{di_c}{dt} = R_c i_c - u_c \\ J \frac{d\Omega}{dt} = C_m \psi_d i_c - M_r \end{cases} \quad (3.151)$$

În acest sistem s-a notat cu R_e , rezistența totală a circuitului indusului care este circuit de comandă, cu M_r cuplul rezistent la arbore iar $\alpha = 2p/\pi$ devine egal cu C_m pentru cuplul electromagnetic total.

Pe toată durata reglajului prin indus se menține constantă tensiunea aplicată înfășurării de excitație încât curentul de excitație se menține constant:

$$I_e = \frac{U_e}{R_e} = \text{const.} \quad (3.152)$$

Dacă se neglijează efectul reacției indusului pe axa longitudinală, se poate considera că fluxul total care îmbrățișează înfășurarea indusului după această axă este constant încât tensiunea electromotoare de rotație se scrie:

$$\alpha \Omega \psi_d = \alpha \Omega L_{ea} \frac{U_e}{R_e} = \alpha C_\Phi U_e \Omega; \quad C_\Phi = \frac{L_{ea}}{R_e}, \quad (3.153)$$

iar sistemul de ecuații (3.151) capătă forma:

$$\begin{cases} R_e I_e = U_e \\ -\alpha C_\Phi \Omega U_e - L_a \frac{di_c}{dt} = R_c i_c - u_c \\ J \frac{d\Omega}{dt} = C_m C_\Phi U_e i_c - M_r \end{cases} \quad (3.154)$$

În regim staționar, se consideră că tensiunea de comandă rămâne constantă (i_c devine constant) determinând modificarea ecuațiilor diferențiale din sistemul (3.154):

$$\begin{cases} R_e I_e = U_e \\ -\alpha C_\Phi U_e \Omega = R_c i_c - u_c \\ M_r = M_e = C_m C_\Phi U_e I_e \end{cases} \quad (3.155)$$

Pentru simplificarea formei de scriere a caracteristicilor mașinii se introduce o mărime λ (numită *coeficient de semnal*) definită prin raportul:

$$\lambda = \frac{U_c}{U_e} \quad (3.156)$$

Din ecuația de tensiuni pentru circuitul indusului se deduce expresia curentului de comandă:

$$I_c = \frac{\lambda U_e - \alpha C_\Phi U_e \Omega}{R_c}, \quad (3.157)$$

care se introduce în expresia cuplului electromagnetic, obținându-se:

$$M_e = M_r = \frac{C_m C_\Phi \lambda U_e^2 - \alpha C_m C_\Phi^2 U_e^2 \Omega}{R_c} \quad (3.158)$$

Pentru scrierea ecuațiilor în mărimi relative se consideră ca mărime de referință, cuplul electromagnetic nominal la pornire ($\Omega = 0$), obținut pentru un coeficient de semnal egal cu unitatea ($\lambda = 1$):

$$M_{pn} = \frac{C_m C_\Phi U_e^2}{R_c} \quad (3.159)$$

Ecuația caracteristicii mecanice, în unități relative are forma:

$$m = \frac{M_e}{M_{p0}} = \lambda - \alpha C_\Phi \Omega . \quad (3.160)$$

Din această ecuație se calculează viteza teoretică de mers în gol ideal:

$$\Omega_0 = \frac{1}{\alpha C_\Phi} , \quad (3.161)$$

obținută pentru cuplul electromagnetic relativ, egal cu zero ($m = 0$). În realitate o asemenea viteză nu poate fi obținută datorită prezenței pierderilor de mers în gol din mașină dar se folosește ca mărime de bază pentru determinarea vitezei relative:

$$v = \frac{\Omega}{\Omega_0} = \frac{n}{n_0} , \quad (3.162)$$

astfel încât caracteristica mecanică devine:

$$m = \lambda - v , \quad (3.163)$$

reprezentând ecuația unei drepte. În figura 3.140-a) sunt reprezentate caracteristicile mecanice pentru diverse valori ale coeficientului de semnal.

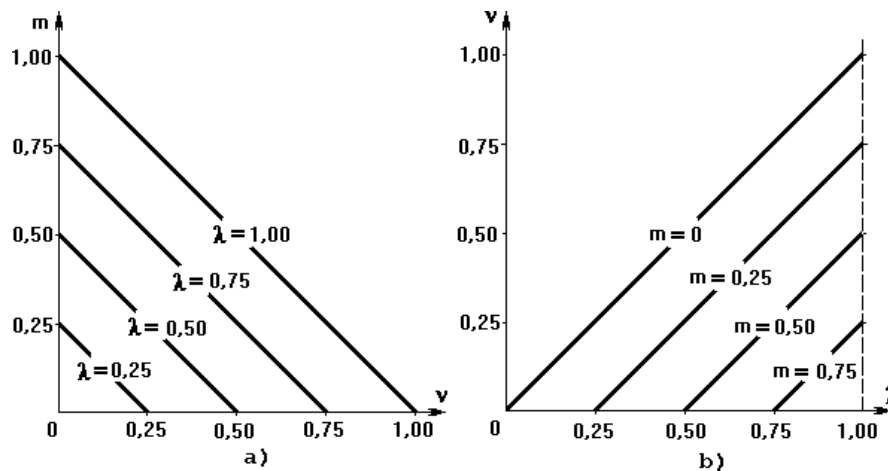


Fig. 3.140. Caracteristicile servomotorului de curent continuu cu reglajul prin indus:
a) – caracteristici mecanice; b) – caracteristici de reglaj.

Se observă că servomotorul de curent continuu la care se face comanda prin indus prezintă caracteristici mecanice liniare și paralele între ele, încât pentru trasarea lor sunt suficiente două puncte oarecare. Viteza teoretică de mers în gol se determină pentru un regim oarecare de sarcină măsurând tensiunea și curentul de comandă, tensiunea de excitație și viteza de rotație. Dacă se folosesc relațiile (3.157) și (3.161) se obține expresia:

$$U_c - R_c I_c = \frac{\Omega}{\Omega_0} U_e , \quad (3.164)$$

cu care se calculează viteza teoretică de mers în gol:

$$\Omega_0 = \Omega \frac{U_e}{U_c - R_c I_c} ; \Rightarrow n_0 = n \frac{U_e}{U_c - R_c I_c} . \quad (3.165)$$

Din expresia caracteristicii mecanice se determină ușor expresia familiei de caracteristici de reglaj:

$$v = \lambda - m , \quad (3.166)$$

cu care s-au trasat caracteristicile de reglaj pentru diverse valori ale cuplului electromagnetic relativ (Fig. 3.140-b).

În realitate, caracteristicile prezentate nu sunt liniare, abaterile datorându-se diverselor cauze: reacția indusului, căderea de tensiune pe perii, etc.

Se poate determina cu ușurință variația puterii mecanice în funcție de viteza de rotație, dacă se pornește de la puterea mecanică utilă rezultată din bilanțul de puteri:

$$P_m = P_c - R_c I_c^2 , \quad (3.167)$$

în care s-a notat cu:

$$P_c = U_c I_c = \lambda U_e I_c , \quad (3.168)$$

puterea absorbită de motor, prin indus, iar cu $R_c I_c^2$ pierderile prin efect electrocaloric în circuitul de comandă. Dacă se ține cont de expresia curentului de comandă, dedusă din relația (3.157):

$$I_c = \frac{U_e}{R_c}(\lambda - v) , \quad (3.169)$$

puterea de comandă devine:

$$P_c = \frac{U_e^2}{R_c} \lambda(\lambda - v) , \quad (3.170)$$

iar puterea mecanică globală este:

$$P_m = \frac{U_e^2}{R_c} (\lambda\lambda - v^2) . \quad (3.171)$$

Această expresie se raportează la puterea absorbită în momentul pornirii:

$$p_m = \frac{P_m}{U_e^2 / R_c} = \lambda v - v^2 . \quad (3.172)$$

Dependența puterii mecanice relative în funcție de viteza relativă, pentru diverse valori ale coeficientului de semnal, sunt date în figura 3.141. Puterea mecanică relativă maximă se deduce prin anularea derivatei $dp_m/d\lambda$:

$$p_{m \max} = \lambda^2 / 4 . \quad (3.173)$$

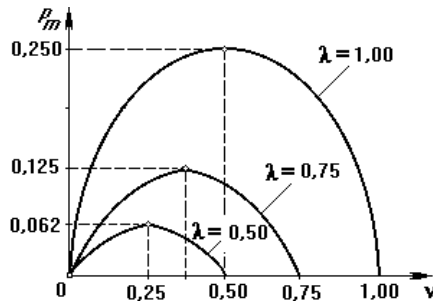


Fig. 3.141. Curbele de variație a puterii mecanice.

Reglajul prin indus se aplică servomotoarelor la care excitația se realizează cu magneți permanenți. Pentru modificarea tensiunii de alimentare a indusului se folosesc amplificatoare electronice liniare și amplificatoare de tip redresor comandat.

b) Reglajul prin excitație

Acest procedeu de reglare poate fi aplicat servomotoarelor prevăzute cu excitație electromagnetică. De această dată, mărimile de comandă sunt tensiunea la borne și curentul din înfășurarea de excitație. Coeficientul de semnal se definește prin relația:

$$\lambda = \frac{U_c}{U_a} . \quad (3.174)$$

Pentru schema din figura 3.109 se scriu ecuațiile în regim staționar:

$$\begin{cases} R_c I_c = U_c \\ -\alpha C_\Phi U_c \Omega = R_a I_a - U_a \\ M_r = M_e = C_m C_\Phi U_e I_a = C_m C_\Phi \lambda U_a I_a . \end{cases} \quad (3.175)$$

Curentul prin indus se deduce din ecuația a doua a sistemului de ecuații de mai sus și expresia coeficientului de semnal:

$$I_a = \frac{U_a - \alpha C_\Phi \Omega \lambda U_a}{R_a} , \quad (3.176)$$

iar cuplul electromagnetic devine:

$$M_e = \frac{k_m C_\Phi \lambda U_a^2 - \alpha k_m C_\Phi^2 \Omega \lambda^2 U_a^2}{R_a} . \quad (3.177)$$

Ca și în cazul reglajului prin indus se consideră ca mărime de referință, cuplul electromagnetic nominal la pornire ($\Omega = 0$), obținut pentru un coeficient de semnal egal cu unitatea ($\lambda = 1$):

$$M_{pn} = \frac{C_m C_\Phi U_a^2}{R_a} \quad (3.178)$$

și viteza teoretică de mers în gol:

$$\Omega_o = \frac{1}{\alpha C_\Phi} . \quad (3.179)$$

Ecuația caracteristicilor mecanice, în unități relative, se obține prin împărțirea relației (3.177) la relația (3.178) și are forma:

$$m = \lambda - v \lambda^2 , \quad (3.180)$$

iar pentru caracteristicile de reglaj se deduce relația:

$$v = \frac{\lambda - m}{\lambda^2} . \quad (3.181)$$

În figura 3.142 sunt reprezentate caracteristicile mecanice pentru diferite valori ale coeficientului de semnal. Caracteristicile mecanice își păstrează forma de dependență liniară în schimb prezintă variații mari de

viteza pentru variații mici ale cuplului, ceea ce constituie un inconvenient al procedurii de reglare prin excitație.

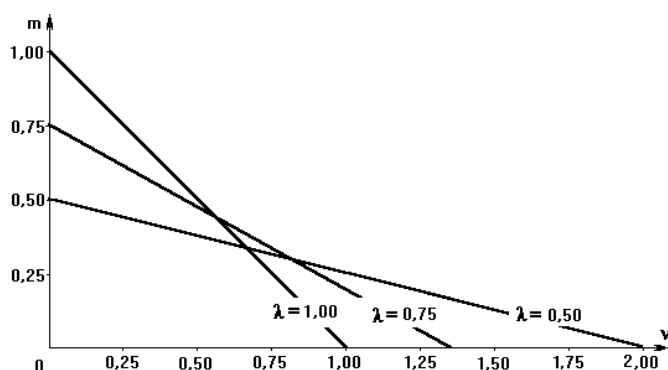


Fig. 3.142. Caracteristicile mecanice la reglajul prin excitație.

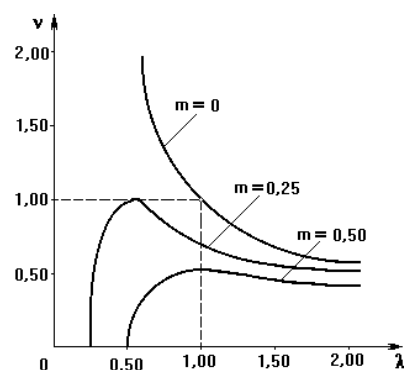


Fig. 3.143. Caracteristicile de reglaj la aplicarea reglajului prin excitație.

Caracteristicile de reglaj reprezintă, dependențe neunivoce între viteza unghiulară și coeficientul de semnal (pentru cupluri mai mici de 0,5); unei valori date a vitezei îi corespund două valori de semnal (Fig. 3.143). În plus aceste caracteristici sunt neliniare ceea ce le face puțin utilizabile în sistemele automate.

Aspectul caracteristicilor mecanice poate fi modificat prin inserierea cu indusul a unei rezistențe suplimentare R_s suficient de mare. În această situație este necesară și creșterea tensiunii de alimentare aplicată indusului (U_a') încât valoarea curentului prin indus și valoarea cuplului electromagnetic, dat de relația:

$$M_e = C_m C_\Phi U_c \left(\frac{U_a'}{R_a + R_s} - \frac{\alpha C_\Phi U_c \Omega}{R_a + R_s} \right), \quad (3.182)$$

să nu mai depindă de viteza unghiulară a indusului (termenul al doilea din paranteză devine neglijabil). Caracteristicile mecanice devin drepte paralele cu axa vitezelor dar metoda nu mai este economică.

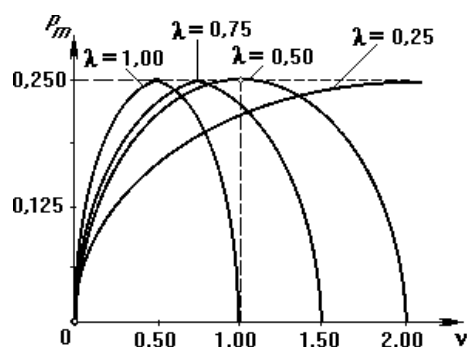


Fig. 3.144. Curbele de variație a puterii mecanice la reglajul prin excitație.

Pentru calculul puterii mecanice globale se determină expresia curentului din circuitul indusului:

$$I_a = \frac{U_a}{R_a} (1 - v\lambda), \quad (3.183)$$

încât se obține:

$$P_m = \frac{U_a^2}{R_a} (\lambda\lambda - v^2\lambda^2), \quad (3.184)$$

sau în unități relative:

$$p_m = \lambda v - v^2\lambda^2. \quad (3.185)$$

Singurul avantaj al reglajului prin excitație în raport cu cel prin indus este independența puterii mecanice maxime de coeficientul de semnal (Fig. 3.144), deci o mai bună utilizare a mașinii la tensiuni de comandă mici.

În concluzie, reglajul prin indus prezintă avantaje față de

reglajul prin excitație:

- caracteristicile mecanice și de reglaj sunt liniare și univoce;
- reglajul vitezei se face în limite largi cu posibilitate de reversare;
- caracteristicile mecanice și de reglaj sunt paralele cu panta mai mare;
- în timpul staționării indusul nu este parcurs de curent.

Toate aceste avantaje au impus procedeul de reglare prin indus în comparație cu reglajul prin excitație.

Deoarece firmele constructoare delimitează domeniile de funcționare pe caracteristica mecanică este necesară definirea unor parametri ai servomotoarelor [28].

Pentru servomotoarele utilizate la acționarea avansurilor pentru mașini- unelte se definesc următoarele mărimi:

- **M_N - cuplul nominal** este cuplul dezvoltat de servomotor cu arborele blocat, la alimentarea de la o sursă de curent pur continuu, temperatura înfășurării rotorice nedeășind limita impusă de clasa de izolație (temperatura mediului ambiant este de 40°C);
- **n_N - turația nominală** este cea mai ridicată turație pentru care servomotorul poate dezvolta cuplul nominal, fără a depăși limita de temperatură impusă în condiții date de ventilație, mașina funcționând timp nelimitat, la o comutație normală;

- $M_{\max}$ - **cuplul maxim** este cuplul intermitent maxim ce poate fi dezvoltat în decursul procesului tranzitoriu pe o durată de cel puțin 0,2 secunde la comutație normală și fără a produce demagnetizarea magnetelor permanenți;
- $n_{\max}$ - **turația maximă** este turația cea mai mare la care servomotorul poate funcționa în regim de scurtă durată (un minut), la cuplu egal cu jumătate din valoarea cuplului nominal, în condiții sigure de comutație.

Funcționarea servomotoarelor la anumite valori maxime este limitată de reacția indusului și fenomenul de comutație, firmele constructoare indicând prin diverse grafice domeniul posibil de utilizare.

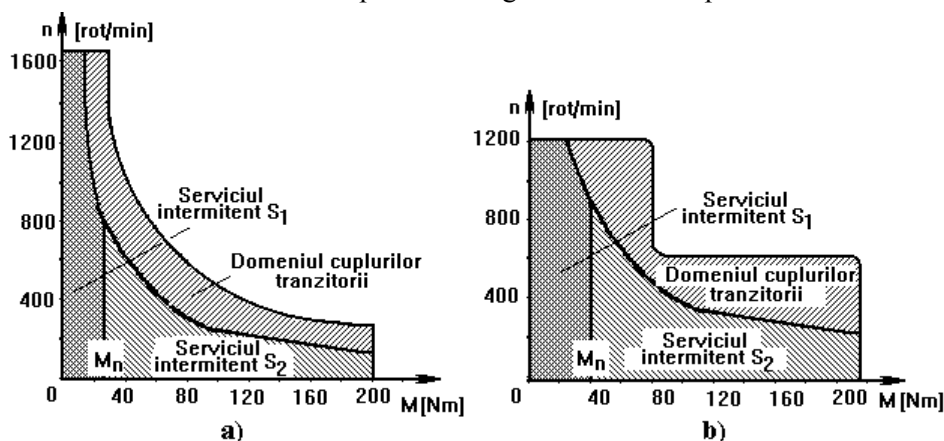


Fig. 3.145. Domeniile de funcționare admise pentru servomotoare cu rotor cilindric: a) – Inland; b) – Porter.

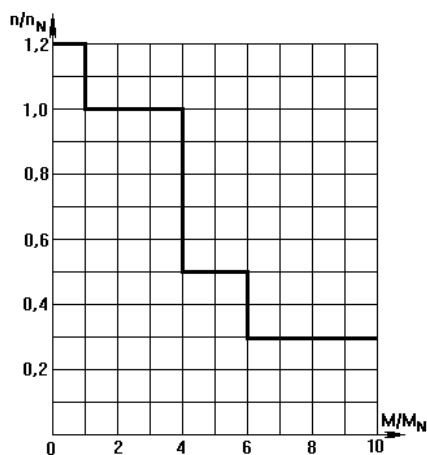


Fig. 3.146. Domeniile de funcționare admise pentru servomotoarele românești.

În figura 3.145 sunt indicate domeniile de funcționare admise din punctul de vedere al comutației pentru servomotoare de curent continuu cu rotor cilindric: tip Inland -a) și tip Porter -b) iar în figura 3.146 sunt indicate domeniile de funcționare admise pentru servomotoarele de curent continuu de fabricație românească.

Pentru servomotoarele cu rotor pahar și disc, comutația limitează mult mai puțin domeniul de funcționare al mașinii. Limitele domeniilor de funcționare se extind dacă se utilizează ventilatoare suplimentare (ventilație forțată).

3.9. SIMULAREA REGLĂRII VITEZEI MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU

3.9.1. REGLAREA VITEZEI MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU LA FLUX CONSTANT

Mașina de curent continuu s-a impus față de mașinile de curent alternativ prin posibilitatea reglării co-mode și în limite largi a turației.

Reglarea vitezei motoarelor de curent continuu se poate face la flux constant și viteze sub valoarea nominală, prin modificarea curentului din indus. Pentru acest regim de funcționare al mașinii de curent continuu cu viteză reglabilă, a fost conceput modelul din figura 3.147.

În cazul funcționării sub turația nominală, fluxul este menținut constant la valoarea sa nominală iar viteza mașinii variază în funcție de tensiunea pe indus. O buclă de control de tip cascadă asigură reglarea curentului în indus și a turației. La ieșirea regulatorului de turație, este instalat un limitator care definește curentul de referință pentru indusul motorului. Astfel, mașina funcționează în acest caz, la cuplu constant.

Modelul SIMULINK are la baza lui patru componente principale: modelul mașinii de curent continuu, modelul regulatorului de viteză (regulator de tip PI), modelul regulatorului de curent de excitație (regulator de tip PI) și modelul regulatorului de curent din indus (regulator de tip PI) [42].

Structura modelului mașinii de curent continuu este prezentată în figura 3.148. și are la bază relațiile (3.186).

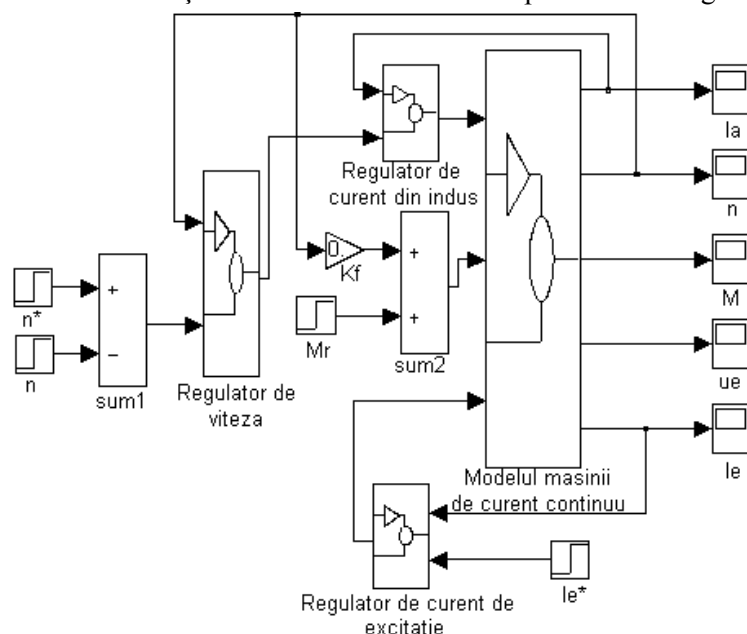


Fig. 3.147. Modelul SIMULINK al mașinii de curent continuu cu flux constant.

Modelul corespunde unei mașini de curent continuu cu următorii parametri nominali: $U_N = 220$ V, $I_N = 8,3$ A, $n_N = 1470$ rot/min;

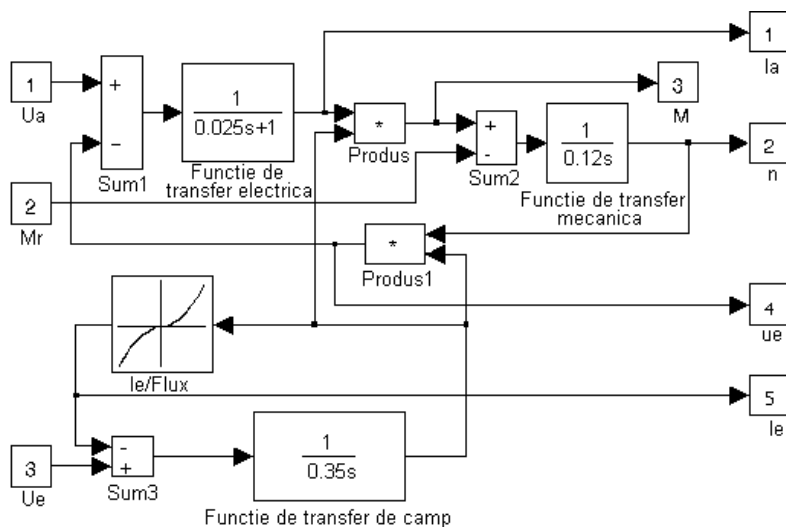


Fig. 3.148. Modelul SIMULINK al mașinii de curent continuu.

$$\begin{cases} u_a = R i_a + \frac{d}{dt}(L_a i_a) - u_e ; & u_e = -p \frac{N}{a} n \Phi = K_e n \Phi \\ u_{ex} = R_e i_e + \frac{d}{dt}(L_e i_e) ; & M - M_r = J \frac{d\Omega}{dt} \\ M = p \frac{N}{2\pi a} i_a \Phi = K_M i_a \Phi ; & i = i_e + i_a \end{cases} \quad (3.186)$$

Deoarece studiul în regim tranzitoriu al mașinii este mai convenabil de făcut în mărimi relative, pentru mașina considerată, parametri de raportare sunt: $U_{bază} = 220$ V, $I_{bază} = 8,3$ A, $Z_{bază} = 26,5$ Ω , iar în funcție de ei, parametri raportați au valorile: $r_a = 0,151$ (rezistența înfășurării indusului), $r_e = 3,77$ (rezistența înfășurării de excitație), $k_f = 0,2$ (coeficientul de frecare). Constantele de timp ale mașinii sunt: $T_a = 25$ ms (constanta de timp a indusului), $T_e = 300$ ms (constanta de excitație), $T_m = 120$ ms (constanta mecanică), $T_f = 70$ ms (constanta de timp a filtrului detector de viteză).

Simularea a fost realizată modificând referința de turație fără a depăși valoarea nominală a vitezei mașinii. Rezultatele simulării prezintă evoluția variabilelor de control, precum și evoluția variabilelor controlate.

La momentul inițial $t = 0$, se stabilește curentul de excitație la valoarea lui nominală (Fig. 3.149). Valoarea prescrisă a turației este zero până la momentul $t = 1$ și permite circuitului de excitație să stabilească fluxul nominal înainte de pornirea mașinii.

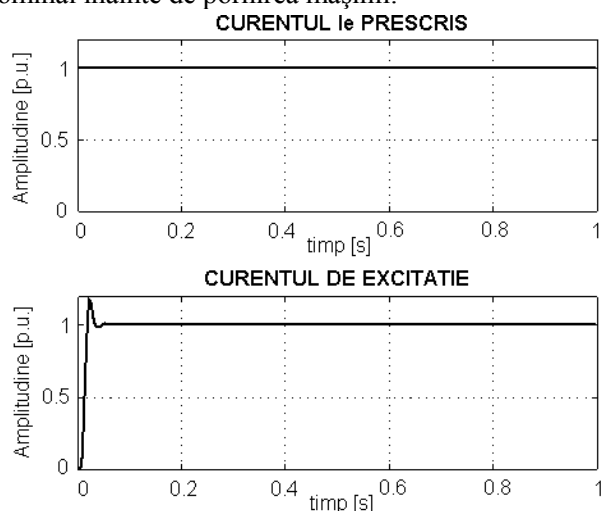


Fig. 3.149. Curentul de excitație.

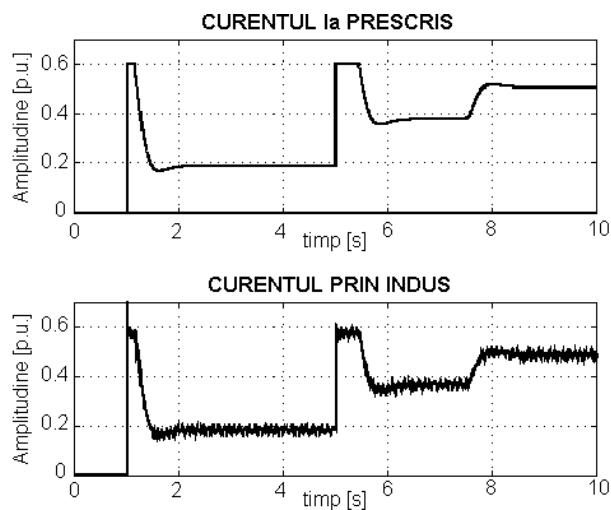


Fig. 3.150. Curentul prin indus.

Între $t = 1$ și $t = 5$ secunde, o valoare prescrisă a vitezei de 0,4 din valoarea nominală, este trimisă regulatorului de turație. Deoarece bucla de reglaj este de tip cascadă pentru turație/curent din indus, comanda ultimului este impusă de ieșirea regulatorului de turație. Ieșirea regulatorului de turație este echipată cu limitator pentru a stabili valoarea maximă admisă a curentului din indus la 0,6 (Fig. 3.150).

La momentul $t = 5$ secunde, se prescrie creșterea vitezei cu 0,4 din valoarea nominală (Fig. 3.151).

Cuplul mașinii este și el limitat (Fig. 3.152). Cum diferența dintre viteza reală și cea de referință scade, curentul din indus se diminuează și el, pentru a se stabili la o nouă valoare corespunzătoare unui regim de funcționare stabilit de noile condiții. În tot acest timp, curentul de excitație este menținut constant la valoarea nominală pentru a garanta funcționarea fără subexcitare a mașinii.

La momentul $t = 7,5$ secunde, o treaptă de amplitudine constantă este aplicată cuplului de sarcină al mașinii. Aceasta conduce la o scădere bruscă a vitezei pe care regulatorul de turație trebuie să o corecteze.

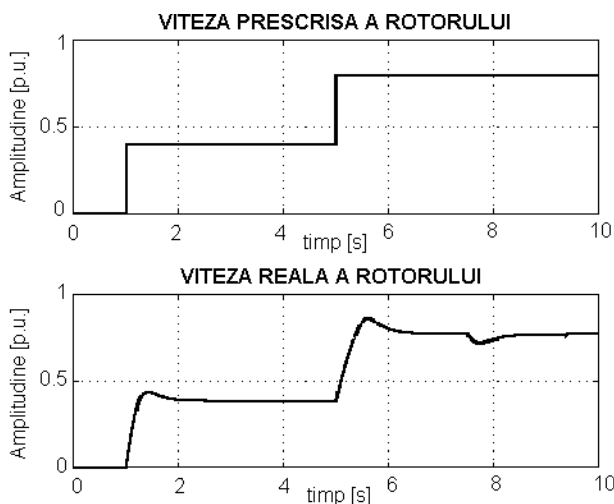


Fig. 3.151. Viteza rotorului mașinii.

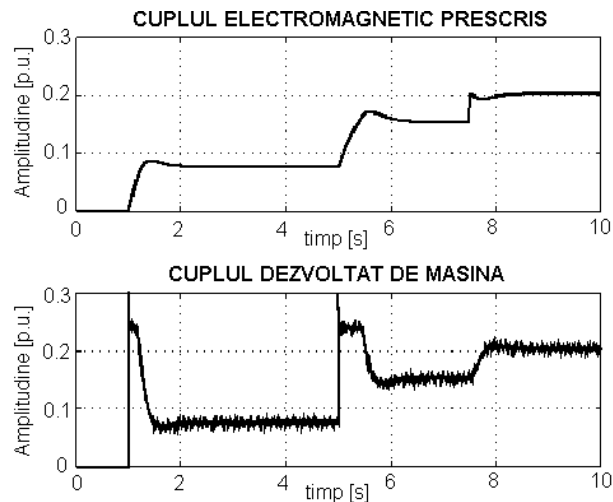


Fig. 3.152. Cuplul electromagnetic.

În figura 3.151, se observă că turația mașinii revine la valoarea ei prestabilită.

3.9.2. FUNCȚIONAREA MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU LA VITEZE SUB ȘI PESTE VITEZA NOMINALĂ

Acest studiu de caz se ocupă cu simularea funcționării mașinii de curent continuu sub și peste viteza nominală.

S-a realizat o simulare pentru a evalua performanțele buclelor de control a turației și a curentului din indus, ambele tip cascadă și a controlului tensiunii electromotoare induse a mașinii. Mașina funcționează la flux constant egal cu cel nominal pentru turații mai mici decât turația nominală, și în regim de subexcitare pentru turații mai mari decât turația nominală.

Pentru a funcționa peste turația nominală, o mașină de curent continuu trebuie să funcționeze în regim de flux slăbit (subexcitare). Tensiunea pe indus este menținută la valoarea nominală, deci și curentul este cel nominal. O buclă de reglaj în cascadă asigură reglarea curentului în indus. Variabila controlată este tensiunea pe indus.

Pentru a obține variația vitezei peste valoarea nominală, se va acționa în circuitul de excitație. De fapt se propune o reglarea a tensiunii electromotoare induse, care trebuie controlată când viteza crește peste valoarea nominală. Variabila controlată în acest caz este tensiunea de excitație. Uzual, pentru alimentarea circuitului de excitație se folosește un redresor monofazat comandat.

O schemă de reglare ce oferă posibilitatea funcționării sub și peste turația nominală a mașinii de curent continuu, a fost realizată în modelul prezentat în figura 3.153 [42].

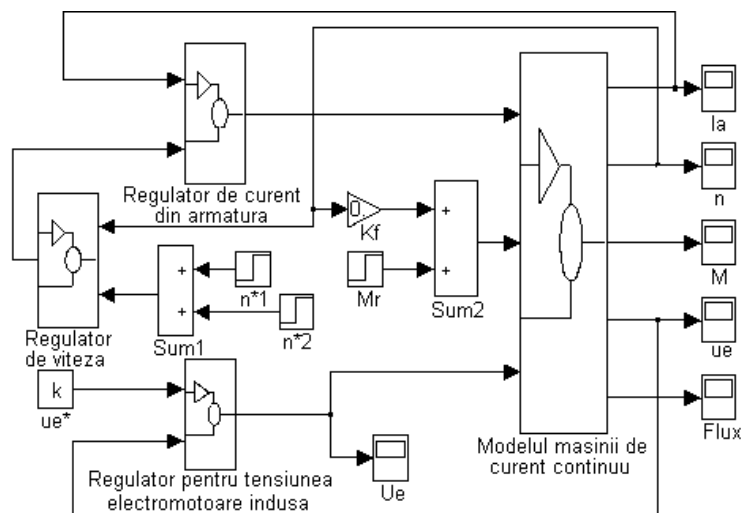


Fig. 3.153. Modelul SIMULINK al mașinii de curent continuu.

Regulatorul tensiunii electromotoare induse este realizat pentru a asigura următoarele caracteristici de performanță

- reglarea tensiunii electromotoare induse e la $e_{\max}$ sau în jur de $0,9 U_a$; se presupune că, căderea de tensiune în mașină este 10% din U_a ;
- pentru funcționarea sub turația nominală, diferența dintre tensiunea indusă în mașină e și $e_{\max}$ este suficient de mare pentru a satura regulatorul PI al buclei tensiunii electromotoare induse;
- pentru funcționare peste turația nominală, regulatorul PI al buclei de reglare a tensiunii electromotoare induse reduce fluxul în mașină pentru a modifica tensiunea indusă. Tensiunea pe indus în acest caz este menținută la valoarea nominală și mașina funcționează la putere constantă (control al turației prin variația curentului de excitație).

Pentru funcționarea în zona slăbirii fluxului, modelul mașinii include neliniarități (datorită formei caracteristicii de magnetizare a circuitului de excitație). Acestea apar în ecuațiile tensiunii electromotoare induse și cele ale cuplului electromagnetic (3.187) și (3.188).

$$M \equiv \Phi I_a, \quad (3.187)$$

$$e \equiv \Phi \Omega. \quad (3.188)$$

Pentru funcționarea sub turația nominală, fluxul este menținut constant, în acest caz modelul mașinii fiind liniar.

Schema de principiu a mașinii de curent continuu cu excitație separată este prezentată în figura 3.148, simularea fiind realizată pentru aceeași mașină folosită anterior.

În această diagramă structurală generală, putem observa un bloc neliniar reprezentând relația neliniară dintre flux și curentul de excitație.

Studiul pe model a fost realizat prin modifica-rea referinței de viteză în timpul simulării, explicația fiind prezentată în cele ce urmează.

Între $t = 0$ și $t = 1s$, referința de turație este zero pentru a oferi timp circuitului de excitație să stabilească fluxul nominal, după cum se poate observa în figura 3.154., curentul de excitație fiind prescris la

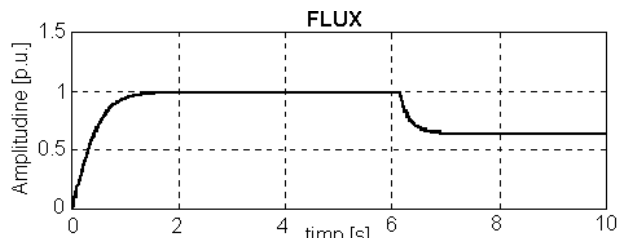


Fig. 3.154. Fluxul din mașină.

= 0,2 la momentul $t = 3,5$ secunde.

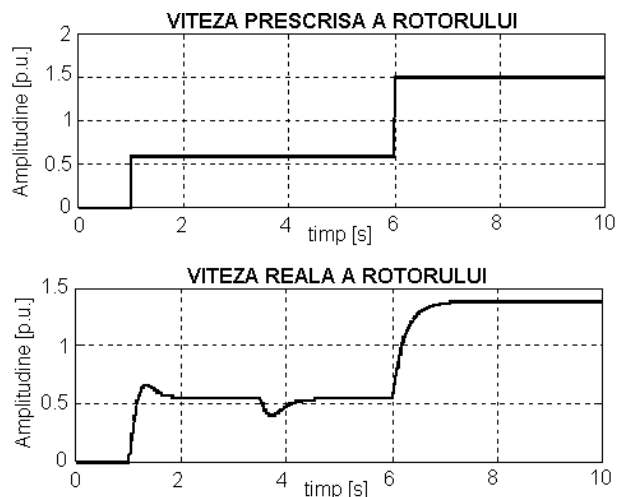


Fig. 3.155. Viteza rotorului.

valoarea nominală. În acest interval, turația, curentul din indus și cuplul electromagnetic dezvoltat de mașină rămân zero.

În intervalul $t = 1s$ și $t = 6s$, circuitul de control al turației primește o comandă referință de 0,6 din turația nominală, conform figurii 3.155. Este necesar să precizăm că în acest interval de timp mașina este supusă unei trepte de cuplu de sarcină M_r

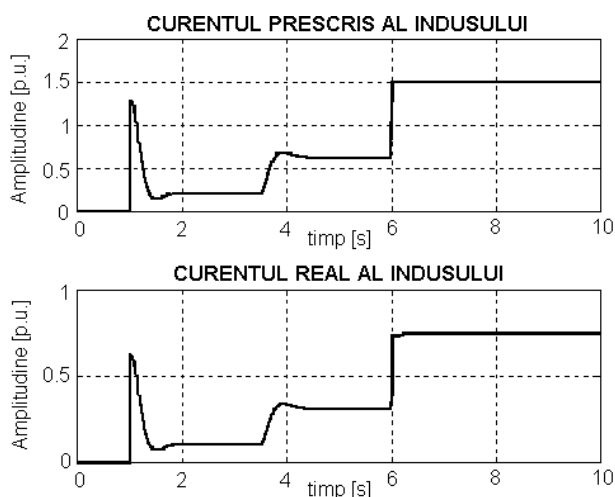


Fig. 3.156. Curentul prin indus.

Deoarece schema conține o buclă de reglare în cascadă pentru turație/curentul din indus, referința ultimului este impusă de regulatorul de turație. Ieșirea regulatorului de turație este prevăzută cu limitator pentru a limita referința curentului din indus la o anumită valoare prestabilită. În rezultatele studiului pe acest model, se poate observa că amplitudinea curentului prin indus este efectiv limitată (Figura 3.156).

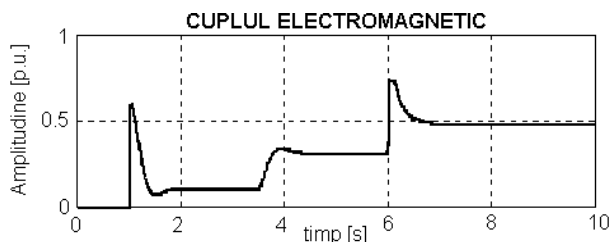


Fig. 3.157. Cuplul electromagnetic dezvoltat de mașină.

Cuplul generat de mașină (conform figurii 3.157) și curentul prin indus (Fig.3.156), răspund acestei trepte. Turația suferă o cădere tranzitorie și apoi revine la valoarea fixată, după cum se poate observa în figura 3.155.

Între $t = 6s$ și $t = 10s$, circuitul de control al turației primește o referință de valoare de 1,5 ori turația nominală, deci mașina va funcționa la turația mai mare decât turația nominală. Se observă că turația mașinii urmărește referința și circuitul de excitație răspunde imediat ce turația depășește valoarea nominală.

În figura 3.158, se constată că tensiunea electromotoare indusă este menținută la 0,9 din valoarea nominală, în timp ce în figura 3.155, se remarcă răspunsul mașinii în regim de subexcitație. Conform figurii 3.155, între $t = 0$ și $t = 6s$ viteza este sub valoarea nominală și tensiunea electromotoare indusă este nereglată. Bucla de control a tensiunii electromotoare induse, ce impune valoarea de 0,9 din valoarea nominală a acesteia, este inactivă în acest interval. Ea va intra în funcțiune în momentul în care se precree o valoare a turației mai mare decât valoarea nominală (intervalul $t = 6s$, $t = 10s$).

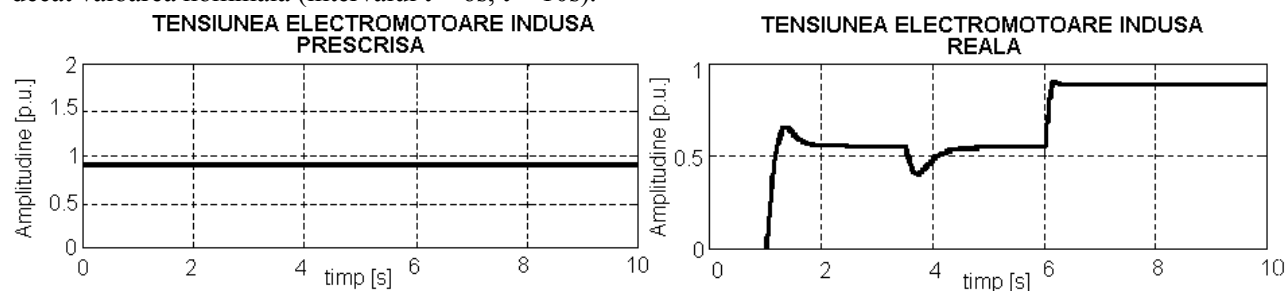


Fig. 3.158. Tensiunea electromotoare indusă.

3.9.3. COMANDA PRIN IMPULSURI A MOTORULUI DE CURENT CONTINUU

Dezvoltarea electronicii de putere a permis materializarea cu eficiență economică deosebită a unei idei mai vechi în ceea ce privește reglarea vitezei motoarelor de curent continuu, alimentate de la surse de curent continuu.

Este vorba de metoda alimentării motorului cu o tensiune de forma unor pulsuri periodice, de înălțime U_a și perioadă T date, durata pulsului și corespunzător, durata pauzei fiind variabile [15].

Variind durata relativă a pulsului de tensiune se variază viteza mașinii la flux de excitație constant. Prin durata relativă a pulsului, α , înțelegem raportul dintre durata t_a a pulsului (durată în care indusul mașinii este alimentat cu tensiunea U_a) și perioada lui, perioadă care cuprinde și pauza în care tensiunea de la bornele indusului este zero ($t_p = T - t_a$). Deoarece $\alpha = t_a/T$, durata relativă a pulsului poate avea valoarea maximă $\alpha = 1$ ($t_a = T$), caz în care mașina este alimentată la tensiunea continuă U_a . Acest caz corespunde modului clasic de funcționare a motorului de curent continuu cu excitație separată, reglarea vitezei făcându-se prin metodele cunoscute. Valoarea minimă a duratei relative este $\alpha = 0$ ($t_a = 0$), caz în care indusul mașinii nu este alimentat. Pentru reglarea vitezei mașinii de curent continuu prin această metodă, valoarea duratei relative trebuie să respecte condiția: $0 < \alpha \leq 1$.

Studiul a fost realizat pe modelul SIMULINK prezentat în figura 3.159, în a cărei componență se găsesc două blocuri principale: modelul SIMULINK al mașinii de curent continuu prezentat anterior, dar cu parametri reali (neraportați) și modelul SIMULINK al generatorului de tensiune în impulsuri.

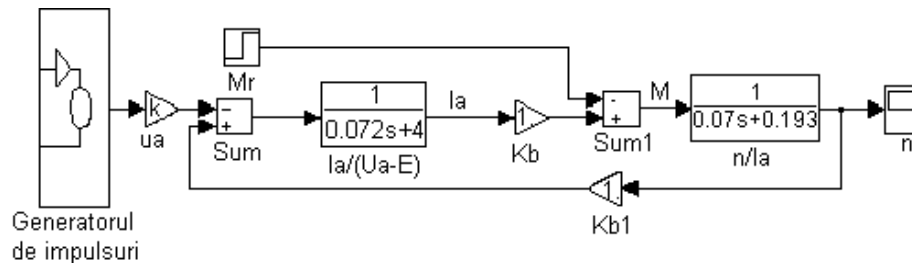


Fig. 3.159. Modelul mașinii de curent continuu alimentată cu tensiune în impulsuri.

Modelul reprezintă funcționarea motorului de curent continuu, într-un singur cadran, în buclă deschisă. Mașina din figura de mai sus este aceeași cu cea din subcapitolele 3.9.1 și 3.9.2, cu următorii parametri reali: inductanța indusului $L_a = 0,072$ H, rezistența circuitului indusului $R_a = 4 \Omega$, momentul de inerție $J = 0,07$ Nm/(radsec²), coeficientul de frecare $K_f = 0,193$ Nm/(radsec⁻¹), coeficientul t.e.m. induse $K_b = 1,429$ [42].

Studiul pe model corespunde următorilor parametri: $T = 0,005$ s, iar cuplul de sarcină $M_r = 0$. Cuplul electromagnetic dezvoltat de mașină echilibrează în regim staționar numai cuplul datorat coeficientului de frecare K_f .

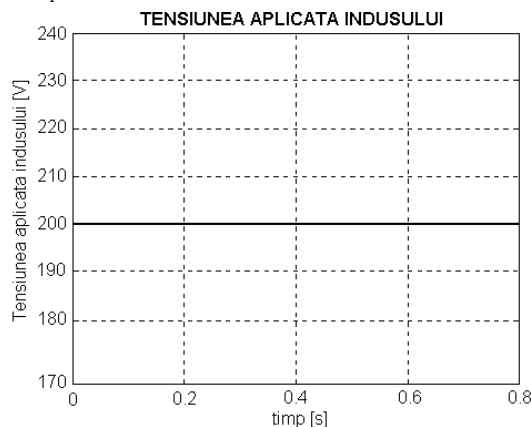


Fig. 3.160. Tensiunea aplicată indusului.

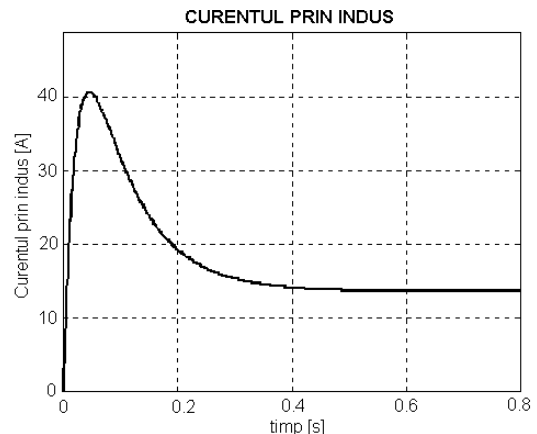


Fig. 3.161. Curentul prin indus.

În primul caz, s-a considerat $\alpha = 1$, ceea ce înseamnă că indusului i s-a aplicat o tensiune continuă $U_a = 200$ V (Fig. 3.160). Pentru această tensiune de alimentare, s-au prezentat evoluțiile în timp ale curentului prin indus (Fig. 3.161), vitezei rotorului (Fig. 3.162) și cuplului electromagnetic dezvoltat de mașină (Fig. 3.163).

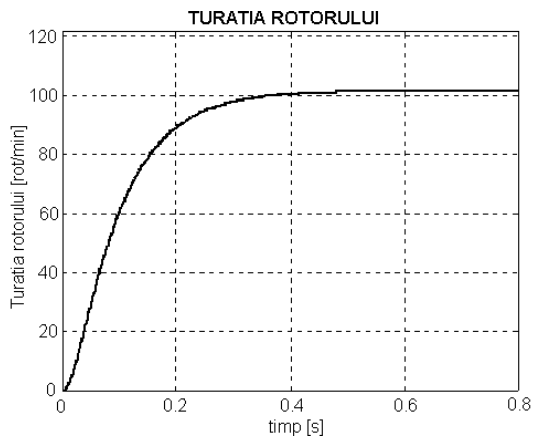


Fig. 3.162. Turația rotorului.

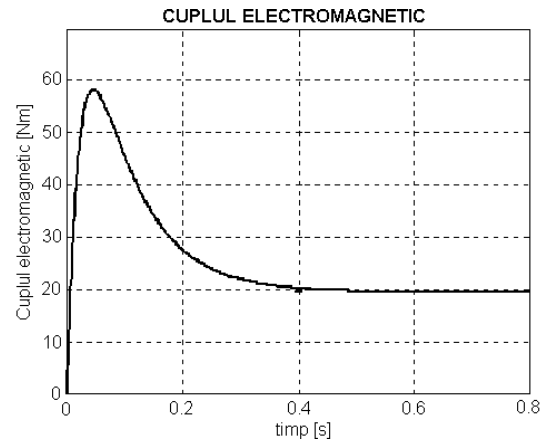


Fig. 3.163. Cuplul electromagnetic.

În al doilea caz, pentru $\alpha = 0,5$ la bornele indusului se vor aplica impulsuri de amplitudine U_a , conform figurii 3.164. Deoarece $t_a = t_p$, valoarea medie a curentului prin indus se va reduce de două ori (Fig. 3.165), valoarea cuplului electromagnetic dezvoltat de mașină se va reduce în aceeași proporție deoarece excitația mașinii rămâne constantă (Fig. 3.167). Aceasta va determina și o reducere a vitezei mașinii tot de două ori (Fig. 3.166).

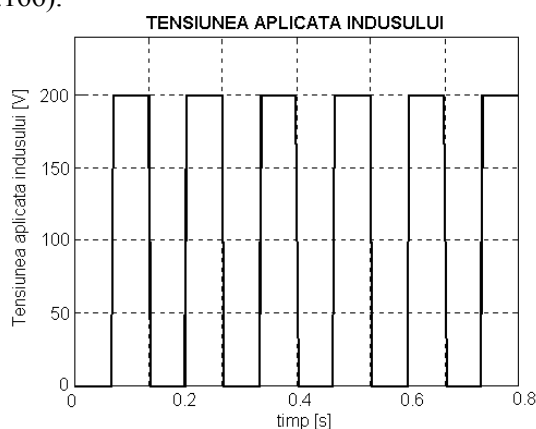


Fig. 3.164. Tensiunea aplicată indusului.

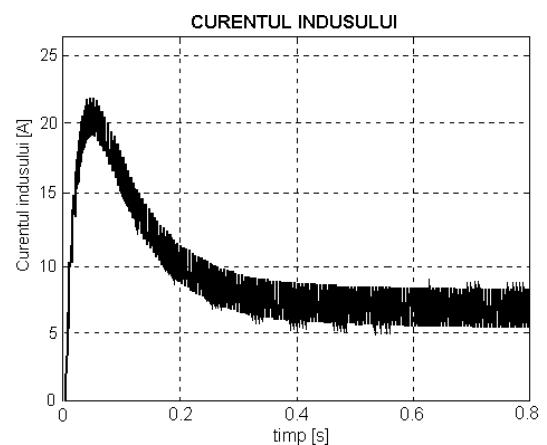


Fig. 3.165. Curentul prin indus.

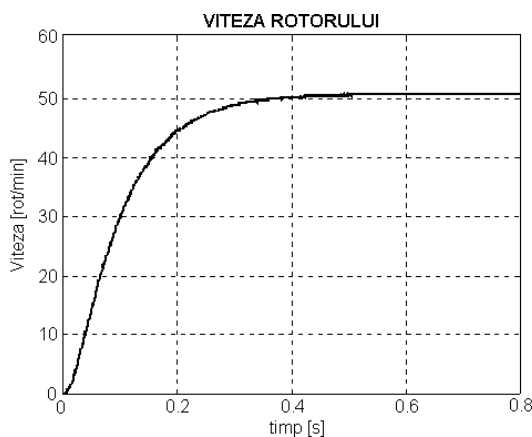


Fig. 3.166. Turația rotorului.

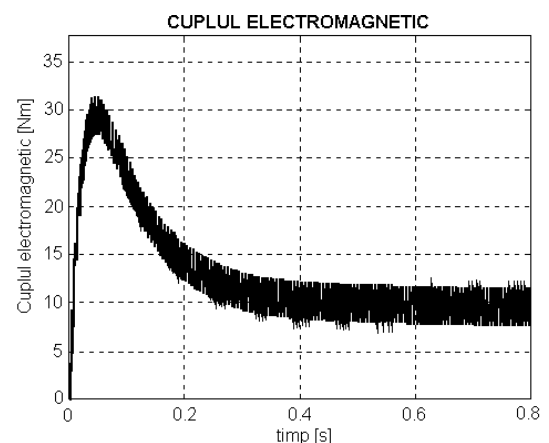


Fig. 3.167. Cuplul electromagnetic.

3.10. TAHOGENERATOARE DE CURENT CONTINUU

Tahogeneratoarele de curent continuu se construiesc și funcționează pe principiul generatorului de curent continuu și prezintă marele avantaj al lipsei erorilor de fază, deoarece tensiunea de ieșire nu este influențată de caracterul sarcinii. Prezența periilor și colectorului poate cauza fenomene supărătoare care impun folosirea unor filtre de deparazitare datorită cărora se mărește constanta de timp a tahogeneratoarelor.

În funcție de modul de realizare a excitației, tahogeneratoarele de curent continuu se pot realiza în două variante: cu excitație separată și cu magneți permanenți.

În cazul variantei cu excitație separată este necesară o sursă de tensiune constantă și o compensare adecvată de temperatură, deoarece prin mărirea rezistenței circuitului de excitație la creșterea temperaturii se reduce curentul de excitație și implicit fluxul inductor. În scopul menținerii constante a fluxului de excitație se recurge la saturarea circuitului magnetic sau la alimentarea înfășurării de excitație de la o sursă de curent constant. Aceste complicații au condus la utilizarea magneților permanenți pentru realizarea excitației, alegându-se aliaje la care stabilitatea în timp și termică este foarte bună (de exemplu, Alnico).

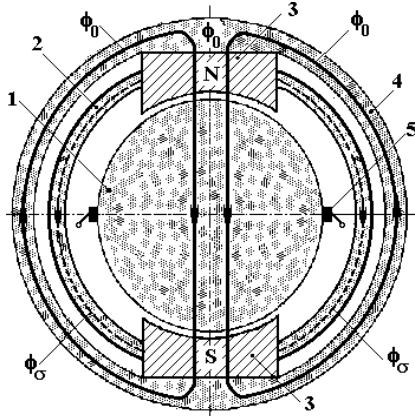


Fig. 3.168. Secțiune transversală printr-un tahogenerator cu magneți permanenți.

tahogeneratorului este egală cu tensiunea electromotoare:

$$E_o = \frac{p}{a} N n \Phi_o, \quad (3.189)$$

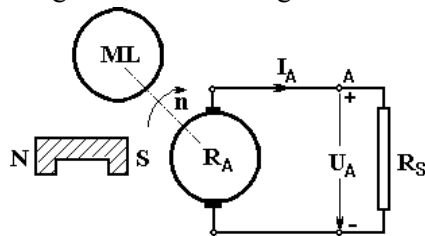


Fig. 3.169. Schema electrică a unui tahogenerator cu magneți permanenți.

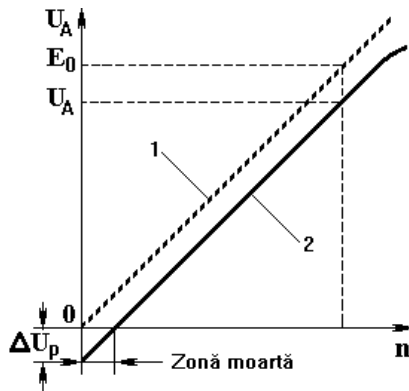


Fig. 3.179. Caracteristicile de ieșire ale tahogeneratorului cu magneți permanenți.

roarea totală este provocată de căderea de tensiune la perii determinând o "zonă moartă" în care tensiunea de ieșire este practic nulă (caracteristica de ieșire reală 2, fiind trasată față de caracteristica 1, obținută la funcționarea în gol, și curbată la viteze mari datorită influenței reacției indusului).

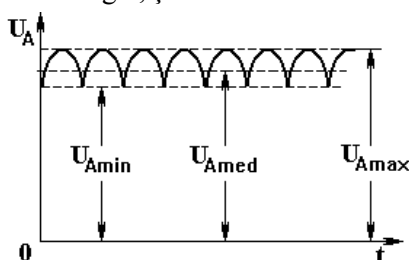


Fig. 3.171. Tensiunea de ieșire la tahogeneratorului cu magneți permanenți

Principalele părți componente ale tahogeneratorului sunt: 1- rotor, 2-șunt magnetic de compensare, 3-magnet permanent, 4 -carcasa feromagnetică și 5-perii.

Schema electrică a unui tahogenerator de curent continuu este prezentată în figura 3.169. La mersul în gol, tensiunea la bornele

și se păstrează o dependență perfect liniară între tensiunea de ieșire și viteză (Fig. 3.170-1) în timp ce la mersul în sarcină tensiunea la borne devine:

$$U_A = E - R_A I_A - \Delta U_p, \quad (3.190)$$

fiind influențată de reacția indusului și de căderea de tensiune la perii.

Dacă se consideră că efectul de reacție a indusului se manifestă ca o cădere de tensiune proporțională cu turația n și curentul de sarcină I_A , atunci tensiunea electromotoare în sarcină devine:

$$E = E_o - k n I_A. \quad (3.191)$$

Se definește eroarea relativă la mersul în sarcină față de mersul în gol prin raportul:

$$\varepsilon_U = \frac{E_o - U_A}{E_o}, \quad (3.192)$$

care depinde de mai multe mărimi:

$$\varepsilon_U = \frac{E_o - U_A}{E_o} = \frac{R_A I_A + k n I_A + \Delta U_p}{U_A + R_A I_A + k n I_A + \Delta U_p}. \quad (3.192)$$

Deoarece curentul prin indus depinde de valoarea rezistenței de sarcină ($I_A = U_A / R_S$), relația (3.193) poate fi scrisă sub forma:

$$\varepsilon_U = \frac{R_A + k n + \Delta U_p / I_A}{R_S + R_A + k n + \Delta U_p / I_A} \approx \frac{1}{1 + R_S / (R_A + k n)}. \quad (3.193)$$

Din această relație se remarcă ușor că o parte importantă din eroarea totală este provocată de căderea de tensiune la perii determinând o "zonă moartă" în care tensiunea de ieșire este practic nulă (caracteristica de ieșire reală 2, fiind trasată față de caracteristica 1, obținută la funcționarea în gol, și curbată la viteze mari datorită influenței reacției indusului).

Din cauza numărului limitat de lamele de colector, tensiunea de ieșire nu este perfect continuă, având o formă pulsatorie (Fig. 3.171) pentru care se definește un coeficient de ondulație:

$$k_o = \frac{U_{Amax} - U_{Amin}}{U_{Amax} + U_{Amin}},$$

(valoarea coeficientului k_o nu poate fi anulat constructiv).