

NICOLAE V. BOȚAN
CONSTANȚIU POPESCU
STELIAN POPESCU

MAȘINI ELECTRICE ȘI ACȚIONĂRI

MANUAL PENTRU LICEE
CU PROFIL DE ELECTROTEHNICĂ,
CLASA A XI-a ȘI ȘCOLI PROFESIONALE

Prof. dr. docent ing. NICOLAE V. BOJAN
Ing. CONSTANȚIU POPESCU
Conf. dr. ing. STELIAN POPESCU

MAȘINI ELECTRICE ȘI ACȚIONĂRI

MANUAL PENTRU LICEE CU PROFIL DE ELECTROTEHNICĂ
ȘI MATEMATICĂ-FIZICĂ
(MESERIILE ELECTRICIAN ȘI ELECTROMECHANIC),
CLASA A XI-a, și ȘCOLI PROFESIONALE



EDITURA DIDACTICĂ ȘI PEDAGOGICĂ
BUCUREȘTI — 1980

Manualul constituie o reeditare a ediției revizuite
în anul 1979, pusă de acord cu structura programei
școlare aprobate de Ministerul Educației
și Învățământului cu nr. 3448/1979

Materialul a fost elaborat astfel :

prof. dr. docent ing. NICOLAE V. BOȚAN : cap. 7, 8, 9, 10, 12

ing. CONSTANȚIU POPESCU : cap. 1, 2, 3, 4, 5, 6

conf. dr. ing. STELIAN POPESCU : cap. 11

Referenți : conf. dr. ing. CONSTANTIN RĂDUȚI
ing. prof. GRIGORE CĂTĂLINESCU

Redactor : ing. RODICA DUMITRAȘCU
Tehnoredactor : I. MIREA
Coperta : VICTOR WEGEMANN

MAȘINI ELECTRICE

CAPITOLUL 1

CURENTUL ALTERNATIV TRIFAZAT

A. PRODUCEREA CURENTULUI
ALTERNATIV TRIFAZAT

Prin rotirea unei spire într-un câmp magnetic constant, în spirală se induce o tensiune alternativă monofazată. Dacă în loc de o spirală, trei spire distincte (fig. 1.1, a) decalate între ele în spațiu cu $\frac{2\pi}{3}$ se rotesc cu viteza ω , în aceste spire se induc trei tensiuni electromotoare e_1, e_2, e_3 , cu aceeași valoare efectivă, însă defazate între ele, cu timpul necesar ca o spirală să se rotească cu unghiul $2\pi/3$, adică $t_a = \frac{2\pi}{3\omega} = \frac{T}{3}$ și deci unghiul de defazaj este $\psi_a = \frac{2\pi}{3}$. În consecință, valorile instantanee ale celor trei t.e.m. sînt:

$$\begin{aligned} e_1 &= E \sqrt{2} \sin \omega t, \\ e_2 &= E \sqrt{2} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right), \\ e_3 &= E \sqrt{2} \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right), \end{aligned} \quad (1.1)$$

și se reprezintă grafic ca în figura 1.1, b și fazorial ca în figura 1.1, c.

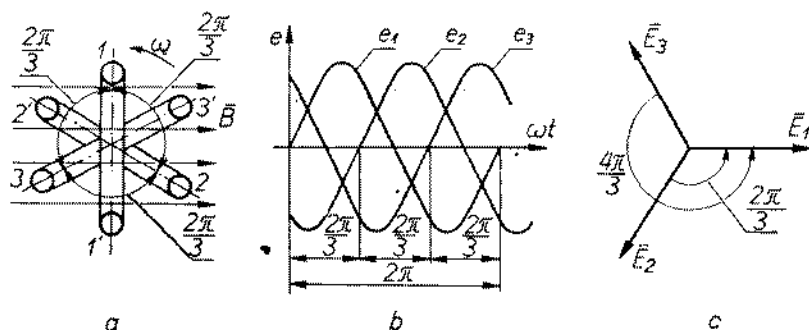


Fig. 1.1. Sistem trifazat de tensiuni:

a — producerea t.e.m. trifazate; b — reprezentarea grafică; c — diagrama fazorială.

Cele trei t.e.m. formează un sistem trifazat simetric, deoarece sînt defazate între ele cu unghiuri egale, și deoarece valorile efective sînt egale, suma celor trei t.e.m. este nulă:

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0, \quad (1.2)$$

sau fazorial:

$$\underline{E}_1 + \underline{E}_2 + \underline{E}_3 = 0. \quad (1.3)$$

B. CONEXIUNILE GENERATOARELOR ȘI ALIMENTAREA RECEPTOARELOR ÎN SISTEME TRIFAZATE

Generatoarele trifazate au trei înfășurări de fază sau faze. Ele ar putea alimenta receptoarele fiecare separat ca în figura 1.2, însă sistemul nu se utilizează, fiind necesare șase conductoare de alimentare.

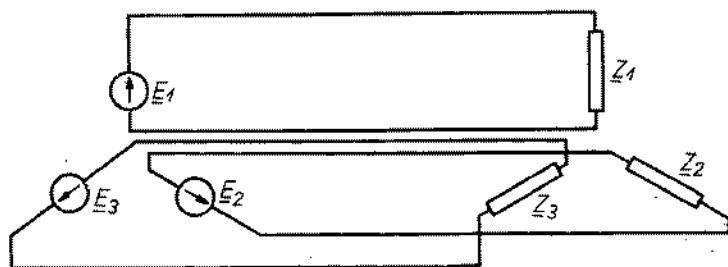


Fig. 1.2. Generator trifazat cu fazați independente.

În sistemul trifazat se utilizează conexiuni speciale în *stea* (fig. 1.4, a) sau *triunghi* (fig. 1.5, a). Punctul comun la conexiunea *stea* se numește *punct neutru* sau *de nul*, iar conductorul legat la el, dacă există, se numește *conductor de nul*. La generatoare se folosește conexiunea *stea*, cu sau fără conductor neutru. Conexiunea *triunghi* nu este avantajoasă funcționării generatoarelor și nu este folosită practic la generatoare. Receptoarele alimentate de la rețele trifazate pot fi *monofazate* sau *trifazate*. Receptoarele de putere mică, cum sînt lămpile electrice, aparate electrocasnice, motoarele mici, sînt monofazate și sînt legate fie între un conductor de linie și conductorul neutru (receptorul A sau B (fig. 1.3) fie între două conductoare de linie (receptorul C, fig. 1.3).

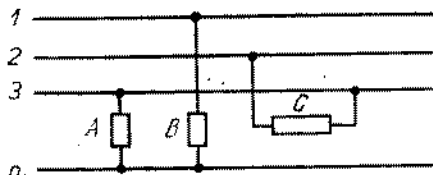


Fig. 1.3. Alimentarea receptoarelor monofazate de la o rețea trifazată.

Receptoarele mari trifazate se leagă cu fazele în *stea* sau în *triunghi*. Receptoarele în *stea* se leagă cu vîrfurile stelei la conductoarele de linie, neutrul receptorului putînd fi legat la neutrul rețelei (montaj în *stea* cu conductor neutru, fig. 1.4, a) sau nelegat la neutrul rețelei (montaj în *stea* fără conductor neutru).

Receptoarele în *triunghi* se leagă cu vîrfurile triunghiului la conductoarele de linie ale rețelei (fig. 1.5, a), conductorul neutru rămînînd nefolosit.

C. TENSIUNILE ȘI CURENȚII ÎN SISTEMUL TRIFAZAT

1. CONEXIUNEA STEA

Se consideră un generator trifazat cu înfășurările legate în stea, care produce un sistem simetric de t.e.m. $E_1 = E_2 = E_3$, alimentînd un receptor legat tot în stea (fig. 1.4, a). Dacă sarcina receptorului este simetrică, adică $Z_1 = Z_2 = Z_3$, curenții și căderile de tensiune în generator sînt egali pe cele trei faze. Ca urmare și tensiunile U_1 , U_2 și U_3 care se numesc *tensiuni de fază*, sînt egale în valoare efectivă și formează un sistem simetric (fig. 1.4, b). Tensiunile U_{12} , U_{23} și U_{31} , care se numesc *tensiuni de linie*, sînt egale cu diferențele tensiunilor de fază respective:

$$U_{12} = U_1 - U_2; U_{23} = U_2 - U_3; U_{31} = U_3 - U_1.$$

Făcînd aceste diferențe în diagrama fazorială din figura 1.4, b, se constată că:

$$U_{12} = 2U_1 \cos 30^\circ = 2U_1 \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} U_1. \quad (1.4)$$

Notînd tensiunea de linie cu $U_l = U_{12} = U_{23} = U_{31}$ și tensiunea de fază $U_f = U_1 = U_2 = U_3$, rezultă că:

$$U_l = \sqrt{3} U_f. \quad (1.5)$$

Valorile curenților pe fază egali cu cei în linie sînt:

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_1}; I_2 = \frac{U_2}{Z_2}; I_3 = \frac{U_3}{Z_3}, \quad (1.6)$$

iar factorii de putere sînt:

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1}; \cos \varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2}; \cos \varphi_3 = \frac{R_3}{Z_3}. \quad (1.7)$$

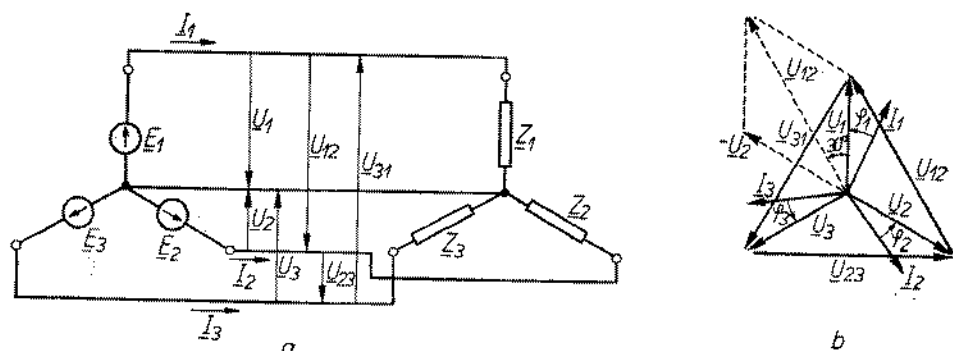


Fig. 1.4. Conexiunea stea:
a — schema electrică; b — diagrama fazorială

În cazul sarcinii simetrice $I_1 = I_f = I_2 = I_3$; $\cos \varphi = \cos \varphi_1 = \cos \varphi_2 = \cos \varphi_3$. Deci la conexiunea stea:

$$U_l = \sqrt{3} U_f, \quad (1.8)$$

$$I_l = I_f = \frac{U}{Z}.$$

În cazul sarcinii simetrice $I_1 + I_2 + I_3 = 0$ și prin conductorul de nul nu circulează curent și conductorul neutru poate lipsi. În cazul unei sarcini nesimetrice, circulează curentul:

$$I_0 = I_1 + I_2 + I_3. \quad (1.9)$$

2. CONEXIUNEA TRIUNGHI

În cazul conexiunii triunghi (fig. 1.5, a) tensiunile de linie sînt egale cu tensiunile de fază:

$$U_l = U_f. \quad (1.10)$$

Curenții de fază se calculează cu relațiile:

$$I_{12} = \frac{U_{12}}{Z_{12}}; I_{23} = \frac{U_{23}}{Z_{23}}; I_{31} = \frac{U_{31}}{Z_{31}}. \quad (1.11)$$

În cazul sarcinii simetrice, curentul de fază este $I_f = I_{12} = I_{23} = I_{31}$, iar curentul de linie rezultă din diferențele curenților de fază, de exemplu $I_1 = I_{12} - I_{31}$ sau $I_l = \sqrt{3} I_f$ (fig. 1.5, b).

Deci la conexiunea triunghi:

$$U_l = U_f,$$

$$I_l = \sqrt{3} I_f. \quad (1.12)$$

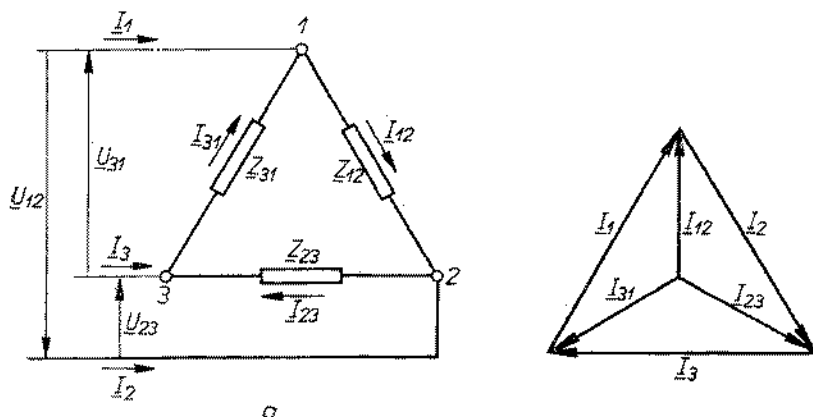


Fig. 1.5. Conexiunea triunghi:
a — schema electrică; b — diagrama fazorială.

3. PUTEREA IN SISTEMUL TRIFAZAT

Puterea unui generator sau receptor trifazat este egală cu suma puterilor din cele trei faze. În cazul unor sisteme de tensiuni și curenți simetrice, puterea este egală cu de trei ori puterea pe o fază.

Puterea activă la conexiunea stea este:

$$P = 3 U_f I_f \cos \varphi = 3 \frac{U_l}{\sqrt{3}} I_l \cos \varphi = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi, \quad (1.13)$$

iar la conexiunea triunghi este:

$$P = 3 U_f I_f \cos \varphi = 3 U_l \frac{I_l}{\sqrt{3}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi. \quad (1.14)$$

Deci, indiferent de conexiune, puterea activă este:

$$P = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi, \quad (1.15)$$

în care φ este defazajul între curenții de fază și tensiunea de fază.

Analog, puterea reactivă este:

$$Q = \sqrt{3} U_l I_l \sin \varphi \quad (1.16)$$

iar puterea aparentă:

$$S = \sqrt{3} U_l I_l. \quad (1.17)$$

Din aceste relații se poate deduce că:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \text{ și } \operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}. \quad (1.18)$$

PROBLEME

1. Un generator trifazat simetric cu $U_l = 380$ V și $f = 50$ Hz, alimentează un receptor în stea cu impedanțele pe fază egale între ele $Z = R + jX = 3 + j4 \Omega$. Să se calculeze curenții și tensiunile pe fază, puterea activă, reactivă și aparentă absorbită de receptor.

Soluție. Modulul impedanței pe fază este $Z = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \Omega$. Tensiunea pe fază este $U_f = \frac{U_l}{\sqrt{3}} = 220$ V. Curentul pe fază egal cu cel de linie este $I_f = I_l = \frac{U_f}{Z} = \frac{220}{5} = 44$ A; $\cos \varphi = \frac{R}{Z} = 0,6$; $\sin \varphi = \frac{X}{Z} = 0,8$. $P = 3 U_f I_f \cos \varphi = 3 R I_f^2 = 17\,424$ W; $Q = 3 U_f I_f \sin \varphi = 3 X I_f^2 = 23\,232$ var; $S = 3 U_f I_f = 29\,040$ VA.

2. Un receptor legat în triunghi are impedanțele pe faze egale $Z = R + jX = 4 + j3 \Omega$ și este conectat la o rețea simetrică, $U_l = 220$ V $f = 50$ Hz. Să se calculeze tensiunile și curenții pe fază.

Soluție. $Z = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5 \Omega$; $U_f = U_l = 220$ V; $I_f = \frac{U_f}{Z} = 44$ A; $I_l = \sqrt{3} I_f = 76,1$ A.

3. La o rețea trifazată simetrică, cu tensiunea de linie $U_l = 380$ V, se leagă un receptor în stea, cu fazele simetrice și impedanța echivalentă $Z = 11 \Omega$. Să se calculeze curentul.

Soluție.

$$U_f = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ V}, I_l = I_f = \frac{220}{11} = 20 \text{ A}.$$

4. La o rețea simetrică cu tensiunea de linie $U_l = 380$ V se leagă un receptor în triunghi, cu fazele simetrice și impedanța echivalentă $Z = 20 \ \Omega$. Să se calculeze curenții.

Soluție.

$$I_f = \frac{U_l}{Z} = \frac{380}{20} = 19 \text{ A}; I_l = \sqrt{3} I_f = 32,9 \text{ A}.$$

5. Un motor alimentat de la o rețea cu tensiunea de linie $U_l = 380$ V are conexiunile în triunghi și absoarbe pe fază curenul $I_f = 23,7$ A, cu factor de putere $\cos \varphi = 0,875$. Să se calculeze puterea absorbită.

Soluție.

$$I_l = \sqrt{3} I_f = 41 \text{ A}, P = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi = 23,6 \text{ kW}.$$

REZUMAT

● Relații între tensiuni și curenți:

— conexiunea în stea: $U_l = \sqrt{3} U_f$; $I_l = I_f$;

— conexiunea în triunghi: $U_l = U_f$; $I_l = \sqrt{3} I_f$.

● Puterea în curent alternativ trifazat:

— puterea activă: $P = 3 U_f I_f \cos \varphi = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi$;

— puterea reactivă: $Q = 3 U_f I_f \sin \varphi = \sqrt{3} U_l I_l \sin \varphi$;

— puterea aparentă: $S = 3 U_f I_f = \sqrt{3} U_l I_l$.

CAPITOLUL 2

MAȘINI ELECTRICE DE CURENT CONTINUU

A. NOȚIUNI GENERALE DESPRE MAȘINI ELECTRICE

1. TIPURI DE MAȘINI ELECTRICE

Mașinile electrice transformă lucrul mecanic în energie electrică sau invers. După transformarea care are loc, se deosebesc:

— *generatoare*, care primesc energie mecanică de la un motor primar și o transformă în energie electrică;

— *motoare*, care primesc energie electrică de la o rețea și o transformă în energie mecanică prin care se acționează o mașină de lucru (strung, macara, laminor).

Mașinile electrice sînt reversibile, adică pot funcționa atât ca motor, cît și ca generator.

Pe lângă cele două regimuri principale de funcționare ca motor sau generator, unele mașini pot funcționa în regim de frână, când primesc atât energie electrică, cât și mecanică, transformându-se în căldură.

Mașinile sînt caracterizate prin prezența unor piese în mișcare de translație sau rotație. La majoritatea mașinilor mișcarea fiind de rotație, mașinile electrice sînt denumite și mașini electrice rotative.

Sînt utilizate în electrotehnică și sisteme care transformă energia electrică, cu anumite caracteristici (tensiune, curent, frecvență) tot în energie electrică, dar cu alte caracteristici. Acestea sînt convertizoarele rotative, convertizoarele statice, redresoarele, transformatoarele.

După felul curentului, mașinile electrice se împart în: *mașini de curent continuu* și *mașini de curent alternativ*.

Mașinile de curent alternativ se împart în:

— *mașini sincrone*, la care turația este constantă, independentă de sarcină și este numită turație sincronă;

— *mașini asincrone*, la care turația variază în anumite limite cu sarcina;

— *mașini de curent alternativ cu colector*.

Mașinile electrice funcționează pe baza fenomenului de inducție electromagnetică și au două părți principale: *inductorul*, care produce fluxul magnetic și *indusul*, în care se induce curentul prin fenomenul de inducție. La cele mai multe tipuri de mașini, inductorul este *stator*, iar indusul *rotor*. Statorul este partea fixă, iar rotorul partea mobilă a mașinii electrice. Între stator și rotor există un spațiu de aer, numit *întrefier*.

2. MĂRIMILE NOMINALE ALE MAȘINILOR ELECTRICE ROTATIVE

Regimul (serviciul) mașinilor electrice rotative constă din ansamblul valorilor numerice ale mărimilor electrice și mecanice care caracterizează funcționarea mașinii electrice la un moment dat.

Serviciul mașinilor electrice este caracterizat de durata și succesiunea în timp a perioadelor de încărcare, mers în gol și repaus al mașinii.

Serviciul nominal este serviciul marcat prin simboluri pe plăcuța indicatoare a mașinii. Mașina este astfel construită, încît atunci cînd funcționează la serviciul nominal, diferitele părți ale ei, care se încălzesc datorită pierderilor (bobinajele și miezul magnetic), nu depășesc anumite limite de temperatură admise de standardele de stat pentru materialele utilizate.

Pentru uniformizarea fabricației de mașini electrice, au fost stabilite cîteva servicii tip, dintre care cele mai importante sînt:

— *Serviciul continuu* (simbolizat (*S 1*)), caracterizat prin funcționarea la puterea nominală un timp oricît de lung, fără ca temperatura bobinajelor să depășească limitele admise.

— *Serviciul de scurtă durată* (*S 2*), caracterizat prin funcționarea la puterea nominală pe o durată mai scurtă decît durata necesară pentru atingerea echilibrului termic, urmată de o durată de repaus suficient de lungă pentru ca mașina să se răcească pînă la temperatura mediului ambiant (de exemplu motorul electric care acționează o barieră de cale ferată).

— *Serviciul intermitent (S 3)* caracterizat prin cicluri de funcționare identice, compuse fiecare dintr-o perioadă de funcționare la puterea nominală și o perioadă de repaus (de exemplu motorul electric al compresorului de aer la un vagon de tramvai).

— *Serviciul neîntrerupt cu sarcină intermitentă periodică (S 6)* caracterizat prin cicluri de funcționare identice, compuse dintr-o perioadă de funcționare la puterea nominală și o perioadă de mers în gol (de exemplu un generator de sudare electrică manuală).

Mărimile nominale care definesc regimul nominal sînt în general următoarele:

— *puterea nominală*: la motoare este puterea mecanică utilă debitată la arbore (W sau kW), la generatoare de curent continuu este puterea electrică utilă debitată la borne (W sau kW), iar la generatoare de curent electric alternativ, este puterea aparentă la borne (VA, kVA);

— *tensiunea nominală (V)*: este tensiunea între bornele de conectare a mașinii la rețea;

— *tensiunea de excitație* (numai la mașini de curent continuu și mașini sincrone): este tensiunea cu care se alimentează circuitul de excitație;

— *curentul nominal (A)*: este curentul corespunzător puterii și tensiunii nominale;

— *frecvența nominală (Hz)* pentru mașinile de curent alternativ;

— *turația nominală (rot/min)*;

— *factorul de putere nominal*.

Toate mărimile nominale sînt indicate pe plăcuța indicatoare a mașinii.

B. ELEMENTE CONSTRUCTIVE DE BAZĂ

1. PĂRȚILE PRINCIPALE ALE MAȘINII DE CURENT CONTINUU

Mașina de curent continuu, fie că este motor sau generator, are inductorul stator și indusul rotor.

Părțile principale ale mașinii de curent continuu sînt: statorul, rotorul cu colector, crucea portperii, scuturi, lagăre, cutie de borne (fig. 2.1).

● **Statorul** care produce fluxul magnetic inductor este format din carcasă, poli și bobine polare.

— *Carcasa* se execută din material magnetic (oțel) în cele mai multe cazuri de formă cilindrică.

— *Polii* care se fixează prin șuruburi de carcasă sînt polii principali (numiți și poli de excitație), iar la majoritatea mașinilor sînt și polii auxiliari (numiți și poli de comutație). Polii principali se execută din tole de oțel cu grosimea de 1—1,5 mm strînse cu nițuri.

— *Bobinele polare* care se montează pe poli sînt bobinele de excitație parcurse de curentul de excitație și bobinele polilor auxiliari, parcurse de curentul principal al mașinii. Bobinele se execută din conductor de cupru izolat și sînt izolate față de miezul și talpa polului și față de carcasă.

● **Rotorul** este format din arbore, pachetul de tole ale rotorului, colectorul, bobinajul indus, suporti de bobinaj, ventilator.

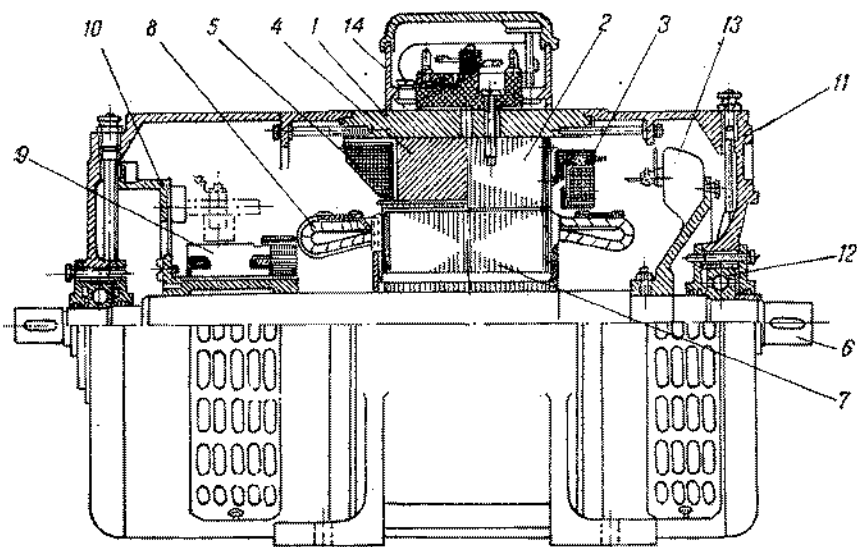


Fig. 2.1. Secțiune prin mașina de curent continuu:

1 — carcasă; 2 — pol de excitație; 3 — bobină de excitație; 4 — pol auxiliar; 5 — bobină de comutație; 6 — arbore; 7 — pachet de tole; 8 — înfășurarea indusului; 9 — colector; 10 — cruce portperiei; 11 — șut; 12 — rulment; 13 — ventilator; 14 — cutie de borne.

— *Arborele* se execută din oțel, transmite cuplul mecanic între pachetul de tole și capătul de arbore liber.

— *Pachetul de tole ale rotorului* se execută din tablă silicioasă cu grosimea de 0,5 mm, împachetată pe arbore și strânsă între suportii de bobinași. Are la exterior creștături deschise sau semiînchise (fig.2.2) în care se introduce bobinajul indus.

— *Colectorul* este format din lamele de cupru de secțiune trapezoidală, izolate între ele cu plăci de micănită și izolate față de piesele de strângere.

— *Bobinajul indus* este format din bobine executate din conductoare izolate de cupru, introduse în creștăturile pachetului de tole, capetele fiind lipite la colector.

— *Ventilatorul* este prevăzut la unele mașini, pentru a realiza o circulație de aer necesară răcirii mașinii.

● **Crucea portperiei.** Pe colector freacă periile pentru a face legătura electrică între bobinajul indus și cutia de borne. Periile se execută din praf de cărbune, grafit sau praf de cupru prin presare. Periile sînt montate în casete metalice, numite portperii, care sînt fixate de o piesă de fontă sau oțel, denumită colierul sau crucea portperiei.

Fig. 2.2. Formarea creștăturilor indusului:
a — creștături deschise; b — creștături semiînchise.



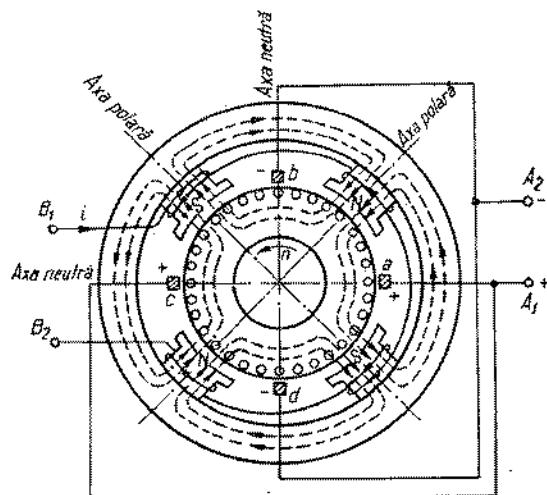


Fig. 2.3. Mașină de curent continuu cu 4 poli ($2p=4$).

pentru diferite utilizări, cum sînt: motoare de curent continuu pentru tracțiune (locomotive Diesel-electrice și Diesel-hidraulice, locomotive de mină, tramvaie, troleibuze), motoare de curent continuu pentru mașini-unelte, pentru nave, generatoare de curent continuu de uz general, generatoare pentru sudare cu arc electric etc.

2. CIRCUITUL MAGNETIC AL MAȘINII DE CURENT CONTINUU

Bobinele de excitație parcurse de curentul de excitație i , produc un cîmp magnetic ale cărui linii de cîmp se închid prin circuitul magnetic format de jugul carcasei, poli, întrefier și pachetul de tole al rotorului (fig.2.3).

Bobinele polilor sînt astfel legate încît parcurgînd statorul, după un pol nord N, urmează un pol sud S, apoi un pol N și așa mai departe. Totalitatea liniilor de cîmp care trec de la un pol la indus formează fluxul Φ al mașinii.

Periile sînt astfel plasate pe colector încît să culeagă curent din conductoarele aflate pe axele neutre (bisectoarele unghiurilor formate de axele polare).

Distanța măsurată pe periferia indusului între axele a doi poli consecutivi se numește *pas polar* și are valoarea:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \quad (2.1)$$

în care $2p$ este numărul de poli, iar D — diametrul indusului.

3. ÎNFĂȘURĂRILE INDUSULUI

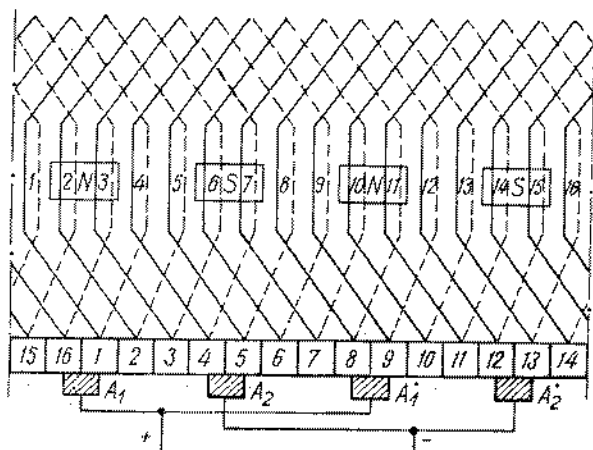
Înfășurarea sau bobinajul indusului este format din bobine identice, introduse în creștăturile rotorului și legate la colector. În fiecare creștătură se găsesc două laturi, a două bobine diferite, o latură în stratul inferior și

● **Scuturile și lagărele** au rolul de a permite montarea rotorului în interiorul statorului și rotirea lui. În partea centrală a scuturilor sînt montați rulmenți sau mai rar lagăre de alunecare.

● **Cutia de borne** este montată de regulă pe carcasă și are în interiorul ei placa de borne, prevăzută cu borne de oțel sau alamă. La aceste borne se fac legăturile electrice din interiorul mașinii și legăturile electrice la rețeaua electrică.

În R. S. România se execută mașini de curent continuu, generatoare și motoare

Fig. 2.4. Schema desfășurată a bobinajului buclat.



alta în stratul superior. O bobină are una din laturi în stratul inferior al unei creștături, iar cealaltă latură în stratul superior al unei creștături situată la un pas polar, pentru ca t.e.m. ce se induc în ele să se înserieze în același sens.

După modul de legare a bobinelor la colector se deosebesc două tipuri principale de bobinaj: *bobinajul buclat* și *bobinajul ondulat*.

● **Bobinajul buclat.** În figura 2.4 este reprezentată schema desfășurată a unui bobinaj buclat cu $2p = 4$. Plecând de la lamela 1 o spirală completă cuprinde conductorul din stratul superior din creștătura 1, conductorul inferior din creștătura 5 aflată la distanță de un pas polar și se ajunge la lamela 2. Spira având forma unei bucle, bobinajul este numit buclat. Parcurgând mai departe bobinajul, se ajunge în final la punctul de plecare și deci bobinajul este închis.

Toate spirele parcurse, pornind de la o perie la alta, formează o cale de curent. În schema din figura 2.4 s-au format patru căi de curent (între lamelele 1 — 4, 5 — 8, 9 — 12 și 13 — 16), deci $2a = 4$.

Bobinajul la care $2a = 2p$ se numește *bobinaj buclat simplu*. Dacă spira se leagă între lamela 1 și 3 sau 1 și 4 se obțin mai multe căi de curent, adică $2a = q2p$. Un astfel de bobinaj se numește *bobinaj buclat multiplu*.

În practică, înfășurările sînt mai complicate decît schema arătată. Între două lamele sînt legate mai multe spire formînd împreună o secție, iar numărul de lamele fiind mai mare decît numărul de creștături, într-o creștătură sînt plasate mai multe laturi de secție în fiecare strat.

● **Bobinajul ondulat.** Spirele sînt plasate în creștături (fig. 2.5) la fel ca la bobinajul buclat, însă capetele sînt legate la două lamele situate aproape la un dublu pas polar. De aceea spirele reprezentate în scheme au forma unor undulații, de unde și numele de bobinaj ondulat. Pe schemă se constată că s-au format două căi de curent: peria + lamelele 7, 14, 6, 13, 5 peria — și peria + lamela 9, 2, 10, 3, 11, peria — (celelalte spire scurtcircuitază perii de același semn și nu formează căi de curent).

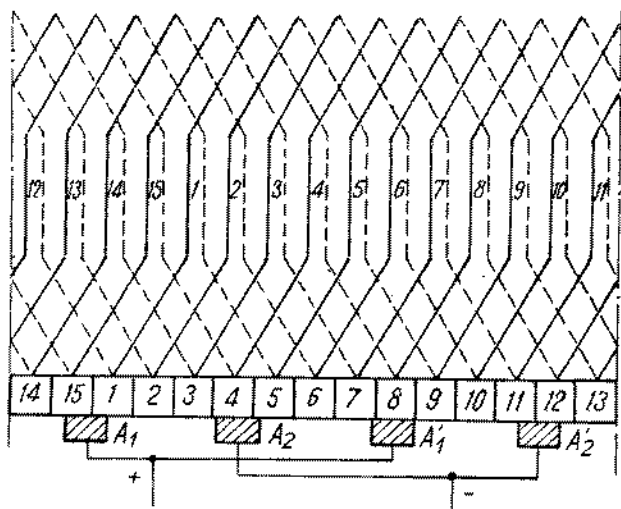


Fig. 2. 5. Schema desfășurată a bobinajului ondulat.

Bobinajul la care numărul de căi de curent este $2a = 2$, indiferent de numărul de poli, se numește *bobinaj ondulat serie* sau *simplu*. Există și bobinaje cu număr mai mare de căi de curent, obținute prin modificarea legăturilor la colector, numite *serie paralel* (când $2 < 2a < 2p$), *paralel simplu* (când $2a = 2p$) și *paralel multiplu* (când $2a > 2p$).

C. TENSIUNEA ELECTROMOTOARE INDUSĂ ȘI CUPLUL ELECTROMAGNETIC

1. FUNCȚIONAREA GENERATORULUI CU O SINGURĂ SPIRĂ

● Funcționarea unui generator de curent alternativ cu o singură spirală.

În figura 2.6, *a* este reprezentat un generator cu o singură spirală, care are capetele legate la două inele, pe care freacă periile *A*, *B* și care se rotește în câmpul magnetic uniform produs de polii *N*—*S*. Conductoarele *ab* și *cd* ale spirei în timpul rotirii taie linii de câmp ale câmpului magnetic. În ele se va induce o t.e.m. al cărei sens se stabilește cu regula mîinii drepte și care este proporțională cu B_r — componenta inducției normale pe direcția deplasării.

Luînd ca origine a unghiurilor α axa neutră, la $\alpha = 0$, cele două conductoare nu taie linii de forță, $B_r = 0$, iar t.e.m. indusă este nulă. La $\alpha = \frac{\pi}{2}$, cînd conductorul *ab* ajunge în axa polului *N* (poziția din figură), conductorul taie linii de forță, B_r este maxim, iar în conductor se induce t.e.m. maximă, care are sensul de la *b* spre *a*. Peria *A* este pozitivă, iar peria *B* negativă. Între $\frac{\pi}{2}$ și π , B_r scade și de asemenea scade și t.e.m. pînă la zero la $\alpha = \pi$. Conti-

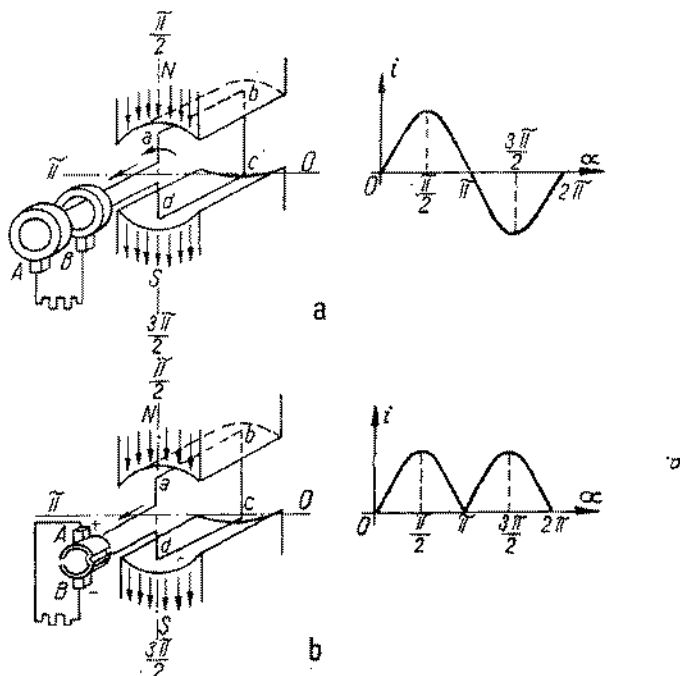


Fig. 2.6. T.e.m. indusă într-un generator cu o singură spirală:
 a — generator de curent alternativ; b — generator de curent continuu,

nuînd rotirea, conductorul ab ajunge în dreptul polului sud și, conform regulii mîinii drepte, t.e.m. indusă are sensul schimbat de la a spre b . Peria B devine pozitivă, iar peria A negativă. Cînd conductorul ajunge în axa polului sud, la $\alpha = \frac{3\pi}{2}$, t.e.m. are valoarea maximă în sens invers decît la $\alpha = \frac{\pi}{2}$. Cînd conductorul ajunge la $\alpha = 2\pi$, adică în poziția inițială, t.e.m. indusă scade din nou la zero.

Se constată că t.e.m. indusă în spirală, care se poate măsura la periile AB , este alternativă sinusoidală.

● Funcționarea unui generator de curent continuu cu o singură spirală.

În figura 2.6, b este reprezentată o mașină similară cu cea din figura 2.6, a , însă în loc de inele, este prevăzută cu două lamele de colector la care sînt legate capetele spirei. Fenomenele ce se petrec în spirală sînt aceleași, însă trebuie observat că de la $\alpha = 0$ la $\alpha = \pi$, cînd t.e.m. în conductorul ab este de la b la a , peria A este în contact cu lamela conductorului ab și este pozitivă. Între $\alpha = \pi$ și $\alpha = 2\pi$, peria A este în contact cu lamela conductorului cd , care are t.e.m. indusă cu sensul de la c la d și deci peria A rămîne tot pozitivă. T.e.m. ce se măsoară la periile A, B este o tensiune periodică, însă cu același sens, numită *pulsatorie*, obținută prin redresarea t.e.m. alternative. Deci colectorul mașinii de curent continuu redresează curentul alternativ indus în bobinajul indusului.

2. TENSIUNEA ELECTROMOTOARE INDUSĂ

La o mașină de curent continuu, inducția magnetică variază la periferia rotorului ca în figura 2.7. În fiecare conductor se induce o t.e.m. alternativă în timp, de aceeași formă cu cîmpul, care este redresată de colector.

În conductoarele cuprinse între două perii $a-b$, t.e.m. cresc de la zero în axa neutră (la peria a), pînă la un maxim sub talpa polară, și apoi scad din nou la zero la peria b , însă toate au sensul de la peria b spre peria a . În conductorul situat la distanța x de peria a , t.e.m. indusă are valoarea:

$$E_x = B_x l v, \quad (2.2)$$

în care B_x este inducția în întrefier în dreptul conductorului, l este lungimea pachetului de tole, iar v este viteza periferică a indusului.

T.e.m. indusă pe o cale de curent este suma t.e.m. induse în fiecare din cele $\frac{N}{2a}$ conductoare ale căii de curent (N este numărul total de conductoare din înfășurare):

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_{\frac{N}{2a}} = \left(\sum_1^{\frac{N}{2a}} B_x \right) l v, \quad (2.3)$$

Dar $\sum_1^{\frac{N}{2a}} B_x = \frac{N}{2a} B_m$, în care B_m este inducția medie în întrefier, și deci:

$$E = \frac{N}{2a} B_m l v. \quad (2.4)$$

Aceeași valoare o au și t.e.m. induse în celelalte căi de curent, și deoarece căile de curent sînt legate în paralel, relația (2.4) exprimă valoarea t.e.m. la perii.

Făcînd înlocuirile $B_m = \frac{\Phi}{\tau l}$, $\tau = \frac{\pi D}{2p}$ și $v = \frac{\pi D n}{60}$, rezultă:

$$E = \frac{N}{2a} \cdot \frac{\Phi}{\frac{\pi D}{2p} \cdot l} \cdot l \cdot \frac{\pi D n}{60} = \frac{p}{a} N \frac{n}{60} \Phi, \quad (2.5)$$

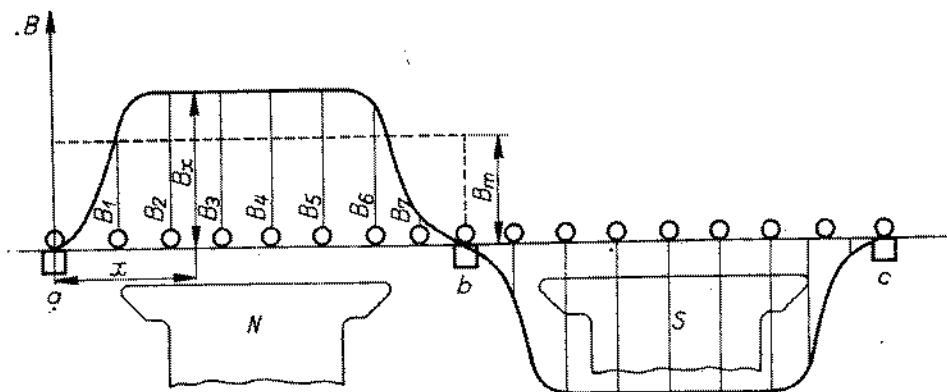


Fig. 2.7. Inducția magnetică la periferia rotorului.

în care E este t.e.m. în volți (V), Φ — fluxul în weberi (Wb), n — turația în rot/min.

Deoarece p , a și N sînt constante pentru o anumită mașină, se notează $K_e = \frac{p}{a} \frac{N}{60}$ și rezultă:

$$E = K_e n \Phi, \quad (2.6)$$

adică t.e.m. indusă în înfășurarea indusului, la mașina de curent continuu (generator sau motor) este proporțională cu turația și cu fluxul magnetic.

3. CUPLUL ELECTROMAGNETIC

Pentru simplificarea calculelor, se consideră o mașină de curent continuu avînd conductoarele înfășurării rotorului dispuse la periferia indusului neted.

La mersul în sarcină, indusul este parcurs de curentul I_a , iar pe fiecare cale de curent (prin conductoare) curentul va fi $i_a = \frac{I_a}{2a}$. Fiecare conductor parcurs de curentul i_a aflîndu-se în cîmpul magnetic al polilor de excitație, va fi supus unei forțe (al cărui sens se poate determina cu regula mîinii stîngi), $F_x = B_x i_a l$, în care B_x este valoarea inducției în dreptul conductorului. Această forță produce față de axa de rotație a indusului un cuplu:

$$M_x = F_x \frac{D}{2} = B_x i_a l \frac{D}{2}, \quad (2.7)$$

avînd același sens pentru toate conductoarele (fig. 2.8).

Cuplul produs de conductoarele afla-

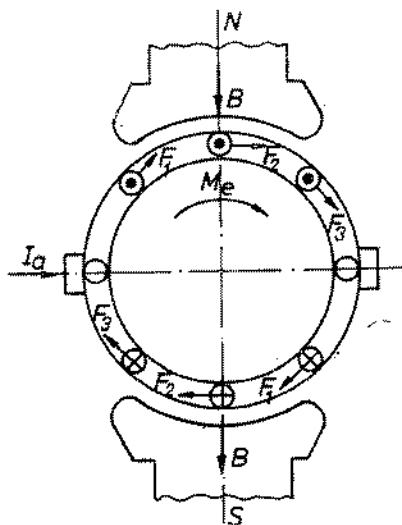


Fig. 2.8. Producerea cuplului la mașina de curent continuu.

te sub un pol este $M_x = \sum_{i=1}^{\frac{N}{2p}} M_x$, iar pentru întreaga mașină cuplul va fi:

$$M_e = 2p \sum_{i=1}^{\frac{N}{2p}} M_x = 2p \cdot \frac{I_a}{2a} l \frac{D}{2} \sum_{i=1}^{\frac{N}{2p}} B_x. \quad (2.8)$$

Înlocuind $\sum_{i=1}^{\frac{N}{2p}} B_x = \frac{N}{2p} B_m$, $B_m = \frac{\Phi}{\tau l}$, $\tau = \frac{\pi D}{2p}$, rezultă:

$$M_e = 2p \cdot \frac{I_a}{2a} \cdot l \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{N}{2p} \cdot \frac{\Phi}{\frac{\pi D}{2p} \cdot l} = \frac{p}{\pi} \frac{N}{2a} \Phi I_a. \quad (2.9)$$

Notînd $K_m = \frac{p}{\pi} \frac{N}{2a}$, rezultă:

$$M_e = K_m \Phi I_a, \quad (2.10)$$

adică *cuplul electromagnetic la mașina de curent continuu este proporțional cu fluxul și curentul în indus.*

La motorul de curent continuu, acest cuplu este un cuplu motor, care dezvoltă puterea mecanică la capătul de arbore, iar la generatorul de curent continuu este un cuplu rezistent. Deosebit de cele arătate mai sus, la o mașină reală, conductoarele sînt introduse în creștături, unde inducția magnetică este mult mai mică decît în întrefier, liniile cîmpului magnetic trecînd în principal prin dinți. Ca urmare, forțele ce acționează asupra conductoarelor sînt reduse, în schimb asupra fierului rotoric se exercită diferența de forțe astfel încît cuplul ce acționează asupra rotorului are valoarea dată de relația (2.10).

D. REACȚIA INDUSULUI ȘI COMUTAȚIA

1. REACȚIA INDUSULUI

La funcționarea în gol, indusul nu este parcurs de curent, iar în mașină există numai cîmpul principal produs de polii de excitație, repartizat ca în figura 2.9, *a*.

La funcționarea în sarcină, indusul este parcurs de curentul I_a , care produce și el un cîmp magnetic denumit *cîmp de reacție*. Dacă în mașină ar exista numai cîmpul de reacție (corespunzător cazului cînd curentul de excitație este nul, iar indusul este alimentat prin perii), el ar fi repartizat ca în figura 2.9, *b*, închizîndu-se transversal prin piesele polare. Acțiunea acestui cîmp de reacție asupra cîmpului principal este numită *reacția indusului*.

La mersul în sarcină, cîmpul magnetic principal și cel de reacție se suprapun dînd un cîmp rezultat, ale cărui linii de cîmp sînt arătate în figura 2.9, *c*. În zonele *a—b* în care sensul celor două cîmpuri este același, cîmpul rezultat este întărit, iar în zonele *b—c*, în care au sens invers, cîmpul este slăbit. Din această cauză se produce o deformare a cîmpului magnetic, astfel încît axa neutră magnetică (în care cîmpul are componentă radială nulă) este rotită

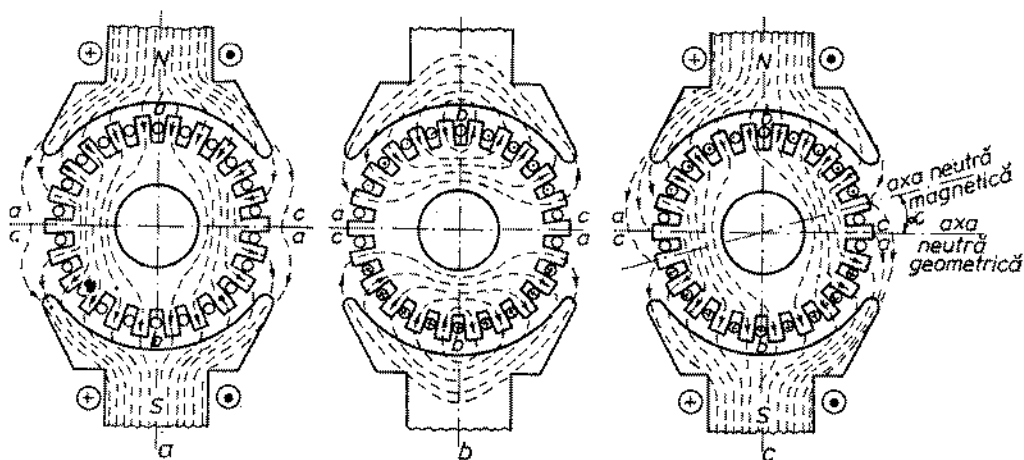


Fig. 2.9. Reacția indusului în mașinile de curent continuu.

cu unghiul α față de axa neutră geometrică. La generatoare axa este rotită în sensul rotației indusului, iar la motoare în sens invers rotației indusului.

Pe lângă aceasta, datorită fenomenului de saturație magnetică, reacția indusului provoacă și o micșorare a fluxului inductor, deoarece creșterea fluxului în zona în care cîmpurile (de reacție și principal) se adună nu compensează total scăderea fluxului în zona în care cîmpurile se scad.

În concluzie, reacția indusului are ca efect:

- deformarea cîmpului magnetic inductor și decalarea axei neutre;
- micșorarea fluxului inductor.

2. COMUTAȚIA MAȘINII DE CURENT CONTINUU

În timpul rotației indusului, secțiile bobinajului trec dintr-o cale de curent în altă cale de curent (fig. 2.10, *a* și *c*), schimbîndu-se sensul curentului în secții și în același timp, la trecerea periei de pe o lamelă de colector pe alta, se produce scurtcircuitarea secției legată la aceste două lamele (fig. 2.10, *b*). Aceasta produce o serie de fenomene electromagnetice, numite în ansamblu, *comutație*.

Notîndu-se cu $i_a = \frac{I_a}{2a}$, curentul într-o cale de curent, și timpul $\Delta t = T_k$ numit *perioada comutației*, curentul în secție își schimbă valoarea de la $+i_a$ la $-i_a$, iar în secția care comută, care are inductivitatea L_s , se induce o t.e.m.:

$$e_r = -L_s \frac{\Delta i}{\Delta t} = -L_s \frac{-i_a - (+i_a)}{T_k} = L_s \frac{2i_a}{T_k}. \quad (2.11)$$

Datorită faptului că laturile secției care comută se găsesc în zona dintre polii de excitație, unde cîmpul de reacție a indusului nu este nul, în secția care comută se mai induce t.e.m. de rotație:

$$e_a = 2w_s B_{sa} l v,$$

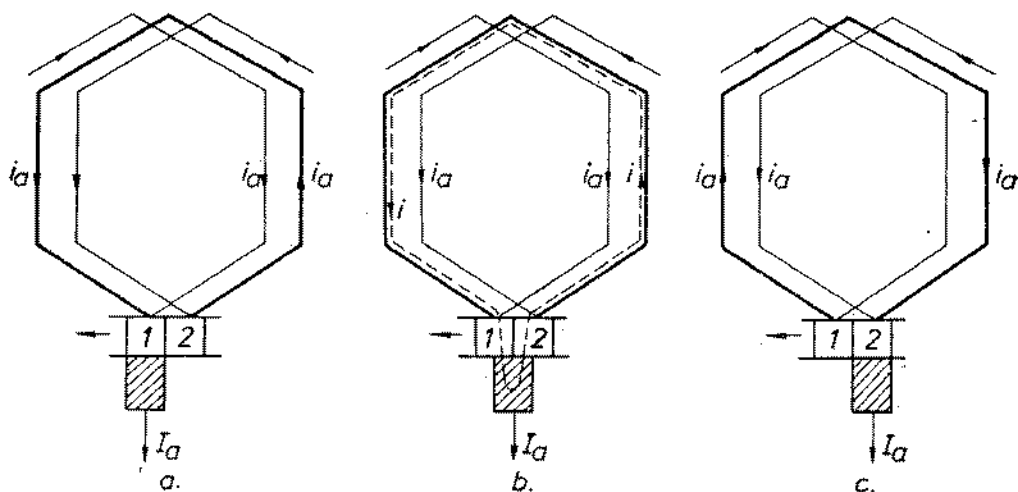


Fig. 2.10. Spira în comutație.

în care w_s este numărul de spire pe secție, iar B_{sa} inducția. Ambele t.e.m. e_r și e_a au sensul astfel încît se opun inversării curentului în secția care comută, curent care se închide prin perie (fig. 2.10. b). Aceasta conduce la creșterea curentului în zona de contact între perie și lamela care părăsește peria, la încălziri locale ale periei și apariția unor scînteii între perie și colector. La funcționarea normală, este admis un anumit grad de scînteiere, însă cînd scînteile depășesc o anumită intensitate, se pot produce arsuri ale periei și colectorului, scoțînd mașina din funcțiune.

Pentru micșorarea scînteilor și deci îmbunătățirea comutației se folosesc următoarele metode:

- **Utilizarea unor calități de perii potrivite condițiilor de comutație ale mașinii** (metalgrafit la mașini mici, grafit sau electrografit la mașini cu condiții de comutație mai grele).

- **Decalarea perilor.** Dacă se decalează periele cu unghiul α (v. paragraful D.1), t.e.m. e_a se anulează, deoarece laturile secției care comută se găsesc în axa neutră magnetică. Decalînd periele cu un unghi mai mare decît α , laturile secției care comută se găsesc în cîmpul magnetic al polilor principali, la marginea zonei polare, unde cîmpul are o valoare suficientă pentru a induce în secție o t.e.m. e_k egală și de sens contrar cu e_r , pe care o compensează. Metoda are dezavantajul că poate fi aplicată numai la motoare mici, cu un singur sens de rotație și cu sarcină constantă (dacă sarcina este variabilă, trebuie modificat mereu unghiul de decalare a perilor).

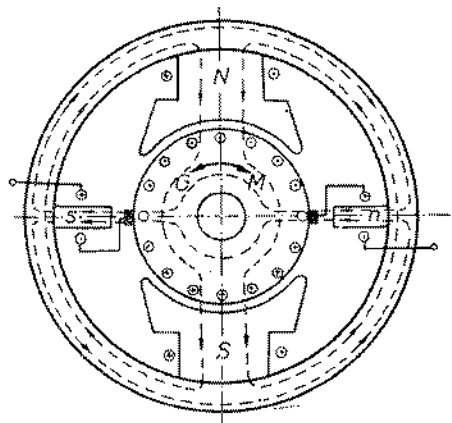


Fig. 2.11. Ameliorarea comutației cu poli auxiliari.

- **Poli auxiliari (poli de comutație).** Poli auxiliari sînt dispuși între poli principali, pe axa neutră geometrică (fig. 2.11). Ei sînt prevăzuți cu bobine legate în serie cu indusul și produc un cîmp local în dreptul conductoarelor ce aparțin secțiilor care comută, în care se induce o t.e.m. de rotație e_k , egală și de sens contrar cu $e_r + e_a$. Cîmpul fiind proporțional cu sarcina, această compensare este realizată la orice sarcină, iar periele fiind calate pe axa neutră geometrică, compensarea are loc pentru oricare din sensurile de rotație. Această metodă este cea mai bună pentru îmbunătățirea comutației și este larg folosită.

E. GENERATOARE DE CURENT CONTINUU

1. SISTEMELE DE EXCITAȚIE ALE GENERATOARELOR DE CURENT CONTINUU

În figura 2.12 (în care s-a notat cu i — curentul de excitație, cu I_a curentul în indus, cu I — curentul de sarcină debitat în rețeaua cu tensiunea U) sînt indicate sistemele de excitație ale generatoarelor de curent continuu și anume:

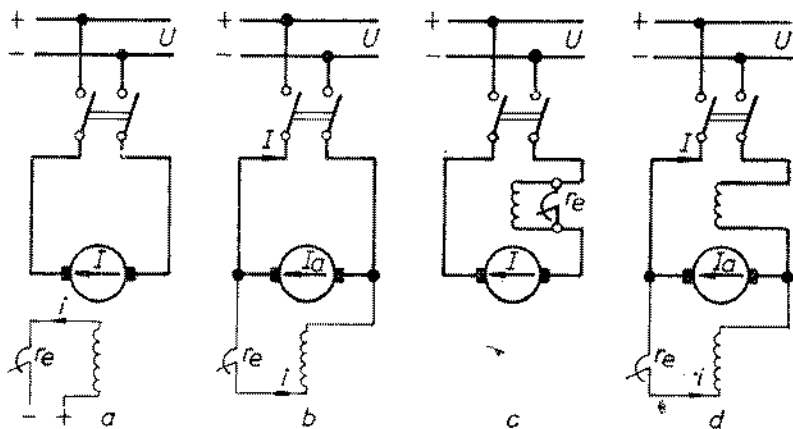


Fig. 2.12. Schemele generatoarelor de curent continuu:
 a — cu excitație separată; b — cu excitație derivație; c — cu excitație serie;
 d — cu excitație mixtă.

— generatoare cu excitație separată, care primesc curentul de excitație de la o sursă separată de curent;

— generator cu excitație derivație, la care bobinajul de excitație este alimentat cu tensiunea U de la bornele generatorului;

— generatoare cu excitație serie, la care bobinajul de excitație este parcurs în serie de curentul de sarcină I al generatorului;

— generatoare cu excitație mixtă (compound) care au o excitație derivație alimentată de la perii și una serie parcursă de curentul I_a .

Pentru reglarea curentului de excitație, se folosește un reostat de excitație.

2. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE A GENERATORULUI DE CURENT CONTINUU

În prezența cîmpului magnetic produs de polii de excitație, rotorul mașinii este învîrțit de un motor primar, care cedează generatorului, la capătul de arbore, o putere P_{ao} . La mersul în gol puterea absorbită P_{ao} este mică, egală cu pierderile în generator, la mersul în gol. În conductoarele înfășurării indusului se va induce t.e.m., $E_o = K_a n \Phi$, iar la bornele generatorului se va măsura tensiunea de mers în gol $U_o = E_o$. Dacă se conectează o sarcină la bornele generatorului, de exemplu un rezistor, prin înfășurarea indusului va circula curentul I_a și se va produce un cuplu electromagnetic rezistent $M_s = K_a \Phi I_a$, care tinde să frîneze mișcarea de rotație, iar motorul primar va ceda generatorului o putere mai mare P_s . Tensiunea măsurată la bornele generatorului este mai mică decît la mersul în gol din cauza căderii de tensiune în rezistența R a tuturor înfășurărilor legate în serie:

$$U = E - \Delta U = E - RI \quad (2.13)$$

Observație. T.e.m. la mersul în sarcină E poate fi diferită de cea de la mersul în gol E_o , iar în relația (2.13) s-a neglijat căderea de tensiune la perii.

3. FUNCȚIONAREA ÎN GOL A GENERATORULUI DE CURENT CONTINUU

Funcționarea în gol este analizată cu ajutorul caracteristicii de mers în gol $U_0 = f(i)$, care stabilește relația între tensiunea la borne U_0 (egală cu E_0 la mersul în gol) și curentul de excitație i , pentru $n = \text{constant}$ și $I = 0$. Deoarece $E = K_e n \Phi$, curba $U_0 = f(i)$ reprezintă la o anumită scară curba $\Phi = f(i)$, numită *curba de magnetizare a mașinii* (fig. 2.13).

● **Generatorul cu excitație separată.** Pentru ridicarea experimentală a caracteristicii $U_0 = f(i)$, se variază curentul i cu ajutorul reostatului de excitație r_e (fig. 2.12, a). Datorită fenomenului histerezis, la creșterea lui i pînă la o valoare maximă i_M , se obține curba 1, iar la descreșterea lui i se obține curba 2. Curba medie este considerată caracteristica de mers în gol a generatorului. Forma ei este caracterizată de următoarele:

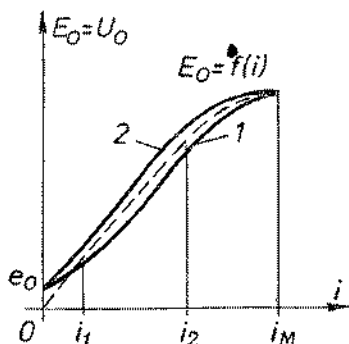


Fig. 2.13. Caracteristica de mers în gol a generatorului cu excitație separată.

— la $i = 0$, U_0 nu este nul. Generatorul are un flux magnetic remanent (datorită magnetizărilor anterioare), care produce o t.e.m. e_0 (circa 2—3% din tensiunea nominală);

— partea inițială a caracteristicii (între i_1 și i_2) este practic o dreaptă, Φ și U_0 cresc proporțional cu i ;

— pentru curenți de excitație mai mari, circuitul magnetic al mașinii începe să se satureze, iar Φ și U_0 nu mai cresc proporțional cu i .

● **Generatorul cu excitație derivație.** Curentul de excitație este furnizat de indusul generatorului, însă, avînd o valoare mică, se poate considera $U_0 \sim E_0$.

Caracteristica de mers în gol are același aspect ca la generatorul cu excitație separată. Pentru a fi posibilă autoexcitația este necesar ca:

— generatorul să aibă un flux remanent care să producă o t.e.m. e_0 , pentru a se putea amorsa procesul de autoexcitație;

— sensul de legare a bobinelor de excitație să fie astfel încît e_0 să producă un flux suplimentar în același sens cu fluxul remanent.

În acest fel, fluxul inițial crește, crește și t.e.m. indusă, atrăgînd după sine creșterea curentului de excitație, care conduce la o nouă creștere a fluxului și t.e.m. induse etc., pînă cînd t.e.m. ajunge la valoarea E_0 , produsă de curentul de excitație $i = \frac{E_0}{r + r_e}$, în care r este rezistența bobinajului de excitație, iar r_e , rezistența reostatului de excitație.

● **Generatorul cu excitație serie.** La funcționarea în gol, generatorul cu excitație serie nu se excită, $E_0 \approx 0$, deoarece curentul în bobinele de excitație (curentul de sarcină) este nul.

● **Generatorul cu excitație mixtă.** Deoarece excitația serie nu este parcursă de curent, caracteristica este identică cu cea a generatorului cu excitație derivație.

4. FUNCȚIONAREA ÎN SARCINĂ A GENERATOARELOR DE CURENT CONTINUU

La funcționarea în sarcină, generatorul debitează un curent de sarcină I ; interesează modul cum variază tensiunea U în funcție de I , adică curba $U = u(I)$ care se numește *caracteristica externă a generatorului*.

● **Generatorul cu excitație separată**, având curentul de excitație constant are t.e.m. E în sarcină constantă și egală cu E_0 . Notînd cu R_a rezistența indusului și a polilor auxiliari, ecuația 2.13 devine:

$$U = E - R_a I \quad (2.14)$$

iar caracteristica din figura 2.14 este o dreaptă.

● **Generatorul cu excitație derivație** are curentul de excitație i dependent de tensiunea U . Din această cauză t.e.m. E este mai mică decât E_0 și scade pe măsură ce crește sarcina. Expresia tensiunii la borne este:

$$U = E - R_a (I + i), \quad (2.15)$$

iar caracteristica este arătată în figura 2.15.

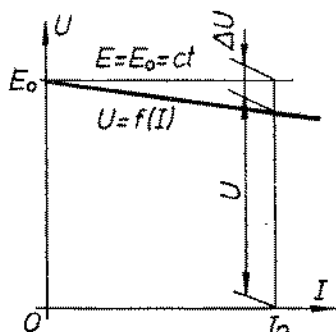


Fig. 2.14. Caracteristica externă a generatorului cu excitație separată.

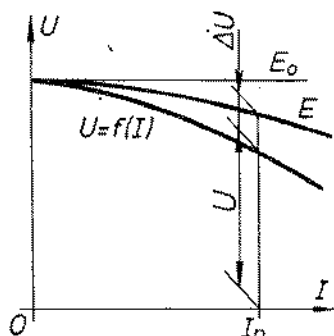


Fig. 2.15. Caracteristica externă a generatorului cu excitație derivație.

● **Generatorul cu excitație serie**. Este folosit numai în aplicații speciale, deoarece E crește mult odată cu sarcina (fig. 2.16).

Notînd cu R_e rezistența echivalentă a excitației serie în paralel cu reostatul de excitație, expresia tensiunii la borne este:

$$U = E - (R_a + R_e) I. \quad (2.16)$$

● **Generatorul cu excitație mixtă**. Notînd cu R_s rezistența bobinajului de excitație serie, expresia tensiunii la borne este:

$$U = E - R_a (I + i) - R_s I. \quad (2.17)$$

Bobinele de excitație serie pot fi legate astfel încît fluxul produs de ele să fie în același sens cu cel al excitației derivație și atunci generatorul se numește *cu excitație mixtă aditivă*, sau în sens contrar, generatorul numindu-se *cu excitație mixtă diferențială*. În comparație cu caracteristica generatorului

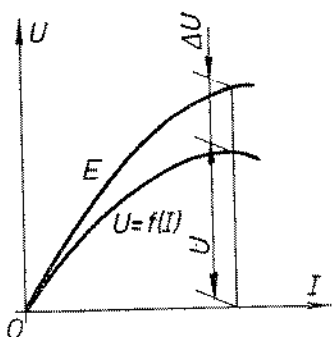


Fig. 2.16. Caracteristica externă a generatorului cu excitație serie.

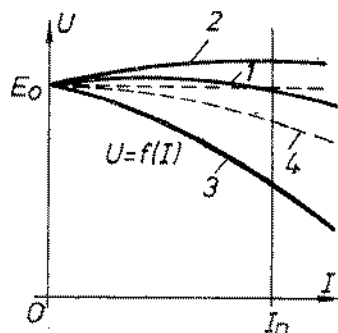


Fig. 2.17. Caracteristicile externe ale generatoarelor cu excitație mixtă.

cu excitație derivație (curba 4, fig. 2.17), la generatorul cu excitație adițională, excitația serie compensează căderea de tensiune, obținându-se o caracteristică aproximativ constantă (curba 1) sau chiar crescătoare (curba 2), iar la generatorul cu excitație diferențială, excitația serie micșorează fluxul și tensiunea scade mai mult (curba 3) decât la generatorul cu excitație derivație.

5. REGLAREA TENSIUNII LA GENERATOARELE DE CURENT CONTINUU

Tensiunea generatoarelor de curent continuu se poate regla prin modificarea t.e.m. E și deci a fluxului Φ (reglajul se face la $n = \text{const.}$). Pentru modificarea fluxului, se modifică curentul de excitație cu ajutorul reostatului de cîmp. La creșterea curentului de excitație, crește tensiunea la borne și invers.

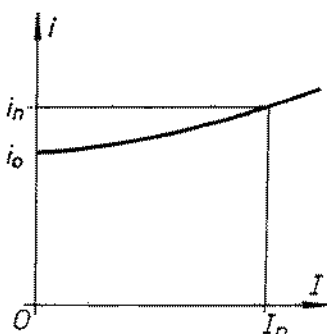


Fig. 2.18. Caracteristica reglajului generatorului cu excitație separată.

În practică este necesar să se mențină tensiunea U la borne constantă, atunci cînd sarcina variază. În acest scop se reglează curentul de excitație. Curba $i = f(I)$ care arată modul cum trebuie variat curentul de excitație în funcție de curentul de sarcină I , pentru a se menține tensiunea la borne U constantă, se numește caracteristica reglajului.

În figura 2.18 este reprezentată caracteristica de reglaj la un generator cu excitație separată.

F. MOTOARE DE CURENT CONTINUU

1. SISTEME DE EXCITAȚIE ALE MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU

Motoarele de curent continuu au aceleași sisteme de excitație ca și generatoarele. În schemele din figura 2.19 sînt prevăzute în plus față de schemele generatoarelor, cu excepția motorului cu excitație separată, reostatele de pornire R_p .

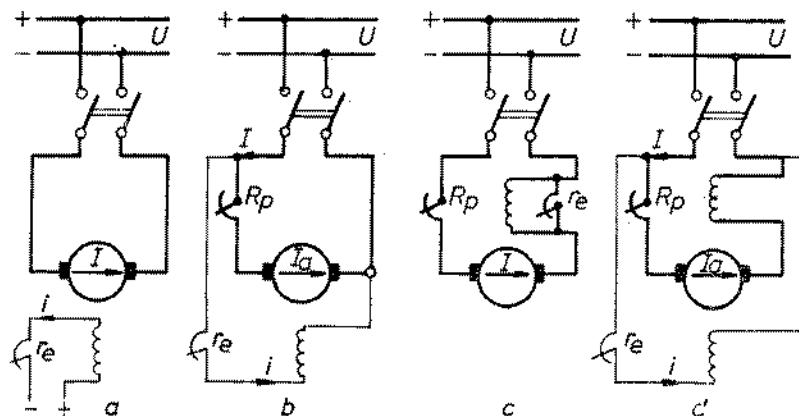


Fig. 2.19. Schemele motoarelor de curent continuu:
a — cu excitație separată; b — cu excitație derivație; c — cu excitație serie
d — cu excitație mixtă

Între curentul de sarcină I , curentul în indus I_a și curentul excitației derivație i există relațiile:

— pentru motorul cu excitație separată și serie:

$$I = I_a; \quad (2.18)$$

— pentru motorul cu excitație derivație sau mixtă:

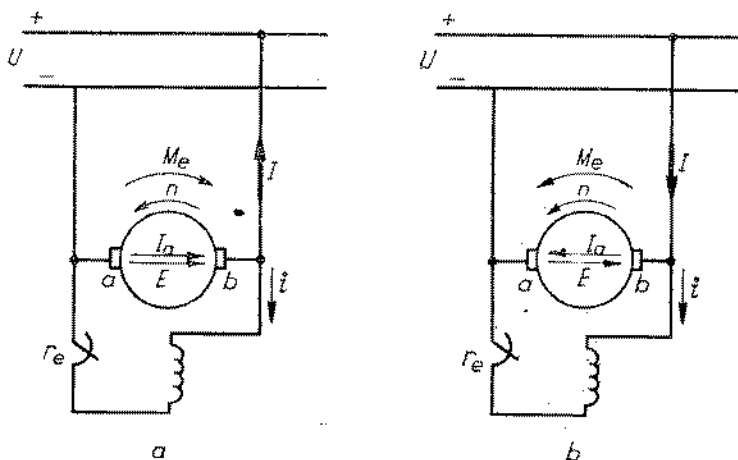
$$I = I_a + i. \quad (2.19)$$

2. REVERSIBILITATEA MAȘINILOR ELECTRICE DE CURENT CONTINUU

Prin *reversibilitatea* unei mașini se înțelege proprietatea acestora de a funcționa fără modificări constructive, fie în regim de generator fie de motor.

Se consideră mașina din figura 2.20, a funcționind ca generator rotit în sens trigonometric cu turația n , și debitind curentul I în rețea. T.e.m. indusă E_g are sensul de la peria a spre b , iar valoarea ei satisface ecuația $U = E_g - \Delta U$. Cuplul electromagnetic M_e este invers sensului de rotație și este deci un cuplu rezistent.

Dacă se reduce fie turația n , fie curentul de excitație i , t.e.m. E devine inferioară tensiunii rețelei U , iar curentul I și I_a își schimbă sensul. Mașina



2.20. Reversibilitatea mașinii de curent continuu:
a — funcționarea ca generator; *b* — funcționarea ca motor.

funcționează acum în regim de motor (fig. 2.20, *b*). T.e.m. indusă E_m are tot sensul de la peria *a* spre *b* (nu s-a schimbat nici sensul de rotație, nici sensul fluxului), iar valoarea ei satisface ecuația $U = E_m + \Delta U$. Cuplul electromagnetic M_e își schimbă sensul (s-a schimbat sensul curentului I_a) și devine un cuplu motor.

3. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE A MOTORULUI DE CURENT CONTINUU

În prezența cîmpului magnetic produs de polii de excitație, periiile sînt conectate la o rețea de curent continuu. Prin înfășurarea indusului va circula curentul I_{a0} , care va produce un cuplu electromagnetic M_e , ce pune în mișcare rotorul cu turația n_0 de mers în gol. Curentul I_{a0} este mic, acoperind pierderile în mașină la mersul în gol. În înfășurare se induce o t.e.m. E , la fel ca la generator, însă de sens opus curentului I_{a0} .

Dacă la capătul de arbore se aplică un cuplu rezistent dat de un mecanism acționat de motor, curentul crește la valoarea I_a , pentru a crește cuplul motor, și motorul merge în sarcină.

Ecuația de mers în sarcină este:

$$U = E + \Delta U \quad (2.20)$$

Pentru diferitele sisteme de excitație, ecuația în sarcină este:

$$\text{excitație separată:} \quad U = E + R_a I; \quad (2.21)$$

$$\text{excitație derivație:} \quad U = E + R_a (I - i); \quad (2.22)$$

$$\text{excitație serie:} \quad U = E + (R_a + R_s) I; \quad (2.23)$$

$$\text{excitație mixtă:} \quad U = E + (R_a + R_s) \cdot (I - i). \quad (2.24)$$

4. CARACTERISTICA MECANICĂ A MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU

Caracteristica mecanică reprezintă relația $n = f(M)$, când tensiunea și rezistența circuitului de excitație sînt constante.

Înlocuindu-se în relația 2.21 valoarea lui E , rezultă:

$$U = E + R_a I_a = K_e n \Phi + R_a I_a, \quad (2.25)$$

de unde:

$$n = \frac{U - R_a I_a}{K_e \Phi} = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{R_a}{K_e \Phi} I_a. \quad (2.26)$$

Înlocuind în această relație valoare I_a din relația 2.10 și făcînd aproximația $M \cong M_e$, rezultă expresia turației n funcție de cuplul M :

● Pentru motorul cu excitație separată sau derivație această expresie este:

$$n = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{R_a}{K_e K_m \Phi^2} M = K_1 - K_2 M. \quad (2.27)$$

Această relație arată că n variază liniar cu cuplul. La mersul în gol,

$$n_0 = K_1 = \frac{U}{K_e \Phi}, \quad (2.28)$$

iar pe măsură ce crește cuplul, n scade (caracteristica 1 din figura 2.21).

● Pentru motorul cu excitație serie, făcîndu-se abstracție de saturația magnetică, se poate considera că fluxul este proporțional cu curentul I_a , adică $\Phi = K_\varphi I_a$.

Expresia cuplului devine:

$$M = K_m I_a \Phi = K_m K_\varphi I_a^2, \quad (2.29)$$

adică cuplul este proporțional cu pătratul curentului, iar expresia turației devine:

$$n = \frac{U \sqrt{K_m K_\varphi}}{K_e K_\varphi \sqrt{M}} - \frac{R_a}{K_e K_\varphi} = \frac{K'}{\sqrt{M}} - K'', \quad (2.30)$$

Conform acestei relații, caracteristica mecanică a motorului cu excitație serie are aspectul unei hiperbole (curba 2 din figura 2.21).

La mersul în gol, n_0 tinde spre infinit și din această cauză motorul cu excitație serie nu poate funcționa în gol sau cu sarcini foarte reduse, deoarece rotorul ar fi distrus de forțele centrifuge.

● La motorul cu excitație mixtă diferențială, excitația serie dezexcită mașina pe măsură ce sarcina crește și din această cauză turația nu mai scade ca la excitația derivație, ci rămîne practic constantă (curba 3 din figura 2.21).

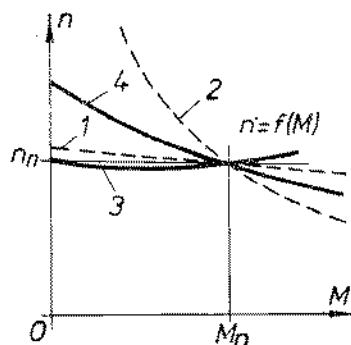


Fig. 2.21. Caracteristicile mecanice ale motoarelor de curent continuu cu excitație: — derivație; 2 — serie; 3, 4 — mixtă.

● **La motorul cu excitație mixtă adițională**, excitația serie provoacă o cădere mai mare a turației pe măsură ce sarcina crește, obținându-se o situație intermediară între cazul excitației derivație și cea serie (curba 4 din figura 2.21).

5. PORNIREA MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU

Se utilizează trei metode de pornire:

● **Prin conectarea directă la rețea.** La pornire, când $n = 0$, $E = 0$, iar din relația 2.21 rezultă curentul de pornire:

$$I_p = \frac{U}{R_a} \quad (2.31)$$

Acest curent poate lua valori foarte mari, inadmisibil pentru rețea și pentru motor. Metoda se poate aplica pentru motoare mici, la care I_p este de maximum 6—8 ori curentul nominal I_a .

● **Prin aplicarea la borne a unei tensiuni reduse.** Metoda se poate aplica numai la motoare cu excitație separată (excitația este maximă în tot timpul pornirii) și când se dispune de o sursă cu tensiune reglabilă (grup motor-generator sau convertizor cu tiristoare). Inițial se aplică o tensiune redusă, astfel ca I_p din relația 2.31 să nu depășească (1,3—1,5) I_n , și apoi este crescută progresiv pînă la valoarea nominală, pe măsură ce crește turația motorului și t.e.m. E .

● **Prin utilizarea unui reostat de pornire.** În circuitul principal este prevăzut un reostat de pornire cu rezistența R_p , astfel aleasă încît curentul de pornire:

$$I_p = \frac{U}{R_a + R_p} \quad (2.32)$$

să ia valori de maximum 1,5—2 I_n . Pe măsură ce crește turația motorului și t.e.m., reostatul este treptat scurtcircuitat, astfel ca la sfîrșitul pornirii reostatul este scos complet din circuit.

6. REGLAREA VITEZEI LA MOTOARELE DE CURENT CONTINUU

Conform relației (2.26), viteza de rotație a motorului are expresia:

$$n = \frac{U - R_a I_a}{K_e \Phi}$$

Neglijîndu-se căderea de tensiune, se poate scrie:

$$n \simeq \frac{U}{K_e \Phi} \quad (2.33)$$

Conform acestei relații, viteza de rotație poate fi reglată, fie prin variația tensiunii aplicate U , fie prin variația fluxului.

● **Reglarea prin variația tensiunii U .** Această metodă se aplică la motoarele cu excitație separată (excitația este maximă și constantă) și care sînt alimentate de la o sursă cu tensiunea reglabilă. Prin reglarea tensiunii de la valoarea nominală în jos, se poate obține reglarea turației de la valoarea nominală la o valoare minimă (practic pînă la zero), la curentul nominal, deci la cuplu constant.

● **Reglarea prin variația fluxului Φ (prin slăbire de cîmp).** Curentul de excitație este micșorat cu ajutorul reostatului de excitație, micșorînd astfel valoarea fluxului, și crescînd turația. Prin această metodă se obține un reglaj al turației, la putere constantă, de la valoarea nominală în sus pînă la 2—3 ori turația nominală.

7. SCHIMBAREA SENSULUI DE ROTAȚIE

Sensul de rotație se inversează prin înversarea sensului cuplului;

$$M = K_m \Phi I_a \quad (2.34)$$

Pentru aceasta se inversează ori sensul fluxului Φ , deci sensul curentului de excitație, ori sensul curentului în îndus I_a , prin înversarea conexiunilor exterioare la bornele înfășurării respective. Dacă se schimbă simultan legăturile la ambele înfășurări, sensul de rotație nu se inversează.

8. FRINAREA MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU

La acționarea electrică a unor mecanisme, apare necesitatea frînării mecanismului, fie pentru micșorarea vitezei, fie pentru menținerea constantă a vitezei mecanismului care este sub acțiunea unui cuplu exterior.

Principalele metode de frînare sînt:

● **Frînarea prin recuperare.** Această metodă se utilizează atunci cînd motorul este antrenat de către mecanismul acționat, la o turație ce depășește turația în gol n_0 a motorului. O astfel de situație apare de exemplu la un vehicul acționat electric (locomotivă electrică, tramvai etc.) care coboară o pantă. Cînd vehiculul este acționat de motor, acesta este alimentat de la rețea cu tensiunea U , curentul intră prin peria pozitivă a motorului. Cînd începe coborîrea pantei, gravitatea acționează asupra vehiculului, iar cuplul motor și curentul I_a scad la zero, mașina de curent continuu mergînd în gol. Crescînd viteza de rotație peste n_0 , t.e.m. E depășește ca valoare pe U , apare un curent I_a invers decît în situația anterioară (iese din peria pozitivă) și mașina funcționează ca generator, transformînd energia cinetică a vehiculului în energie electrică pe care o înapoiază rețelei, realizînd o recuperare a energiei. Frînarea prin recuperare este cea mai economică metodă, însă poate fi utilizată numai la turații mari și decî cu ea nu se poate realiza oprirea motorului.

● **Frînarea dinamică (reostatică)** se obține decuplînd motorul de la rețea și legînd la bornele sale un reostat. Mașina funcționează ca generator, care

transformă energia primită de la mecanism, în energie electrică debitată în reostat. Efectul de frinare se micșorează pe măsura descreșterii turației, așa încît nici cu această metodă nu se poate obține decît frînarea pînă la turații mici.

Metoda este larg utilizată în practică, de exemplu la vehicule acționate electric.

● **Frînarea prin contracurent** constă în inversarea conexiunilor la bornele motorului alimentat de la rețea. La această metodă, energia cinetică a mecanismului și energia primită de la rețea se transformă în căldură în motor, obținîndu-se o frinare puternică, sensul de rotație putîndu-se inversa, dacă mașina nu este deconectată la timp de la rețea.

G. PIERDERILE ȘI RANDAMENTUL MAȘINILOR DE CURENT CONTINUU

În mașinile de curent continuu se produc următoarele pierderi:

$p_{Cu a} = R_a I_a^2$ — pierderile electrice în cupru, în înfășurarea indusului, bobinele de comutație și de excitație serie;

$p_{Cu e} = U_i$ — pierderile electrice în bobinele de excitație;

$p_{ep} = \Delta U_p \cdot I_a$ — pierderile electrice la contactul periiilor;

p_{Fe} — pierderile în fier produse prin histerezis și curenți turbionari în pachetul de tole al indusului;

p_m — pierderile mecanice (produse prin frecare în lagăre, la perii și prin ventilație).

Suma acestor pierderi Σp reprezintă pierderile totale în mașină, care se scad din puterea absorbită pentru a rezulta puterea utilă.

● La generator:

— puterea absorbită P_a este puterea mecanică primită la capul de arbore;

— puterea utilă este $P = P_a - \Sigma p = UI$, adică puterea electrică cedată rețelei;

— randamentul generatorului rezultă:

$$\eta_g = \frac{P}{P_a} = \frac{P}{P + \Sigma p} = \frac{UI}{UI + \Sigma p} \quad (2.35)$$

● La motor:

— puterea absorbită $P_a = UI$ este puterea electrică primită de la rețea;

— puterea utilă $P = P_a - \Sigma p$ este puterea mecanică cedată la capul de arbore;

— randamentul motorului rezultă:

$$\eta_M = \frac{P}{P_a} = \frac{P_a - \Sigma p}{P_a} = \frac{UI - \Sigma p}{UI} \quad (2.36)$$

În figura 2.22 este arătată circulația puterilor la generator și la motor.

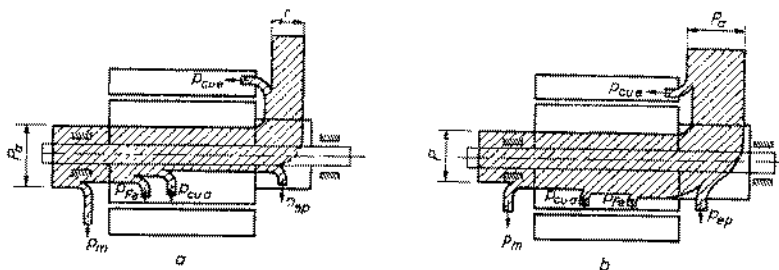


Fig. 2.22. Circulația puterilor în mașina de curent continuu:
a — generator; b — motor.

● La generator $P_e = P_a - p_m - p_{Fe} = EI_a$ este puterea transformată în putere electrică și se numește *putere electromagnetică*.

● La motor $P_M = P_a - p_{cu a} - p_{cu f} - p_{ep} = M_e \Omega$ este puterea transformată în putere mecanică.

H. UTILIZAREA, EXPLOATAREA ȘI DEFECTELE MAȘINILOR DE CURENT CONTINUU

1. UTILIZARE

Mașinile de curent continuu se folosesc în special acolo unde este necesar un cuplu mare de pornire și reglaj al turației în limite mari: tracțiune electrică, acționarea mașinilor-unelte, laminare, mașini de ridicat, excavatoare etc.

2. EXPLOATARE

a. INSTALARE

La instalarea mașinii electrice trebuie să se aibă în vedere îndeplinirea corectă a următoarelor operații: fixarea pe fundație suficient de rezistentă, cuplarea (axială prin cuple, cu curele sau roți dințate), executarea legăturilor la placa de borne și legarea la pământ. În schema electrică trebuie să se prevadă protecția contra suprasarcinilor și scurtcircuitelor și protecția de tensiune nulă.

b. EXPLOATARE

În exploatare, mașina trebuie să funcționeze într-un regim care să nu depășească caracteristicile sale nominale, iar tensiunea de alimentare nu trebuie să difere cu mai mult de $\pm 5\%$ față de tensiunea nominală.

c. ÎNTREȚINERE

Pentru a asigura o exploatare normală și o durată de serviciu îndelungată, mașinile sînt supuse periodic unor verificări, revizii și reparații planificate. Aceste lucrări au ca scop în primul rînd înlocuirea pieselor ce se uzează normal, cum sînt periile, vasilina rulmenților, uleiul lagărelor de alunecare, îndepărtarea prafului depus și în al doilea rînd remedierea la timp a unor defecte mărunte ce pot provoca stricăciuni mai mari, dacă nu ar fi înlăturate la timp.

3. DEFECTELE MAȘINILOR DE CURENT CONTINUU ȘI REMEDIEREA LOR

Defectele mai importante ce pot apărea la mașinile de curent continuu sînt:

- **Înrăutățirea comutației**, prin apariția unor scînteii puternice sau chiar „cerc de foc la colector”. Defectul se poate datora următoarelor cauze:

- *Deformarea colectorului*. Prin uzare, colectorul se poate ovaliza sau se poate slăbi strîngerea lamelelor de colector. În acest caz mașina se demontează și se repară colectorul.

- *Starea necorespunzătoare a suprafeței colectorului sau periile neșlefuite*. Pentru remediere se șlefuieste suprafața colectorului, se frezează micanita dintre lamele și se șlefuiesc periile.

- *Deplasarea periilor din axa neutră*. Se verifică poziția periilor și se fixează bine crucea portperii, pentru a nu se deplasa.

- *Presiune diferită pe perii*. Se reglează resoartele portperii pentru a se realiza o presiune aproximativ egală la toate periile.

- *Scurtcircuit în bobinajul indusului*.

- **Defectarea bobinajului indusului** provocată de:

- *Scurtcircuit între spire*, din cauza străpungerii izolației între spire sau între două lamele de colector. Are ca efect încălzirea puternică a spirelor scurtcircuitate și înrăutățirea comutației, iar la generator, tensiunea la borne este insuficientă. Pentru remediere se demontează mașina și se rebobinează parțial sau total indusul.

- *Întrerupere în înfășurarea indusului*. Motorul nu pornește, iar generatorul nu dă tensiune. Remedierea necesită rebobinarea parțială sau totală a indusului.

- *Străpungerea izolației față de masă*. Dacă străpungerea s-a produs într-un singur loc, mașina funcționează normal, însă este periculos pentru personalul de serviciu. De aceea la verificările periodice se controlează rezistența de izolație față de masă.

- **Defectarea bobinelor polare** provocată de:

- *Întreruperea în circuitul bobinelor de excitație*. Generatorul nu dă tensiune, iar motorul nu pornește.

— *Înteruperea sau scurtcircuitul în bobinele polilor auxiliari* are ca efect înrăutățirea comutației. Mașina trebuie demontată și remediată bobina sau legătura defectă.

— *Scurtcircuit între spire la bobinele de excitație.* Generatorul nu mai dă tensiune suficientă, iar motorul funcționează cu o viteză mai mare. Defectul nu e însoțit de încălzirea spirelor scurtcircuitate, deoarece fluxul în stator este constant, însă defectul se poate amplifica și de aceea bobina defectă trebuie înlocuită.

● **Defecte mecanice.** Acestea se manifestă prin zgomote și vibrații puternice și sînt cauzate în principal de uzura lagărelor sau slăbirea și dezechilibrarea cuplajelor. Pentru remediere se înlocuiesc lagărele și se echilibrează partea rotativă a mașinii și cuplajul.

PROBLEME

1. Un generator de curent continuu cu excitație derivație are puterea utilă $P=23$ kW tensiunea $U=230$ V, rezistența indusului $R_a=0,15$ Ω și rezistența bobinajului de excitație $R_e=115$ Ω . Să se calculeze curentul de sarcină I , curentul de excitație i_e și f.e.m. E .

Soluție. $I = \frac{P}{U} = \frac{23 \cdot 10^3}{230} = 100$ A; $i_e = \frac{U}{R_e} = \frac{230}{115} = 2$ A. Curentul în indus: $I_a = I + i_e = 102$ A; $E = U + \Delta U = 230 + 0,15 \cdot 102 = 245,3$ V.

2. Un motor de curent continuu cu excitație derivație are următoarele caracteristici: $P=8,8$ kW; $U=220$ V; $\eta=0,8$; $R_a=0,5$ Ω ; $R_e=110$ Ω . Să se calculeze: P_a, I, i_e, E .

Soluție. $P_a = \frac{P}{\eta} = \frac{8,8}{0,8} = 11$ kW; $I = \frac{P_a}{U} = \frac{11 \cdot 10^3}{220} = 50$ A; $i_e = \frac{U}{R_e} = \frac{220}{110} = 2$ A; $I_a = 50 + 2 = 48$ A; $E = 220 - 0,5 \cdot 48 = 196$ V.

3. Un motor de curent continuu cu excitație separată are următoarele caracteristici: $U=220$ V; $R_a=0,2$ Ω ; $I_n=100$ A; $n_n=1000$ rot/min. Să se calculeze turația de mers în gol.

Soluție. Din relația 2.26 se determină $K_\Phi \Phi = \frac{U - R_a I_{an}}{n_n} = \frac{220 - 0,2 \cdot 100}{1000} = 0,2$, iar din relația 2.27 rezultă:

$n_0 = \frac{U}{K_\Phi \Phi} = 1000$ rot/min (motorul fiind cu excitație separată, Φ nu depinde de sarcină).

4. Un motor de curent continuu are următoarele caracteristici: $P=4,4$ kW; $U=110$ V; $\eta=0,8$; $R_a=0,2$ Ω . Să se calculeze rezistența reostatului de pornire, astfel ca $I_p=1,4$ I_n .

Soluție. $P_a = \frac{P}{\eta} = 5,5$ kW; $I_n = \frac{P_a}{U} = 50$ A; $R_p = \frac{U - R_a I_p}{I_p} =$

$$= \frac{110 - 0,2 \cdot 1,4 \cdot 50}{1,4 \cdot 50} = 1,37$$
 Ω .

5. Un generator de curent continuu are $U=220$ V, $I=10$ A și $P_a=2,5$ kW. Să se calculeze puterea utilă, pierderile și randamentul.

Răspuns. $P_u=2,2$ kW; $\Sigma p=0,3$ kW; $\eta=0,88$.

6. Un motor de curent continuu are $U = 110 \text{ V}$; $I = 100 \text{ A}$; $P_u = 9 \text{ kW}$.

Să se calculeze puterea absorbită, pierderile și randamentul.

Răspuns: $P_a = 11 \text{ kW}$; $\Sigma p = 2 \text{ kW}$; $\eta = 0,81$.

REZUMAT

● Tipuri de mașini electrice:

După transformarea energiei:

- *motoare*: energie electrică \rightarrow mecanică;
- *generatoare*: energie mecanică \rightarrow electrică;
- *convertizoare*: energie electrică \rightarrow electrică;
- *Frână*: energie electrică + mecanică \rightarrow căldură.

După principiul de funcționare:

- *mașini de curent continuu*
- *mașini de curent alternativ* $\left\{ \begin{array}{l} \text{— sincrone} \\ \text{— asincrone} \\ \text{— cu colector} \end{array} \right.$

● Serviciul mașinilor electrice

- S_1 — continuu;
- S_2 — scurtă durată;
- S_3 — intermitent periodic;
- S_4 — neîntrerupt cu sarcină intermitentă periodică.

● Elemente constructive de bază la mașina de curent continuu:

Statorul $\left\{ \begin{array}{l} \text{— carcasa} \\ \text{— poli de excitație} \\ \text{— bobine de excitație} \\ \text{— poli auxiliari} \\ \text{— bobine de comutație} \end{array} \right.$

Rotorul $\left\{ \begin{array}{l} \text{— arbore} \\ \text{— pachet de tole} \\ \text{— suporti de bobinaj} \\ \text{— colectorul} \\ \text{— bobinajul indus} \\ \text{— ventilator} \end{array} \right.$

Crucea port-perii

Scuturi și lagăre

Cutia de borne

● **Înfășurările de curent continuu:**

$$\text{Buclat} \begin{cases} \text{— simplu: } 2a=2p \\ \text{— multiplu: } 2a=q2p \end{cases}$$

$$\text{Ondulat} \begin{cases} \text{— serie: } 2a=2, \text{ indiferent de } 2p \\ \text{— serie paralel: } 2 < 2a < 2p \\ \text{— paralel simplu: } 2a=2p \\ \text{— paralel multiplu: } 2a > 2p \end{cases}$$

● **Tensiunea electromotoare indusă:**

$$E = \frac{N}{2a} B_m l v = \frac{p}{a} N \frac{n}{60} \Phi = K_e n \Phi,$$

în care:

$$B_m = \frac{\Phi}{\tau l} \text{ — inducția medie în întrefier;}$$

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \text{ — pasul polar;}$$

l — lungimea pachetului de tole;

$$v = \frac{\pi D n}{60} \text{ — viteza periferică.}$$

● **Reacția indusului:**

- deformează câmpul magnetic inductor;
- decalează axa neutră;
- micșorează fluxul inductor.

● **Îmbunătățirea comutației:**

- utilizarea de perii care nu formează scintei

$$\text{— inducere în spirele care comută, a lui } e_k = e_r + e_a \begin{cases} \text{— prin decalarea periiilor} \\ \text{— prin poli auxiliari} \end{cases} \begin{cases} \text{— la generator în sensul rotației} \\ \text{— la motor în sens invers rotației} \end{cases}$$

● **Sisteme de excitație la generatoare și motoare de curent continuu:**

- separată;
- derivație;
- serie;
- mixtă $\begin{cases} \text{— adițional} \\ \text{— diferențial} \end{cases}$

● Căderi de tensiune, puteri, randament

Excitație, puteri, randament	Generator	Motor
Separată	$U = E - R_a I$	$U = E + R_a I$
Derivație	$U = E - R_a(I + i)$	$U = E + R_a(I - i)$
Serie	$U = E - (R_a + R_s)I$	$U = E + (R_a + R_s)I$
Mixtă	$U = E - R_a(I + i) - R_s I$	$U = E + (R_a + R_s) \cdot (I - i)$
Indiferent	$U = E - \Delta U$	$U = E + \Delta U$
Putere utilă	electrică $P = UI$	mecanică $P = UI - \Sigma p$
Putere absorbită	mecanică $P_a = UI + \Sigma p$	electrică $P_a = UI$
Randament	$\eta = \frac{P}{P_a}$	

● Cuplul și caracteristica mecanică a motoarelor de curent continuu.

Cuplul electromagnetic:

$$M_e = K_m \Phi I_a.$$

Caracteristica mecanică:

$$n = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{R_a}{K_e K_m \Phi^2} M, \quad \begin{cases} \text{— la excitație separată: } n = K_1 - K_2 M \\ \text{— la excitație serie: } n = \frac{K'}{\sqrt{M}} - K'' \end{cases}$$

● Reglarea tensiunii la generatoare:

$$U = E - \Delta U = K_e n \Phi - \Delta U \approx K_e n \Phi.$$

U este proporțional cu n și cu Φ , deci cu i_a .

● Pornirea motoarelor de curent continuu:

$$I_p = \frac{U}{R_a + R_p}.$$

● Reglarea turației motorului de curent continuu:

— de la n_n în jos — n este proporțional cu U ;

— de la n_n în sus — n este invers proporțional cu Φ , deci cu i_a .

● Schimbarea sensului de rotație:

$$M = K_m \Phi I_a.$$

Schimbarea sensului $\begin{cases} \text{— inversarea fluxului } \Phi, \text{ deci a lui } i_e \\ \text{— inversarea curentului în indus } I_a \end{cases}$

● Metode de frinare a motoarelor de curent continuu:

— prin recuperare;

— dinamică (reostatică);

— prin contracurent.

CAPITOLUL 3

TRANSFORMATOARE ELECTRICE

A. CONSTRUCȚIA ȘI UTILIZAREA TRANSFORMATORULUI

1. NOȚIUNI GENERALE

Transformatorul este un *aparat static* care modifică pe *cale electromagnetică* parametrii unui circuit de *curent alternativ* (*tensiunea și curentul*).

Trebuie subliniat că transformatorul poate modifica (transforma) numai caracteristicile curentului alternativ și că transformarea se face la aceeași frecvență.

În principal transformatorul este constituit dintr-un miez magnetic, pe care sînt așezate două înfășurări, izolate între ele, *înfășurarea primară*, care primește energia electrică, și *înfășurarea secundară*, care cedează energia electrică unei rețele sau unui consumator. Înfășurarea care corespunde cu tensiunea cea mai mare se numește *înfășurare de înaltă tensiune* (IT), iar înfășurarea corespunzătoare tensiunii mai mici se numește *înfășurare de joasă tensiune* (JT).

2. UTILIZAREA ȘI CLASIFICAREA TRANSFORMATOARELOR

Transformatoarele sînt de o largă utilizare în practică, îndeosebi în domeniul transportului și distribuției energiei electrice.

● După domeniul de utilizare, transformatoarele electrice se pot clasifica în:

— *transformatoare de putere*, pentru transportul și distribuția energiei electrice;

— *autotransformatoare*;

— *transformatoare de măsură*, pentru conectarea indirectă a aparatelor de măsură a tensiunilor și curenților mari;

— *transformatoare de putere cu caracteristici speciale*, cum sînt cele pentru alimentarea cuptoarelor electrice, pentru alimentarea redresoarelor cu vapori de mercur, pentru sudare electrică, pentru încercări etc.;

— *transformatoare de putere mică*, cum sînt transformatoarele de siguranță, transformatoarele de izolare, de separare etc.

● După numărul de faze, transformatoarele pot fi *monofazate* sau *polifazate*, între acestea, transformatoarele trifazate fiind cele mai utilizate.

● Din punctul de vedere al modului de răcire, transformatoarele pot fi *uscate* (cu răcire în aer) sau *cu răcire în ulei* (care sînt cele mai utilizate).

În țara noastră se execută o gamă mare de transformatoare: seria unitară de transformatoare de putere de la 10 kVA la 1 600 kVA și 6—35 kV, transformatoare de mare putere, cu reglaj în sarcină de la 2,5 la 63 MW și 35 la 110 kV ș. a.

3. ELEMENTELE CONSTRUC- TIVE DE BAZĂ

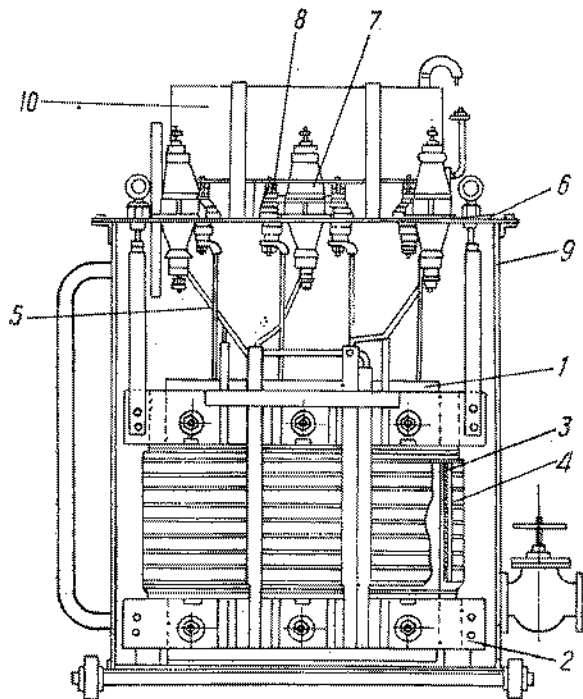


Fig. 3.1. Secțiune prin transformatorul trifazat în ulei:
1 — miez magnetic; 2 — grinzile schelei; 3 — înfășurarea de joasă tensiune; 4 — înfășurarea de înaltă tensiune; 5 — conexiuni; 6 — capac; 7 — izolatoare de înaltă tensiune; 8 — izolatoare de joasă tensiune; 9 — cuva; 10 — conservatorul de ulei.

Tipul cel mai utilizat de transformator, și anume transformatorul trifazat în ulei este constituit din următoarele părți principale: miezul magnetic, schelea, înfășurările, capacul cu izolatoarele de trecere și cuva de ulei (fig. 3.1).

● **Miezurile magnetice** se execută din tole confecționate din tablă silicioasă specială pentru transformatoare și sînt de două tipuri: în manta (fig. 3.2) și cu coloane (fig. 3.3).

Cu linie întreruptă sînt indicate locurile unde se montează înfășurările.

● **Înfășurările.** Se realizează din bobine în general de formă cilindrică, unele de joasă tensiune și altele de înaltă tensiune. Bobinele și miezul sînt strînse cu ajutorul schelei.

● **Cuva.** La transformatoarele cu răcire în ulei, miezul cu înfășurările sînt introduse într-o cuvă din tablă de oțel, care se umple cu ulei. Uleiul are un triplu rol: de izolant, agent de răcire și de a proteja înfășurările de umiditate.

● **Modurile de răcire.** Transformatoarele uscate se răcesc prin circulația naturală a aerului pe lângă miez și înfășurări sau cu ventilație forțată cu ajutorul unui ventilator.

La transformatoarele în ulei, căldura de la înfășurări și miez este transportată de ulei în dispozitivele de răcire ale cuvei (ondule, țevi, radiatoare) unde este cedat aerului înconjurător.

● **Capacul, bornele și conservatorul.** Partea superioară a unei cuve este închisă etanș de un capac din tablă de oțel.

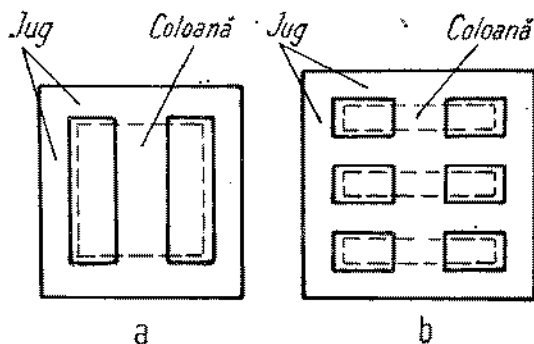


Fig. 3.2. Miezuri magnetice în manta:
a — monofazat; b — trifazat.

Pe capac sînt montate bornele de trecere a legăturilor electrice din interiorul transformatorului, la exterior și un rezervor de tablă, numit conservator, care comunică printr-o conductă cu cuva. Conservatorul este parțial umplut cu ulei, astfel încît preia variațiile de nivel ale uleiului ce se produc la variația temperaturii lui.

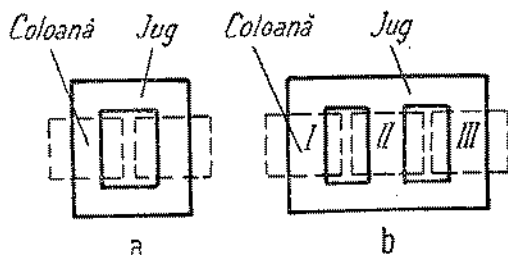


Fig. 3.3. Miezuri magnetice cu coloane:
a — monofazat; b — trifazat.

B. TRANSFORMATORE MONOFAZATE

1. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE

Funcționarea transformatorului se bazează pe principiul inducției electromagnetice între două circuite fixe, așezate pe un miez magnetic comun (fig. 3.4).

Pentru o descriere simplificată a funcționării transformatorului, se neglijează o serie de fenomene, care vor fi studiate în capitolele următoare, și anume: căderile de tensiune, fluxurile de scăpări, pierderile în fier și în cupru etc.

Se presupune mai întâi că circuitul secundar 2 este deschis (nu are legat nici un receptor). Alimentînd înfășurarea primară 1, care are w_1 spire, cu o tensiune alternativă u_1 , prin ea va circula un curent alternativ de valoare redusă i_0 , numit *curent de mers în gol*.

Tensiunea magnetomotoare $w_1 i_0$ produce un flux magnetic alternativ ϕ care se închide prin circuitul magnetic 3. Acest flux induce în înfășurarea primară o tensiune electromotoare e_1 și în înfășurarea secundară o tensiune electromotoare e_2 .

Tensiunea electromotoare e_1 este de sens contrar cu tensiunea aplicată u_1 și neglijînd căderile de tensiune, se poate spune că este egală în valoare absolută cu această tensiune.

Dacă se conectează la bornele înfășurării secundare un receptor, prin această înfășurare va circula curentul secundar i_2 .

Tensiunea magnetomotoare $w_2 i_2$ este opusă tensiunii magnetomotoare $w_1 i_0$ și tinde să micșoreze fluxul ϕ . Valoarea fluxului ϕ însă trebuie să se mențină constantă (neglijîndu-se căderile de tensiune și pierderile) pentru a se putea induce tensiunea electromotoare e_1 care trebuie să fie egală cu tensiunea aplicată u_1 . De aceea înfășurarea primară va absorbi de la rețea un curent mai mare decît i_0 , numit *curent primar* i_1 , astfel încît tensiunea magnetomotoare rezultantă să mențină și în sarcină fluxul magnetic ϕ .

Deci, cînd transformatorul funcționează în sarcină, înfășurarea primară absoarbe de la rețea puterea $u_1 i_1$.

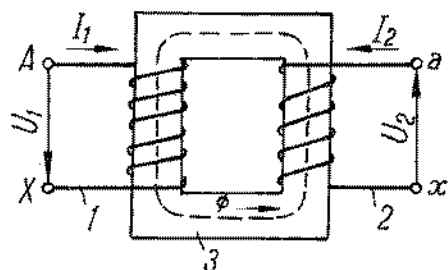


Fig. 3.4. Principiul de funcționare a transformatorului.

și debitează prin înfășurarea secundară unui receptor puterea $u_2 i_2$. Neglijând pierderile în transformator, se poate scrie $u_1 i_1 = u_2 i_2$.

2. ECUAȚIILE GENERALE DE FUNCȚIONARE

La funcționarea transformatorului apar, spre deosebire de cele arătate în cazul simplificat descris anterior, și alte fenomene cum sînt: fluxurile de scăpări, căderile de tensiune etc.

În figura 3.5 este arătată schema unui transformator monofazat, la secundarul căruia a fost conectat un receptor.

Înfășurarea primară, alimentată cu tensiunea alternativă sinusoidală u_1 , absoarbe curentul i_1 . Tensiunea la bornele înfășurării secundarului este u_2 , iar receptorul absoarbe curentul i_2 .

Prin miezul magnetic se închide fluxul principal Φ , străbătînd ambele înfășurări. În afară de acesta, înfășurarea primară produce un flux de scăpări Φ_{s1} , corespunzător liniilor de cîmp care se închid în jurul acestei înfășurări prin aer, și care nu străbat înfășurarea secundară. La fel și înfășurarea secundară, produce un flux de scăpări Φ_{s2} , corespunzător liniilor de cîmp care se închid în jurul acestei înfășurări prin aer, și care nu străbat înfășurarea primară.

Pentru scrierea ecuațiilor de funcționare se notează cu:

ω_1 și ω_2 — numărul de spire în înfășurarea primară, respectiv secundară;

R_1 și R_2 — rezistența electrică a înfășurării primare, respectiv secundare;

L_1 și L_2 — inductivitățile de scăpări a înfășurării primare, respectiv secundare.

Considerînd fluxul Φ sinusoidal, și luînd ca origine de fază, faza fluxului Φ , valoarea instantanee a acestuia este:

$$\varphi = \Phi \sin \omega t.$$

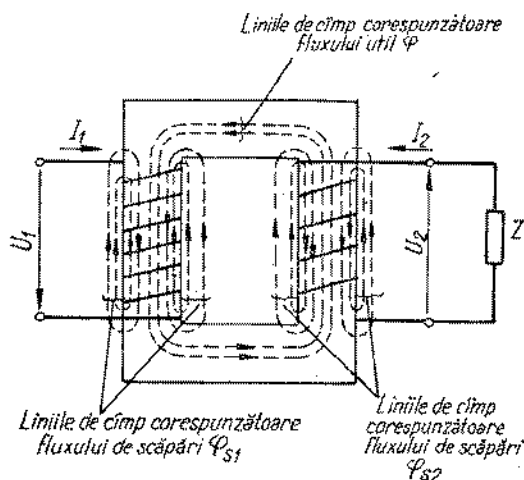


Fig. 3.5. Funcționarea transformatorului în sarcină.

Conform legii inducției, t.e.m. e_1 este:

$$e_1 = -w_1 \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = w_1 \Phi \omega \cos \omega t = w_1 \Phi \omega \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (3.1)$$

și are valoarea efectivă:

$$E_1 = \frac{w_1 \Phi \omega}{\sqrt{2}} = 4,44 f \omega_1 \Phi, \quad (3.2)$$

fiind defazată cu $\frac{\pi}{2}$ în urma fluxului.

La fel t.e.m. e_2 este:

$$e_2 = w_2 \Phi \omega \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (3.3)$$

are valoarea efectivă

$$E_2 = 4,44 f \omega_2 \Phi \quad (3.4)$$

și este defazată cu $\frac{\pi}{2}$ în urma fluxului.

Fluxul de scăpări Φ_{s1} induce în înfășurarea primară t.e.m. de scăpări:

$$e_{s1} = -L_1 \frac{\Delta i_1}{\Delta t}, \quad (3.5)$$

cu valoarea efectivă $L_1 \omega I_1$ și defazată cu $\frac{\pi}{2}$ în urma curentului i_1 .

La fel, fluxul de scăpări Φ_{s2} induce în înfășurarea secundară t.e.m. de scăpări.

$$e_{s2} = -L_2 \frac{\Delta i_2}{\Delta t}, \quad (3.6)$$

cu valoarea efectivă $L_2 \omega I_2$ și defazată cu $\frac{\pi}{2}$ în urma curentului i_2 .

Notînd cu $R_1 i_1$ și $R_2 i_2$ căderile de tensiune în primar respectiv secundar, ecuațiile de funcționare ale transformatorului se obțin aplicînd teorema a doua a lui Kirchhoff celor două circuite ale înfășurării din primar și secundar.

În valori instantanee rezultă:

$$(\text{circuitul primarului}) \quad u_1 + e_1 + e_{s1} = R_1 i_1; \quad (3.7)$$

$$(\text{circuitul secundarului}) \quad e_2 + e_{s2} - u_2 = R_2 i_2, \quad (3.8)$$

sau

$$u_1 = -e_1 + R_1 i_1 - e_{s1}; \quad (3.9)$$

$$u_2 = e_2 - R_2 i_2 + e_{s2}. \quad (3.10)$$

În complex, aceste ecuații se scriu:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 - \underline{E}_{s1}; \quad (3.11)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - R_2 \underline{I}_2 + \underline{E}_{s2}. \quad (3.12)$$

Notînd cu X_1 reactanța de scăpări a înfășurării primare $X_1 = L_1 \omega$ și cu X_2 reactanța de scăpări a înfășurării secundare $X_2 = L_2 \omega$, t.e.m. \underline{E}_{s1} și \underline{E}_{s2} au expresiile

$$\underline{E}_{s1} = -j X_1 \underline{I}_1; \quad (3.13)$$

$$\underline{E}_{s2} = -j X_2 \underline{I}_2, \quad (3.14)$$

în care fazorul $-j$ arată că t.e.m. sînt defazate cu $\frac{\pi}{2}$ în urma curenților respectivi.

Ecuatiile de funcționare ale transformatorului devin:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1, \quad (3.15)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - R_2 \underline{I}_2 - jX_2 \underline{I}_2. \quad (3.16)$$

Componentele $R_1 \underline{I}_1$ și $R_2 \underline{I}_2$ se numesc *căderi de tensiune active*, iar componentele $jX_1 \underline{I}_1$ și $jX_2 \underline{I}_2$ se numesc *căderi de tensiune inductive (reactive)*.

3. FUNCȚIONAREA TRANSFORMATORULUI MONOFAZAT ÎN GOL

Transformatorul funcționează în gol atunci când înfășurarea primară este legată la rețea, iar înfășurarea secundară este deschisă.

Înfășurarea primară absoarbe de la rețea curentul de mers în gol I_0 , care are o valoare redusă, în raport cu valoarea de funcționare în sarcină.

Curentul I_0 produce tensiunea magnetomotoare:

$$F_0 = w_1 I_0, \quad (3.17)$$

care la rîndul ei produce fluxul Φ care se închide prin miezul magnetic al transformatorului și fluxul de scăpări Φ_{s1} .

Fluxul Φ induce în înfășurarea primară și cea secundară tensiunile electromotoare E_1 respectiv E_2 , care au valorile indicate de relațiile (3.2) și (3.4). Deoarece secundarul este deschis, prin înfășurarea secundară nu circulă curent și deci $I_2 = 0$; $F_2 = 0$; $\Phi_{s2} = 0$. Ecuatiile de funcționare în gol sînt deci:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_0 + jX_1 \underline{I}_0; \quad (3.18)$$

$$\underline{U}_{20} = \underline{E}_2. \quad (3.19)$$

În relația 3.19, tensiunea în secundar a fost notată cu U_{20} pentru a se indica că este vorba de valoarea la funcționarea în gol.

Raportul de transformare este raportul între valorile tensiunii electromotoare primare și secundare. Folosindu-se relațiile (3.2) și (3.4) se obține:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44f w_1 \Phi}{4,44f w_2 \Phi} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (3.20)$$

Deoarece la mersul în gol, $E_2 = U_{20}$, iar căderile de tensiune în primar au valori reduse și pot fi neglijate, și deci se poate considera $E_1 \simeq U_1$, raportul de transformare se poate scrie:

$$K = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} \simeq \frac{U_1}{U_{20}}. \quad (3.21)$$

Relația (3.21) permite determinarea raportului de transformare printr-o încercare de mers în gol, prin măsurarea valorilor U_1 și U_{20} și calcularea raportului lor.

Curentul de mers în gol are două componente: o componentă inductivă sau magnetizantă I_{0r} , care produce fluxul magnetic și este în fază cu acest flux, și o componentă activă I_{0a} , în cuadratură cu Φ . Valoarea componentei inductive I_{0r} depinde de numărul de spire ale înfășurării primare w_1 , de mărirea fluxului Φ și de reluctanța circuitului magnetic. Componenta I_{0a} este

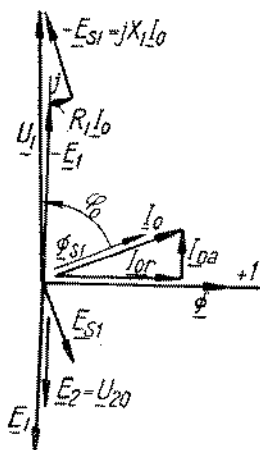


Fig. 3.6. Diagrama de fazori a funcționării transformatorului în gol.

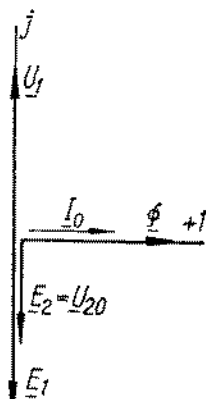


Fig. 3.7. Diagrama de fazori a funcționării transformatorului ideal în gol.

corespunzătoare puterii active necesare acoperirii pierderilor în fier ale transformatorului și are valoarea

$$I_{0a} = \frac{P_{Fe}}{U_1}, \quad (3.22)$$

în care P_{Fe} sînt pierderile în fier.

În funcție de componentele sale, curentul I_0 se obține din expresia:

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2}. \quad (3.23)$$

Diagrama fazorială a funcționării transformatorului în gol este reprezentată în figura 3.6.

Pe axa reală este luat fluxul Φ . În fază cu Φ este reprezentată componenta inductivă I_{0r} a curentului de mers în gol, iar defazată cu $\frac{\pi}{2}$ înaintea, componenta activă I_{0a} . Suma acestor două componente reprezintă curentul de mers în gol I_0 , care este defazat înaintea fluxului Φ cu unghiul α .

În fază cu I_0 este fluxul de scăpări Φ_{s1} , iar defazată cu $\frac{\pi}{2}$ în urma acestuia este t.e.m. E_{s1} . T.e.m. E_1 și E_2 sînt defazate în urma fluxului Φ cu $\frac{\pi}{2}$. Pentru obținerea fazorului tensiunii U_1 pe diagramă, se adună cele trei componente ale ei după ecuația (3.18). Se trasează $-E_1$ opus lui E_1 , de la vârful fazorului $-E_1$ se trasează în continuare căderea de tensiune $R_1 I_0$ în fază cu I_0 , apoi în continuare se trasează căderea de tensiune reactivă $jX_1 I_0$, egală și opusă cu E_{s1} . Fazorul trasat din origine la vârful acestei ultime căderi de tensiune, care închide poligonul, este U_1 . Rezultă că la mersul în gol I_0 este defazat în urma lui U_1 cu unghiul φ_0 .

Pentru un transformator ideal, fără pierderi în fier și fără căderi de tensiune, ecuațiile (3.18) și (3.19) ar deveni:

$$U_1 = -E_1; \quad (3.24)$$

$$U_{20} = E_2, \quad (3.25)$$

iar diagrama fazorială ar fi simplificată (fig. 3.7).

4. FUNCȚIONAREA ÎN SARCINĂ A TRANSFORMATORULUI MONOFAZAT

Transformatorul funcționează în sarcină când înfășurarea secundară este conectată la un receptor.

În figura 3.8 este reprezentată schema unui transformator monofazat în sarcină pe o impedanță $Z = R + jX$. Cunoscând impedanța complexă a secundarului $Z_2 = R_2 + jX_2$ curentul I_2 se poate determina din ecuația:

$$\underline{E}_2 = \underline{I}_2 [R + R_2 + j(X + X_2)]. \quad (3.26)$$

Curentul I_2 este defazat în urma t.e.m. \underline{E}_2 cu unghiul ψ a cărui valoare este dată de relația:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{X + X_2}{R + R_2}. \quad (3.27)$$

Valoarea efectivă a curentului I_2 se poate calcula cu relația:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2 + R)^2 + (X_2 + X)^2}}. \quad (3.28)$$

Fenomenele care se petrec la funcționarea în sarcină a transformatorului au fost arătate la paragraful B_2 , iar ecuațiile de funcționare sînt (3.15) și (3.16):

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1; \quad (3.15)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - R_2 \underline{I}_2 - jX_2 \underline{I}_2. \quad (3.16)$$

Deoarece căderile de tensiune în înfășurarea primară reprezintă numai 3—5% din valoarea tensiunii aplicate, se poate considera că valoarea fluxului util la mersul în gol este egală cu valoarea fluxului util la mersul în sarcină.

La funcționarea în gol, fluxul Φ era produs de tensiunea magnetomotoare $F_0 = \omega_1 I_0$. La funcționarea în sarcină, t.m.m. se compun după ecuația:

$$\omega_1 I_1 + \omega_2 I_2 = \omega_1 I_0 \quad (3.29)$$

din care se deduce:

$$I_1 = I_0 + \left(-I_2 \frac{\omega_2}{\omega_1} \right), \quad (3.30)$$

care arată cum depinde valoarea curentului în primar, de mărimea curentului din secundar.

În figura 3.9 este reprezentată diagrama fazorială a funcționării transformatorului în sarcină. Pe axa reală este luat fluxul Φ , și defazat înainte cu unghiul α este reprezentat curentul I_0 . Defazat cu $\frac{\pi}{2}$ în urma fluxului sînt t.e.m. \underline{E}_1 și \underline{E}_2 . În urma t.e.m. \underline{E}_2 cu unghiul ψ_2 calculat cu relația (3.27) se găsește \underline{I}_2 (din relația 3.26 sau 3.28). Pentru reprezentarea curentului \underline{I}_1 se folosește relația 3.30. Se trasează mai întîi $-I_2 \frac{\omega_2}{\omega_1}$ opus la \underline{I}_2 și apoi se compune cu \underline{I}_0 , aflîndu-se \underline{I}_1 . Pentru determinarea tensiunii \underline{U}_1 , se folosește relația 3.15. Se trasează mai întîi $-\underline{E}_1$ în sens opus lui \underline{E}_1 , din vîrfurile acestuia se tra-

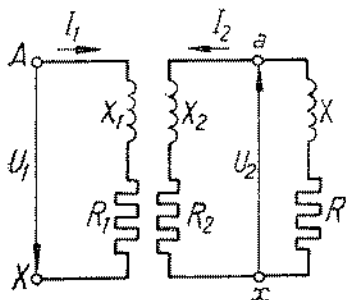


Fig. 3.8. Schema electrică a unui transformator funcționând în sarcină.

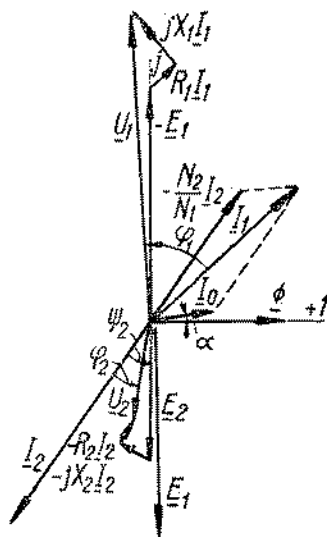


Fig. 3.9. Diagrama de fazori a funcționării transformatorului în sarcină.

sează căderea de tensiune activă $R_1 I_1$ în fază cu I_1 și apoi căderea de tensiune inductivă defazată cu $\frac{\pi}{2}$ înaintea lui I_1 , iar fazorul care închide poligonul este \underline{U}_1 . Pentru determinarea tensiunii \underline{U}_2 , se folosește ecuația 3.16. Din vârful fazorului \underline{E}_2 se trasează $-jX_2 I_2$ defazat cu $\frac{\pi}{2}$ în urma lui I_2 și apoi $-R_2 I_2$ opus ca fază lui I_2 . Fazorul care închide poligonul este \underline{U}_2 . Pe diagramă sînt determinate și defazajul φ_1 între \underline{U}_1 și I_1 și defazajul φ_2 între \underline{U}_2 și I_2 .

5. SCHEMA ECHIVALENTĂ A TRANSFORMATORULUI

Raportul de transformare îngreuiază compararea parametrilor (rezistențe, reactanțe, căderi de tensiune, curenți, tensiuni electromotoare) celor două înfășurări ale transformatorului. Pentru aceasta se obișnuiește să se raporteze toți parametrii transformatorului la același număr de spire, de regulă w_1 , adică parametrii înfășurării secundare se raportează la înfășurarea primară. Pentru aceasta se înlocuiește în calcul înfășurarea secundară, cu o înfășurare avînd w_1 spire ca și înfășurarea primară, toți parametrii înfășurării secundare fiind înlocuiți cu alți parametri recalculați astfel ca să nu se influențeze regimul de funcționare a transformatorului.

Toate mărimile înfășurării secundare care sînt raportate se numesc mărimi raportate și se notează cu aceleași simboluri însoțite de semnul prim, de exemplu E'_2 ; I'_2 ; R'_2 etc.

Raportarea f.e.m. din secundar se face proporțional cu raportul de transformare K :

$$\begin{aligned} E'_2 &= K E_2; \\ E'_{s2} &= K E_{s2}. \end{aligned} \quad (3.31)$$

Curentul secundar se raportează invers proporțional cu K :

$$I_2' = \frac{1}{K} I_2. \quad (3.32)$$

Rezistența, reactanța și impedanța din secundar se raportează astfel ca să nu se schimbe căderea de tensiune procentuală față de t.e.m. E_2 , adică:

$$\frac{R_2' I_2'}{E_2'} = \frac{R_2 I_2}{E_2}$$

și

$$\frac{X_2' I_2'}{E_2'} = \frac{X_2 I_2}{E_2},$$

de unde rezultă raportarea proporțională cu K^2 :

$$\begin{aligned} R_2' &= K^2 R_2, \\ X_2' &= K^2 X_2. \end{aligned} \quad (3.33)$$

Este de remarcă că pierderile în cupru din secundar nu-și modifică valoarea prin raportare:

$$P_{Cu2} = R_2 I_2^2 = K^2 R_2 \frac{1}{K^2} I_2^2 = R_2 I_2'^2. \quad (3.34)$$

Unghiurile de defazaj între tensiuni, curenți și fluxuri nu se modifică la raportare.

Transformatorul la care s-au raportat parametrii înfășurării secundare la înfășurarea primarului se numește *transformator echivalent*.

Ecuațiile transformatorului echivalent devin:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1; \quad (3.35)$$

$$\underline{U}_2' = \underline{E}_2' - R_2' \underline{I}_2' - jX_2' \underline{I}_2', \quad (3.36)$$

în care $\underline{E}_1 = \underline{E}_2'$.

Ecuațiile devin și mai simple, dacă se neglijează curentul de mers în gol I_0 . În acest caz $\underline{I}_1 = -\underline{I}_2'$, iar din ecuațiile 3.35 și 3.36, ținând seamă că $\underline{E}_1 = \underline{E}_2'$ și $\underline{I}_1 = -\underline{I}_2'$, rezultă prin adunare:

$$\underline{U}_1 + \underline{U}_2' = \underline{I}_1 [R_1 + R_2' + j(X_1 + X_2')]. \quad (3.37)$$

Aceasta este ecuația simplificată a transformatorului a cărui schemă echivalentă este reprezentată în figura 3.10.

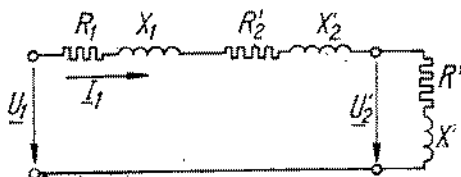


Fig. 3.10. Schema electrică echivalentă simplificată a transformatorului.

6. INCERCAREA ÎN SCURT-CIRCUIT ȘI TENSIUNEA DE SCURT-CIRCUIT

Încercarea în scurtcircuit se efectuează pentru a determina tensiunea de scurtcircuit a transformatorului, mărime importantă în cunoașterea funcționării transformatorului și care este indicată totdeauna pe plăcuța de fabricație.

Dacă primarul unui transformator cu secundarul legat în scurtcircuit este alimentat cu o tensiune redusă U_{kn} , astfel încît prin înfășurările primară și secundară să circule curenții nominali, raportul:

$$u_k = \frac{U_{kn}}{U_{1n}} \cdot 100 [\%] \quad (3.38)$$

definește tensiunea de scurtcircuit nominală, exprimată în procente din tensiunea nominală primară a transformatorului.

Valoarea tensiunii de scurtcircuit depinde de puterea și tensiunea transformatorului, putînd avea valori de la 4% la 12%.

La încercarea în scurtcircuit, tensiunea aplicată primarului fiind redusă (doar cîteva procente din tensiunea nominală), și valoarea fluxului este redusă așa încît se poate considera că tensiunea magnetomotoare rezultantă este nulă, adică:

$$w_1 I_1 + w_2 I_2 = 0. \quad (3.39)$$

Din această relație, considerînd valorile absolute ale curenților, se deduce:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{w_1}{w_2} = K. \quad (3.40)$$

Deci la funcționarea în scurtcircuit, raportul de transformare este egal cu raportul dintre curentul secundar și curentul primar.

Înlocuind în ecuația 3.37 pe $\underline{U}_1 = \underline{U}_k$ și pe $\underline{U}_2' = 0$ (deoarece la scurtcircuit $\underline{U}_2 = 0$), rezultă:

$$\underline{U}_k = [R_1 + R_2' + j(X_1 + X_2')]I_1. \quad (3.41)$$

Notînd cu $R_k = R_1 + R_2'$ rezistența totală echivalentă și cu $X_k = X_1 + X_2'$ reactanța totală echivalentă rezultă:

$$\underline{U}_k = (R_k + jX_k)I_1. \quad (3.42)$$

Ecuațiile (3.41), (3.42) sînt reprezentate în figura 3.11, numită și *triunghiul de scurtcircuit al transformatorului*.

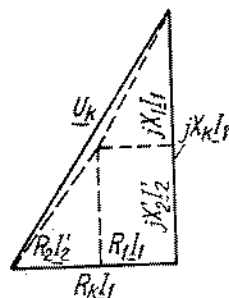


Fig. 3.11. Triunghiul de scurtcircuit al transformatorului.

7. CARACTERISTICA EXTERNĂ A TRANSFORMATORULUI

Caracteristica externă a transformatorului este curba $U_2 = f(I_2)$ trasată pentru diferite valori ale lui $\cos \varphi_2$.

Această caracteristică se poate obține printr-o încercare directă în sarcină, pentru diferite valori ale $\cos \varphi_2$, alimentînd transformatorul în primar cu tensiunea nominală. Se obțin curbele din figura 3.12 în care sînt trasate două caracteristici, una pentru $\cos \varphi_2 = 1$ și alta pentru $\cos \varphi_2 = 0,8$.

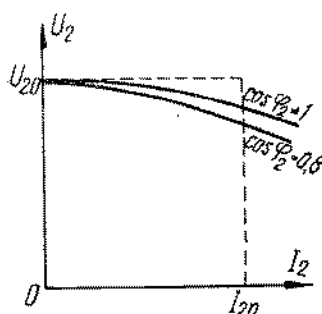


Fig. 3.12. Caracteristica externă a transformatorului.

Se numește variația tensiunii transformatorului, sau căderea procentuală de tensiune, pentru un anumit factor de putere $\cos \varphi_2$, diferența aritmetică între tensiunea secundară nominală la funcționarea în gol și tensiunea secundară corespunzătoare curentului secundar nominal, raportată la tensiunea secundară la funcționarea în gol și exprimată în procente:

$$\Delta U_n \% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} 100 [\%], \quad (3.43)$$

tensiunea primară avînd valoarea nominală.

8. PIERDERILE ȘI RANDAMENTUL

● Pierderile în transformator sînt formate din pierderile în fier și pierderile în cupru.

Pierderile în fier sînt pierderile în miezul magnetic prin histerezis și prin curenți Foucault:

$$P_{Fe} = G_{Fe} p_{Fe}, \quad (3.44)$$

în care G_{Fe} este masa totală a miezului, iar p_{Fe} sînt pierderile specifice corespunzătoare inducției existente în miez.

Pierderile în fier pot fi determinate printr-o încercare de mers în gol. Deoarece la mersul în gol pierderile în cupru $R_1 I_0^2$ sînt neglijabile, rezultă că la mersul în gol puterea absorbită de primar de la rețea reprezintă pierderile în fier:

$$P_0 = P_{Fe} + R_1 I_0^2 \approx P_{Fe}. \quad (3.45)$$

Pierderile în cupru se produc în înfășurarea primară și cea secundară:

$$P_{Cu} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2. \quad (3.46)$$

Ele pot fi determinate măsurînd puterea absorbită P_k la încercarea în scurtcircuit, cînd pierderile în fier sînt neglijabile.

● **Randamentul** transformatorului este raportul dintre puterea $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$, furnizată de secundar, și puterea $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$ absorbită de primar:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}}. \quad (3.47)$$

C. TRANSFORMATORE TRIFAZATE

1. FUNCȚIONAREA TRANSFORMATORULUI TRIFAZAT

Transformatorul trifazat este utilizat în rețele trifazate de transport și distribuție și are ponderea cea mai mare în fabricația de transformatoare.

În sistemele trifazate, transformarea se poate realiza și cu ajutorul a trei transformatoare monofazate, câte unul pe fiecare fază, avînd înfășurările lor primare și respectiv secundare legate în stea sau în triunghi.

Soluția cea mai economică și utilizată în general este folosirea unui transformator trifazat, care are înfășurările corespunzătoare celor trei faze așezate pe un singur miez, numit miez trifazat, ca în figura 3.13. Pe fiecare coloană a miezului este așezată o înfășurare corespunzătoare unei faze a primarului și câte o înfășurare corespunzătoare unei faze a secundarului.

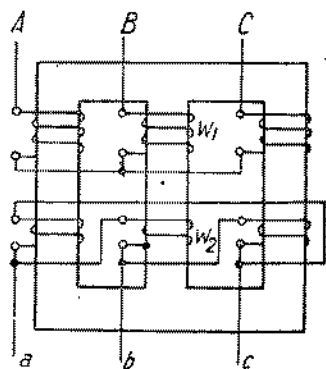


Fig. 3.13. Transformator trifazat.

Se știe că în sistemele trifazate, tensiunile, respectiv curenții de pe fiecare fază, sînt defazate între ele cu 120° și în orice moment suma valorilor instantanee ale tensiunilor sau ale curenților este egală cu zero. Ca urmare, și suma valorilor instantanee ale fluxurilor produse de acești curenți este egală cu zero, adică:

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0. \quad (3.48)$$

De aceea se poate construi miezul trifazat cu trei coloane prin care se formează aceste fluxuri, așa cum se realizează sistemele electrice trifazate cu trei înfășurări, fără conductor de întoarcere.

Fenomenele care se petrec pe fiecare din cele trei faze ale transformatorului trifazat sînt identice cu cele studiate la transformatorul monofazat, iar diagrama fazorială a transformatorului monofazat poate fi considerată ca diagrama fazorială a unei faze a transformatorului trifazat. Trebuie menționat că la transformatorul trifazat, pentru a determina tensiunile între faze și curenții în linie, trebuie ținut seama de conexiunile înfășurării.

2. CONEXIUNILE TRANSFORMATOARELOR TRIFAZATE

Cele trei faze ale fiecărei înfășurări a transformatorului trifazat (primară și secundară) pot fi legate în trei feluri: *în stea, în triunghi sau în zigzag* (fig. 3.14).

Relațiile între tensiunile între faze și cele pe fază și între curenții în linie și cei pe fază sînt:

— la legarea în stea::

$$U_{AB} = \sqrt{3} U_f; \quad I = I_f; \quad (3.49)$$

— la legarea în triunghi:

$$U_{AB} = U_f; \quad I = \sqrt{3} I_f. \quad (3.50)$$

La conexiunea *zigzag*, bobinajul fiecărei faze este împărțit în două jumătăți, care se așază pe coloane diferite. Compunerea tensiunilor electromotoare la conexiunea zigzag este arătată în figura 3.15. Pe diagramă sînt re-

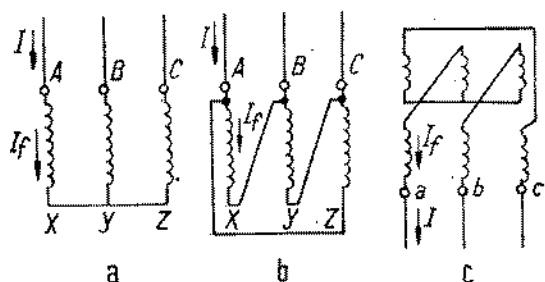


Fig. 3.14. Schemele conexiunilor bobinajelor trifazate:
a — stea; b — triunghi; c — zigzag.

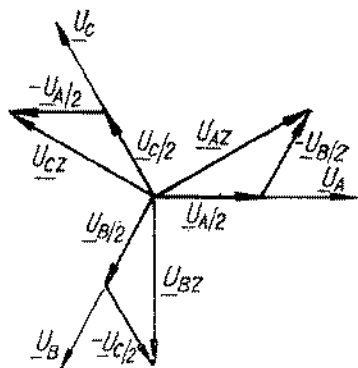


Fig. 3.15. Diagrama fazorială a tensiunilor la conexiunea zigzag.

prezentate și tensiunile U_A pentru conexiunea stea care s-ar obține în cazul când ambele jumătăți de bobinaj ar fi montate pe aceeași coloană.

Rezultă că tensiunea pe fază la conexiunea zigzag este:

$$U_{AZ} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_A = 0,866 U_A. \quad (3.51)$$

● **Grupe de conexiuni.** Există mai multe posibilități de conexiune a transformatorului trifazat, primarul putînd fi legat în stea sau triunghi, iar secundarul în stea, în triunghi sau zigzag.

Conexiunea unui transformator este simbolizată prin două litere, una mare și una mică, și un număr.

Prima literă care este mare simbolizează conexiunea înfășurării de înaltă tensiune; ea poate fi Y pentru conexiunea stea sau D pentru triunghi. A doua literă, care este mică, simbolizează conexiunea înfășurării de joasă tensiune; ea poate fi y pentru conexiunea stea, d pentru conexiunea triunghi sau z pentru conexiunea zigzag. În cazul cînd punctul neutru este scos la un izolator pe capac, simbolul conexiunii respective se completează cu indicele zero, de exemplu Y_0, y_0, z_0 .

Numărul care urmează grupului de litere poate fi de la 1 la 12 și indică defazajul între tensiunile electromotoare primară și secundară. Acest număr înmulțit cu 30 indică în grade unghiul de defazaj negativ (în urmă) al fazorului tensiunii electromotoare între două borne de joasă tensiune, față de fazorul tensiunii electromotoare între bornele corespunzătoare de înaltă tensiune.

Unghiul de defazaj depinde de tipul conexiunii și de modul de legare a capetelor înfășurării la borne (sau de sensul de înfășurare al bobinelor).

Ca urmare, prin combinarea conexiunilor înfășurărilor (Y sau D la înaltă tensiune și y, d, z la joasă tensiune) se pot obține șase tipuri de conexiuni și, ținîndu-se seama de efectul sensului de bobinare sau al legării la borne, rezultă un număr de 12 conexiuni posibile. Dintre acestea sînt standardizate șapte conexiuni, și anume $Yy - 12, Dy - 11, Yz - 11, Dz - 5, Yz - 5, Yd - 11$ și $Yd - 5$.

Conexiunile care în simbol au același număr formează o grupă de conexiuni. Cunoașterea grupei de conexiuni din care fac parte transformatoarele este foarte importantă la funcționarea lor în paralel.

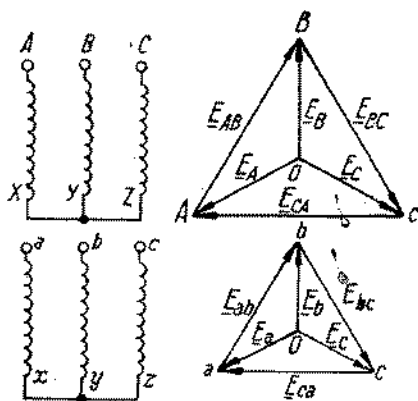


Fig. 3.16. Conexiunea Yy-12.

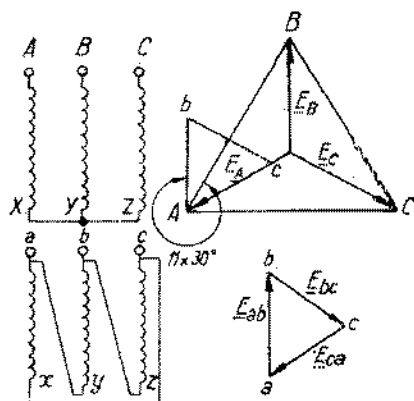


Fig. 3.17. Conexiunea Yd-11.

● **Construirea diagramelor fazoriale la diferite tipuri de conexiuni.** Pentru a verifica defazajul dintre tensiunile electromotoare E_1 și E_2 la diferite conexiuni, se construiesc diagrame fazoriale, ținând seama de conexiunea și modul de legare a înfășurărilor. În toate cazurile următoare se consideră că sensul de bobinaj la cele două înfășurări este același.

Conexiuni stea-stea avînd schema electrică reprezentată în figura 3.16 are capetele de bobinaj legate în același sens, iar tensiunile electromotoare pe fază din secundar în fază cu cele din primar. Se întocmește mai întîi diagrama fazorială a tensiunilor electromotoare din primar. Tensiunile E_A , E_B și E_C sînt tensiunile electromotoare pe fază, defazate între ele cu 120° . Compunîndu-se fazorii doi cîte doi, se găsesc fazorii tensiunilor la borne. Se trasează apoi fazorii E_a , E_b și E_c ai tensiunilor electromotoare pe fază în secundar, care sînt în fază cu cei din primar, așa cum s-a arătat mai înainte. Compunînd și acești fazorii doi cîte doi, se găsește triunghiul abc al tensiunilor electromotoare de la bornele secundarului. Se constată că E_{ab} este în fază cu E_{AB} , adică unghiul dintre fazorii lor este zero sau 360° , și deci conexiunea este Yy — 12, unde 12 simbolizează un unghi de $12 \times 30 = 360^\circ$.

Conexiunea stea-triunghi are schema electrică și triunghiul ABC al tensiunilor electromotoare primare reprezentate în figura 3.17. Se observă că în secundar E_{ab} (de la a la b) este egal cu E_b . Deci fazorul E_{ab} are aceeași direcție și sens cu fazorul E_B . În mod asemănător se construiesc fazorii E_{bc} în fază cu E_c și E_{ca} în fază cu E_A . Unghiul pe care îl face E_{ab} gu E_{AB} este de 30° , adică $11 \times 30^\circ$ și deci conexiunea este Yd — 11.

Conexiunea stea-triunghi are schema electrică din figura 3.18 în care triunghiul secundar este legat invers ca în cazul precedent. Ten-

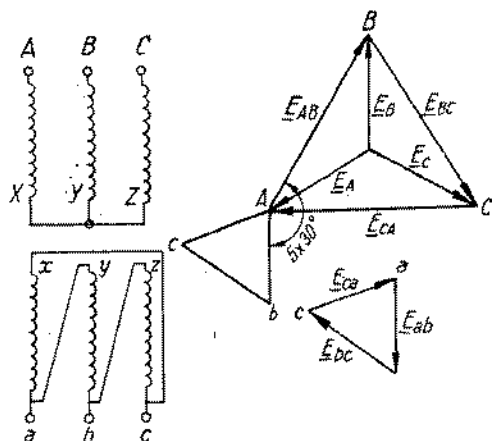


Fig. 3.18. Conexiunea Yd-5.

siunea electromotoare E_{ab} este egală cu E_b , care din cauza inversării legăturilor este în opoziție cu E_B . Deci, se construiește E_{ab} în sens invers cu E_B și la fel E_{bc} în sens invers cu E_C și E_{ca} în sens invers cu E_A . Unghiul pe care îl face E_{ab} cu E_{AB} este de 150° , adică $5 \times 30^\circ$ și deci conexiunea este $Yd-5$.

3. RAPORTUL DE TRANSFORMARE LA TRANSFORMATORE TRIFAZATE

Raportul de transformare K al unui transformator trifazat se definește ca raport între tensiunile electromotoare compuse (între faze) de la bornele înfășurării primare și de la bornele înfășurării secundare. El poate fi diferit de raportul K_w dintre numărul de spire pe fază al bobinajului primar și secundar, în funcție de conexiunea transformatorului.

La transformatorul monofazat, se știe că raportul de transformare este:

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = K_w, \quad (3.52)$$

adică raportul de transformare este egal cu raportul numărului de spire.

Același lucru rezultă și la transformatoarele trifazate cu conexiunile Dd și Yy , adică $K = K_w$.

La conexiunea Yd , tensiunea între faze la primar este de $\sqrt{3}$ ori mai mare decât tensiunea pe fază, tensiunea între faze la secundar este egală cu tensiunea pe fază, iar raportul de transformare rezultă:

$$K = \frac{E_{AB}}{E_{ab}} = \frac{\sqrt{3} E_A}{E_a} = \sqrt{3} \frac{\omega_1}{\omega_2} = \sqrt{3} K_w. \quad (3.53)$$

La conexiunea Dy , se demonstrează la fel că raportul de transformare este:

$$K = \frac{E_{AB}}{E_{ab}} = \frac{E_A}{\sqrt{3} E_a} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{1}{\sqrt{3}} K_w. \quad (3.54)$$

4. PUTEREA ȘI RANDAMENTUL TRANSFORMATORELOR TRIFAZATE

Puterea absorbită din rețea de primarul transformatorului este de trei ori mai mare decât puterea pe o fază, adică:

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1.$$

Se demonstrează ușor că, indiferent dacă primarul este legat în stea sau în triunghi, puterea exprimată în funcție de tensiunea între faze și curentul în linie este:

$$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_1. \quad (3.55)$$

Analog, puterea debitată de secundar este:

$$P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2. \quad (3.56)$$

Pierderile în fier se calculează și se determină la fel ca la transformatorul monofazat.

Pierderile în cupru se determină cu relația:

$$P_{cu} = 3R_{1f} I_{1f}^2 + 3R_{2f} I_{2f}^2 = 3R_b I_{1f}^2, \quad (3.57)$$

toate mărimile cu indice f fiind pe fază.

Randamentul se calculează cu aceeași relație 3.47 de la transformatorul monofazat.

D. FUNCȚIONAREA ÎN PARALEL A TRANSFORMATOARELOR

Două sau mai multe transformatoare funcționează în paralel atunci cînd sînt alimentate de la aceeași rețea și debitează pe o aceeași rețea secundară.

Condițiile pe care trebuie să le îndeplinească transformatoarele pentru a funcționa în paralel în condiții optime sînt:

— să aibă aceeași grupă de conexiuni (numai pentru transformatoare trifazate);

— primarul și secundarul să fie conectat astfel încît fazele transformatoarelor să se găsească în concordanță;

— tensiunile nominale, primare și secundare să fie egale (această condiție implică egalitatea rapoartelor de transformare);

— tensiunile de scurtcircuit să fie egale;

— puterile transformatoarelor ce se leagă în paralel să nu depășească raportul 3 : 1.

Nerespectarea primelor două condiții face imposibilă funcționarea în paralel a transformatoarelor.

Concordanța fazelor (a doua condiție) se poate controla cu o lampă (de tensiune dublă față de tensiunea secundară) sau cu un voltmetru.

La transformatoarele monofazate, concordanța fazelor se verifică ca în figura 3.19. Transformatorul TR_1 , fiind conectat la rețeaua secundară, se leagă o bornă a transformatorului TR_2 la una din bare și se controlează cu lampa (sau cu un voltmetru) borna rămasă liberă și cealaltă bară.

Dacă lampa rămîne stinsă (sau voltmetrul indică zero) transformatorul TR_2 poate fi conectat, iar dacă lampa arde (sau voltmetrul indică o tensiune dublă față de tensiunea secundarului) trebuie schimbate legăturile transformatorului TR_2 la bare.

La transformatoarele trifazate se leagă o bornă a secundarului la una din bare și se verifică cu lampa sau cu voltmetrul celelalte două borne și bare libere, care urmează a fi cuplate.

Dacă în ambele cazuri lampa nu arde sau voltmetrul indică zero, se poate face cuplarea.

Dacă celelalte condiții de funcționare în paralel, adică egalitatea rapoartelor de transformare și a tensiunilor de scurtcircuit nu sînt

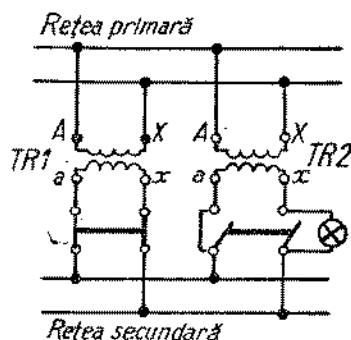


Fig. 3.19. Verificarea fazelor la cuplarea în paralel a două transformatoare, monofazate.

satisfăcute în limitele anumitor toleranțe, transformatoarele care funcționează în paralel nu se încarcă proporțional cu puterile lor, și deci puterea maximă care se poate obține de la grupul de transformatoare funcționând în paralel este limitată de unul din transformatoarele care funcționează la puterea nominală, pe când celelalte transformatoare sînt încărcate mai puțin.

E. AUTOTRANSFORMATORUL

Autotransformatorul este format, ca și transformatorul dintr-un miez magnetic și două înfășurări, una primară și alta secundară, însă acestea au contact galvanic între ele, iar înfășurarea de joasă tensiune constituie o parte a înfășurării de înaltă tensiune.

În schema unui autotransformator monofazat coborîtor ca cel din figura 3.20, a , porțiunea de înfășurare aX este înfășurarea de joasă tensiune cu w_2 spire, iar porțiunea AX reprezintă înfășurarea de înaltă tensiune cu w_1 spire, din care $(w_1 - w_2)$ spire pe porțiunea Aa , și w_2 spire ale înfășurării de joasă tensiune pe porțiunea aX .

Expresiile tensiunilor electromotoare induse și ale raportului de transformare sînt aceleași ca la transformator.

La mersul în sarcină la autotransformatorul ideal, fără pierderi și fără căderi de tensiune și considerînd defazajul primar egal cu cel secundar, se poate scrie din condiția ca puterea de ieșire să fie egală cu puterea de intrare:

$$K = \frac{w_1}{w_2} \cong \frac{U_1}{U_2} \cong \frac{I_2}{I_1}. \quad (3.58)$$

În înfășurarea de joasă tensiune aX , circula curenții I_3 , egal cu diferența dintre curenții I_2 și I_1 :

$$I_3 = I_2 - I_1 = I_2 - \frac{I_2}{K} = I_2 \left(1 - \frac{1}{K}\right). \quad (3.59)$$

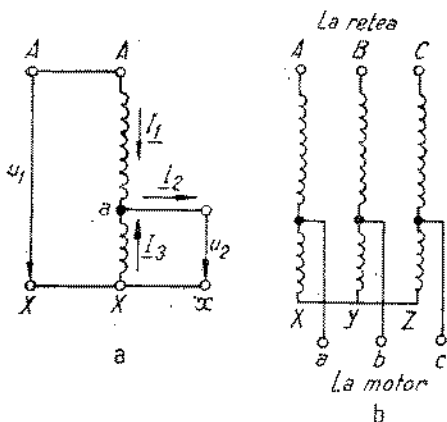


Fig. 3.20. Schemele autotransformatoarelor:
a — autotransformator monofazat coborîtor;
b — autotransformator trifazat de pornire.

Din această relație rezultă că în înfășurarea secundară aX circula un curent mai mic decît curentul secundar în linie, și cu atît mai mic cu cît raportul de transformare K este mai mic.

Aceasta dă posibilitatea ca înfășurarea aX să fie executată cu o secțiune de conductor mai mică decît la un transformator obișnuit și rezultă o economie de cupru și deci un preț de cost mai redus.

Cazul limită corespunde raportului de transformare $K = 1$, cînd tensiunea secundară este egală cu tensiunea primară și cînd borna a coincide cu borna A . Curentul I_3 conform relației (3.59) ar deveni nul, deoarece s-a

neglijat curentul de magnetizare, iar autotransformatorul devine deci o bobină de inductanță legată la rețea.

Se construiesc autotransformatoare monofazate și trifazate, cu raportul de transformare de maximum $K = 2$, deoarece pe de o parte peste această valoare economia realizată este prea mică față de transformator, iar pe de altă parte, autotransformatorul prezintă inconvenientul că, în cazul întreruperii porțiunii αX din înfășurare, înalta tensiune pătrunde în rețeaua de joasă tensiune punând în pericol receptoarele și personalul de deservire.

Autotransformatoarele se utilizează în rețele de transport, ca ridicătoare sau coboritoare de tensiune, la pornirea motoarelor sincrone și asincrone, la reglarea vitezei motoarelor de curent alternativ cu colector etc.

Autotransformatoarele utilizate în liniile de transport se construiesc pentru tensiuni și puteri mari. Pe lângă avantajul economiei de cupru arătat anterior, micșorarea dimensiunilor înfășurării permite și reducerea circuitului magnetic. Izolația înfășurării de joasă tensiune trebuie însă supradimensionată pentru solicitarea la tensiunea înaltă.

În figura 3.20, *b* este reprezentată schema unui autotransformator trifazat de pornire.

F. EXPLOATARE, DEFECTE ȘI REMEDIERI

● **Exploatare.** Transformatoarele se instalează în stații electrice sau posturi de transformare, fie sub cerul liber, în care caz au borne speciale de exterior, fie în încăperi bine ventilate.

Protecția transformatorului se realizează cu siguranțe fuzibile și relele maxime de curent, împotriva scurtcircuitelor și suprasarcinilor, cu eclatoare împotriva supratensiunilor și cu un releu de gaze, care sesizează defecte locale interioare.

Normele de exploatare prevăd temperatura maximă a aerului ambiant de $+40^{\circ}\text{C}$, iar a apei de răcire de $+25^{\circ}\text{C}$.

În exploatare sînt admise suprasarcini de scurtă durată, de exemplu 10% timp de 1 oră sau 30% timp de 15 min, transformatorul de putere fiind construit astfel ca să poată suporta aceste suprasarcini fără supraîncălzirea înfășurărilor și a uleiului.

Rezistența de izolație nu trebuie să scadă cu mai mult de 20% față de valoarea măsurată în fabrica producătoare.

● Defecte și remedierea lor

Defectele înfășurărilor sînt: *scurtcircuitul între spire și străpungerea sau conturnarea izolației*, ce se pot datora fie defectelor de izolație, fie îmbătrînirii izolației, fie unor supratensiuni. La scurtcircuite, înfășurările fiind supuse unor eforturi electrodinamice mari se pot deforma. În toate cazurile transformatorul trebuie demontat și refăcute înfășurările total sau parțial.

Defectele miezului magnetic sînt: *deteriorarea izolației între tole*, care provoacă încălziri locale și *slăbirea strîngerii miezului*, care produce un bîzîit puternic în timpul funcționării. În ambele cazuri transformatorul se demon-tează și se reizolează tolele sau se strînge miezul.

Defectele pe care le poate prezenta uleiul sînt: *îmbătrînirea uleiului*, după o perioadă mai lungă de funcționare, prin oxidarea și creșterea acidității, și *umezirea* din cauză unei perioade mai îndelungate de nefuncționare.

Uleiul degradat poate provoca defecte grave în transformator, deoarece își pierde din calitățile sale izolante, de aceea el trebuie purificat sau înlocuit.

PROBLEME

1. Să se calculeze raportul de transformare și t.e.m. E_2 la un transformator monofazat cunoscîndu-se $w_1 = 2\,000$ spire, $w_2 = 500$ spire, $E_1 = 1\,000$ V.

Răspuns: $K = 4$; $E_2 = 250$ V.

2. Un transformator monofazat are $w_1 = 600$ spire și $w_2 = 30$ spire, $\Phi = 0,003$ Wb, $f = 50$ Hz. Să se calculeze E_1 , E_2 și K .

Răspuns: $E_1 = 399,6$ V; $E_2 = 19,9$ V; $K = 20$.

3. Un transformator trifazat are raportul de transformare al înfășurărilor de pe fază $K_w = 10$. Să se calculeze raportul de transformare în cazurile cînd înfășurările sînt legate pentru următoarele conexiuni: Yy , Yd , Dy .

Răspuns: 10; 17,3; 5,77.

4. Un transformator monofazat debitează puterea $P_2 = 10$ kW.

Puterea absorbită la mersul în gol este 400 W, iar pierderile în cupru sînt 600 W. Să se calculeze puterea absorbită P_1 și randamentul.

Răspuns: $P_1 = 11$ kW; $\eta = 0,99$.

5. Să se calculeze puterea aparentă absorbită de un transformator trifazat, avînd $U_1 = 60$ kV și $I_1 = 10$ A.

Răspuns: 1 038 kVA.

6. Un transformator trifazat are tensiunea secundară nominală $U_2 = 400$ V și curentul secundar nominal $I_2 = 100$ A. Pierderile la mersul în gol sînt 1 500 W, iar pierderile la încercarea de scurtcircuit sînt de 2 000 W.

Să se calculeze randamentul cînd transformatorul funcționează la $U_2 = 400$ V, $I_2 = 100$ A și $\cos \varphi_2 = 0,8$.

Răspuns: $P_2 = 55,36$ kW; $P_1 = 58,86$ kW; $\eta = 0,94$.

7. Să se construiască diagrama fazorială pentru conexiunea $Dy-11$.

8. Un autotransformator are $U_1 = 220$ V, $U_2 = 110$ V, numărul total de spire 400, $I_1 = 5$ A. Neglijînd pierderile și căderile de tensiune, să se calculeze w_2 și I_2 .

Răspuns: $w_2 = 200$; $I_2 = 10$ A.

REZUMAT

● Elemente constructive de bază:

— miez: $\left\{ \begin{array}{l} \text{— în manta} \\ \text{— cu coloane} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{— monofazat} \\ \text{— trifazat} \end{array} \right.$

— schelet

— înfășurări: $\left\{ \begin{array}{l} \text{— așezate concentric} \\ \text{— așezate alternat} \end{array} \right.$

- *cuvă*
- *capac*
- *conservator*

● **Ecuatiile de funcționare:**

- *in valori instantanee:*

$$\begin{aligned} u_1 &= -e_1 + R_1 i_1 + e_{s1}; \\ u_2 &= e_2 - R_2 i_2 + e_{s2}. \end{aligned}$$

- *in complex:*

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + j X_1 \underline{I}_1; \\ \underline{U}_2 &= \underline{E}_2 - R_2 \underline{I}_2 - j X_2 \underline{I}_2, \end{aligned}$$

în care:

e_1 este t.e.m. indusă în primar cu valoarea efectivă $E_1 = 4,44 f^{w1} \Phi$;

e_2 — t.e.m. indusă în secundar cu valoarea efectivă $E_2 = 4,44 f^{w2} \Phi$;

$R_1 I_1, R_2 I_2$ — căderile de tensiune active;

$X_1 I_1, X_2 I_2$ — căderile de tensiune inductive.

● **Funcționarea în gol:**

- *ecuațiile de funcționare:*

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_0 + j X_1 \underline{I}_0; \\ \underline{U}_2 &= \underline{E}_2, \end{aligned}$$

în care:

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2};$$

- *raportul de transformare:*

$$k = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} \cong \frac{U_1}{U_2}.$$

● **Funcționarea în sarcină:**

- *curentul în secundar în funcție de impedanța $\underline{Z} = R + jX$ a receptorului:*

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{E_2}{\sqrt{(R_2 + R)^2 + (X_2 + X)^2}}; \\ \text{tg } \varphi_2 &= \frac{X_2 + X}{R_2 + R}; \end{aligned}$$

- *ecuația tensiunilor magnetomotoare:*

$$w_1 \underline{I}_1 + w_2 \underline{I}_2 = w_1 \underline{I}_0;$$

- *căderea procentuală de tensiune:*

$$\Delta U_n = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100 [\%].$$

● **Raportarea secundarului la primar și ecuația de funcționare:**

- *relații de raportare:*

$$\begin{aligned} E'_2 &= K E_2; & R'_2 &= K^2 R_2; \\ I'_2 &= \frac{1}{K} I_2; & X'_2 &= K^2 X_2; \\ Z'_2 &= K^2 Z_2. \end{aligned}$$

- *ecuația transformatorului echivalent (cu I_0 neglijat)*

$$\underline{U}_1 + \underline{U}'_2 = \underline{I}_1 [R_1 + R'_2 + j(X_1 + X'_2)] = \underline{I}_1 (R_s + jX_s) = \underline{I}_1 \underline{Z}_s.$$

● Tensiunea de scurtcircuit:

$$\underline{U}_K = \underline{Z}_s \underline{I}_1 \text{ în procente } u_K = \frac{U_K}{U_{1n}} \times 100[\%].$$

● Randamentul:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}}.$$

● Transformatorul trifazat:

— relații între tensiuni și curenți:

conexiunea stea: $U = \sqrt{3} U_f$; $I = I_f$;

conexiunea triunghi: $U = U_f$; $I = \sqrt{3} I_f$;

conexiunea zigzag: $U_{f \text{ zigzag}} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{f \text{ stea}}$.

— raportul de transformare:

la Yy și Dd : $K = K_w$;

la Yd : $K = \sqrt{3} K_w$;

la Dy : $K = \frac{1}{\sqrt{3}} K_w$.

CAPITOLUL 4

ÎNFĂȘURĂRILE STATORULUI MAȘINILOR DE CURENT ALTERNATIV ȘI PRODUCEREA CÎMPURILOR MAGNETICE ÎNVÎRTITOARE

A. GENERALITĂȚI ASUPRA CÎMPURILOR MAGNETICE ALTERNATIVE

1. CÎMPUL MAGNETIC ALTERNATIV

Cîmpul magnetic al înfășurării unei mașini electrice depinde de felul curentului ce parcurge înfășurarea, de dispunerea conductoarelor înfășurării și de forma circuitului magnetic.

Astfel, în cazul unui miez de transformator, avînd o bobină cu w spire parcursă de un curent continuu I , cîmpul magnetic este constant în timp, repartizat uniform în toate punctele secțiunii, avînd intensitatea $H = \frac{wI}{l}$ și se numește *cîmp constant* (în timp) și *uniform* (în spațiu).

Cînd bobina este parcursă de un curent alternativ sinusoidal $i = I \sqrt{2} \cos \omega t$, intensitatea cîmpului este:

$$H = \frac{\omega i}{l} = \frac{\omega I \sqrt{2}}{l} \cos \omega t = H_m \cos \omega t, \quad (4.1)$$

iar cîmpul este repartizat de asemenea uniform în secțiunea miezului, însă variază în timp sinusoidal în fază cu i , numindu-se *cîmp alternativ* (în timp) și *uniform* (în spațiu) sau, pe scurt, *cîmp alternativ*.

2. CIMPUL MAGNETIC MONOFAZAT BIPOLAR

În figura 4.1 este reprezentat un circuit magnetic, format dintr-o armătură cilindrică (statorul) în care se găsește o a doua armătură cilindrică (rotorul). Pe stator este așezat un bobinaj repartizat în 10 creștături, avînd legăturile făcute astfel încît atunci cînd este parcurs de un curent i să se formeze un cîmp magnetic cu doi poli, ale cărui linii de forță se închid prin stator, rotor și întrefier, după liniile trasate întrerupt în figura 4.1. Un astfel de cîmp se numește *cîmp bipolar*.

Dacă bobinajul ar fi concentrat în două creștături diametrice, cîmpul ar avea aproape aceeași valoare pe toată zona unui pol. Deoarece bobinajul este repartizat în creștături, liniile de forță ale cîmpului nu se mai repartizează uniform pe zona polului. Linia de cîmp care se închide prin dinții 3 și 4, apropiați axei UV , este înlănțuită cu conductoarele unei singure creștături; liniile de cîmp care se închid prin dinții 2 și 5 sînt înlănțuite cu conductoarele din

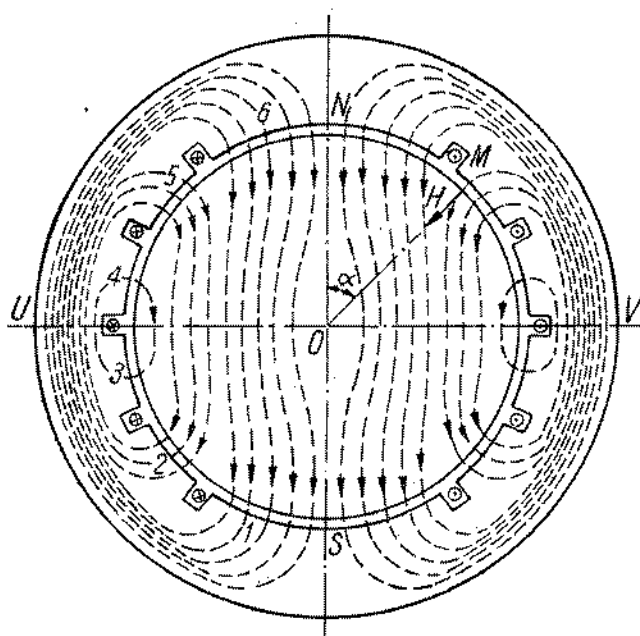


Fig. 4.1. Bobinaj monofazat bipolar. Cîmp cu repartiție sinusoidală.

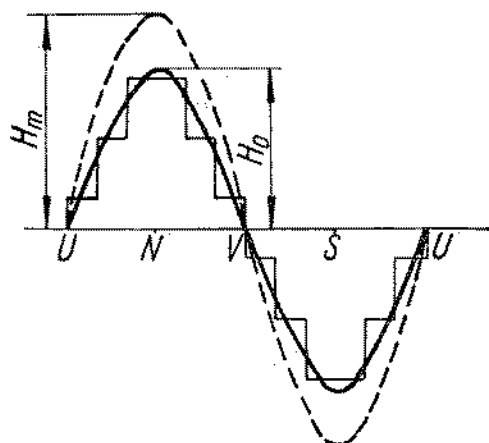


Fig. 4.2. Cîmpul cu repartiție sinusoidală în reprezentare desfășurată.

polului, intensitatea cîmpului într-un punct oarecare M situat pe raza OM care face unghiul α cu raza ON , este:

$$H = H_0 \cos \widehat{NOM} = H_0 \cos \alpha. \quad (4.2)$$

Dacă curentul care parcurge înfășurarea este continuu, $H_0 = \text{ct}$, cîmpul este un cîmp constant (în timp) și cu repartiție sinusoidală (în spațiu).

Dacă curentul este alternativ sinusoidal, $i = I \sqrt{2} \cos \omega t$, intensitatea cîmpului în punctul N este:

$$H_0 = H_m \cos \omega t, \quad (4.3)$$

în care H_m este intensitatea maximă a cîmpului în punctul N . În punctul oarecare M , intensitatea cîmpului este:

$$H = H_0 \cos \alpha = H_m \cos \omega t \cos \alpha. \quad (4.4)$$

Un astfel de cîmp este un *cîmp alternativ cu repartiție sinusoidală în spațiu*.

3. CÎMPUL MAGNETIC MONOFAZAT MULTIPOLAR

Conductoarele înfășurării pot fi legate astfel încît să se formeze $2p$ zone în care curenții în conductoare, la un moment dat, să aibă același sens, ca în figura 4.3. O zonă a înfășurării ocupă unghiul $\tau = \frac{2\pi}{2p} = \frac{\pi}{p}$, numit *pas polar*.

Cîmpul produs de o astfel de înfășurare este un cîmp monofazat multipolar (cu $2p$ poli), alternativ (în timp) și cu repartiție sinusoidală în spațiu.

trei creștături și deci cîmpul va fi aproape de trei ori mai mari. La fel în dinții 1 și 6 cîmpul va fi mai mare de aproape cinci ori decît în dinții 3 și 4.

Dacă se reprezintă periferia statorului prin dreapta $UNVSU$ (fig. 4.2) intensitatea cîmpului (luînd cîmpul polului nord ca pozitiv și neglijînd deschiderea creștăturilor) are o variație în trepte de-a lungul întrefierului, variație apropiată de o sinusoidă (curba trasată cu o linie continuă). Un asemenea cîmp se numește *cîmp cu repartiție sinusoidală în spațiu*.

Notînd cu H_0 intensitatea cîmpului în punctul N , situat pe axa

punct oarecare M situat pe raza OM

Într-un punct oarecare M situat pe raza OM care face unghiul α cu raza ON_1 , intensitatea cîmpului este:

$$H = H_0 \cos N_1 OM = H_0 \cos p \alpha, \quad (4.5)$$

iar dacă curentul este alternativ sinusoidal, intensitatea cîmpului este:

$$H = H_m \cos \omega t \cos p \alpha. \quad (4.6)$$

În această relație, termenul $\cos \omega t$ indică variația sinusoidală în timp a cîmpului, iar termenul $\cos p \alpha$ indică repartiția sinusoidală în spațiu cu $2p$ poli.

Cîmpul magnetic alternativ cu repartiție sinusoidală este numit și *cîmp magnetic pulsatoriu, sinusoidal în timp și sinusoidal în spațiu*.

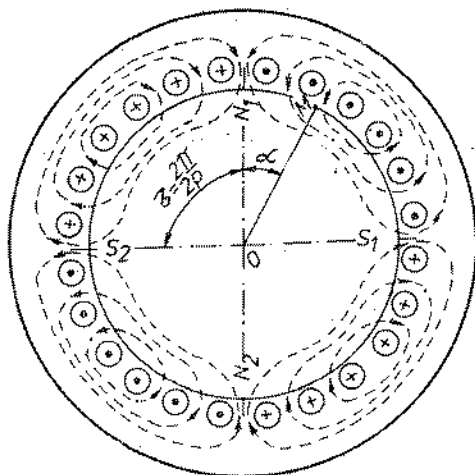


Fig. 4.3. Bobinaj monofazat multipolar.

B. NOȚIUNI GENERALE DESPRE ÎNFĂȘURĂRILE STATOARELOR MAȘINILOR DE CURENT ALTERNATIV

Spre deosebire de bobinajele de indus ale mașinilor de curent continuu, care sînt închise (începutul și sfîrșitul înfășurării sînt legate împreună la aceeași lamelă de colector), înfășurările de curent alternativ sînt deschise, în sensul că începutul și sfîrșitul înfășurării sînt legate la două borne separate de la placa de borne.

Statorul mașinilor de curent alternativ este prevăzut cu creștături uniform repartizate, în care se introduc bobinele înfășurării. Dacă într-o creștătură se găsesc conductoare aparținînd unei singure bobine, bobinajul respectiv se numește *bobinaj într-un strat*, iar dacă într-o creștătură se găsesc conductoare aparținînd la două bobine diferite, bobinajul se numește *bobinaj în două straturi*.

Prin bobină se înțelege ansamblul de spire ale căror laturi se introduc în două creștături. Două sau mai multe bobine inseriate formează un grup de bobine. Înfășurarea unei faze poate avea una sau mai multe grupe de bobine, care se leagă în serie sau paralel, capetele înfășurării fazei respective rămînd libere.

Condiția de realizare a unei înfășurări de curent alternativ a fost arătată în paragraful precedent și anume, legăturile între conductoare trebuie făcute încît să se formeze $2p$ zone în care curenții în conductoare la un moment dat să aibă același sens, $2p$ fiind numărul polilor.

O mărime caracteristică înfășurărilor de curent alternativ este *numărul de creștături pe pol și fază q* , determinat cu relația:

$$q = \frac{Z}{2pm}, \quad (4.7)$$

în care: Z este numărul de creștături;

$2p$ — numărul de poli;

m — numărul de faze.

Cu cât q este mai mare, cu atât cîmpul produs de înfășurare se apropie mai mult de o sinusoidă.

În scopul de a apropia cât mai mult cîmpul produs de înfășurare de o sinusoidă, la bobinajele trifazate în două straturi, se utilizează un pas scurtat la bobinare cu una sau mai multe creștături.

C. ÎNFĂȘURĂRI MONOFAZATE

Înfășurările monofazate se execută de regulă într-un strat, ocupînd numai $2/3$ din numărul de creștături ale armăturii. În figura 4.4 este reprezentată schema desfășurată a unei înfășurări monofazate, într-un strat, cu

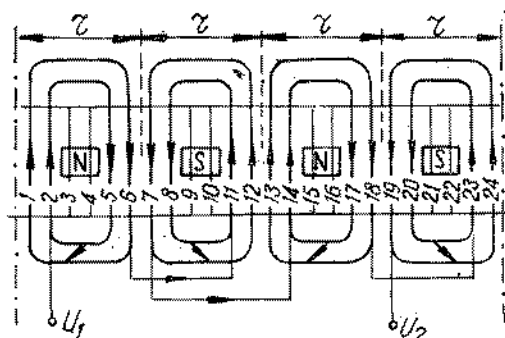


Fig. 4.4. Bobinaj monofazat cu 4 poli în reprezentare desfășurată.

$2p = 4$, armătura avînd $Z = 24$ creștături. Sînt ocupate de înfășurare $\frac{2}{3} 24 = 16$ creștături, iar numărul de creștături pe pol și fază este

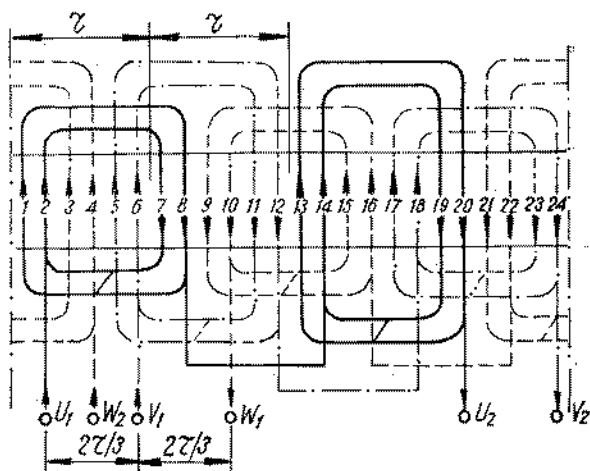
$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{16}{4 \cdot 1} = 4.$$

Înfășurarea este formată din patru grupe de bobine înseriate între ele, fiecare grupă fiind formată din două bobine concentrice înseriate fără întreruperea conductorului. Deoarece capetele de bobină nu se încrucișează, acest tip de bobinaj se numește *bobinaj într-un strat, cu capete de bobine într-un etaj*.

D. ÎNFĂȘURĂRI TRIFAZATE

O înfășurare trifazată este formată din trei înfășurări monofazate identice, bobinate pe același stator, decalate între ele cu unghiul $\frac{2\pi}{3}$ și ocupînd fiecare cîte o treime din numărul de creștături.

Fig. 4.5. Schema desfășurată a unui bobinaj trifazat într-un strat cu capete de bobine în două etaje.



Ele sînt legate în stea sau în triunghi și sînt alimentate de la o rețea trifazată de curent alternativ. Sensul în care, parcurgînd periferia statorului, se întîlnesc începuturile fazelor, în ordinea normală u, v, w , se numește *sensul succesiunii fazelor*.

Începuturile fazelor sînt decalate între ele tot cu unghiul $\frac{2\pi}{3}$, adică cu $\frac{2\tau}{3}$ în care $\tau = \frac{2\pi}{p}$ este *pasul polar*.

În figura 4.5 este reprezentată schema desfășurată a unui bobinaj trifazat, avînd $Z = 24$ de creștături, $2p = 4$ poli, $m = 3$ faze. Numărul de creștături pe pol și fază este:

$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2.$$

Pentru a observa formarea polilor, este necesar a se da sensuri curenților. Convențional, sînt alese sensurile de curenți din momentul t_1 din figura 4.6 în care curenții în fazele 1 și 2 (adică U și V) sînt pozitivi, adică curenții circulă de la U_1 la U_2 și de la V_1 la V_2 , iar în faza 3 curențul este negativ (adică curențul circulă de la W_2 la W_1). Este evident că, pentru alt moment ales, sensurile curenților în una, două sau toate trei fazele se schimbă.

Notîndu-se sensurile de curenți în schema din figura 4.5, se constată formarea a patru zone cu același sens de curent, corespunzătoare celor patru poli. Pe fiecare pol se găsesc cîte două creștături din fiecare fază, deoarece $q = 2$. Intrările în înfășurare de la capetele $U_1 V_1 W_1$ se fac conform celor menționate anterior la $\frac{2\tau}{3}$. Fiecare fază este formată din două grupe de bobine, fiecare avînd două bobine concentrice. Capetele bobinelor se încrucișează și de aceea este necesar a fi situate la două nivele sau în două etaje.

Bobinajul din figura 4.5 este bobinaj într-un strat, cu capete de bobine în două etaje. Se execută și bobinaje cu capete de bobine în trei etaje. Aspectul capetelor de bobine în etaje este arătat în figura 4.7.

În practică sînt mai utilizate bobinajele în două straturi, care sînt mai ușor de executat și au avantajul că se pot realiza ușor bobinaje cu pas scurtat.

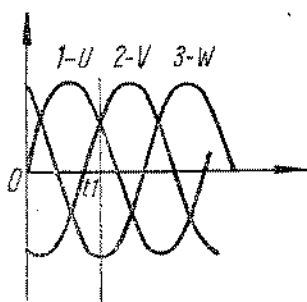


Fig. 4.6. Alegerea convențională a sensurilor curenților.

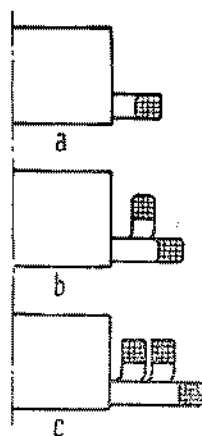


Fig. 4.7. Aspectul capetelor de bobină la bobinaje într-un strat;
a — cu 1 etaj; b — cu 2 etaje;
c — cu 3 etaje.

În figura 4.8 este reprezentat bobinajul trifazat în două straturi avînd $2p = 4$ și $q = 2$. Capetele de bobine formează o coroană și de aceea bobinajul se mai numește *cu capete în coroană*; în fiecare creștătură există laturi aparținînd la două bobine diferite. Pasul de bobinare al fiecărei bobine este:

$$y = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6,$$

și este numit *pas diametral*. Prima bobină de exemplu este așezată cu laturile în creștătura 1 și în creștătura $1 + 6 = 7$. Un astfel de bobinaj se numește

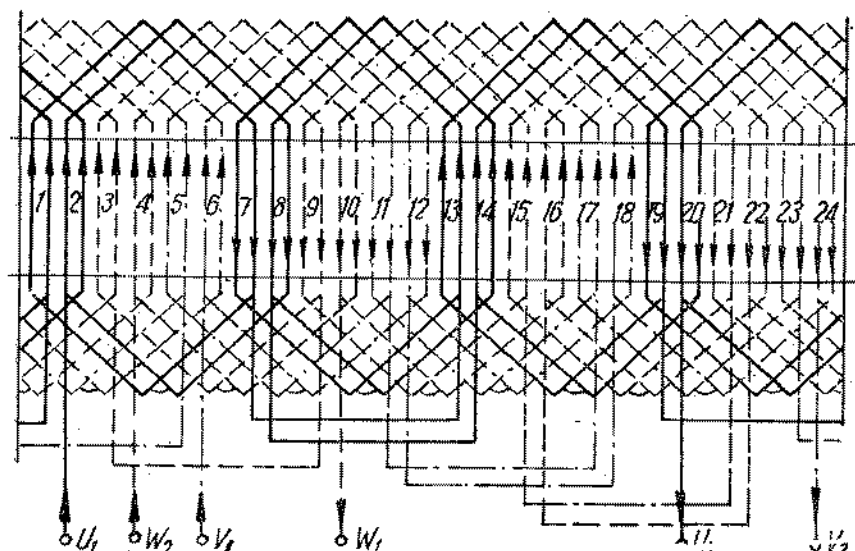


Fig. 4.8. Schema desfășurată a unui bobinaj trifazat în două straturi.

bobinaj cu pas diametral. Pentru a se realiza un câmp magnetic mai apropiat de sinusoidală, în practică se execută bobinajele cu pas scurtat, adică în loc să se introducă bobina în creștăturile 1 și 7 se introduce, în creștăturile 1 și 6 sau 1 și 5.

E. CÂMPUL MAGNETIC ÎNVÎRTITOR AL UNEI ARMĂTURI MOBILE

Se consideră o mașină formată dintr-un stator cilindric, și o armătură mobilă cu doi poli, a cărei bobină este alimentată cu curent continuu (fig. 4.9, a). Când armătura este imobilă, în poziția din figură, se formează un câmp constant în timp, cu repartiție sinusoidală (presupunem că forma pieselor polare realizează o astfel de repartiție). Într-un punct oarecare M , situat pe stator la unghiul α_0 față de axa polului N_1 , câmpul are valoarea, conform relației 4.2:

$$H = H_0 \cos \alpha_0. \quad (4.8)$$

Când armătura se rotește cu viteza unghiulară Ω se obține un câmp constant, cu repartiție sinusoidală, care se rotește cu viteza unghiulară Ω . Un astfel de câmp se numește *câmp învîrtitor*.

Pentru a stabili expresia câmpului învîrtitor, să scriem valoarea câmpului în punctul oarecare M , când armătura se rotește în sens trigonometric cu viteza unghiulară Ω .

După timpul t , axa polului nord ajunge în dreptul punctului N_2 de pe stator. Deci, după timpul t , intensitatea maximă a câmpului a ajuns în dreptul punctului N_2 . Unghiul parcurs de armătură în timpul t este $\beta = \Omega t$ și deci unghiul pe care îl face raza fixă OM cu raza corespunzătoare câmpului maxim, la timpul t , este $\alpha = \alpha_0 + \beta$.

Ca urmare, la timpul t , intensitatea câmpului în punctul fix va fi:

$$\begin{aligned} iH &= H_0 \cos \alpha = H_0 \cos (\alpha_0 + \beta) = \\ &= H_0 \cos (\alpha_0 + \Omega t). \end{aligned} \quad (4.9)$$

Armătura continuând să se rotească, în dreptul punctului M ajunge axa V , ar câmpul devine nul $H=0$, apoi ajunge axa polului S și câmpul devine

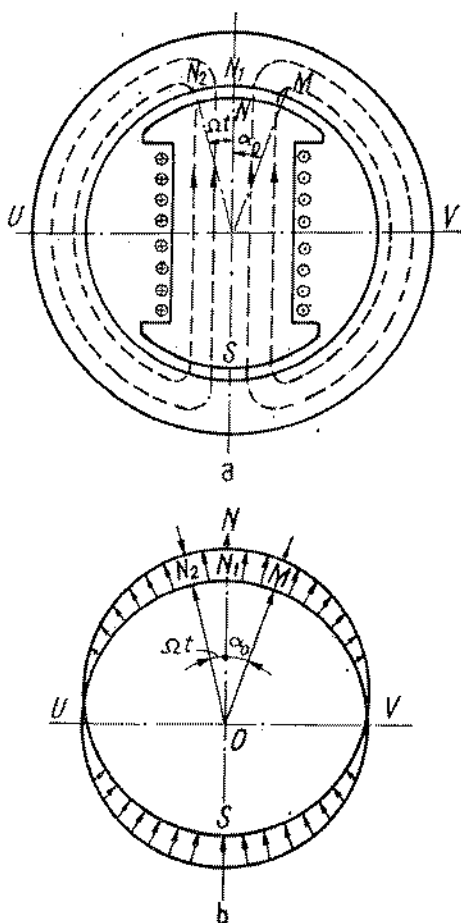


Fig. 4.9. Câmp învîrtitor produs prin învîrtirea unei armături mobile bipolare: a — schema mașinii cu armătură mobilă; b — reprezentarea grafică a repartiției câmpului.

maxim în sens invers $H = -H_0$ ș.a.m.d. Deci, în dreptul punctului M , atunci când armătura mobilă se rotește, câmpul este alternativ (conform relației 4.9).

Dacă armătura mobilă este multipolară, expresia câmpului învîrtitor devine (analog cu relația 4.5):

$$H = H_0 \cos p (\alpha_0 - \Omega t). \quad (4.10)$$

Dacă armătura se rotește în sens invers sensului trigonometric, rezultă $\alpha = \alpha_0 - \beta = \alpha_0 - \Omega t$, iar expresia câmpului învîrtitor este:

$$H = H_0 \cos p (\alpha_0 - \Omega t). \quad (4.11)$$

F. CÎMPUL MAGNETIC AL UNEI ÎNFĂȘURĂRI MONOFAZATE

La paragraful 4A3, s-a arătat că o înfășurare monofazată multipolară, alimentată cu un curent alternativ, produce un câmp magnetic multipolar pulsatoriu, sinusoidal în timp și cu repartiție sinusoidală în spațiu, avînd expresia:

$$H = H_m \cos \omega t \cos p\alpha.$$

Folosind identitatea $\cos a \cos b = \frac{1}{2} \cos (a + b) + \frac{1}{2} \cos (a - b)$, câmpul H se poate descompune în două componente $H = H_1 + H_2$, în care:

$$H_1 = \frac{1}{2} H_m \cos (p\alpha + \omega t) = \frac{1}{2} H_m \cos p \left[\alpha + \frac{\omega}{p} t \right]. \quad (4.12)$$

$$H_2 = \frac{1}{2} H_m \cos (p\alpha - \omega t) = \frac{1}{2} H_m \cos p \left[\alpha - \frac{\omega}{p} t \right].$$

Comparînd aceste relații cu relațiile 4.10 și 4.11, tragem concluzia că un câmp magnetic multipolar pulsatoriu se descompune în două câmpuri învîrtitoare de sens contrar, cu valoarea maximă $\frac{1}{2} H_m$ și cu viteza unghiulară $\Omega = \frac{\omega}{p}$.

G. CÎMPUL MAGNETIC ÎNVÎRTITOR AL UNEI ÎNFĂȘURĂRI TRIFAZATE

Una din cele mai importante proprietăți ale sistemului trifazat de curenți este posibilitatea de a produce un câmp magnetic învîrtitor cu ajutorul unei înfășurări trifazate fixe. Producerea câmpului magnetic învîrtitor se poate urmări intuitiv pe figura 4.10. O înfășurare trifazată bipolară a unui stator poate fi reprezentată simplificat prin trei bobine identice fixe, cu axele în același plan, ale căror începuturi U, V, W sînt decalate cu 120° (fig. 4.10, a). Bobinele sînt parcurse de curenții trifazați reprezentați în figura 4.10, b.

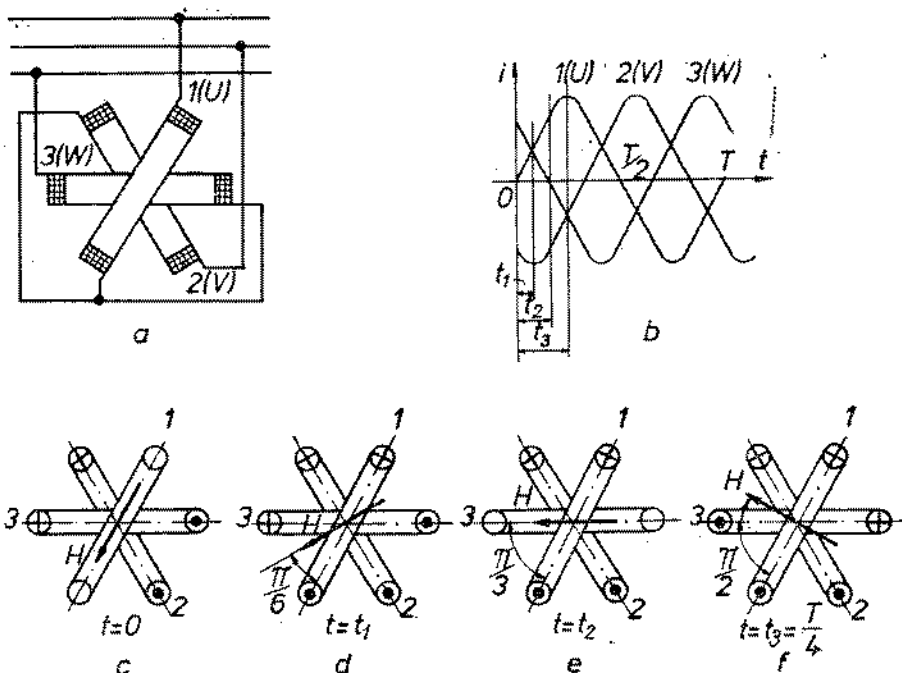


Fig. 4.10. Producerea cîmpului învîrtitor bipolar cu ajutorul unui bobinaj trifazat.

Fiecare fază a înfășurării va produce câte un cîmp pulsatoriu, decalate între ele în spațiu cu unghiul $\frac{2\pi}{3}$ și defazate în timp cu $\frac{T}{3}$. În figurile 4.10, c...f, sînt reprezentate simplificat cele trei bobine și sensurile curenților în ele la momentele $t = 0$, $t = t_1$ etc. La $t = 0$ (fig. 4.10, c) în faza 1 curentul este nul, în faza a 2-a curentul este negativ (indicat \ominus la începutul fazei a 2-a), iar în faza a 3-a curentul este pozitiv (indicat \oplus la începutul fazei a 3-a), egal și de sens contrar cu cel din faza a 2-a.

Cele două bobine, parcurse de curenți egali, vor produce un cîmp magnetic bipolar, cu intensitate H , orientat după axa lor de simetrie, care coincide cu planul bobinei 1.

La $t = t_1$ (fig. 4.10, d) i_2 este maxim negativ, iar i_1 și i_3 sînt pozitivi și egali. Cîmpul magnetic produs de cele trei bobine are axa orientată după axa de simetrie a bobinei 2, rotită deci față de poziția de la $t = 0$, cu unghiul $\frac{\pi}{6}$. Urmărind în continuare schimbarea sensurilor curenților în momentele următoare, se constată că axa cîmpului magnetic se rotește în sensul succesiunii fazelor, ajungînd la timpul $t_3 = \frac{T}{4}$ (fig. 4.10, f) să fie rotită față de poziția inițială cu unghiul $\frac{\pi}{2}$, iar după o perioadă cu o rotație completă.

Pentru a găsi expresia cîmpului învîrtitor produs de un bobinaj multipolar, se va urmări pe figura 4.11, reprezentarea frontală a unui bobinaj cu $2p = 4$ (indicat desfășurat în figura 4.5). Fiecare fază ocupă patru zone, de exemplu faza 1 ocupă zonele u_1, u_2, u_3 și u_4 , producînd câte un cîmp pulsatoriu cu $2p = 4$ poli, și cu intensitatea maximă H_m . Pe figură este notat câte un

pol nord al fiecărei faze (N_1 , N_2 și N_3), decalajați între ei cu unghiul geometric $\frac{2\pi}{3p}$ (N_1 este pe axa de simetrie a zonelor u_1 și u_2 , N_2 este pe axa de simetrie a zonelor v_1 și v_2 etc.).

Cînd înfășurarea este parcursă de sistemul simetric de curenți $i_1 = I\sqrt{2} \cos \omega t$; $i_2 = I\sqrt{2} \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$; $i_3 = I\sqrt{2} \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right)$ intensitățile cîmpurilor magnetice în punctele N_1 , N_2 , și N_3 în fază cu curenții, sînt:

$$\begin{aligned} H_{01} &= H_m \cos \omega t; \\ H_{02} &= H_m \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right); \\ H_{03} &= H_m \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right). \end{aligned} \quad (4.13)$$

Într-un punct oarecare M situat la unghiul α_0 față de N_1 , cele trei faze produc cîmpuri magnetice cu intensitățile:

$$\begin{aligned} H_1 &= H_{01} \cos p\alpha_0; \\ H_2 &= H_{02} \cos p \left(\alpha_0 - \frac{2\pi}{3p} \right); \\ H_3 &= H_{03} \cos p \left(\alpha_0 - \frac{4\pi}{3p} \right). \end{aligned} \quad (4.14)$$

Înlocuind în relațiile (4.14) valorile date de relațiile (4.13), și făcînd descompunerea expresiilor ca la paragraful 4 F , se găsește intensitatea H a cîmpului magnetic rezultat în punctul M :

$$\begin{aligned} H = H_1 + H_2 + H_3 &= \frac{3}{2} H_m \cos (p\alpha_0 - \omega t) + \frac{1}{2} H_m \cos (p\alpha_0 + \omega t) + \\ &+ \frac{1}{2} H_m \cos \left(p\alpha_0 + \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) + \frac{1}{2} H_m \cos \left(p\alpha_0 + \omega t - \frac{8\pi}{3} \right). \end{aligned}$$

Suma ultimilor trei termeni reprezintă suma a trei mărimi sinusoidale simetrice, deci este nulă, rezultînd:

$$H = \frac{3}{2} H_m \cos (p\alpha_0 - \omega t) = \frac{3}{2} H_m \cos p \left(\alpha_0 - \frac{\omega}{p} t \right). \quad (4.15)$$

Comparînd această relație cu (4.11), tragem concluzia că o înfășurare trifazată cu $2p$ poli, parcursă de un sistem simetric de curenți trifazați, produce un cîmp magnetic învîrtitor cu $2p$ poli, avînd:

- intensitatea maximă $3/2$ din intensitatea maximă a cîmpului produs de fiecare fază în parte;
- viteza unghiulară $\Omega = \frac{\omega}{p}$;
- viteza de rotație în sensul succesiunii fazelor.

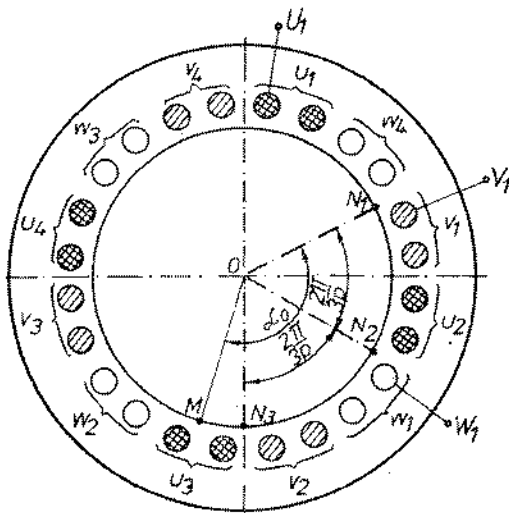


Fig. 4.11. Bobinaj trifazat cu 4 poli.

Pentru inversarea sensului de rotație al câmpului învîrtitor, trebuie schimbat sensul succesiunii fazelor, prin inversarea a două din cele trei legături dintre rețea și fazele înfășurării.

Concluzii

Din paragrafele precedente se poate trage concluzia că expresia generală a unui câmp învîrtitor, indiferent dacă este creat de o armătură mobilă sau de o înfășurare fixă este:

$$H = H_m \cos p(\alpha_0 \pm \Omega t), \quad (4.16)$$

în care Ω este viteza unghiulară a câmpului învîrtitor, iar semnul \pm indică sensul de rotație al câmpului.

Într-un punct M aflat pe armătura fixă, la unghiul α_0 față de axa unui pol nord, la $t = 0$, câmpul, conform acestei relații, este alternativ, cu pulsația $\omega = p\Omega$.

Alegînd ca origine de fază (poziția punctului M la timpul $t = 0$) unghiul $p\alpha_0 = \frac{\pi}{2}$, expresia câmpului devine:

$$H = H_m \sin p\Omega t = H_m \sin \omega t. \quad (4.17)$$

Se atrage atenția că în timp ce α_0 este un unghi geometric (unghiul la centrul statorului ale cărui laturi trec prin punctul M și axa polului nord la timpul $t = 0$), unghiul $p\alpha_0 = \frac{\pi}{2}$ este un unghi electric al câmpului alternativ cu pulsația ω , deci:

$$p \times \text{unghiul geometric} = \text{unghiul electric}.$$

Ținînd seama că inducția magnetică în întrefier este $B = \mu H$, expresia inducției în întrefier este:

$$B_\delta = B_{\delta m} \sin \omega t, \quad (4.18)$$

în care $B_{\delta m}$ este inducția maximă $B_{\delta m} = \mu H_m$.

APLICAȚII

1. Să se întocmească schema unui bobinaj trifazat într-un strat cu capete de bobine în două etaje avînd $2p = 4$, $z = 36$ creștături.

2. Cu aceleași date ca la aplicația 1 să se întocmească schema unui bobinaj trifazat în două straturi cu pas diametral.

3. Să se întocmească schema unui bobinaj monofazat, avînd $Z = 36$ creștături și $2p = 4$.

4. Să se întocmească schema unui bobinaj trifazat în două straturi cu $2p = 4$, $z = 36$ creștături și pas scurtat cu o creștătură.

REZUMAT

● Cîmpuri produse de o înfășurare monofazăată multipolară:

— alimentată cu curent continuu, produce un câmp constant în timp cu repartiție sinusoidală în întrefier.

$$H = H_0 \cos p\alpha;$$

— alimentată cu curent alternativ, produce un cînd alternativ, cu repartiție sinusoidală în întrefier și o variație sinusoidală în timp :

$$H = H_m \cos p\alpha \cos \omega t.$$

● Elementele înfășurărilor de curent alternativ :

Z — numărul de creștături ;

$2p$ — număr de poli ;

m — număr de faze ;

$$q = \frac{Z}{2pm} \text{ — număr de creștături pe pol și fază.}$$

● Tipuri de bobinaje :

După numărul de faze $\left\{ \begin{array}{l} \text{— monofazat} \\ \text{— trifazat} \end{array} \right.$

După sistemul de bobinare $\left\{ \begin{array}{l} \text{bobinaje într-un strat} \left\{ \begin{array}{l} \text{— cu capete de bobină într-un etaj} \\ \text{— cu capete de bobină în 2 etaje} \\ \text{— cu capete de bobină în 3 etaje} \\ \text{— cu capete de bobină în lanț} \end{array} \right. \\ \text{bobinaje în două straturi} \left\{ \begin{array}{l} \text{— cu pas diametral} \\ \text{— cu pas scurtat} \end{array} \right. \end{array} \right.$

● Cîmpul învîrtitor al unei armături mobile.

Roata polară cu $2p$ poli se rotește cu turația n (rot/min), deci cu viteza unghiulară

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} \text{ rad/s.}$$

Expresia cîmpului învîrtitor este :

$$H = H_m \cos (p\alpha_0 \pm p\Omega t) = H_m \cos (p\alpha_0 \pm \omega t),$$

în care :

H este cîmpul într-un punct M aflat la unghiul geometric α_0 față de axa unui pol nord ;

$p\alpha_0$ — unghiul electric care arată originea de fază (semnele \pm arată sensul de rotație).

● Cîmpul magnetic al unei înfășurări monofazate

$$H = H_m \cos p\alpha \cos \omega t$$

se poate descompune în două cîmpuri învîrtitoare în sensuri opuse

$$H_1 = \frac{1}{2} H_m \cos p \left(\alpha + \frac{\omega}{p} t \right) ;$$

$$H_2 = \frac{1}{2} H_m \cos p \left(\alpha - \frac{\omega}{p} t \right) .$$

● Cîmpul magnetic învîrtitor al unei înfășurări trifazate, prin care circulă un sistem trifazat de curenți

$$i_1 = I \sqrt{2} \cos \omega t ; i_2 = I \sqrt{2} \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) ;$$

$$i_3 = I \sqrt{2} \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right)$$

este :

$$H = \frac{3}{2} H_m \cos p \left(\alpha_0 - \frac{\omega}{p} t \right) .$$

● Expresia cîmpului învîrtitor și inducției în întrefier luînd ca origine de fază axa neutră ($p\alpha_0 = \frac{\pi}{2}$) este:

$$H = H_m \sin \omega t;$$

$$B_\delta = B_{\delta m} \sin \omega t.$$

CAPITOLUL 5

MAȘINI ELECTRICE SINCRONE

A. ELEMENTE CONSTRUCTIVE DE BAZĂ

Mașinile electrice sincrone sînt caracterizate prin faptul că au viteza de rotație egală cu viteza cîmpului învîrtitor, de unde și numele de mașini sincrone.

Ele pot funcționa în regim de motor, în regim de generator sau ca compensatoare de fază.

Motoarele sincrone se folosesc pentru puteri mai mari de 100 kW, în locul motoarelor asincrone, deoarece, deși au o construcție mai complicată, au avantajul că pot funcționa cu un factor de putere $\cos \varphi = 1$; sau chiar capacitiv, compensînd astfel energia reactivă consumată de alți receptori din rețea.

Mașinile sincrone se folosesc în special ca generatoare de curent alternativ, în care caz sînt denumite generatoare sincrone sau alternatoare. Mai sînt utilizate denumirile de turboalternator, pentru cazul cînd este antrenat de o turbină cu abur, sau hidroalternator, pentru cazul cînd este antrenat de o turbină hidraulică.

Compensatorul de fază este o mașină sincronă care debitează energie reactivă, în anumite puncte ale unei rețele, pentru a îmbunătăți factorul de putere.

Ca orice mașină electrică, mașina sincronă are un inductor și un indus.

Inductorul are o înfășurare de excitație alimentată în curent continuu, și poate fi rotor sau stator.

Dacă inductorul este rotor, mașina sincronă este denumită *mașină sincronă în construcție normală*, iar dacă inductorul este stator, este denumită *mașină sincronă în construcție inversă*.

Părțile principale ale mașinii sincrone sînt: statorul, rotorul, portperiile, scuturile, lagărele, cutia de borne etc.

1. MAȘINA SINCRONĂ ÎN CONSTRUCȚIE NORMALĂ

● **Statorul** este indus și este format din carcasă, pachetul de tole și înfășurarea statorului, monofazată sau trifazată, absolut identic ca statorul mașinilor asincrone.

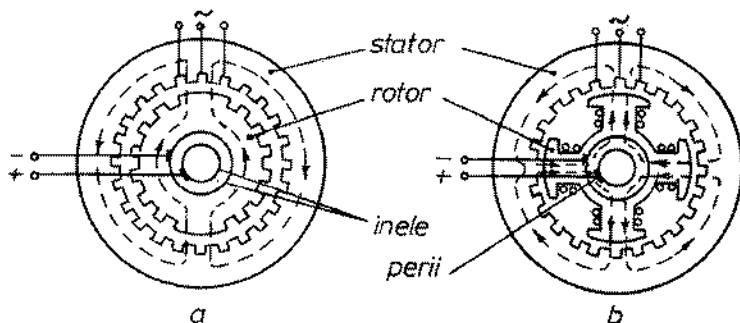


Fig. 5.1. Mașina sincronă în construcție normală:
a — cu poli înecați; b — cu poli aparenti.

● **Rotorul** este inductor avînd o înfășurare de excitație cu același număr de poli ca și statorul. Înfășurarea de excitație este legată la două inele colectoare, de care freacă periiile prin care se alimentează excitația cu un curent continuu numit curent de excitație.

Bobinele înfășurării de excitație sînt astfel înseriate, încît polaritatea polilor să alterneze la periferia rotorului.

La mașinile mari, curentul de excitație este furnizat de o mașină de curent continuu, denumită excitatoare, montată pe același arbore cu mașina sincronă. La mașinile mici, generatoarele se pot autoexcita, inelele fiind alimentate de la un redresor conectat la bornele statorului.

În funcție de forma constructivă, rotoarele pot fi cu poli înecați (fig. 5.1,a) sau cu poli aparenti (fig. 5.1,b).

Rotorul cu poli înecați se utilizează pentru mașini cu doi poli și chiar pentru patru poli. El se execută din oțel masiv sau tole, sub formă de cilindru, cu creștături la exterior, în care se introduce înfășurarea de excitație formată din mai multe bobine repartizate în creștături. Creștăturile nu sînt uniform repartizate pe circumferință, ci este prevăzut cîte un dinte mai lat, în axa fiecărui pol. Această construcție are o mare robustețe mecanică și se folosește la viteze mari, de exemplu la turbogeneratoare.

Rotorul cu poli aparenti se utilizează la mașini cu patru poli și mai mult. Poliș se execută din oțel masiv sau tole și sînt fixați în butucul rotorului montat pe arbore. Înfășurarea de excitație este formată din bobine polare introduse pe fiecare pol. Această construcție se utilizează la viteze mai mici și, în special, la hidrogeneratoare care au o turație de cîteva sute de rotații pe minut.

2. MAȘINA SINCRONĂ ÎN CONSTRUCȚIE INVERSĂ

● **Statorul** este inductor și este format din carcasă, poli de excitație și bobine polare aflate pe poli, și care se alimentează cu curentul continuu de excitație (fig. 5.2), similar cu statorul mașinii de curent continuu.

● **Rotorul** este indus, format dintr-un pachet de tole cu creștături la exterior în care este introdusă o înfășurare monofazată sau trifazată, legată la inele.

Numărul de inele poate fi 2 pentru înfășurarea monofazată, 3 pentru înfășurarea trifazată sau 4 pentru înfășurarea trifazată cu neutrul scos la placa de borne.

În țara noastră se execută o varietate mare de mașini sincrone și anume:

— generatoarea pentru grupuri electrogene de la 4 kVA la 300 kVA;

— generatoare pentru centrale electrice pînă la 330 MW;

— motoare sincrone de la 200 la 1 600 kW.

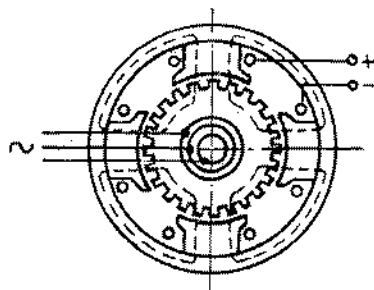


Fig. 5.2. Mașina sincronă în construcție inversă.

B. FUNCȚIONAREA ÎN REGIM DE GENERATOR

1. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE A GENERATORULUI SINCRON ÎN CONSTRUCȚIE NORMALĂ

a. FUNCȚIONAREA ÎN GOL T.E.M. INDUSĂ

Se consideră un generator sincron cu rotorul cu $2p$ poli aparenti. Bobinaul de excitație parcurs de curentul continuu i produce un câmp fix față de rotor, cu o repartiție sinusoidală în spațiu, asigurată de forma piesei polare (fig. 5.3,a).

Învîrtind rotorul la turația n , deci cu viteza unghiulară $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$, conform

celor arătate la capitolul 4, relația (4.18), câmpul produs de rotor este un câmp învîrtitor, cu inducția în întrefier $B_\delta = B_{\delta m} \sin \omega t$, în care pulsația este $\omega = p\Omega$.

Se consideră că pe stator există o înfășurare monofazată, cu $2p$ poli și $q=1$, adică o singură crestătură pe pol, și cu numărul total de conductoare egal cu N , care formează $w = \frac{N}{2}$ spire, bobinate cu pasul diametral τ .

Poliile câmpului învîrtitor trec succesiv prin fața spirelor de pe stator, astfel încît spirele sînt străbătute de un flux magnetic, alternativ, variind odată cu inducția și are expresia:

$$\varphi = \Phi_m \sin \omega t. \quad (5.1)$$

Valoarea fluxului maxim Φ_m se poate afla din relația:

$$\Phi_m = B_{\delta \text{ mediu}} S = L_\tau B_{\delta \text{ mediu}}, \quad (5.2)$$

în care:

L este lungimea pachetului de tole;

τ — pasul polar;

S — suprafața corespunzătoare unui pol;

$B_{\delta \text{ mediu}}$ — inducția medie în întrefier.

În figura 5.3, a este reprezentat câmpul corespunzător unui pol, avînd inducția maximă $B_{\delta m}$. Construind un dreptunghi cu aria egală cu aria dintre curba câmpului și axa de referință, înălțimea acestui dreptunghi reprezintă

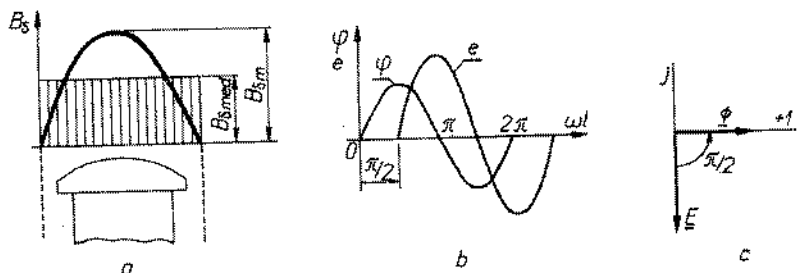


Fig. 5.3. Inducția în întrefier și t.e.m. indusă:

a — inducția medie în întrefier; b — fluxul inductor și t.e.m. indusă; c — diagrama fazorială.

inducția medie $B_{s \text{ mediu}}$. Se poate demonstra că în cazul unei repartiții sinusoidale în spațiu a cîmpului, inducția medie este:

$$B_{s \text{ mediu}} = \frac{2 B_{sm}}{\pi} . \quad (5.3)$$

Conform legii inducției electromagnetice, în spirele străbătute de fluxul alternativ φ , se induce o t.e.m.:

$$e = - \omega \frac{d\varphi}{dt} .$$

Făcînd înlocuirea $\varphi = \Phi_m \sin \omega t$ și calculînd derivata, rezultă:

$$e = - \omega \Phi_m \cos \omega t = \omega \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = E_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) . \quad (5.4)$$

T.e.m. indusă este deci alternativă sinusoidală, cu aceeași pulsație ca și cîmpul învîrtitor și defazată în timp în urma fluxului cu unghiul $\frac{\pi}{2}$ (fig. 5.3, b și c).

Valoarea efectivă este:

$$E = \frac{\omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{\omega \Phi_m 2\pi f}{\sqrt{2}} = 4,44 f \omega \Phi_m , \quad (5.5)$$

adică o relație identică cu cea găsită la teoria transformatorului.

Relația (5.5) este valabilă numai pentru cazul considerat cînd pe fiecare pol există o singură creștătură, iar pasul este diametral și deci toate spirele înfășurării ocupă simultan aceeași poziție în cîmp.

Dacă înfășurarea are mai multe creștături pe pol (acesta fiind cazul real în practică), spirele nu mai ocupă simultan aceeași poziție în cîmp și deci t.e.m. induse în spirele aflate în creștături diferite sînt defazate între ele și nu se mai însumează aritmetic, ci fazorial. Din această cauză, valoarea efectivă a t.e.m. induse trebuie raportată prin înmulțirea cu k_q , numit și *factor de zonă*.

Scurtarea pasului de bobinaj provoacă de asemenea o micșorare a fluxului inductor ce străbate spirele și de aceea valoarea t.e.m. induse trebuie raportată prin înmulțire cu k_s , numit *factorul de scurtare*.

Notînd cu $k_w = k_p k_s$ factorul de bobinaj, atunci valoarea efectivă a t.e.m. induse devine:

$$E = 4,44 k_w f \omega \Phi_m, \quad (5.6)$$

iar la mersul în gol:

$$E_0 = 4,44 k_w f \omega \Phi_0.$$

Din relația (5.6) se constată că E_0 este proporțional cu Φ_0 care la rîndul său depinde de valoarea curentului de excitație i . Variația lui E_0 la mersul în gol în funcție de curentul de excitație i este denumită caracteristică de mers în gol (fig. 5.4) care are forma la fel ca la mașinile de curent continuu, determinată de existența unei t.e.m. remanente E_{om} datorită unui cîmp remanent al polilor, o porțiune dreaptă a caracteristicii, cînd Φ_0 este proporțional cu i și deci E_0 este proporțional cu i , și porțiunea corespunzătoare saturării circuitului magnetic, cînd fluxul Φ_0 și deci E_0 crește mai puțin decît proporțional cu i .

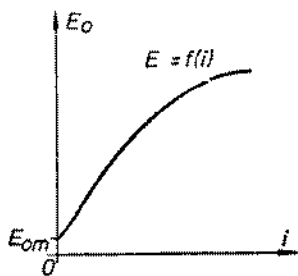


Fig. 5.4. Caracteristica de mers în gol a generatorului sincron.

Dacă statorul este prevăzut cu o înfășurare trifazată cu $2p$ poli, iar rotorul se rotește în sensul succesiunii fazelor, adică 1, 2, 3 (sau U, V, W), în fiecare fază se induce o t.e.m. cu valoarea efectivă dată de relația (5.6), însă din cauza decalajului dintre faze t.e.m. sînt și ele defazate. Unghiul geometric de decalaj a înfășurărilor fazelor, pe periferia statorului este:

$$\frac{2\pi}{3} = \frac{2 \cdot \frac{2\pi}{2p}}{3} = \frac{2\pi}{3p},$$

iar unghiul electric de defazaj între tensiunile induse în cele trei faze este

$$p \cdot \frac{2\pi}{3p} = \frac{2\pi}{3}, \quad (5.7)$$

adică 120° electrice.

Dacă se ia ca origine de fază faza fluxului φ , expresiile celor trei tensiuni electromotoare induse în cele trei faze și care formează un sistem simetric de tensiuni sînt:

$$\begin{aligned} e_1 &= E \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right); \\ e_2 &= E \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right); \\ e_3 &= E \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \frac{4\pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (5.8)$$

Frecvența t.e.m. induse este:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{p\Omega}{2\pi} = \frac{p \cdot \frac{2\pi n}{60}}{2\pi} = \frac{pn}{60}. \quad (5.9)$$

Deoarece frecvența rețelelor este constantă, rezultă că turația mașinii sincrone depinde numai de numărul perechilor de poli p și are pentru $f=50$ Hz una din valorile:

p	1	2	3	4	5	6	etc.
n [rot/min]	3 000	1 500	1 000	750	600	500	etc.

b. FUNCȚIONAREA ÎN SARCINĂ. REACȚIA INDUSULUI

La funcționarea în sarcină, înfășurarea trifazată a statorului este parcursă de un sistem trifazat de curenți, cu aceeași frecvență f ca și t.e.m. care i-a produs, și care conform celor arătate la capitolul 4, produc un câmp magnetic învîrtitor de reacție, cu aceeași viteză unghiulară și același sens de rotație ca și câmpul inductor. Viteza câmpului învîrtitor de reacție n_0 este egală cu viteza rotorului:

$$n_0 = \frac{60f}{p} = \frac{60}{p} \frac{p \cdot n}{60} = n. \quad (5.10)$$

Cînd generatorul debitează pe o rețea, frecvența f este un parametru constant al rețelei și deci rotorul trebuie să se învîrtească cu turația $n = n_0$, la sincronism cu câmpul învîrtitor al indusului.

Câmpul învîrtitor de reacție produce un flux de reacție Φ_a , care se compune cu fluxul inductor Φ_0 , dînd un flux rezultat Φ :

$$\Phi_0 + \Phi_a = \Phi. \quad (5.11)$$

În funcție de defazajul între curentul de sarcină I și tensiunea electromotoare E , efectele reacției indusului sînt diferite.

Știînd că întotdeauna E este defazat cu $\frac{\pi}{2}$ în urma lui Φ iar Φ_a este în fază cu curentul I , se vor analiza efectele reacției indusului pentru diferite defazaje între E și I .

Dacă I este în fază cu E , fluxul de reacție este defazat cu $\frac{\pi}{2}$ în urma fluxului inductor, astfel încît polii fluxului de reacție se găsesc în dreptul axelor dintre polii inductorului. Fluxul de reacție se închide prin stator și rotor perpendicular pe liniile de forță ale fluxului inductor și de aceea se numește și flux transversal. El întărește fluxul inductor pe o jumătate a polului și îl slăbește pe cealaltă jumătate a polului, așa încît fluxul rezultat are aproximativ aceeași valoare cu fluxul inductor, însă este distorsionat, la fel ca la mașinile de curent continuu.

La sarcină inductivă Φ_a micșorează fluxul inductor, iar la sarcină capacitivă Φ_a mărește fluxul inductor, așa cum se va arăta la reprezentarea diagramei fazoriale.

2. ECUAȚIILE DE FUNCȚIONARE

Se notează cu:

R — rezistența ohmică a unei faze a înfășurării statorului;

X — reactanța de scăpări a acestei înfășurări;

E_a — t.e.m. indusă în înfășurarea statorului de fluxul de reacție;

U — tensiunea la borne;

E_0 — t.e.m. indusă în înfășurare la mersul în gol.

Aplicând teorema a II-a a lui Kirchhoff în circuitul statorului, rezultă:

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + R\underline{I} + jX\underline{I} - \underline{E}_a. \quad (5.12)$$

T.e.m. în sarcină este:

$$\underline{E} = \underline{E}_0 + \underline{E}_a = \underline{U} + R\underline{I} + jX\underline{I}. \quad (5.13)$$

În aceste ecuații \underline{I} este defazat față de \underline{U} cu unghiul φ , în funcție de caracterul sarcinii.

3. DIAGRAMA FAZORIALĂ

Luând ca origine de fază faza tensiunii \underline{U} (fig. 5.5), curentul \underline{I} este defazat în urmă cu φ . În fază cu \underline{I} se găsește căderea de tensiune activă $R\underline{I}$, și cu $-\frac{\pi}{2}$ defazat înainte căderea de tensiune inductivă $jX\underline{I}$. Însușind conform relației 5.13 se găsește t.e.m. în sarcină \underline{E} . În fază cu \underline{I} este fluxul $\underline{\Phi}_a$ de reacție și defazat cu $-\frac{\pi}{2}$ în urmă este t.e.m. \underline{E}_a . Făcând suma $\underline{E}_0 = \underline{E} - \underline{E}_a$ se găsește t.e.m. \underline{E}_0 . Defazat cu $\frac{\pi}{2}$ înaintea lui \underline{E}_0 se găsește fluxul inductor $\underline{\Phi}_0$. Prin însumarea $\underline{\Phi}_0 + \underline{\Phi}_a$ se găsește fluxul rezultat $\underline{\Phi}$. Unghiul θ între \underline{E} și \underline{E}_0 este un unghi de defazaj intern al generatorului și anume este unghiul între fluxul inductor $\underline{\Phi}_0$ și fluxul rezultat $\underline{\Phi}$.

Din figura 5.5, *a* se constată că la sarcină inductivă, ca urmare a reacției indusului, fluxul rezultat $\underline{\Phi}$ este mai mic decât fluxul inductor. Cu cât φ crește, cu atât acest efect este mai important, iar la sarcină inductivă pură, $\underline{\Phi}_a$ este opus lui $\underline{\Phi}_0$, iar fluxul $\underline{\Phi}$ capătă o valoare minimă.

În figura 5.5, *b* este reprezentată diagrama fazorială în cazul unei sarcini capacitive. Se constată că fluxul rezultat $\underline{\Phi}$ este mai mare decât fluxul inductor $\underline{\Phi}_0$, iar la limită când sarcina este capacitivă pură, $\underline{\Phi}_a$ este în fază cu $\underline{\Phi}_0$, iar $\underline{\Phi}$ capătă o valoare maximă.

Concluzie. Efectul reacției indusului la mașina sincronă depinde de defazajul între \underline{E} și \underline{I} și anume:

— La defazaj zero, fluxul de reacție $\underline{\Phi}_a$ este defazat cu $\frac{\pi}{2}$ în urma fluxului inductor $\underline{\Phi}_0$. Fluxul $\underline{\Phi}_0$ este distorsionat, iar fluxul rezultat $\underline{\Phi}$ are aproximativ aceeași valoare cu fluxul inductor.

— La sarcină inductivă, fluxul de reacție se compune cu fluxul inductor, iar fluxul rezultat este mai mic decât fluxul inductor în gol.

— La sarcină capacitivă, fluxul de reacție se compune cu fluxul inductor, iar fluxul rezultat este mai mare decât fluxul inductor în gol.

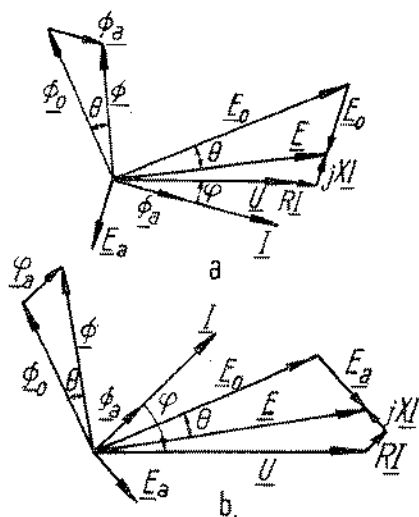


Fig. 5.5. Diagrama fazorială a generatorului sincron:
a — sarcină inductivă; b — sarcină capacitivă.

Ecuatia (5.12) se poate simplifica dacă se ține seama că \underline{E}_a este proporțional cu Φ_a , iar Φ_a proporțional cu \underline{I} . Se poate scrie \underline{E}_a sub forma:

$$-\underline{E}_a = jX_a \underline{I}, \quad (5.14)$$

prin care $-\underline{E}_a$ se consideră o cădere de tensiune depinzând de o reactanță X_a .

În acest fel, ecuația (5.12) devine:

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + R\underline{I} + jX\underline{I} + jX_a \underline{I} = \underline{U} + R\underline{I} + j(X + X_a)\underline{I},$$

sau:

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + R\underline{I} + jX_s \underline{I}, \quad (5.15)$$

în care X_s este denumită reactanță totală sau sincronă. Diagrama fazorială se simplifică ca în figura 5.6.

Dacă se neglijează rezistența R a statorului, ecuația (5.15) se simplifică și mai mult, devenind:

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + jX_s \underline{I}, \quad (5.16)$$

iar diagrama fazorială se simplifică ca în figura 5.7.

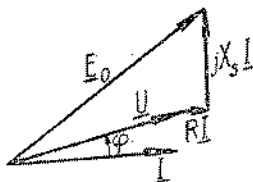


Fig. 5.6. Diagrama fazorială simplificată a generatorului sincron.

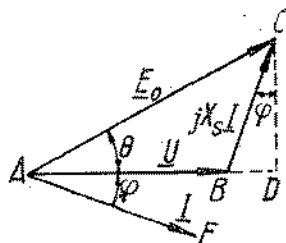


Fig. 5.7. Diagrama fazorială în care se neglijează rezistența statorului.

4. BILANȚUL DE PUTERI

Scăzînd din puterea absorbită de generator P_a de la motorul primar, pierderile mecanice p_m , pierderile în excitație p_e și pierderile în fier din miezul statorului p_{Fe} , rezultă puterea electromagnetică P_{em} :

$$P_{em} = P_a - (p_m + p_e + p_{Fe}),$$

care este transmisă statorului prin intermediul cîmpului electromagnetic și transformată în putere electrică. O parte din ea acoperă pierderile în cuprul statorului p_{Cu1} , astfel încît puterea utilă la borne este:

$$P = P_{em} - p_{Cu1} = P_a - \Sigma p = 3UI \cos \varphi.$$

Dacă se neglijează rezistența statorului R și deci și pierderile în cuprul statorului, se poate scrie:

$$P_{em} = P = 3UI \cos \varphi. \quad (5.17)$$

În diagrama din figura 5.7, în care s-a coborît perpendiculara CD pe AB se observă că:

$$CD = CB \cos \varphi = AC \sin \theta,$$

sau

$$X_s I \cos \varphi = E_0 \sin \theta,$$

de unde:

$$I \cos \varphi = \frac{E_0 \sin \theta}{X_s}. \quad (5.18)$$

Înlocuind în relația 5.17), rezultă expresia puterii electromagnetice:

$$P_{em} = \frac{3 U E_0 \sin \theta}{X_s}, \quad (5.19)$$

iar cuplul electromagnetic M_e corespunzător acestei puteri este:

$$M_e = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{3 U E_0 \sin \theta}{\Omega X_s}. \quad (5.20)$$

Relațiile (5.19) și (5.20) exprimă puterea electromagnetică, respectiv cuplul, în funcție de parametrii interni ai generatorului și mărimile electrice. Puterea și cuplul sînt proporționale cu $\sin \theta$ în care θ este unghiul de defazaj între t.e.m. \underline{E} și \underline{E}_0 , egal cu unghiul de defazaj între fluxul rezultat Φ și fluxul inductor Φ_0 și în același timp unghiul de decalaj între polii cîmpului învîrtitor inductor și polii cîmpului învîrtitor rezultat. La $\theta=0$, puterea electromagnetică, respectiv cuplul este zero; la $\theta = \frac{\pi}{2}$, puterea și cuplul sînt maxime.

Dacă se neglijează cuplul produs de pierderi, cuplul electromagnetic M_e este egal cu cuplul M produs de motorul primar la arbore. Notînd cu U_l și I_l tensiunea între faze, respectiv curentul în linie, puterea utilă la borne la generatorul trifazat este:

$$P = 3 U_l I_l \cos \varphi = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi. \quad (5.21)$$

Randamentul generatorului trifazat este:

$$\eta = \frac{P}{P_a} = \frac{\sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi}{\sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi + \Sigma p}. \quad (5.22)$$

5. CARACTERISTICILE GENERATORULUI SINCRON ÎN SARCINĂ

Caracteristică externă $U = f(I)$ este curba de variație a tensiunii U la bornele generatorului, cînd debitează singur pe un receptor un curent variabil I , curentul de excitație i și factorul de putere $\cos \varphi$ rămînd constante.

Dacă factorul de putere $\cos \varphi = 1$, caracteristica este ușor coborîtoare, așa cum se vede în figura 5.8.

Dacă factorul de putere este mai mic decît 1, de exemplu 0,8 cu sarcina inductivă, așa cum s-a arătat, reacția indusului micșorează fluxul inductor și cu cît sarcina crește, cu atît tensiunea scade, mai mult însă decît la $\cos \varphi = 1$.

Dacă factorul de putere este mai mic decît 1, de exemplu 0,8 capacitiv, reacția indusului întărește fluxul inductor, și pe măsură ce crește curentul, crește și tensiunea, așa cum se vede în figura 5.8.

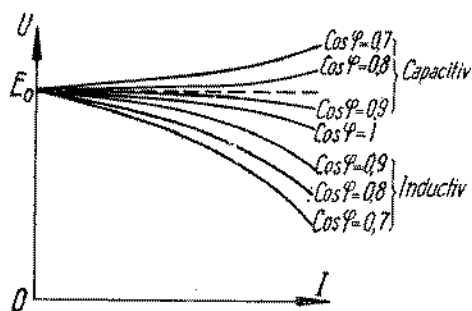


Fig. 5.8. Caracteristica externă a generatorului sincron.

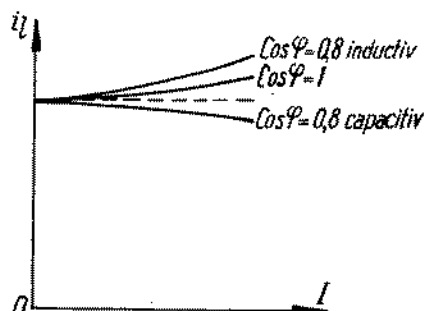


Fig. 5.9. Caracteristicile de reglaj.

Variația tensiunii generatorului, numită și cădere sau ridicare de tensiune este:

$$\Delta U\% = \frac{E_0 - U_n}{U_n} 100 (\%),$$

adică diferența între t.e.m. la mersul în gol și tensiunea în sarcină nominală, raportată la tensiunea nominală.

Caracteristica de reglaj indică variația curentului de excitație i cu sarcina I , pentru a menține tensiunea constantă la borne. În figura 5.9 sînt prezentate caracteristicile de reglaj pentru diferiți factori de putere.

Pentru factorii de putere inductivi este necesar a se mări i odată cu sarcina, pentru a menține U constant, din cauza reacției indusului. Pentru factorii de putere capacitivi, curentul de excitație trebuie micșorat, deoarece reacția indusului întărește fluxul inductor.

C. FUNCȚIONAREA ÎN PARALEL A GENERATOARELOR SINCRONE

1. CUPLAREA ÎN PARALEL

Se presupune că la o rețea trifazată, alimentată de un generator sincron, trebuie legat un nou generator prin închiderea întreruptorului (fig. 5.10). Dacă între contactele întreruptorului pe fiecare fază ar exista o diferență de potențial, prin închiderea lui s-ar produce un scurtcircuit ce ar provoca deranjamente importante.

Pentru a evita acest lucru, este necesar ca pe fiecare fază, în momentul închiderii, t.e.m. a generatorului să fie egală cu tensiunea U a rețelei. Această se asigură dacă sînt îndeplinite următoarele condiții de conectare în paralel:

- valorile eficace ale t.e.m. a generatorului și tensiunii rețelei să fie egale;
- frecvența t.e.m. a generatorului f_G să fie egală cu frecvența f a rețelei;
- ambele tensiuni să fie în fază;
- succesiunea în timp a fazelor generatorului să fie aceeași cu succesiunea fazelor corespunzătoare ale rețelei.

Operațiile prin care se realizează condițiile de mai sus constituie sincronizarea.

Se aduce mai întâi generatorul la o turație aproximativ egală cu turația nominală, ceea ce se poate verifica cu un frecvențmetru, și apoi se mărește excitația generatorului, pînă cînd tensiunea generatorului este egală cu tensiunea rețelei.

Pentru verificarea coincidenței succesiunii fazelor și determinării momentului sincronizării, se folosesc aparate numite sincronoscoape. Cel mai simplu sincronoscop este format din trei lămpi așezate pe un panou ca în figura 5.10. Lampa *III* și voltmetrul *V* sînt legate direct la o fază, iar lămpile *I* și *II* sînt legate încrucișat între celelalte două faze. Cînd frecvența generatorului f_g diferă de cea a rețelei f , lămpile se aprind și se sting într-o anumită succesiune dînd impresia unui foc învîrtitor, spre stînga sau spre dreapta, după cum $f_g < f$ sau $f_g > f$, indicînd în acest fel cum trebuie reglată turația pentru egalizarea frecvențelor.

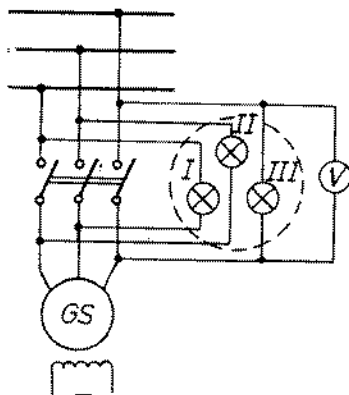


Fig. 5.10. Schema pentru cuplarea în paralel a generatorului sincron trifazat.

Dacă succesiunea fazelor nu este corectă, lămpile se sting și se aprind simultan.

Pe măsură ce se reglează turația generatorului, viteza de rotație a focului învîrtitor scade, iar în momentul cînd frecvențele sînt egale și tensiunile în fază, lampa *III* este stinsă, voltmetrul indică zero, și se poate face cuplarea în paralel.

După cuplarea la rețea, generatorul nu debitează putere, întrucît puterea primită de la motorul primar acoperă numai pierderile de mers în gol, iar unghiul θ este egal cu zero. Pentru încărcare cu sarcină activă, se mărește admisia la motorul primar (combustibil, abur). Prin aceasta se mărește cuplul la arborele generatorului, rotorul se deplasează înainte față de cîmpul învîrtitor al statorului în sensul de rotație și unghiul θ crește.

La funcționarea în paralel a generatoarelor sincrone, în cazul modificării bruste a puterii active (care modifică unghiul θ), rotorul execută o serie de oscilații în jurul noii poziții de funcționare. Pentru amortizarea acestor oscilații se utilizează o înfășurare de amortizare, formată din bare de cupru introduse în creștăturile prevăzute în piesele polare și scurtcircuitate la capete. La rotoarele cu poli înecați se folosesc pene metalice pentru creștături.

2. FUNCȚIONAREA GENERATORULUI SINCRON CUPLAT ÎN PARALEL PE BARELE UNEI CENTRALE

Se consideră un generator sincron cuplat la barele unei centrale a cărei tensiune U și frecvență sînt menținute constante de alte generatoare care au împreună o putere foarte mare în comparație cu generatorul analizat. Generatorul funcționează în regimul cu putere activă constantă (nu se acționează

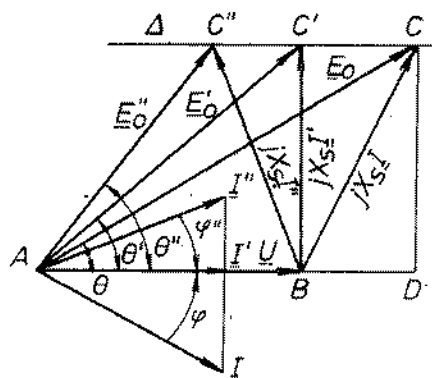


Fig. 5.11 Funcționarea generatorului sincron cu tensiune constantă la borne și cu excitație variabilă.

ghiul de defazaj al curentului, astfel ca să fie perpendicular pe $jX_s I$ și $I \cos \varphi$ să rămână constant.

Pentru curenți de excitație mari, defazajul este inductiv (cazul cînd E_0 are vîrfurile în C); pentru curenți de excitație mici defazajul este capacitiv (cazul E_0' cu vîrfurile în C''), iar pentru un anumit curent de excitație, defazajul este zero, $\cos \varphi = 1$ și curentul minim (cazul I' și E_0'').

Deci, la generatorul sincron care funcționează cuplat la o rețea cu tensiunea constantă, prin reglarea curentului de excitație se reglează numai factorul de putere, respectiv puterea reactivă, fără a se influența puterea activă debitată de generator. Reglarea puterii active se face numai reglînd debitul agentului la motorul primar.

D. FUNCȚIONAREA MOTORULUI SINCRON

1. REVERSIBILITATEA MAȘINII SINCRONE.

PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE

A MOTORULUI SINCRON

Dacă un generator sincron este rotit de un motor primar și debitează energie la rețea, se știe că cîmpul învîrtitor inductor al rotorului se rotește odată cu rotorul cu viteza $n = n_0$, iar cîmpul statorului se rotește în același sens și cu aceeași viteză (fig. 5.12, a). Polii rotorului sînt decalajați în spațiu înaintea polilor cîmpului rezultat în sensul rotirii cu unghiul θ . Forțele ce se nasc între polii rotorului și cei ai statorului explică apariția cuplului rezistent în cazul generatorului (fig. 5.12, a).

Dacă sarcina se micșorează treptat pînă la mersul în gol, fără ca generatorul să fie decuplat de la rețea, unghiul θ se micșorează treptat pînă cînd polii rotorului și polii statorului ajung pe aceeași axă și nu se mai produc forțe între poli, deci dispare cuplul rezistent (fig. 5.12, b). Generatorul nu mai debitează energie la rețea, iar de la motorul primar primește numai puterea necesară pentru acoperirea pierderilor la mersul în gol.

asupra motorului primar) și curent de excitație variabil. Înlocuind în expresia puterii 5.17, pe $I \cos \varphi$ din relația 5.18, rezultă:

$$E_0 \sin \theta = \frac{X_s P}{3 U} = \text{constant}, \quad (5.23)$$

în care X_s , P și U sînt constante.

Cînd variază curentul de excitație variază t.e.m. E_0 , însă din diagrama fazorială din figura 5.11 se constată că segmentul $CD = E_0 \sin \theta$ trebuind să rămână constant, vîrfurile fazorului E_0 se deplasează pe dreapta Δ , paralelă cu U . Căderea de tensiune $jX_s I$ își schimbă valoarea și direcția și corespunzător se modifică valoarea și un-

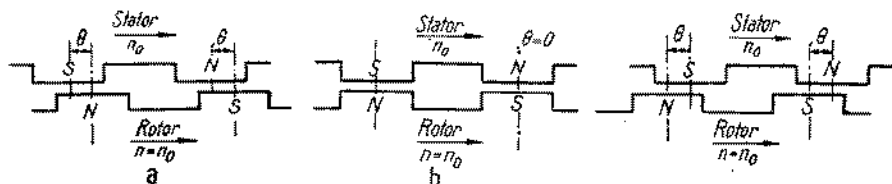


Fig. 5.12. Decalajul polilor cîmpurilor învîrtitoare:

a — la generator; b — la mersul în gol; c — la motor.

Dacă motorul primar începe să funcționeze în regim de frînă, rotorul rămîne în urma cîmpului statorului, însă continuă să se rotească cu viteza de sincronism $n = n_0$. Polii rotorului sînt decalajați în urma polilor statorului cu unghiul θ (fig. 5.12, c).

Forțele ce se nasc între polii rotorului și cei ai statorului produc un cuplu motor, iar mașina funcționează în regim de motor, transformînd energia electrică în energie mecanică.

2. ECUAȚIA DE FUNCȚIONARE ȘI DIAGRAMA FAZORIALĂ

Notîndu-se cu \underline{U} tensiunea rețelei de alimentare, cu E_0 t.e.m. indusă în înfășurarea statorului și cu X_s , reactanța sincronă, ecuația de funcționare a motorului sincron rezultă:

$$\underline{U} = -\underline{E}_0 + j X_s \underline{I}. \quad (5.24)$$

Diagrama fazorială este reprezentată în figura 5.13, prin triunghiul ABC .

3. CUPLUL MOTORULUI SINCRON ȘI REGIMURILE DE FUNCȚIONARE

● **Cuplul motorului sincron** are aceeași expresie ca la generatorul sincron (5.20):

$$M_e = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{3 U E_0 \sin \theta}{\Omega X_s}.$$

Cînd $\theta = 0$, cuplul este zero, motorul merge în gol; cînd $\theta = \frac{\pi}{2}$, cuplul este maxim, iar cînd $\theta > \frac{\pi}{2}$ cuplul devine negativ și mașina se desprinde.

Puterea electromagnetică este egală cu puterea absorbită de stator de la rețea, din care se scad pierderile în înfășurarea statorului și pierderile în fier:

$$P_{em} = P_a - (p_{cu1} + p_{Fe}). \quad (5.25)$$

● **Regimul de funcționare cu i_e constant și M variabil.** Se consideră un motor sincron funcționînd în sarcină cu curentul I , cuplul corespunzător unghiului θ și curentul de excitație fiind i_e . Diagrama de funcționare este reprezentată de triunghiul ABC din figura 5.13.

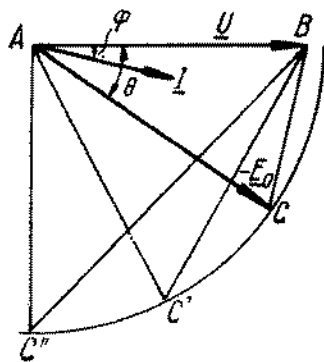


Fig. 5.13. Diagrama fazorială la funcționarea motorului sincron cu i_e constant și M variabil.

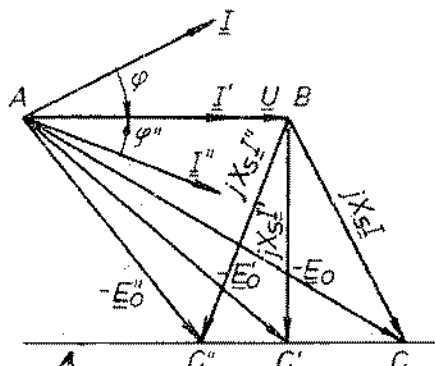


Fig. 5.14. Diagrama fazorială la funcționarea motorului sincron cu i_e variabil și M constant.

Dacă se menține constant curentul de excitație, t.e.m. E_0 rămâne constantă, iar dacă se variază cuplul, pe măsură ce cuplul crește, se mărește și unghiul θ conform relației (5.20).

Pentru diferite unghiuri θ , vârful fazorului $-E_0$ descrie un cerc (fig. 5.13) cu centrul în A . Din relația 5.20 și figura 5.13 se vede că se obține cuplul maxim pentru $\theta = \frac{\pi}{2}$. Acest cuplu se numește *cuplu de desprindere*.

deoarece cînd cuplul crește la această valoare, motorul se desprinde, iese din sincronism și absoarbe de la rețea un curent foarte mare. Motoarele sincrone normale sînt construite astfel încît cuplul nominal să fie mai mic decît cuplul maxim.

● **Regimul de funcționare cu i_e variabil și M constant.** Dacă cuplul și deci puterea este menținută constantă ca și la generatorul sincron, prin variația curentului de excitație vârful fazorului t.e.m. $-E_0$ se deplasează pe dreapta Δ paralelă cu U (fig. 5.14). Spre deosebire de cazul generatorului, la motor, atunci cînd curentul de excitație este mare (motorul supraexcitat), defazajul este capacitiv (cazul cînd $-E_0$ are vârful în C — fig. 5.14), iar cînd curentul de excitație este mic (motorul subexcitat) defazajul este inductiv (I'' și φ'' din fig. 5.14). Pentru un anumit curent de excitație, motorul funcționează cu $\cos \varphi = 1$ (cazul I' și $-E'_0$ în figura 5.14). De obicei, motoarele sincrone funcționează supraexcitate pentru a fi îmbunătățit factorul de putere în instalații. În același scop se folosesc și motoare sincrone funcționînd supraexcitat în gol, numite *compensatoare*.

4. PORNIREA MOTOARELOR SINCRONE

După cum s-a văzut, mașinile sincrone funcționează (produc cuplu) numai cînd rotorul are viteza de sincronism. La pornire, cînd motorul are viteza $n = 0$, cuplul său este nul. În consecință, motoarele sincrone nu pot porni singure, ceea ce constituie dezavantajul esențial al lor.

Pentru a pune în funcțiune un motor sincron, rotorul trebuie adus la viteza de sincronism printr-o metodă oarecare, după care se conectează statorul la rețea și se încarcă cu o sarcină mecanică.

Există două metode de pornire:

● **Pornirea cu motor auxiliar.** Rotorul este învârtit de un motor auxiliar cu care este cuplat mecanic și adus la turația de sincronism. Drept motor auxiliar poate fi folosită excitatoarea de curent continuu a motorului sincron, dacă este cuplată mecanic cu rotorul. Se reglează apoi curentul de excitație pentru a se obține t.e.m. nominală, și se cuplează la rețea prin sincronizare la fel ca la generatoare.

● **Pornirea în asincron.** Barele de amortizare, ce se găsesc pe rotor, formează colivii, la fel ca la un motor asincron în scurtcircuit. Datorită acestora, așa cum se vede la capitolul 6, motorul poate fi pornit ca un motor asincron. În timpul pornirii, înfășurarea de excitație este legată în scurtcircuit, pentru a se evita inducerea în ea a unei tensiuni periculoase. Când motorul ajunge aproape de viteza de sincronism, se excită rotorul cu curent continuu, pătrind un regim tranzitoriu de accelerare, care aduce rotorul la viteza de sincronism.

PROBLEME

1. Un generator sincron monofazat debitează un curent de 50 A la tensiunea 231 V și factorul de putere 0,8. Știindu-se că randamentul este $\eta = 0,7$, să se calculeze puterea absorbită de la motorul primar.

$$\text{Răspuns: } P = UI \cos \varphi, \text{ iar } P_a = \frac{P}{\eta} = 1,32 \text{ kW.}$$

2. Un generator sincron trifazat are $2p=4$, puterea 30 kW, $U=400$ V, $\cos \varphi=0,8$, $f=50$ Hz, și $\eta=0,9$. Să se calculeze curentul debitat, turația și puterea absorbită de la motorul primar.

$$\text{Răspuns: Din relația } P = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi \text{ se deduce } I = 54,1 \text{ A; } n = \frac{60 f}{p} = 1500 \text{ rot/min.}$$

$$P_a = \frac{P}{\eta} = 33,3 \text{ kW.}$$

3. Un generator sincron cu $2p=2$, este antrenat cu turația $n=3000$ rot/min. Pe fază sînt $w=30$ spire, iar factorul de bobinaj $k_w=0,9$. Știind că fluxul este $\Phi_0 = 0,02$ Wb, să se calculeze t.e.m. la mersul în gol.

$$\text{Răspuns: } f = \frac{pn}{60} = 50 \text{ Hz; } E_0 = 4,44 k_w w \Phi_0 = 120 \text{ V.}$$

4. Un generator sincron trifazat are înfășurarea statorului legată în stea, tensiunea între faze $U=400$ V, curentul $I=200$ A, și $\cos \varphi=0,8$. Reactanța sincronă a unei faze este $X_s=0,3 \Omega$. Să se determine E_0 , neglijîndu-se rezistența înfășurării.

$$\text{Răspuns: } \varphi=36^\circ 54', \text{ iar } \sin \varphi=0,6. \text{ Tensiunea pe fază este } U_f = \frac{U_l}{\sqrt{3}} = 231 \text{ V. Se reprezintă}$$

diagrama fazorială similar cu figura 7.11, dar luîndu-se curentul I pe axa reală. În complex $I = 200$ A, iar $\underline{U} = U \cos \varphi + j U \sin \varphi = 184,8 + j 138,6$. Rezultă, conform relației 7.16), $\underline{E}_0 = 184,8 + j 198,6$. Rezultă $E_0 = 271,5$ V.

REZUMAT

● Tipuri de mașini sincrone:

În construcție normală $\left\{ \begin{array}{l} \text{— rotor cu poli înecați} \\ \text{— rotor cu poli aparenti} \end{array} \right.$

În construcție inversă

● Elemente constructive de bază:

Mașini în construcție normală:

Statorul $\left\{ \begin{array}{l} \text{— carcasa} \\ \text{— pachetul de tole} \\ \text{— înfășurarea statorului} \end{array} \right.$

Rotorul $\left\{ \begin{array}{l} \text{cu poli înecați} \\ \text{cu poli aparenti} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{— arbore} \\ \text{— pachet cu tole} \\ \text{— înfășurare de excitație repartizată} \\ \text{— două inele colectoare} \end{array} \right.$

$\left\{ \begin{array}{l} \text{— arbore} \\ \text{— butuc} \\ \text{— poli de excitație} \\ \text{— bobine polare} \\ \text{— două inele colectoare} \end{array} \right.$

Portierile

Ventilatorul

Cuția de borne

Mașini în construcție inversă:

Statorul $\left\{ \begin{array}{l} \text{— carcasa} \\ \text{— poli} \\ \text{— bobine polare} \end{array} \right.$

Rotorul $\left\{ \begin{array}{l} \text{— arbore} \\ \text{— pachet de tole} \\ \text{— înfășurare monofazată sau trifazată} \\ \text{— inele colectoare} \end{array} \right.$

● Funcționarea ca generator:

T.e.m. în gol:

$$E_0 = 4,44 k_w f \omega \Phi_0.$$

Compunerea fluxurilor la mersul în sarcină:

$$\Phi_0 + \Phi_a = \Phi.$$

Ecuția de funcționare:

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + \underline{R}I + jX_s I - \underline{E}_a.$$

Ecuția simplificată:

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + \underline{R}I + jX_s I.$$

în care X_s este reactanța sincronă.

Ecuția simplificată, neglijând rezistența R:

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + jX_s \underline{I}.$$

Cuplul electromagnetic:

$$M_e = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{3 U E_0 \sin \theta}{\Omega X_s}.$$

Puterea utilă la generatorul trifazat:

$$P = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi.$$

● Funcționarea în paralel a generatoarelor sincrone trifazate (condiții de funcționare în paralel):

- T.e.m. egală cu tensiunea rețelei
- Frecvența egală cu frecvența rețelei
- T.e.m. în fază cu tensiunea rețelei
- Succesiunea fazelor să fie aceeași cu cea a rețelei.

● Funcționarea ca motor:

Ecuția de funcționare:

$$\underline{U} = -\underline{E}_0 + jX_s \underline{I}.$$

Cuplul motorului sincron:

$$M_s = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{3 U E_0 \sin \theta}{\Omega X_s} \begin{cases} \theta = 0 \rightarrow \text{mers în gol} \\ \theta = \frac{\pi}{2} \rightarrow \text{cuplul maxim} \end{cases}$$

Regimuri de funcționare:

- Cu i_e constant și M variabil
- Cu i_e variabil și M constant.

Pornirea motoarelor sincrone:

- Cu motor auxiliar
- Pornire în asincron.

CAPITOLUL 6

MAȘINI ELECTRICE ASINCRONE

A. ELEMENTE CONSTRUCTIVE DE BAZĂ

Mașinile electrice asincrone sînt caracterizate prin faptul că au viteza de rotație puțin diferită de viteza cîmpului învîrtitor, de unde și numele de asincrone. Ele pot funcționa în regim de motor, în regim de generator sau în regim de frînă.

Cea mai largă utilizare o au ca motoare electrice, fiind preferate față de celelalte tipuri de motoare, prin construcția mai simplă și siguranța în exploatare.

Ca orice mașină rotativă, mașinile asincrone au un stator, care este inductorul, și un rotor (indusul), separate de un întrefier.

După modul de realizare a înfășurării indusului, există două tipuri principale de mașini asincrone:

— *mașini asincrone cu rotorul bobinat și cu inele colectoare* (pe scurt, mașini asincrone cu inele);

— *mașini asincrone cu rotorul în scurtcircuit*.

Părțile principale ale unei mașini asincrone sînt: statorul, rotorul, portperiile (numai la mașinile cu inele), scuturile, lagărele, cutia de borne etc. (fig. 6.1).

● **Statorul** produce cîmpul magnetic învîrtitor și este format din carcasă, pachetul de tole și înfășurarea statorului.

— *Carcasa* se execută din fontă, din oțel sudat sau la mașini mici din aliaje de aluminiu.

— *Pachetul de tole* este de formă cilindrică, cu creștături la partea interioară. Se execută din tablă, silicioasă, laminată la cald sau la rece, cu grosimea de 0,5 mm.

În figura 6.2, *a* sînt indicate formele principale ale creștăturilor din tola statorului.

— *Înfășurarea statorului* poate fi monofazată sau trifazată, într-un strat sau în două straturi, conform celor arătate la cap. 4.

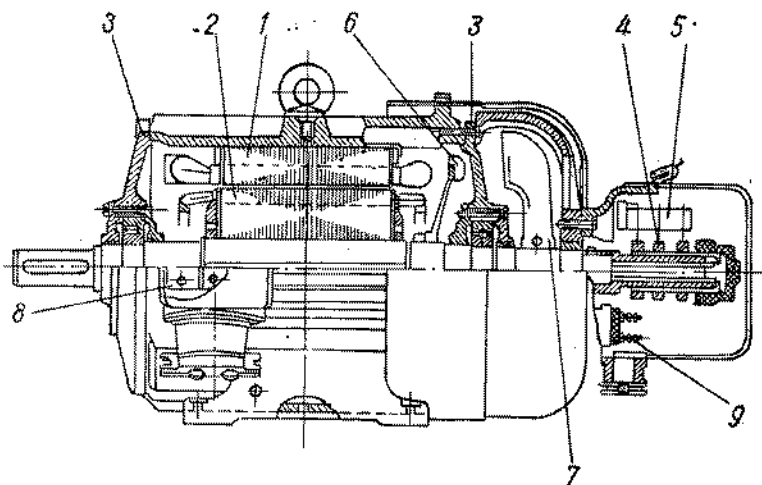


Fig. 6.1. Secțiune printr-o mașină asincronă cu inele colectoare:

1 — stator; 2 — rotor; 3 — scuturi; 4 — inele; 5 — portperii; 6 — ventilator interior; 7 — ventilator exterior; 8 — placa de borne a statorului; 9 — placa de borne a rotorului.

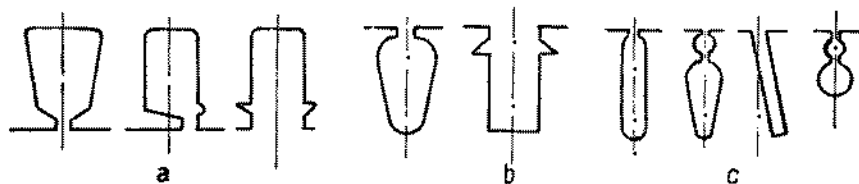


Fig. 6.2. Formele principale ale creștăturilor mașinilor asincrone:

a — creștătură de stator; *b* — creștături de rotor bobinat; *c* — creștături de rotor în scurtcircuit.

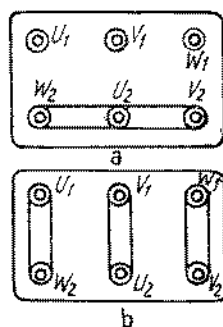


Fig. 6.3. Legarea bornelor la conexiunea:
a — stea; b — triunghi.

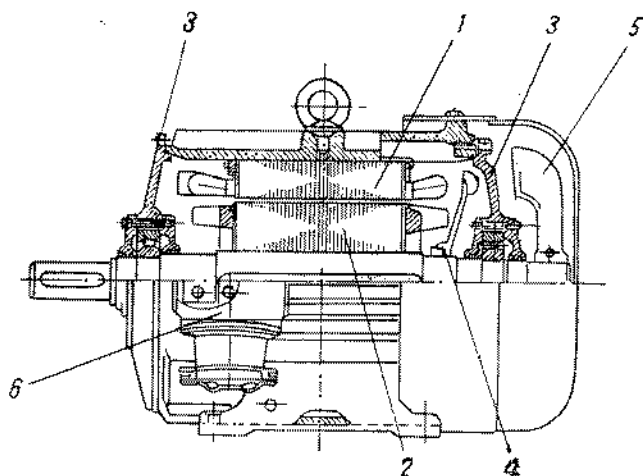


Fig. 6.4. Secțiune printr-o mașină asincronă în scurtcircuit:
1 — stator; 2 — rotor; 3 — scuturi; 4 — ventilator interior; 5 — ventilator exterior; 6 — cutie de borne.

Capetele înfășurării statorului sînt legate la o placă de borne. Înfășurarea mașinilor trifazate poate fi legată în stea sau în triunghi. Conexiunea poate fi executată la înfășurare, în care caz la placa de borne se scot numai trei capete U, V, W , sau poate fi executată prin montarea unor barete la placa de borne, în care caz la aceasta se scot șase capete notate $U_1V_1W_1, U_2V_2W_2$. În figura 6.3 se arată modul de legare a bornelor pentru conexiunea stea sau triunghi.

● **Rotorul**, după tipul mașinii, poate fi cu inele sau în scurt-circuit.

— **Rotorul cu inele** (fig. 6.1) este format din arborele de oțel, pe care este împachetat pachetul de tole prevăzut cu creștături la exterior, a căror formă este arătată în figura 6.2, b. Înfășurarea indusului este trifazată și realizată din conductoare izolate, introduse în creștăturile rotorului, similar cu înfășurarea statorului. Înfășurarea rotorului se leagă în stea, iar cele trei capete se scot printr-o gaură practică axial în arbore, la capătul unde este montat subansamblul inele colectoare. Acesta are trei inele, executate din bronz, alamă sau oțel, izolate între ele, și montate strîns pe un butuc izolat. La fiecare inel se leagă unul din capetele înfășurării rotorului, legat în stea.

— **Rotorul în scurtcircuit** (fig. 6.4) este format din arbore, pachetul de tole prevăzut cu creștături a căror formă este arătată în figura 6.2, c și înfășurarea în scurtcircuit, care va fi descrisă mai departe.

● **Subansamblul portperii** (numai la mașinile cu inele) este prevăzut cu perii de cărbune-grafit sau metal-grafit, ce freacă pe inelele colectoare. Perii sînt legate la o placă de borne a rotorului, prevăzută cu trei borne.

În figura 6.5 sînt arătate schemele convenționale ale motoarelor asincrone.

În R.S. România se execută motoare asincrone de la puteri fracționare (sub 1 kW) pînă la 1600 kW și 6 kV, în scurtcircuit sau cu inele.

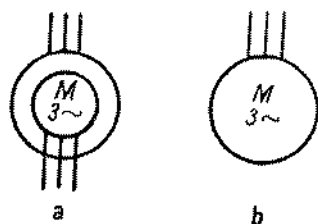


Fig. 6.5. Schemele convenționale ale mașinilor asincrone:
a — cu inele; b — în scurtcircuit.

În afară de acestea, se execută motoare asincrone speciale: motoare anti-grizutoase de la 2,2 la 30 kW pentru acționări în mine de cărbuni, motoare antiexplozive de la 0,8 la 100 kW pentru industria chimică, motoare de macara de la 0,3 la 60 kW, motoare pentru ascensoare, pompe submersibile, motoare pentru industria metalurgică, pentru nave etc.

B. FUNCȚIONAREA MAȘINILOR ASINCRONE ÎN REGIM DE MOTOR

1. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE

Se consideră un motor asincron avînd pe stator o înfășurare trifazată cu $2p$ poli, iar rotorul cu inele, avînd o înfășurare trifazată cu același număr de poli legată în stea.

Alimentînd statorul de la o rețea trifazată, înfășurarea va fi parcursă: de un sistem trifazat de curenți care, conform celor arătate la capitolul 4, vor produce un cîmp învîrtitor de inducție B_1 , în sensul succesiunii fazelor, cu viteza unghiulară $\Omega_1 = \frac{\omega_1}{p}$, în care $\omega_1 = 2\pi f_1$ este *pulsatia rețelei de alimentare*. Turația cîmpului învîrtitor n_1 , numită *turația de sincronism*, rezultă:

$$n_1 = \frac{60}{2\pi} \Omega_1 = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{\omega_1}{p} = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{60 f_1}{p} \quad (6.1)$$

Pentru frecvența $f_1 = 50$ Hz, ea depinde de numărul de perechi de poli p și poate avea una din valorile arătate la capitolul 5.

Cîmpul învîrtitor al statorului va induce:

● **în înfășurarea statorului**, un sistem trifazat de t.e.m. E_1 , de pulsație ω_1 , care împreună cu căderile de tensiune din stator, va echilibra tensiunea aplicată U_1 .

● **în înfășurarea rotorului**, care în momentul pornirii este imobilă, un sistem trifazat de t.e.m. E_2 , cu aceeași pulsație ω_1 ca cea din stator. Înfășurarea rotorului fiind închisă prin reostatul de pornire sau direct scurtcircuitată la inele, cele trei t.e.m. E_2 vor produce în ea trei curenți I_2 , care formează un sistem trifazat, cu aceeași pulsație ω_1 ca a statorului. *Sensul succesiunii fazelor este determinat de sensul de rotație al cîmpului învîrtitor statoric.*

Funcționarea mașinii asincrone, după cum se vede, este analoagă cu cea a transformatorului: statorul este comparabil cu înfășurarea primară, iar rotorul cu înfășurarea secundară a transformatorului. Apare ca element nou mișcarea rotorului față de stator.

În prezența cîmpului învîrtitor al statorului, asupra conductoarelor parcurse de curenți din înfășurarea rotorului, se vor exercita forțe, producînd un cuplu electromagnetic ce va roti rotorul în sensul cîmpului învîrtitor. Turația rotorului crește pînă la o valoare $n < n_1$ cînd cuplul dezvoltat de motor este egal cu cuplul rezistent.

Rotorul nu poate ajunge la sincronism, adică la $n = n_1$, deoarece în acest caz conductoarele înfășurării rotorului ar fi imobile în raport cu cîmpul magnetic învîrtitor al statorului și nu s-ar mai induce curenți în rotor. Chiar la mer-

sul în gol, turația nu ajunge la sincronism deoarece și la mersul în gol mai există încă un cuplu rezistent datorită pierderilor.

Pentru a învinge cuplul rezistent în sarcină, rotorul are turația n mai mică decât n_1 , astfel încît să existe turația relativă n_2 a cîmpului învîrtitor față de rotor. În acesta se induce t.e.m. E_2 și curenții I_2 , de frecvență f_2 , producîndu-se și cuplul de rotație.

Mașina absoarbe energie electrică de la rețea și o transformă în energie mecanică, pentru a învinge cuplul rezistent la arbore, funcționînd în regim de motor.

În concluzie, motorul asincron are turația n totdeauna mai mică decît turația sincronă n_1 , pentru a fi posibilă interacțiunea electromagnetică între stator și rotor. Sensul de rotație este același cu sensul cîmpului învîrtitor. La mersul în gol n este foarte apropiat de n_1 , iar cu cît sarcina crește, cu atît n scade.

2. ALUNECAREA, FRECVENȚA T.E.M. ȘI CURENȚILOR ÎN ROTOR

În paragraful precedent au fost notate cu f_1 frecvența rețelei, cu $\omega_1 = 2\pi f_1$ pulsația rețelei, cu $\Omega_1 = \frac{\omega_1}{p} = \frac{2\pi n_1}{60}$ viteza unghiulară a cîmpului învîrtitor și cu $n_1 = \frac{60 f_1}{p}$ turația cîmpului învîrtitor. A fost notată, de asemenea, cu n turația rotorului, la care corespunde viteza unghiulară a rotorului $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$.

Viteza unghiulară relativă dintre cîmpul învîrtitor al statorului și rotor este:

$$\Omega_2 = \Omega_1 - \Omega, \quad (6.2)$$

la care corespunde turația relativă:

$$n_2 = n_1 - n. \quad (6.3)$$

Se numește *alunecare* raportul:

$$s = \frac{\Omega_2}{\Omega_1} = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1} = \frac{n_1 - n}{n_1}, \quad (6.4)$$

Cînd mașina funcționează ca motor, alunecarea este cuprinsă între $s=1$ la pornire (cînd $n=0$) și $s \approx 0$ la mersul în gol (cînd $n \approx n_1$). Dacă unei mașini asincrone i se aplică un cuplu motor la arbore, turația crește peste turația de sincronism $n > n_1$, alunecarea este negativă, iar mașina funcționează ca generator.

Din relațiile 6.3 și 6.4 se deduc expresiile vitezei unghiulare și turațiilor în funcție de alunecare:

$$\begin{aligned} \Omega_2 &= s\Omega_1; \\ n_2 &= sn_1; \\ \Omega &= \Omega_1(1-s); \\ n &= n_1(1-s). \end{aligned} \quad (6.5)$$

Pulsația t.e.m. și curenților în rotor va fi:

$$\omega_2 = p \Omega_2 = p s \Omega_1 = s \omega_1, \quad (6.6)$$

iar frecvența:

$$f_2 = \frac{p n_2}{60} = \frac{p (n_1 - n)}{60},$$

sau:

$$f_2 = \frac{\omega_2}{2\pi} = \frac{s \omega_1}{2\pi} = s f_1. \quad (6.7)$$

Din aceste relații se deduce că la funcționarea în sarcină a motorului asincron, pulsația respectiv frecvența t.e.m. și curenților din rotor sînt doar fracțiuni din pulsația, respectiv frecvența curenților din stator.

3. REACȚIA INDUSULUI. TENSIUNILE MAGNETOMOTOARE

a. REACȚIA INDUSULUI

Sistemul trifazat de curenți din rotor va produce la rîndul său un cîmp învîrtitor de reacție, de inducție B_2 , care față de rotor are viteza unghiulară $\Omega_2 = \frac{\omega_2}{p}$ în sensul succesiunii fazelor din rotor, care este același cu sensul de rotație.

Față de stator, acest cîmp învîrtitor are viteza unghiulară egală cu suma vitezelor unghiulare a cîmpului față de rotor și a rotorului față de stator, adică viteza:

$$\Omega_2 + \Omega = \Omega_1.$$

Deci, viteza unghiulară a cîmpului de reacție este independentă de viteza rotorului și este egală cu viteza cîmpului inductor. Cele două cîmpuri învîrtitoare se rotesc cu aceeași viteză (viteza de sincronism), însă sînt defazate între ele și se compun într-un cîmp rezultat de inducție B .

b. TENSIUNILE MAGNETOMOTOARE

La mersul în gol cu $s \approx 0$, motorul asincron absoarbe în stator curentul de mers în gol I_0 . Statorul produce o tensiune magnetomotoare învîrtitoare \underline{F}_{10} , proporțională cu $k_{w1} \omega_1 I_0$, care produce cîmpul magnetic învîrtitor. Din cauza pierderilor de fier, fluxul nu este în fază cu I_0 .

La mersul în sarcină, statorul parcurs de curentul I_1 , produce t.m.m. \underline{F}_1 proporțională cu $k_{w1} \omega_1 I_1$, iar rotorul produce t.m.m. \underline{F}_2 proporțională cu $k_{w2} \omega_2 I_2$.

Așa cum s-a arătat mai înainte, viteza unghiulară a cîmpului produs de rotor, și deci a tensiunii magnetomotoare \underline{F}_2 este egală cu viteza unghiulară a cîmpului produs de stator și deci cu viteza t.m.m. \underline{F}_1 . Cu toate că \underline{F}_1 și \underline{F}_2 sînt produse de curenți cu frecvență diferită, deoarece se rotesc în spațiu cu aceeași viteză, pot fi considerați ca fiind produși de două înfășurări trifazate fixe, parcurse de curenți de aceeași frecvență, deci se pot reprezenta

și compune ca doi fazoni. Deoarece, așa cum se va vedea în paragraful următor, fluxul în mașină este practic același atât la mersul în gol cât și la mersul în sarcină compunerea tensiunilor magnetomotoare se face după relația:

$$E_1 + E_2 = E_{10}.$$

Înlocuind cu valorile cu care sînt proporționale, rezultă:

$$k_{w1}\omega_1 I_1 + k_{w2}\omega_2 I_2 = k_{w1}\omega_1 I_0,$$

sau împărțind cu $k_{w1}\omega_1$:

$$I_1 + \frac{k_{w2}\omega_2}{k_{w1}\omega_1} I_2 = I_0. \quad (6.8)$$

4. TENSIUNILE ELECTROMOTOARE INDUSE. FLUXURILE DE SCĂPĂRI

Cîmpul magnetic învîrtitor rezultat induce în înfășurarea statorului (relația 5.6), t.e.m.:

$$E_1 = 4,44 k_{w1} f_1 \omega_1 \Phi_m, \quad (6.9)$$

cu pulsația ω_1 , iar în înfășurarea rotorului t.e.m.:

$$E_{s2} = 4,44 k_{w2} f_2 \omega_2 \Phi_m, \quad (6.10)$$

cu pulsația $\omega_2 = s \omega_1$.

Înlocuind $f_2 = s f_1$ și notînd cu:

$$E_2 = 4,44 k_{w2} f_1 \omega_2 \Phi_m, \quad (6.11)$$

t.e.m. de pulsație ω_1 , care ar fi indusă de același flux în înfășurarea imobilă a rotorului, se poate scrie:

$$E_{s2} = s E_2. \quad (6.12)$$

În afară de fluxul util datorat cîmpului magnetic învîrtitor, rezultat, există în mașină și fluxuri de scăpări (fig. 6.6).

Corespunzător t.m.m. F_1 , se va produce un cîmp de scăpări ale cărui linii de cîmp nu înlanțuie spirele înfășurării rotorului, ci se închid în jurul spirelor statorului prin creștătură sau prin aer în jurul capetelor frontale ale

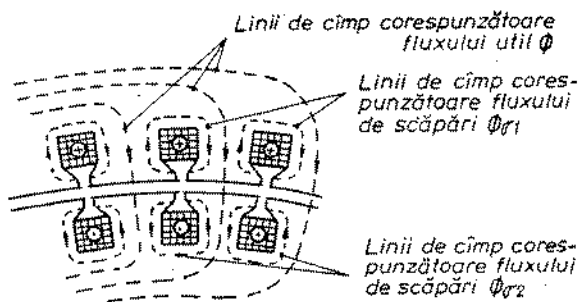


Fig. 6.6. Fluxurile în mașina asincronă la mersul în sarcină.

spirelor, dînd un flux total de scăpări Φ_{o1} , sinusoidal și de pulsație ω_1 . El va induce în înfășurarea statorului o t.e.m. cu valoarea efectivă:

$$E_{o1} = X_1 I_1,$$

în care X_1 este reactanța de scăpări a statorului.

La fel, corespunzător t.m.m. F_2 , se va produce fluxul de scăpări Φ_{o2} , de pulsația ω_2 , care va induce în înfășurarea rotorului t.e.m.:

$$E_{o2} = X_{s2} I_2,$$

în care X_{s2} este reactanța de scăpări a rotorului la frecvența f_2 .

C. ECUAȚIILE DE FUNCȚIONARE ȘI DIAGRAMA DE FAZORI

1. ECUAȚIILE DE FUNCȚIONARE

Pentru o fază a statorului, ecuația în complex se scrie ca și la transformator:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + j X_1 \underline{I}_1, \quad (6.13)$$

în care:

\underline{U}_1 este tensiunea pe fază aplicată statorului;

\underline{E}_1 — t.e.m. indusă de fluxul Φ în înfășurarea statorului, defazată cu $\pi/2$ în urma fluxului;

$R_1 \underline{I}_1$ — căderea ohmică de tensiune în stator în fază cu curentul \underline{I}_1 ;

$j X_1 \underline{I}_1$ — căderea inductivă de tensiune, defazată cu $\pi/2$ înaintea curentului \underline{I}_1 ;

R_1 — rezistența înfășurării statorului;

X_1 — reactanța de scăpări a statorului.

Deoarece căderile de tensiune $R_1 \underline{I}_1$ și $X_1 \underline{I}_1$ sînt relativ mici, tensiunea \underline{U}_1 poate fi considerată aproximativ egală cu \underline{E}_1 și deci se poate scrie:

$$U_1 \simeq E_1 = 4,44 k_{w1} f_1 w_1 \Phi_m. \quad (6.14)$$

Deoarece U_1, k_{w1}, f_1, w_1 sînt constante, din relația (6.14) se deduce că în mașina asincronă fluxul Φ este practic constant, independent de sarcină. Curenții \underline{I}_1 și \underline{I}_2 variază cu sarcina, însă ei se compun conform ecuației (6.8) avînd aproximativ aceeași rezultantă indiferent de sarcină.

Ecuația rotorului este și ea analoagă cu cea a înfășurării secundare a transformatorului, cu deosebirea că tensiunea la borne este nulă (înfășurarea este scurtcircuitată):

$$E_{s2} = R_2 \underline{I}_2 + j X_{s2} \underline{I}_2, \quad (6.15)$$

în care:

E_{s2} este t.e.m. indusă de fluxul Φ în înfășurarea rotorului, de frecvență f_2 și defazată cu $\pi/2$ în urma fluxului;

$R_2 \underline{I}_2$ — căderea ohmică de tensiune în rotor, în fază cu curentul \underline{I}_2 ;

$j X_{s2} \underline{I}_2$ — căderea inductivă de tensiune în rotor, în care X_{s2} este reactanța de scăpări a rotorului la frecvența f_2 .

Dar $X_{s2} = \omega_2 L_{\sigma 2}$ în care $L_{\sigma 2}$ este inductivitatea de scăpări a rotorului. Înlocuind $\omega_2 = s\omega_1$ și notînd $X_2 = \omega_1 L_{\sigma 2}$ reactanța de scăpări a rotorului la frecvența f_1 rezultă:

$$X_{s2} = s \omega_1 L_{\sigma 2} = s X_2. \quad (6.16)$$

Înlocuind în relația 6.15 și ținînd seama de relația (6.12), se obține:

$$s \underline{E}_2 = R_2 \underline{I}_2 + j s X_2 \underline{I}_2,$$

sau împărțind cu s :

$$\underline{E}_2 = \frac{R_2}{s} \underline{I}_2 + j X_2 \underline{I}_2, \quad (6.17)$$

care este ecuația rotorului raportată la frecvența statorului. Prin raportare la frecvența statorului, modulul și faza curentului \underline{I}_2 nu se schimbă, înfășurarea mobilă parcursă de curenții \underline{I}_2 de pulsație ω_2 , fiind înlocuită cu o înfășurare fixă parcursă de curenții \underline{I}_2 de pulsație ω_1 .

Valoarea efectivă a curentului în înfășurarea rotorului rezultă din relația (6.15):

$$I_2 = \frac{E_{s2}}{\sqrt{R_2^2 + X_{s2}^2}} = \frac{s E_2}{\sqrt{R_2^2 + s^2 X_2^2}}. \quad (6.18)$$

Defazajul φ_2 al curentului \underline{I}_2 în urma lui \underline{E}_2 rezultă din relația:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{X_{s2}}{R_2} = \frac{s X_2}{R_2}. \quad (6.19)$$

2. DIAGRAMA DE FAZORI

În figura 6.7. este reprezentată diagrama de fazori corespunzătoare ecuațiilor (6.13), (6.17) și (6.8).

Ca origine de fază este luată originea de fază a fluxului Φ . Defazat înaintea fluxului, din cauza pierderilor în fier este curentul \underline{I}_0 . T.e.m. induse în stator și rotor sînt \underline{E}_1 (în figură este reprezentat $-\underline{E}_1$) și $\underline{E}_2 = \underline{E}_{s2}/s$ avînd valorile din relațiile (6.9) și (6.11), defazate cu $\pi/2$ în urmă față de Φ ($-\underline{E}_1$ este defazat înainte cu $\pi/2$). Defazat în urma lui \underline{E}_2 cu unghiul φ_2 (din relația 6.19) este trasat fazorul \underline{I}_2 (cu valoarea din relația 6.18) și fazorul $\frac{k_{w2} \omega_2}{k_{w1} \omega_1} \underline{I}_2$. Compunînd pe acesta din urmă cu \underline{I}_0 se găsește \underline{I}_1 conform ecuației (6.8).

Tensiunea \underline{U}_1 se găsește construind diagrama după ecuația (6.13). Din vîrfurile fazorului $-\underline{E}_1$ se trasează în fază cu \underline{I}_1 , căderea ohmică de tensiune $R_1 \underline{I}_1$ și apoi defazat cu $\pi/2$ înaintea căderii inductive de tensiune $j X_1 \underline{I}_1$. Unindu-se originea cu vîrfurile

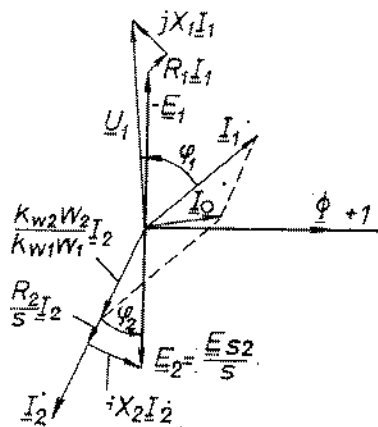


Fig. 6.7. Diagrama de fazori la mersul în sarcină.

acestui din urmă fazor, se găsește tensiunea \underline{U} și unghiul φ_1 de defazaj între \underline{U}_1 și \underline{I}_1 .

În fază cu \underline{I}_2 se trasează căderea ohmică de tensiune $\frac{R_2}{s} \underline{I}_2$ și defazat cu $\pi/2$ înaintea lui \underline{I}_2 căderea inductivă de tensiune $jX_2 \underline{I}_2$. Suma lor trebuie să coincidă cu \underline{E}_2 , conform ecuației (6.17).

D. PIERDERILE ȘI RANDAMENTUL. BILANȚUL DE PUTERI

Motorul asincron trifazat absoarbe de la rețea prin bornele înfășurării statorului, puterea electrică $3 U_1 I_1 \cos \varphi_1$, în care U_1 și I_1 sînt tensiunea, respectiv curentul pe fază. Exprimată în funcție de tensiunea între faze U_l și curentul în linie I_l , puterea absorbită este:

$$P_a = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi. \quad (6.20)$$

În stator se produc pierderi în cuprul înfășurării statorului $p_{Cu1} = 3R_1 I_1^2$ și pierderile în fier p_{Fe} prin histerezis și curenți turbionari.

Puterea rămasă:

$$P_{em} = P_a - (p_{Cu1} + p_{Fe}),$$

este transmisă rotorului și se numește *putere electromagnetică* (fig. 6.8).

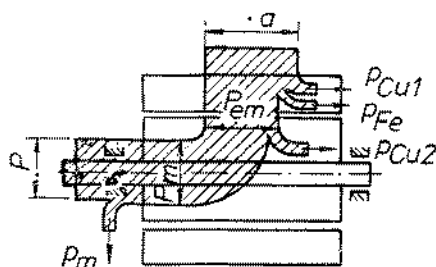


Fig. 6.8. Bilanțul puterilor în mașina asincronă.

Din aceasta, scăzînd pierderile în cuprul înfășurării rotorului $p_{Cu2} = 3R_2 I_2^2$, rezultă:

$$P_m = P_{em} - p_{Cu2}, \quad (6.21)$$

care este puterea mecanică totală transmisă arborelui. Deoarece frecvența f_2 în rotor este mică, pierderile în fierul rotorului sînt neglijabile.

Scăzînd din P_m pierderile mecanice p_m produse prin frecări în lagăre și prin ventilație, rezultă puterea utilă la capătul de arbore:

$$P = P_a - (p_{Cu1} + p_{Cu2} + p_{Fe} + p_m) = P_a - \Sigma p.$$

Randamentul motorului este:

$$\eta = \frac{P}{P_a} = \frac{\sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi - \Sigma p}{\sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi}, \quad (6.22)$$

E. SCHEMA ECHIVALENTĂ A MAȘINII ASINCRONE

Ca și la transformator, se utilizează pentru studiul mașinii asincrone, sistemul de raportare a mărimilor rotorice la numărul de spire al înfășurării statorului, pentru a găsi o schemă simplificată și a putea construi diagrame la aceeași scară pentru stator și pentru rotor:

Notînd cu:

$$k_e = \frac{k_{w1} \omega_1}{k_{w2} \omega_2}, \quad (6.23)$$

raportarea mărimilor rotorice se face cu relațiile:

$$\begin{aligned} E'_2 &= k_e E_2; \\ I'_2 &= \frac{1}{k_e} I_2; \\ R'_2 &= k_e^2 R_2; \\ X'_2 &= k_e^2 X_2. \end{aligned} \quad (6.24)$$

Raportînd mărimile din ecuația (6.17) rezultă:

$$\frac{E'_2}{k_e} = \frac{R'_2}{s k_e^2} \cdot k_e I'_2 + j \frac{X'_2}{k_e^2} \cdot k_e I'_2,$$

sau înmulțind cu k_e :

$$E'_2 = \frac{R'_2}{s} \cdot I'_2 + j X'_2 I'_2. \quad (6.25)$$

La fel, ecuația (6.8) devine:

$$I_1 + I'_2 = I_0. \quad (6.26)$$

În acest caz, sistemul de ecuații al mașinii asincrone devine:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1 I_1 + j X_1 I_1; \quad (6.13)$$

$$\underline{E}'_2 = \frac{R'_2}{s} \underline{I}'_2 + j X'_2 \underline{I}'_2; \quad (6.25)$$

$$I_1 + I'_2 = I_0. \quad (6.26)$$

Prin acest sistem de ecuații, obținut prin raportarea mărimilor rotorice la stator, rotorul în mișcare în care toate mărimile erau funcție de alunecare, este înlocuit cu un rotor fix, în care t.e.m. E'_2 este egală cu E_1 și cu aceeași frecvență f_1 , curentul I'_2 este de frecvență f_1 , reactanța X'_2 este corespunzătoare frecvenței f_1 , și numai rezis-

tența $\frac{R'_2}{s}$ mai este funcție de alu-

necare. Deci și la mersul în sarcină cu alunecare s , există o asemănare între funcționarea mașinii asincrone și funcționarea transformatorului.

Schema echivalentă a mașinii asincrone, avînd ecuațiile (6.13), (6.25) și (6.26) este reprezentată în figura 6.9.

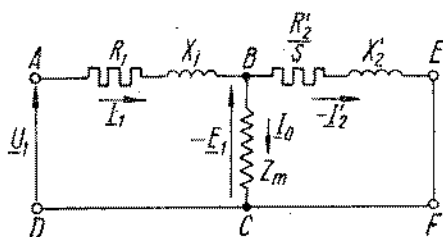


Fig. 6.9. Schema echivalentă a mașinii asincrone.

F. CUPLUL ELECTROMAGNETIC ȘI CARACTERISTICA MECANICĂ

1. EXPRESIA CUPLULUI

Cuplul electromagnetic M_e este creat de interacțiunea dintre câmpul învîrtitor produs de stator și curentul I_2 din rotor. Deoarece câmpul se rotește cu viteza unghiulară Ω_1 , puterea electromagnetică se poate scrie:

$$P_{em} = \Omega_1 M_e, \quad (6.27)$$

Puterea mecanică totală transmisă arborelui, conform relației (6.21) este:

$$P_m = P_{em} - p_{cu2} = P_{em} - 3 R_2 I_2^2. \quad (6.28)$$

Dar puterea mecanică totală poate fi scrisă sub forma:

$$P_m = \Omega M_e = (1 - s) \Omega_1 M_e. \quad (6.29)$$

Înlocuind în relația (6.28) rezultă:

$$(1 - s) \Omega_1 M_e = \Omega_1 M_e - 3 R_2 I_2^2,$$

de unde:

$$M_e = \frac{3 R_2 I_2^2}{s \Omega_1}. \quad (6.30)$$

Dacă se neglijează pierderile mecanice prin frecări, deci cuplul produs prin frecări, cuplul util M este aproximativ egal cu cuplul electromagnetic:

$$M \simeq M_e = \frac{3 R_2 I_2^2}{s \Omega_1}. \quad (6.31)$$

Expresia generală a cuplului (6.31) poate fi adusă la o formă simplă, mult folosită în analiza funcționării mașinii asincrone:

$$M = \frac{2 M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}, \quad (6.32)$$

în care M_k este cuplul maxim, cu valoarea:

$$M_k = \frac{3 U_1^2}{2 \Omega_1 [R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}]}, \quad (6.33)$$

iar s_k este alunecarea la care cuplul este maxim, numită și *alunecare critică*, și care are valoarea:

$$s_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (6.34)$$

2. CARACTERISTICA MECANICĂ

Caracteristica mecanică $M = f(s)$ este reprezentată în figura 6.10 și rezultă din ecuația (6.32).

La $s = 0$, cuplul este nul. Pentru valori ale alunecării cuprinse între 0 și s_k , în relația 6.32 se poate neglija termenul $\frac{s}{s_k}$, față de termenul $\frac{s_k}{s}$ și

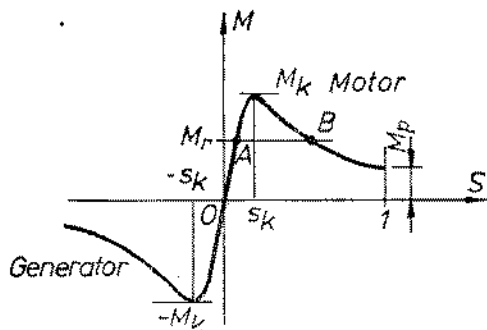


Fig. 6.10. Caracteristica mecanică a mașinii asincrone $M = f(s)$.

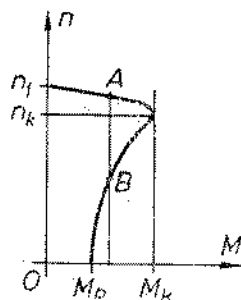


Fig. 6.11. Caracteristica mecanică a motorului asincron $n = f(M)$.

deci cuplul crește proporțional cu alunecarea. Pentru valori ale alunecării cuprinse între s_k și 1 , se poate neglija termenul $\frac{s_k}{s}$ față de $\frac{s}{s_k}$, și deci cuplul variază practic invers cu alunecarea.

Din relațiile (6.34) și (6.33) se observă că alunecarea critică depinde de rezistența R_2 , însă valoarea cuplului maxim este independentă de R_2 , proprietate care este utilizată la pornire.

Cuplul pentru $s = 1$ este cuplul de pornire al motorului.

În figura 6.10 se vede că pentru un cuplu rezistent M_r practic constant, sînt posibile două puncte de funcționare A și B , la alunecări diferite. În realitate motorul funcționează stabil numai în punctul A , deoarece dacă ar funcționa în punctul B , la o mică creștere a cuplului rezistent, cuplul activ scade și începe un proces de frînare, pînă la oprirea motorului.

Raportul $\frac{M_k}{M_n}$, în care M_n este cuplul nominal, se numește capacitatea de supraîncărcare a motorului; se ia de obicei egal cu 2.

În figura 6.10 este reprezentată și zona alunecărilor și cuplurilor negative care corespunde funcționării mașinii asincrone ca generator.

Caracteristica $n = f(M)$ din figura 6.11 se deduce din caracteristica $M = f(s)$ și relația $n = n_1(1 - s)$.

G. PORNIREA MOTOARELOR CU INELE

În scopul creșterii cuplului la pornire, care pe caracteristica naturală $M = f(s)$ poate fi mai mic decît cuplul rezistent nominal, și micșorării șocului de curent absorbit din rețea, care poate fi de 4...7 ori curentul nominal, motoarele cu inele se pornesc cu reostat de pornire.

În paragraful precedent s-a arătat că cuplul maxim M_k nu depinde de R_2 , iar alunecarea s_k crește proporțional cu R_2 . Modificînd valoarea lui R_2 prin înserierea în circuitul rotorului a unor rezistențe suplimentare, se obține o familie de curbe $M = f(s)$ ca în figura 6.12, care au același M_k însă cupluri de pornire mai mari.

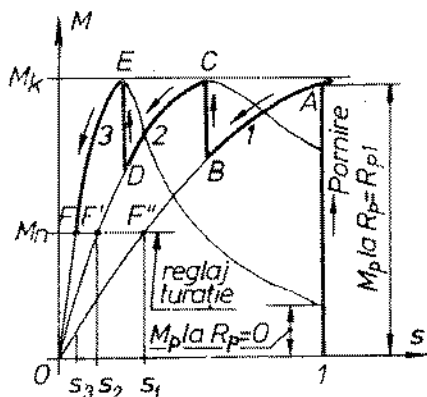


Fig. 6.12. Caracteristica mecanică la pornirea motoarelor asincrone cu inele cu ajutorul reostatului.

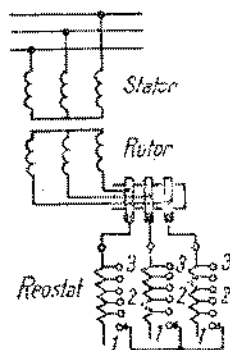


Fig. 6.13. Pornirea și reglarea turației la motoare asincrone cu inele.

În figura 6.13 este reprezentată schema unui motor, la ale cărui inele este legat un reostat trifazat în stea. Dacă bara de scurtcircuitare a reostatului s-ar găsi pe poziția 1 din figură, iar rezistența suplimentară R_p pe fiecare fază este aleasă corespunzător, pe caracteristica 1 din figura 6.12, cuplul de pornire poate fi apropiat de valoarea cuplului maxim (în punctul A).

Motorul pornește, alunecarea scade și cuplul scade conform curbei AB. Scurtcircuitînd o parte din rezistențele reostatului de pornire, punctul de funcționare sare din B pe o nouă caracteristică 2, ș.a.m.d., pînă ce bara de scurtcircuitare ajunge în poziția 3, reostatul este complet scurtcircuitat, iar punctul de funcționare urmărește caracteristica 3 pe curba EF, pînă în punctul F, cînd cuplul activ este egal cu cuplul rezistent M_n . Evident că în funcție de cuplul minim admis la pornire, reostatul poate fi construit cu mai multe trepte de pornire.

H. VARIANTE CONSTRUCTIVE ALE MOTOARELOR ASINCRONE TRIFAZATE

Construcția motorului asincron poate fi simplificată, folosindu-se în locul rotorului bobinat și cu inele colectoare, un rotor în scurtcircuit, numit și *rotor în colivie de veveriță* sau, simplu, *rotor în colivie*. Rotorul nu mai are inele colectoare, iar bobinajul este înlocuit cu bare masive de cupru sau aluminiu, câte una în fiecare creștătură, neizolate față de tole, care sînt scurtcircuitate la capete prin două inele. Colivia poate fi realizată și prin turnare sub presiune a aluminiului, care umple complet creștăturile, realizîndu-se în același timp inelele de scurtcircuitare și aripioarele de ventilație (fig. 6.4).

Aceste colivii sînt echivalente cu înfășurările trifazate bobinate, și au avantajul că produc un câmp învîrtitor cu același număr de poli ca și statorul, fiind posibil ca același rotor să funcționeze cu orice număr de poli pe stator.

Modul de funcționare și caracteristicile motoarelor în scurtcircuit sînt aceleași ca la motorul cu inele, însă prezintă dezavantajul că au un cuplu de pornire mic și nu pot fi pornite cu reostat legat la rotor.

Pentru îmbunătățirea cuplului de pornire și totodată micșorarea curentului de pornire se folosesc alte două variante constructive:

— *motoare cu dublă colivie*, care au două colivii coaxiale separate,

— *motoare cu colivie din bare înalte*.

La pornire, aceste două tipuri de mașini au un cuplu mărit, datorită fenomenului de refluxare a curentului în barele înalte sau în dublă colivie, fenomen care refulează (împinge) curentul către partea superioară a conductorului din creștătură; în momentul pornirii.

Se presupune că într-o creștătură adâncă a rotorului sînt introduse mai multe conductoare legate în paralel (fig. 6.14). Fluxul de scăpări al creștăturii se repartizează astfel încît, așa cum se vede în figura 6.14, barele din partea inferioară a creștăturii sînt înălțuite de mai multe linii de forță ale fluxului, decît barele din partea superioară a creștăturii. Aceasta înseamnă că inductivitatea de scăpări este mai mare pentru barele inferioare decît pentru cele superioare.

Valoarea curentului în rotor, conform relației (6.18) este egală cu:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{s2}^2}},$$

iar $X_{s2} = 2\pi f_2 L_{s2}$ în care L_{s2} este inductivitatea de scăpări.

Cunoscînd că inductivitatea de scăpări este mai mare la barele inferioare, relația precedentă arată că intensitatea curentului I_2 nu se repartizează egal pe conductoarele în paralel (sau pe secțiunea unui conductor masiv din creștătură), ci în conductoarele de la fundul creștăturii curentul este mai mic, iar în conductoarele din partea superioară curentul este mai mare, adică curentul este refulat (împins) în conductoarele de la partea superioară. La funcționarea normală a motorului, refluxarea nu are importanță, deoarece f_2 este mic și X_{s2} este de asemenea mic. La pornire, frecvența curenților din rotor f_2 este egală cu frecvența rețelei, X_{s2} are valoarea mai mare și fenomenul de refluxare este foarte accentuat. Refluxarea curentului la pornire este echivalentă cu micșorarea secțiunii barei din creștătură, ca și cum în creștătură ar exista numai barele din partea superioară, ceea ce conduce la o creștere a rezistenței înfășurării la pornire, avînd ca efect creșterea cuplului de pornire.

Pornirea prin conectare directă a motoarelor în scurtcircuit produce șocuri de curent de 6...8 ori mai mari decît curentul nominal. Pentru micșorarea curentului de pornire se micșorează tensiunea aplicată inițial la pornire prin următoarele metode:

● **Pornirea cu bobină trifazată de inducție.** Se folosește o bobină trifazată de inducție L , legată în schemă ca în figura 6.15. La pornire, cînd C este închis iar C_1 deschis, curentul de pornire produce o cădere de tensiune în bobină, și în acest fel motorul este alimentat cu o tensiune redusă. După pornire, se scurtcircuitază bobina cu întrerupătorul C_1 .

● **Pornire cu autotransformator trifazat.** Același efect se obține folosind un autotransformator trifazat de pornire, cu una sau mai multe prize (fig. 6.16). La pornire, C_1 și C_2 sînt închise, motorul primește o tensiune redusă

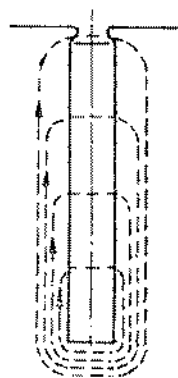


Fig. 6.14. Fluxul de scăpări al creștăturii înalte.

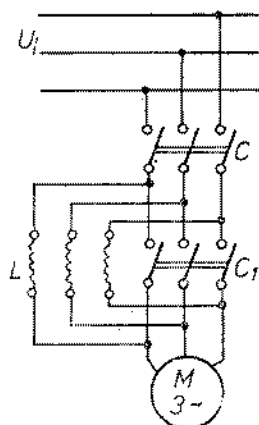


Fig. 6.15. Pornirea motoarelor asincrone cu reactanțe în stator.

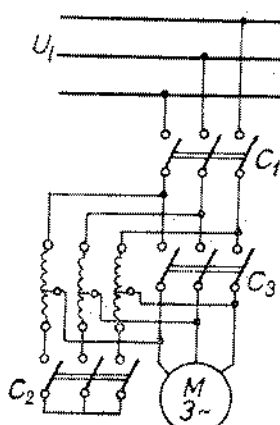


Fig. 6.16. Pornirea motoarelor asincrone cu autotransformator.

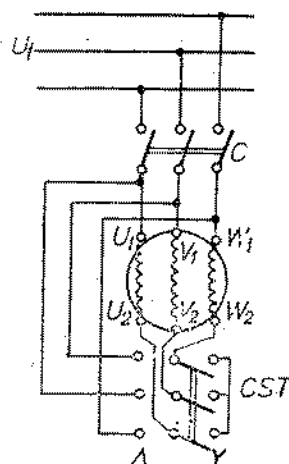


Fig. 6.17. Pornirea motoarelor asincrone cu comutator stea-triunghi.

După pornire, se deschide mai întâi C_2 , pentru a nu pune autotransformatorul în scurtcircuit și apoi se închide C_3 , alimentând motorul cu tensiunea rețelei.

● **Pornire cu comutator stea-triunghi.** Se folosește un comutator stea-triunghi, a cărui schemă simplificată este reprezentată în figura 6.17, și care la pornire cuplează la rețea înfășurarea statorului legată în stea (poziția Y în figura 6.17), iar după pornire o leagă în triunghi (poziția Δ în figura 6.17). Prin această metodă se aplică la pornire fiecărei faze o tensiune redusă de $\sqrt{3}$ ori și deci curentul pe fază este redus de $\sqrt{3}$ ori, iar în linie curentul este redus de 3 ori, față de cazul când s-ar fi cuplat direct la rețea motorul legat în triunghi. Metoda se poate aplica numai motoarelor construite să funcționeze cu înfășurarea statorului legată în triunghi, și care au scoase la placa de borne șase capete ale înfășurării.

Deoarece cuplul de pornire se reduce prin micșorarea tensiunii, motoarele în scurtcircuit sînt folosite în cazurile cînd nu este necesar un cuplu mare de pornire.

I. REGLAREA VITEZEI ȘI SCHIMBAREA SENSULUI DE rotație LA MOTOARELE ASINCRONE

1. REGLAREA VITEZEI

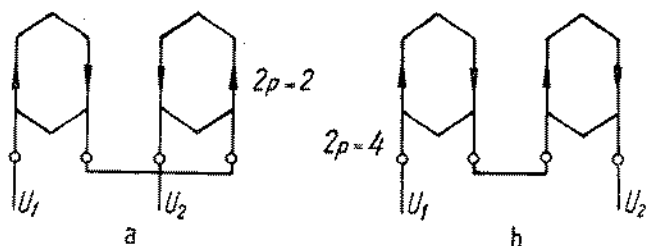
Scriind viteza de rotație a motorului asincron sub forma

$$n = n_1 (1 - s) = \frac{60 f_1}{p} (1 - s), \quad (6.35)$$

se constată că reglarea vitezei de rotație este posibilă prin:

- reglarea frecvenței;
- schimbarea numărului de poli;
- reglarea alunecării.

Fig. 6.18. Schimbarea numărului de poli prin modificarea legăturilor la înfășurare.



● **Reglarea vitezei de rotație prin reglarea frecvenței.** Metoda se poate aplica când se dispune de o instalație proprie prevăzută în acest scop, care să alimenteze motorul cu o tensiune având frecvența variabilă în limite largi. Instalația poate fi un generator sincron cu viteza reglabilă, sau un convertizor cu tuburi electronice sau tiristoare. Metoda se aplică la motoarele în scurtcircuit când este necesară reglarea vitezei simultan la mai multe motoare, de exemplu la acționarea motoarelor pentru role de laminor. Această metodă nu produce pierderi suplimentare de putere.

● **Schimbarea numărului de poli.** Această metodă constă din schimbarea numărului de poli fie prin utilizarea pe stator a două înfășurări distincte, fiecare cu un alt număr de poli, fie prin utilizarea unei singure înfășurări cu prize și schimbarea conexiunilor cu ajutorul unui comutator pentru a schimba numărul de poli.

De exemplu, în figura 6.18, este arătat modul cum prin schimbarea legăturilor la bobinaj se modifică numărul de poli din $2p = 2$ în $2p = 4$.

Metoda se aplică numai la motoarele în scurtcircuit, la care schimbarea numărului de poli se face numai la înfășurarea statorului, întrucât rotorul în colivie, așa cum s-a arătat, poate funcționa cu orice număr de poli pe stator, producând un câmp învârtitor cu același număr de poli ca și statorul. Schimbarea numărului de poli la rotorul bobinat și cu inele conduce la complicații constructive foarte mari.

În practică se realizează motoare cu 2—3 trepte de viteză, apropiate de vitezele sincrone.

Această metodă nu produce pierderi suplimentare de putere.

● **Reglarea alunecării.** Această metodă se poate aplica numai la motoarele cu rotorul bobinat și cu inele colectoare, și constă din introducerea suplimentară a unor rezistențe în circuitul rotorului, modificând prin aceasta caracteristica $M = f(s)$, și realizând pentru același cuplu o altă alunecare și deci altă turație (fig. 6.12). Pentru reglaj se folosește un reostat similar cu cel de pornire din figura 6.13, dar dimensionat corespunzător pentru a funcționa în permanență conectat în circuitul rotorului.

Această metodă realizează un reglaj continuu însă numai pentru $n_1 > n > n_k$ și are dezavantajul că produce pierderi suplimentare de putere în reostatul de reglaj.

2. SCHIMBAREA SENSULUI DE ROTAȚIE

După cum s-a arătat în paragrafele anterioare, rotorul motorului asincron se rotește în același sens cu câmpul învârtitor, iar sensul câmpului învârtitor este în ordinea 1, 2, 3 a succesiunii fazelor, adică sensul în care fazele sînt

parcurs de curenți în întârziere unul față de altul. Pentru schimbarea sensului de rotație al rotorului, trebuie să se inverseze sensul cîmpului învîrtitor.

În acest scop, este suficient să se inverseze legăturile între rețea și motor la două din borne, și prin aceasta se schimbă ordinea succesiunii fazelor în stator și deci sensul de rotație al rotorului.

J. MOTORUL ASINCRON MONOFAZAT

Motorul asincron monofazat are pe stator o înfășurare monofazată, iar rotorul în scurtcircuit.

Înfășurarea statorului produce un cîmp magnetic pulsatoriu, care se poate descompune în două cîmpuri învîrtitoare de sens contrar H_1 și H_2 , așa cum s-a arătat la capitolul 4. În acest fel, motorul monofazat poate fi echivalat cu două motoare asincrone trifazate identice, ale căror înfășurări produc cîmpuri învîrtitoare identice dar de sens contrar, și care au rotoarele montate pe același arbore.

Cîmpurile învîrtitoare H_1 și H_2 produc asupra rotorului cuplurile M_1 și M_2 , avînd caracteristicile $n = f(M_1)$ și $n = f(M_2)$ din figura 6.19. Pentru o turație oarecare n , cuplul rezultat este $M = M_1 - M_2$. Pentru $n = 0$, cuplul de pornire, așa cum se vede din figura 6.19 este $M_p = M_{p1} - M_{p2} = 0$.

Din cele de mai sus se trag următoarele concluzii:

- motorul monofazat nu are cuplu la pornire;
- dacă i se aplică un impuls exterior, motorul pornește în sensul în care i s-a dat impulsul, dezvoltînd un cuplu M conform caracteristicii $n = f(M)$;
- motorul poate funcționa în ambele sensuri, deci nu poate funcționa în regim de frînă.

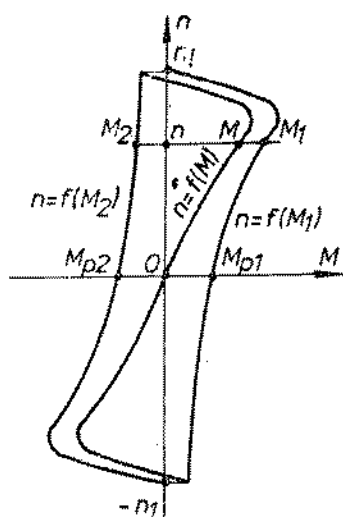


Fig. 6.19. Caracteristica mecanică a motorului asincron monofazat.

Pentru crearea unui cuplu suplimentar la pornire, motoarele monofazate sînt prevăzute cu dispozitive auxiliare, de exemplu:

— *motor asincron monofazat cu fază auxiliară* (fig. 6.20). Pe stator se așază un al doilea bobinaj (denumit fază auxiliară), care este decalat în spațiu cu $\frac{\pi}{2p}$ față de bobinajul principal. Pentru aceasta, bobinajul principal va ocupa numai 2/3 din creștăturile statorului, ca în schema din figura 4.4.

În restul de creștături se așază bobinajul fazei auxiliare. Acest bobinaj este conectat la aceeași rețea (în paralel cu bobinajul principal), totuși trebuie să fie parcurs de un curent defazat cît mai mult față de curentul din bobinajul principal, ceea ce se obține montînd în serie cu faza auxiliară o impedanță (rezistență sau condensator). Rezultatele cele mai bune se obțin cu condensator, care poate crea un defazaj apropiat de $\frac{\pi}{2}$. Datorită fazei auxi-

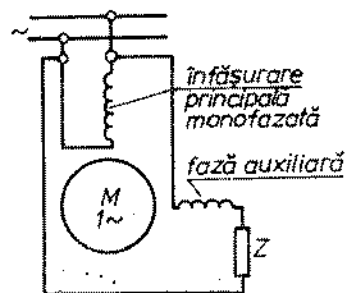


Fig. 6.20. Motor asincron monofazat cu fază auxiliară de pornire.

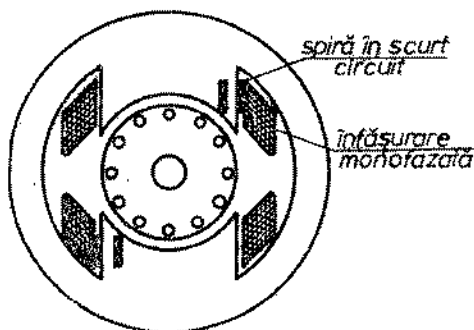


Fig. 6.21. Motor asincron monofazat cu spirală în scurtcircuit.

liare, la pornire se obține un câmp învîrtitor și un cuplu de pornire, cu atât mai mare cu cît defazajul în faza auxiliară este mai apropiat de $\frac{\pi}{2}$. După pornire, faza auxiliară se întrerupe, sau dacă impedanța este un condensator, poate rămîne în circuit, deoarece îmbunătățește factorul de putere.

— *motor asincron monofazat cu spirală în scurtcircuit.* Pe stator sînt așezate cîteva spire în scurtcircuit, care creează o anumită disimetrie în câmpurile H_1 și H_2 și deci un câmp învîrtitor și cuplu de pornire. Statorul este cu poli aparenti pe care este așezat bobinajul principal monofazat legat la rețea. Talpa polară are o creștătură, astfel încît în ea se poate așeza o spirală de cupru legată în scurtcircuit, care să cuprindă o parte din talpa polară. Fluxul alternativ produs de bobinajul principal, induce un curent alternativ în spira în scurtcircuit, care — conform legii lui Lenz — se opune cauzei care l-a produs. Ca urmare, fluxurile pe cele două porțiuni ale tălpii polare sînt diferite ca amplitudine și fază, și produc un câmp învîrtitor și un cuplu de pornire (fig. 6.21).

K. EXPLOATARE, DEFECTE ȘI REMEDIERI

● **Exploatare.** În acest paragraf se menționează numai problemele specifice mașinilor asincrone, în completare la cele cunoscute de la cap. 2.

Schemele de acționare a motoarelor asincrone trebuie să prevadă unul din sistemele de pornire arătate anterior. Motoarele de putere mai mică pot fi pornite prin cuplare directă la rețea, cu condiția ca instalația electrică de alimentare să suporte curenții de pornire.

Metoda de pornire în stea-triunghi se poate aplica numai motoarelor construite pentru a funcționa cu înfășurarea legată în triunghi la tensiunea rețelei. La sistemele de protecție cunoscute din cap 2 (contra scurtcircuitelor, suprasarcinilor și de tensiune nulă) trebuie adăugată la motoarele asincrone trifazate protecția contra funcționării în două faze. Dacă un motor asincron este alimentat numai pe două faze, sau dacă se întrerupe înfășurarea unei faze a statorului, atunci motorul nu pornește. Dacă defectul se întîmplă însă în timp ce motorul funcționează, el va continua să se rotească,

dar va absorbi de la rețea un curent mai mare. Dacă nu există un sistem de protecție care să sesizeze că motorul absoarbe curent numai prin două faze, există pericolul supraîncălzirii și arderii izolației înfășurării.

● **Defecte și remedieri.** Defectele bobinajelor de curent alternativ sînt:

— **Scurtcircuit între spire.** Se poate datora unei străpungeri a izolației conductorului sau unui defect din fabricație. Spirele scurtcircuitate aflîndu-se într-un cîmp alternativ se încălzesc puternic și se distruge izolația bobinei. Mașina cu un astfel de defect trebuie rebobinată total sau numai prin înlocuirea bobinei defecte.

— **Scurtcircuit între faze,** prin străpungera izolației între faze, fie la capetele de bobine, fie în creștături la bobinajele în două straturi cu pas scurtat. Defectul provoacă de regulă o topire locală a conductoarelor și de aceea mașina trebuie rebobinată.

— **Punerea la masă a bobinajului,** prin străpungera izolației față de masă. De regulă acest defect are loc în zonă porțiunilor introduse în creștături a bobinajelor. Uneori acest defect se poate remedia prin reparații locale, însă de cele mai multe ori la locul defectului se produce topirea spirelor și mașina trebuie rebobinată.

— **Legături greșite.** Dacă se leagă greșit fie un grup de bobine fie o fază întreagă, prin inseriere inversă, motorul pornește greu și face zgomot, iar curentul este inegal pe cele trei faze. Mașina trebuie demontată și refăcute legăturile corect după schema de bobinaj.

La rotoarele în scurtcircuit poate apărea defectul de întrerupere a barei sau o creștere a rezistenței unei bare (de exemplu, din cauza unui contact imperfect la inelul de scurtcircuitare). Acest defect produce supraîncălzirea înfășurărilor motorului. Defectul se pune în evidență, alimentînd statorul cu o tensiune redusă, fără ca rotorul să pornească, și măsurînd curenții pe faze. Dacă la schimbarea poziției rotorului, variază curenții absorbiți de stator, înseamnă că există un defect în barele rotorului.

Față de cele cunoscute de la cap. 2, trebuie menționat că din cauza întrefierului mai mic, la mașina asincronă poate apărea mai des defectul de frecare a rotorului de stator, din cauza uzurii lagărelor sau alt defect mecanic

APLICAȚII ȘI PROBLEME

1. Un motor asincron trifazat cu $2p=4$, alimentat de la o rețea cu frecvența $f_1=50$ Hz, are turația $n=1\,425$ rot/min. Să se calculeze alunecarea și frecvența curenților induși în rotor.

Răspuns: $n_1 = \frac{60 f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1\,500$ rot/min; $s = \frac{n_1 - n}{n_1} = 0,05$ sau 5%. Frecvența din rotor $f_2 = sf_1 = 0,05 \cdot 50 = 2,5$ Hz.

2. Un motor asincron trifazat cu $2p=2$, alimentat de la o rețea cu frecvența $f_1=50$ Hz, funcționează la sarcina nominală cu alunecarea $s=3\%$. Să se calculeze turația nominală a motorului.

Răspuns: $n_1 = 3\,000$; $n = n_1 - sn_1 = 3\,000 - 0,03 \cdot 3\,000 = 2\,910$ rot/min.

3. Un motor asincron trifazat are următoarele caracteristici nominale: $P = 30$ kW; $U = 220/380$ V; $\cos\varphi=0,8$; $\eta=0,9$. Să se calculeze curentul absorbit din rețea și curentul pe fază.

Răspuns: din relațiile $P_a = \sqrt{3} U_l I_l \cos\varphi$ și $\eta = P/P_a$ se deduce $I = 24\,084/U$.

Dacă rețeaua are $U_l = 220$ V, motorul funcționează în triunghi:

$$I_l = 109,4 \text{ A, iar } I_f = 63,2 \text{ A.}$$

Dacă rețeaua are $U_l = 380$ V, motorul funcționează în stea:

$$I_l = I_f = 63,2 \text{ A.}$$

4. Un motor asincron trifazat are următoarele caracteristici: $P = 20$ kW; $U = 380$ V, $I = 40$ A, $\cos \varphi = 0,85$. Să se calculeze randamentul.

Răspuns: 0,89.

5. Un motor asincron trifazat cu $2p=4$, alimentat de la o rețea cu frecvența $f_1=50$ Hz, are turația 1 440 rot/min și capacitatea de supraîncărcare $M_k/M_n = 2$. Să se determine alunecarea critică și raportul M_p/M_n în care M_g este cuplul de pornire.

Răspuns: $n_1 = 1\,500$ rot/min; $s_n = 0,04$. Din relația (6.32) se deduce:

$$\frac{s_n}{s_k} + \frac{s_k}{s_n} = \frac{2 M_k}{M_n} \text{ sau } s_k^2 - 0,16 s_k + 0,0016 = 0.$$

Se găsește $s_k = 0,149282$ (soluția $s_k = 0,010718$ nu are sens, deoarece trebuie ca $s_k > s_n$). Pentru calculul cuplului de pornire se folosește tot relația (6.32), în care $M = M_p$, iar $s=1$; se găsește $\frac{M_p}{M_n} = 0,584$.

REZUMAT

● Elemente constructive de bază:

Statorul	{ carcasa pachetul cu tole înfășurarea statorului	
Rotorul	{ cu inele	{ — arbore — pachet de tole — înfășurarea rotorului — inele colectoare
		{ — arbore — pachet de tole — colivie

Ventilatorul

Portperiile (numai la motoare cu inele)

Cutia de borne (la motoare cu inele sînt două cutii de borne)

● Alunecarea:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}.$$

● Pulsațiile, vitezele unghiulare, turațiile și frecvențele la funcționarea în sarcină:

mărimea	înfășurarea statorului	cîmpul învîrtilor al statorului	rotorul	înfășurarea rotorului	cîmpul învîrtilor al rotorului	
					față de rotor	față de stator
ω	$\omega_1 = 2\pi f_1$	—	—	$\omega_2 = s\omega_1$	—	—
f	f_1	—	—	$f_2 = sf_1$	—	—
Ω	—	$\Omega_1 = \frac{\omega_1}{p}$	$\Omega = \Omega_1(1-s)$	—	$\Omega_2 = s\Omega_1$	$\Omega_1 = \Omega + \Omega_2$
n	—	$n_1 = \frac{60 f_1}{p}$	$n = n_1(1-s)$	—	$n_2 = sn_1$	$n_1 = n + n_2$

● T.e.m. induse:

$$E_1 = 4,44 k_{w1} f_1 \omega_1 \Phi_m;$$

$$E_{s2} = 4,44 k_{w2} f_2 \omega_2 \Phi_m = s E_2.$$

● Ecuațiile de funcționare raportate la frecvența statorului:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = -E_1 + R_1 \underline{I}_1 + j X_1 \underline{I}_1; \\ E_2 = \frac{R_2}{s} \underline{I}_2 + j X_2 \underline{I}_2; \\ \underline{I}_1 + \frac{k_{w2} \omega_2}{k_{w1} \omega_1} \underline{I}_2 = \underline{I}_0. \end{cases}$$

● Curentul în rotor:

$$\underline{I}_2 = \frac{s E_2}{\sqrt{R_2^2 + s^2 X_2^2}}; \quad \text{tg } \varphi_2 = \frac{s X_2}{R_2}.$$

● Ecuațiile de funcționare raportate la numărul de spire ale înfășurării primare:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + j X_1 \underline{I}_1; \text{ în care: } \begin{cases} \underline{E}_2' = k_e E_2; \\ \underline{I}_2' = \frac{I}{k_e} \underline{I}_2; \\ R_2' = k_e^2 R_2; \\ X_2' = k_e^2 X_2; \\ k_e = \frac{k_{w1} \omega_1}{k_{w2} \omega_2}. \end{cases} \\ \underline{E}_2' = \frac{R_2'}{s} \underline{I}_2' + j X_2' \underline{I}_2'; \\ \underline{I}_1 + \underline{I}_2' = \underline{I}_0; \end{cases}$$

● Randamentul motorului asincron:

$$\eta = \frac{P}{P_a} = \frac{\sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi - \Sigma p}{\sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi}.$$

● Cuplul:

$$M = \frac{3 R_2 I_2^2}{s \Omega_1} = \frac{2 M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}.$$

● Pornirea motoarelor asincrone:

— Cu reostat legat la înfășurarea rotorului (numai la motoare cu inele)

- Prin reducerea tensiunii aplicate în momentul pornirii
- $\left\{ \begin{array}{l} \text{— cu reactanțe în stator} \\ \text{— cu autotransformator} \\ \text{— cu comutator stea-triunghi} \end{array} \right.$

● **Reglarea vitezei:**

- Prin alimentare cu frecvență variabilă.
- Prin schimbarea numărului de poli.
- Cu reostat legat la inele (numai la motoare cu inele).

● **Schimbarea sensului de rotație:**

- Prin inversarea a două faze la alimentare.

● **Motor asincron monofazat:**

- Cu spiră în scurtcircuit.
- Cu fază auxiliară.

ACȚIONĂRI

CAPITOLUL 7

ECUAȚIA FUNDAMENTALĂ A MIȘCĂRII

A. NOȚIUNI INTRODUCTIVE

● O instalație de acționare electrică este formată din mai multe părți componente: *mașină de lucru* sau mașina ce trebuie acționată, *motorul electric* care acționează sau pune în mișcare mașina de lucru, *organul de transmisie* care face legătura dintre motorul electric de acționare și mașina de lucru și *instalația de comandă* a întregului ansamblu.

Notă. Uneori motorul electric de acționare poate fi înlocuit cu un motor hidraulic sau pneumatic, în care caz se spune că se realizează o acționare hidraulică sau pneumatică.

Notă. În anumite situații, legătura dintre motorul de acționare și mașina de lucru ce face direct și în acest caz organul de transmisie poate lipsi.

● Ecuația fundamentală a mișcării.

Mașinile de lucru sînt de o diversitate foarte mare și anume, ele pot fi: mașini-unelte pentru prelucrarea metalelor, mașini de ridicat sau transportat, pompe, ventilatoare, laminoare de diferite tipuri, calandre, malaxoare, ferăstraie, mașini agricole de diferite tipuri etc. *Indiferent de tipul mașinii de lucru considerate*, pentru ca ea să poată realiza lucrul util sau produsul pentru care este folosită, *trebuie să consume o anumită cantitate de energie, pentru a învinge forțele ce apar în timpul procesului de lucru.*

Forțele care trebuie învinse în timpul procesului sînt: *forțe utile* (f_u), necesare pentru realizarea produsului, pentru deplasarea sau ridicarea unei sarcini etc. și *forțe de frecare* (f_f), ce apar în lagăre sau în diferite angrenaje ale mașinii de lucru, forțe de frecare cu aerul etc. Motorul de acționare trebuie să învingă forțele care se opun mișcării sale, datorită cărui fapt acestea se numesc *forțe rezistente* ($F_r = f_u + f_f$).

Dar, în afară de aceste forțe, motorul mai trebuie să învingă și alte forțe, ce se datoresc inerției pieselor în mișcare ale întregii instalații de acționare (motor, organ de transmisie, mașină de lucru). Aceste forțe apar în timpul procesului de pornire, de oprire, de inversare a sensului de rotație, sau ori de cîte ori are loc modificarea vitezei de lucru a instalației de acționare. Datorită acestui fapt, aceste forțe se numesc *forțe rezistente dinamice* (F_d). Pentru a le deosebi de forțele F_u , forțele rezistente F_r se mai numesc *forțe rezistente statice*.

Prin urmare, pentru ca un motor de acționare să poată pune în mișcare și deci să acționeze o mașină de lucru, el trebuie să dezvolte o forță F egală cu suma tuturor forțelor rezistente statice și dinamice:

$$F = F_s + F_d. \quad (7.1)$$

Această relație, care pune în evidență legătura dintre forțele rezistente date de mașina de lucru și forța pe care trebuie să o dezvolte motorul pentru realizarea mișcării, se numește **ecuația fundamentală a mișcării**.

B. FORME ALE ECUAȚIEI FUNDAMENTALE A MIȘCĂRII

1. ECUAȚIA FUNDAMENTALĂ A MIȘCĂRII PENTRU ACȚIONĂRI CU MIȘCARE LINIARĂ

Ecuația fundamentală a mișcării, pusă sub forma cu totul generală (7.1), este puțin utilizabilă practic. Pentru a putea fi folosită în vederea rezolvării unor probleme de acționare, este necesar ca termenii acestei ecuații să fie explicitați, punându-se în evidență factorii de care depind. Astfel, se știe că forța dinamică este

$$F_d = ma, \quad (7.2)$$

unde m este masa totală a organelor în mișcare ale sistemului de acționare, iar $a = \frac{dv}{dt}$ este accelerația liniară ce se imprimă organelor în mișcare, v fiind viteza liniară a acestora. Se poate scrie deci $F_d = m \frac{dv}{dt}$.

Observație. Această formă arată că forța dinamică apare numai atunci cînd viteza liniară v variază. Atunci cînd sistemul de acționare funcționează în regim stabilizat, deci $v = \text{const.}$, derivata $\frac{dv}{dt} = 0$ și în consecință, forța dinamică $F_d = 0$. Se poate spune, deci, că atunci cînd sistemul de acționare lucrează în regim stabilizat, motorul dezvoltă o forță $F = F_s$, care învinge numai forța rezistentă statică.

Ținînd cont de expresia (7.2) și de dependența accelerației de viteză, ecuația fundamentală a mișcării (7.1) se mai scrie și sub forma:

$$F = F_s + m \frac{dv}{dt}. \quad (7.3)$$

Forma (7.3) se aplică în cazul unor acționări cu mișcare liniară.

2. ECUAȚIA FUNDAMENTALĂ A MIȘCĂRII PENTRU ACȚIONĂRI CU MIȘCARE DE ROTAȚIE

Deoarece marea majoritate a acționărilor și în special a acționărilor electrice sînt cu mișcare de rotație, este necesar ca în locul forțelor, în ecuația (7.3) să intervină cupluri.

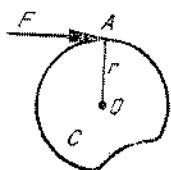


Fig. 7.1. Cuplul produs de forța F .

Pentru aceasta, se ține seama că, pentru ca un corp oarecare C să fie rotit în jurul unui punct O , numit *centru de rotație* (fig. 7.1), este necesar ca într-un punct oarecare A al corpului, situat la distanța r de centrul de rotație O , să i se aplice o forță F . Produsul $M = Fr$ se numește *cuplu de rotație*. În ipoteza că toate masele pieselor în mișcare de rotație sînt concentrate la aceeași distanță r de centrul de rotație, ecuația de mișcare (7.1) se poate scrie sub forma $F \cdot r = F_s \cdot r + F_d \cdot r$, sau

$$M = M_s + M_d, \quad (7.4)$$

unde: M este cuplul dezvoltat de motor pe arborele său;

M_s — cuplul rezistent static, datorat forțelor rezistente statice;

M_d — cuplul rezistent dinamic, datorat forțelor rezistente dinamice.

Relația (7.4) reprezintă ecuația fundamentală a mișcării în cazul rotației. Ținînd cont de relația (7.2) și de faptul că $M_d = F_d \cdot r$, rezultă

$$M_d = m \cdot a \cdot r = m \cdot r \cdot \frac{dv}{dt}.$$

Înlocuind viteza liniară v în funcție de cea unghiulară Ω , adică $v = r\Omega$, rezultă $\frac{dv}{dt} = r \frac{d\Omega}{dt}$, și deci

$$M_d = mr^2 \frac{d\Omega}{dt}.$$

Pe de altă parte, se știe că $J = mr^2$ reprezintă *momentul de inerție* al unui corp în mișcare de rotație, deci $M_d = J \frac{d\Omega}{dt}$.

Rezultă deci că ecuația fundamentală a mișcării dată de relația (7.4) se mai poate scrie sub forma:

$$M = M_s + J \frac{d\Omega}{dt}, \quad (7.5)$$

În relația (7.5) apare viteza unghiulară Ω , măsurată în radiani/secundă. În practică însă, vitezele diferitelor mașini de lucru și ale motoarelor sînt date în rotații pe minut.

● Pentru aplicarea relației (7.5) la rezolvarea unei probleme de acționare, este necesar ca viteza motorului n rot/min să fie transformată în viteză unghiulară Ω rad/s. Practic, însă, este mult mai comod ca relația (7.5) să fie astfel transformată încît în ea să apară direct viteza n rot/min.

Pentru aceasta se ține seama că $\Omega = \frac{\pi n}{30}$, deci $\frac{d\Omega}{dt} = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{dn}{dt}$. Pe de altă parte, $J = mr^2$, iar $m = \frac{G}{g}$, unde G este greutatea totală a corpului în mișcare de rotație, iar $g = 9,81$ m/s² este accelerația gravitației; rezultă că $J = \frac{G}{g} \cdot r^2$ și înlocuind raza r cu diametrul $\frac{D}{2}$, se observă că $J = \frac{G}{g} \cdot \frac{D^2}{4}$ și deci rezultă că cuplul rezistent dinamic devine:

$$M_d = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = \frac{G}{g} \cdot \frac{D^2}{4} \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}, \quad (7.6)$$

deoarece $\frac{\pi}{120 \cdot g} = \frac{\pi}{120 \cdot 9,81} = \frac{1}{374,9} \cong \frac{1}{375}$.

În final deci, ecuația fundamentală a mișcării dată de relația (7.5) se poate scrie sub forma

$$M = M_s + \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}, \quad (7.7)$$

formă sub care este folosită cel mai des în calculele practice. Produsul GD^2 care apare în relația (7.7) se numește *moment de volant* al corpului în mișcare de rotație. De obicei, pentru motoarele electrice momentul de volant este dat în cataloagele de motoare electrice. Pentru piesele în mișcare de rotație ale mașinilor de lucru și ale organelor de transmisie, momentul de volant se determină prin calcul.

C. UNITĂȚI DE MĂSURĂ PENTRU CUPLU, MOMENT DE INERȚIE ȘI MOMENT DE VOLANT

● Unitatea de măsură *pentru cuplu în sistemul internațional de unități* (SI) este newton-metrul Nm. Pentru *momentul de inerție* $J = \frac{G}{g} \cdot r^2$, unitatea de măsură în SI este $\frac{Ns^2}{m} \cdot m^2 = Nms^2$. Pentru *momentul de volant*, unitatea de măsură este Nm^2 .

● Deoarece în unele manuale de specialitate unitățile de măsură pentru mărimile considerate se mai dau încă în **sistemul tehnic de unități (ST)**, în cele ce urmează se indică și acestea. Unitatea de măsură pentru forță în ST este kilogramul forță (kgf), iar pentru lungimi este metrul (m), deci unitatea de măsură *pentru cuplu* este $kgf \cdot m$. În același sistem de unități, *pentru momentul de inerție* unitatea de măsură este $kgf \cdot m \cdot s^2$, iar *pentru momentul de volant* — $kgf \cdot m^2$. Reamintim că $1 \text{ kgf} = 9,81 \text{ N}$, sau $1 \text{ N} = 0,102 \text{ kgf}$.

D. RAPORTAREA CUPLULUI REZISTENT STATIC LA ARBORELE MOTORULUI

Formele scrise anterior pentru ecuația fundamentală de mișcare sînt valabile atît timp cît motorul de acționare este cuplat direct pe arborele mașinii de lucru, sau atît timp cît viteza mașinii de lucru este aceeași ca și cea a motorului. Atunci cînd între cele două elemente se interpune un organ de transmisie care face ca viteza mașinii de lucru să difere de cea a motorului de acționare, formele menționate pentru ecuația fundamentală a mișcării sînt valabile numai dacă toate cuplurile care intervin se raportează la o singură viteză, fie a motorului, fie a mașinii de lucru.

În adevăr, se știe că pentru a antrena mașina de lucru, motorul dezvoltă la arborele său un cuplu M care, înmulțit cu viteza unghiulară a motorului, dă tocmai *puterea pe arborele motorului*:

$$P_m = M \cdot \Omega.$$

În mod analog, pentru mașina de lucru, cuplul rezistent static M_s , înmulțit cu viteza unghiulară Ω_s a arborelui mașinii de lucru dă *puterea pe arborele acesteia*:

$$P_s = M_s \cdot \Omega_s.$$

● Neglijînd pierderile ce au loc în organul de transmisie, în ipoteza unui cuplu rezistent dinamic $M_d = 0$, deci a funcționării sistemului în *regim stabilizat*, motorul va trebui să dezvolte o putere egală cu cea cerută pe arborele mașinii de lucru, deci:

$$P_m = P_s, \text{ sau } M \cdot \Omega = M_s \cdot \Omega_s, \text{ de unde rezultă că}$$

$$M = M_s \cdot \frac{\Omega_s}{\Omega}.$$

Notînd raportul vitezelor $\frac{\Omega}{\Omega_s} = i$, rezultă că

$$M = M_s \cdot \frac{1}{i},$$

în care i este *raportul de transmisie* al organului de transmisie dintre motor și mașina de lucru. Deoarece cuplul M astfel calculat trebuie să învingă cuplul rezistent de pe arborele mașinii de lucru pentru ca aceasta să poată fi antrenată de motor, se poate spune că acest cuplu este egal cu *cuplul rezistent static raportat la arborele motorului* și se notează cu M_r . Rezultă deci că

$$M_r = M_s \cdot \frac{1}{i}.$$

● În realitate, în organul de transmisie au loc pierderi, datorate în special frecărilor și care se evidențiază prin *randamentul transmisiei*, notat cu η . Ținîndu-se seama de randamentul transmisiei, deci de faptul că motorul va trebui să dezvolte o putere mai mare decît puterea pe arborele mașinii de lucru, pentru a acoperi pierderile din organul de transmisie, rezultă că

$$P_m \cdot \eta = P_s \quad \text{sau} \quad M \cdot \Omega \cdot \eta = M_s \Omega_s,$$

de unde rezultă că cuplul rezistent static raportat la arborele motorului va fi:

$$M_r = M_s \cdot \frac{1}{i} \cdot \frac{1}{\eta}. \quad (7.8)$$

E. RAPORTAREA MOMENTELOR DE INERȚIE (SAU DE VOLANT) LA ARBORELE MOTORULUI

Dacă se consideră că numai pentru învingerea cuplului dinamic motorul de acționare dezvoltă o putere $P'_m = M_{dr} \Omega$, și că puterea dinamică pe arborele mașinii de lucru este $M_d \Omega_s$, neglijînd pierderile în organul de transmisie, se poate scrie egalitatea celor două puteri, adică:

$$M_{dr} \Omega = M_d \Omega_s.$$

De aici rezultă că:

$$M_{dr} = M_d \frac{\Omega_s}{\Omega} = M_d \frac{1}{i}. \quad (7.9)$$

Ținându-se seama că energia elementară pe arborele mașinii de lucru este dată de relația:

$$dA = M_s \Omega_s dt = J \Omega_s d\Omega_s,$$

rezultă că:

$$M_s = J \frac{d\Omega_s}{dt}. \quad (7.10)$$

În mod analog, pe arborele motorului:

$$dA_r = M_{sr} \Omega dt = J_r \Omega d\Omega,$$

de unde:

$$M_{sr} = J_r \frac{d\Omega}{dt}. \quad (7.11)$$

Înlocuind valorile din relațiile (7.10) și (7.11) în relația (7.9), rezultă că:

$$J_r \frac{d\Omega}{dt} = J \frac{d\Omega_s}{dt} \frac{1}{i},$$

sau:

$$J_r = J \frac{d\Omega_s}{d\Omega} \cdot \frac{1}{i}.$$

Înlocuind $\frac{d\Omega_s}{d\Omega} = \frac{\Omega_s}{\Omega} = \frac{1}{i}$, și ținând seama și de randamentul transmisiei, rezultă că:

$$J_r = J \frac{1}{i^2} \cdot \frac{1}{\eta}. \quad (7.12)$$

Dar, în această relație J este momentul de inerție al tuturor pieselor în mișcare, incluzînd și rotorul motorului. Deoarece rotorul se rotește cu viteza unghiulară Ω , momentul său de inerție nu mai trebuie raportat la arborele motorului. Notînd cu J_m momentul de inerție al rotorului motorului și cu J_s momentul de inerție al mașinii de lucru, rezultă că $J = J_m + J_s$. Momentul de inerție total raportat la arborele motorului va fi

$$J_r = J_m + J_s \frac{1}{i^2} \cdot \frac{1}{\eta}. \quad (7.13)$$

În mod analog se demonstrează că momentul de volant total raportat la arborele motorului este dat de relația

$$(GD^2)_r = (GD^2)_m + (GD^2) \cdot \frac{1}{i^2} \cdot \frac{1}{\eta}. \quad (7.14)$$

deoarece este clar că $\frac{\Omega}{\Omega_s} = \frac{n}{n_s} = i$, unde n_s este viteza în rct/min a arborelui mașinii de lucru.

Dacă mașina de lucru este de construcție mai complexă, avînd de exemplu trei arbori ce se rotesc cu vitezele n_1, n_2, n_3 , rapoartele de transmisie dintre motor și fiecare arbore fiind i_1, i_2, i_3 , iar randamentele transmisiilor respective sînt η_1, η_2, η_3 , momentul de volant total raportat la arborele motorului va fi:

$$(GD^2)_r = (GD^2)_m + (GD^2)_1 \cdot \frac{1}{i_1^2 \eta_1} + (GD^2)_2 \cdot \frac{1}{i_2^2 \eta_2} + (GD^2)_3 \cdot \frac{1}{i_3^2 \eta_3}. \quad (7.15)$$

F. RAPORTAREA MIȘCĂRII DE TRANSLAȚIE LA MIȘCAREA DE ROTAȚIE

În practică se întâlnesc adeseori mașini de lucru la care, în afara maselor în mișcare de rotație, există și mase în mișcare de translație. Pentru asemenea mașini de lucru este necesar să se țină seama și de cuplul rezistent dinamic suplimentar ce trebuie învins de motorul de acționare, pentru a imprima maselor în mișcare de translație accelerația dorită. Pentru determinarea acestui cuplu suplimentar, este necesar ca masele în mișcare de translație să fie înlocuite cu mase fictive cu mișcare de rotație, care produc același efect raportat la arborele motorului.

În acest scop, se consideră că energia cinetică a masei m în mișcare de translație, cu viteza liniară v , $A_t = \frac{mv^2}{2}$, este egală cu energia cinetică a maselor fictive în mișcare de rotație cu viteza Ω egală cu a motorului și cu moment de inerție fictiv J'_r , adică $A_r = J'_r \frac{\Omega^2}{2}$.

Dacă se consideră că transmisia de energie se face fără pierderi, rezultă că $J'_r \frac{\Omega^2}{2} = \frac{mv^2}{2}$, de unde se obține $J'_r = \frac{mv^2}{\Omega^2}$, iar în cazul în care se iau în considerare și pierderile în transmisie, rezultă că

$$J'_r = \frac{mv^2}{\Omega^2 \cdot \eta} \quad (7.16)$$

Pentru a se obține *momentul de volant fictiv* raportat la arborele motorului, în relația (7.16) se înlocuiește $J = \frac{GD^2}{4g}$ și $m = \frac{G}{g}$ și se obține

$$(GD^2)'_r = \frac{4Gv^2}{\Omega^2 \eta} \quad (7.17)$$

Dacă o mașină de lucru posedă atît mase în mișcare de rotație, cît și mase în mișcare de translație, atunci *momentul de volant total raportat la arborele motorului* se poate scrie

$$(GD^2)_r = (GD^2)_m + (GD^2)_1 \cdot \frac{1}{i^2 \cdot \eta_{11}} + \frac{4Gv^2}{\Omega^2 \cdot \eta_{12}} \quad (7.18)$$

unde:

- $(GD^2)_1$ este momentul de volant total datorat maselor în mișcare de rotație;
- η_1 — randamentul transmisiei dintre motor și arborele mașinii de lucru, cu mișcare de rotație;
- η_2 — randamentul organului de transformare a mișcării liniare în mișcare de rotație.

G. DISCUTAREA ECUAȚIEI FUNDAMENTALE A MIȘCĂRII

Una dintre utilizările principale ale ecuației fundamentale a mișcării este **determinarea cuplului și deci și a puterii motorului de acționare**. Din această ecuație se observă că valoarea și semnul cuplului dezvoltat de motor

sînt date de valorile și semnele cuplurilor rezistente static și dinamic, raportate la arborele motorului de acționare.

În legătură cu **semnele cuplurilor** se fac următoarele **convenții**:

— *cuplul dezvoltat de motor* se consideră *pozitiv* atunci cînd motorul lucrează în sensul învingerii forțelor rezistente (statice și dinamice) date de mașina de lucru și *negativ* atunci cînd motorul lucrează în sensul opririi sau frînării mașinii de lucru;

— *cuplurile rezistențe* (static și dinamic) se consideră *pozitive* atunci cînd se opun mișcării date de motor, deci cînd motorul lucrează în sensul învingerii lor, și *negative* atunci cînd mișcarea ajută motorului, deci lucrează în același sens cu motorul.

Pentru a urmări mai ușor modul cum pot evolua semnele cuplurilor menționate, se va considera un exemplu concret: fie un motor electric m (fig. 7.2) care acționează toba T , pe care se înfășoară cablul de ridicare a unei sarcini $S = S_u + S_0$, formată din sarcina utilă S_u și greutatea dispozitivului de prindere a sarcinii S_0 . Pentru simplificare se consideră că motorul m este cuplat direct cu arborele țabei T .

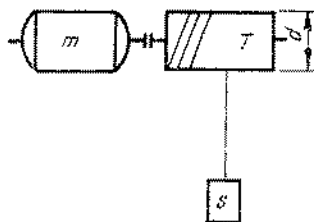


Fig. 7.2. Mecanism de ridicare.

Ansamblul din figura 7.2 poate executa diferite operații și anume: *ridicarea sarcinii S* ; *coborîrea sarcinii S* ; *ridicarea dispozitivului în gol*, adică a sarcinii S_0 , *coborîrea dispozitivului în gol* (S_0). Fiecare dintre aceste operații se execută în trei timpi distincți: *pornirea*, timp în care viteza motorului crește de la zero pînă la viteza de mers stabilizat n ; *funcționarea în regim stabilizat*, cînd viteza $n = \text{const.}$; *oprirea*, timp în care viteza scade de la n la zero.

Discutarea ecuației fundamentale a mișcării constă în a stabili valorile și semnele cuplurilor ce intervin pentru fiecare operație și timp de funcționare în parte.

1. VALORILE CUPLURILOR REZISTENTE

● În cazul *ridicării și coborîrii sarcinii totale S* , **cuplul rezistent static** este $M_{s1} = S \cdot \frac{d}{2}$, unde d este diametrul tobei T . În cazul *ridicării și coborîrii sarcinii în gol* (S_0), cuplul rezistent static este $M_{s2} = S_0 \cdot \frac{d}{2}$ și deoarece $S > S_0$, rezultă că $M_{s1} > M_{s2}$.

● **Cuplul rezistent dinamic** $M_d = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$ diferă de asemenea în cele două cazuri considerate, deoarece momentul de volant GD^2 este mai mare în cazul *ridicării și coborîrii sarcinii totale S* , decît în cazul *funcționării în gol* (S_0). Cuplul rezistent dinamic în cele două situații poate diferi și prin accelerațiile diferite care pot să apară. Se observă de asemenea că în regim stabilizat $M_d = 0$, deoarece $n = \text{const.}$ și deci $\frac{dn}{dt} = 0$.

2. SEMNELE CUPLURILOR REZISTENTE

În privința semnelor cuplurilor rezistente, se observă următoarele:

● **Cuplurile rezistente statice** sînt întotdeauna pozitive *la ridicarea sarcinii*, deoarece se opun cuplului dezvoltat de motor. Aceste cupluri sînt, în general, negative *la coborîrea sarcinii*, deoarece cuplul rezistent static ajută motorul, cuplat la rețeaua de alimentare în sensul coborîrii. Ele pot fi uneori — chiar la coborîre — și pozitive, și anume atunci cînd cuplul util — M_{s2} de coborîre a sarcinii în gol este mai mic, în valoare absolută, decît cuplul de frecări M_f , adică $|-M_{s2}| < M_f$.

● **Cît privește cuplul rezistent dinamic**, acesta va fi întotdeauna pozitiv *la pornire*, indiferent de sarcină, deoarece în acest caz motorul dezvoltă un cuplu suplimentar de accelerare. *La oprire*, cuplul rezistent dinamic este negativ, deoarece viteza scade și deci este vorba de o accelerație negativă.

3. VALOAREA ȘI SEMNUL CUPLULUI MOTORULUI

În rezumat, pentru exemplul considerat, rezultă următoarele situații distincte:

● **La ridicarea sarcinii totale:**

— *la pornire*: $M = M_{s1} + M_{a1}$, cuplul motorului este pozitiv;
— *în regim stabilizat*: $M = M_{s1}$, cuplul motorului este pozitiv;
— *la oprire*: $M = M_{s1} - M_{a1}$, cuplul motorului este negativ numai dacă $|M_{a1}| > M_{s1}$.

● **La coborîrea sarcinii totale:**

— *la pornire*: $M = -M_{s1} + M_{a1}$, cuplul motorului este pozitiv numai dacă $|M_{s1}| < M_{a1}$;
— *în regim stabilizat*: $M = -M_{s1}$, deci cuplul motorului este negativ;
— *la oprire*: $M = -M_{s1} - M_{a1}$, deci cuplul motorului este negativ.

● **La ridicarea sarcinii în gol:**

— *la pornire*: $M = M_{s2} + M_{a2}$, cuplul motorului este pozitiv;
— *în regim stabilizat*: $M = M_{s2}$, cuplul motorului este pozitiv;
— *la oprire*: $M = M_{s2} - M_{a2}$, cuplul motorului este negativ numai dacă $|M_{a2}| > M_{s2}$.

● **La coborîrea sarcinii în gol:**

— *la pornire*: $M = -M_{s2} + M_{a2}$, cuplul motorului este pozitiv numai dacă $|M_{s2}| < M_{a2}$;
— *în regim stabilizat*: $M = -M_{s2}$, cuplul motorului este negativ; el poate fi și pozitiv dacă $|-M_{s2}| < M_f$;
— *la oprire*: $M = -M_{s2} - M_{a2}$, cuplul motorului este negativ.

Exemplul 7.1. O mașină de lucru 3 (fig. 7.3) dezvoltă un cuplu rezistent total $M = 145 \text{ Nm}$ la o viteză de rotație $n_1 = 800 \text{ rot/min}$. Să se determine cuplul pe care trebuie să-l dezvolte motorul 1 pe arbore, cunoscîndu-se: viteza pe arborele motorului $n = 1\,000 \text{ rot/min}$, randamentul organului de transmisie $(2)\eta = 0,9$, momentul de volant al motorului împreună cu pinionul organului de transmisie de pe arborele său $(GD^2)_m = 0,2 \text{ Nm}^2$, iar al mașinii de lucru $(GD^2)_s = 1,5 \text{ Nm}^2$. Se dă accelerația $\frac{dn}{dt} = 60 \text{ rot/s}^2$.

Cunoscând vitezele de rotație ale celor doi arbori, se determină raportul de transmisie al organului de transmisie 2:

$$i = \frac{n}{n_1} = \frac{1000}{800} = 1,25$$

și, conform relației (7.8), cuplul rezistent static raportat la arborele motorului:

$$M_r = M_s \cdot \frac{1}{i} \cdot \frac{1}{\eta} = 145 \cdot \frac{1}{1,25} \cdot \frac{1}{0,9} = 128,8 \text{ Nm.}$$

Conform relației (7.14), momentul de volant total raportat la arborele motorului este:

$$(GD^2)_r = (GD^2)_m + GD^2_s \cdot \frac{1}{i^2} \cdot \frac{1}{\eta} = 0,2 + 1,5 \cdot \frac{1}{1,25^2} \cdot \frac{1}{0,9} = 2,8 \text{ Nm.}$$

Deci, cuplul pe care trebuie să-l dezvolte motorul pe arbore este:

$$M = M_r + \frac{(GD^2)_r}{375} \frac{dn}{dt} = 128,8 + \frac{2,8}{375} \cdot 3600 = 155,6 \text{ Nm.}$$

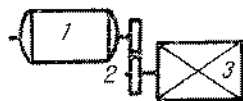


Fig. 7.3. Schema de acționare pentru aplicația 7.1.

Exemplul 7.2. Sistemul de ridicare al sarcinii $S = 2000 \text{ N}$ este format din (fig. 7.4): motorul 1, organul de transmisie 2, toba de ridicare 3 și scripetele 4. Știind că diametrul tobei $d = 0,4 \text{ m}$ să se determine cuplul rezistent static la ridicarea sarcinii și valoarea sa raportată la arborele motorului, cunoscând că viteza motorului este $n = 1400 \text{ rot/min}$, iar viteza liniară de ridicare a sarcinii este $v = 3 \text{ m/s}$. Se consideră că randamentul transmisiei $\eta = 0,9$.

Ținând seama de scripetele 4, se poate observa că pe periferia tobei 3 se aplică numai jumătate din sarcina S și deci:

$$M_s = \frac{S}{2} \cdot \frac{D}{2} = 1000 \cdot 0,2 = 200 \text{ Nm.}$$

Știind că viteza liniară de ridicare a sarcinii $v = \frac{\pi d n_1}{60}$, rezultă:

$$n_1 = \frac{60v}{\pi d} = \frac{180}{3,14 \cdot 0,4} = 143,3 \text{ rot/min}$$

și deci raportul de transmisie $i = \frac{1000}{143,3} \approx 7$.

Valoarea cuplului rezistent raportat la arborele motorului este:

$$M_r = M_s \cdot \frac{1}{i} \cdot \frac{1}{\eta} = 200 \cdot \frac{1}{7} \cdot \frac{1}{0,9} = 31,7 \text{ Nm.}$$

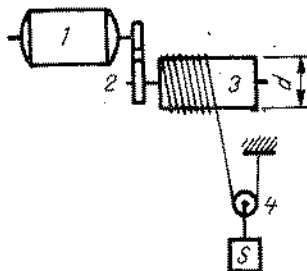


Fig. 7.4. Schema de acționare pentru aplicația 7.2.

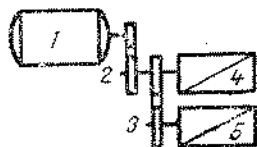
Exemplul 7.3. O mașină de lucru este formată (fig. 7.5) din mecanismul 4 ce se roteste cu viteza $n_1 = 600 \text{ rot/min}$ și are un cuplu rezistent static $M_1 = 120 \text{ Nm}$ și mecanismul 5, ce se rotește cu viteza $n_2 = 750 \text{ rot/min}$ și are un cuplu rezistent static $M_{s2} = 480 \text{ Nm}$. Cunoscând că randamentele celor două transmisii 2 și 3 sînt egale $\eta_2 = \eta_3 = 0,9$, să se determine cuplul rezistent static total raportat la arborele motorului 1, viteza sa fiind $n = 1200 \text{ rot/min}$.

Se determină rapoartele de transmisie:

$$i_2 = \frac{1200}{600} = 2 \text{ și } i_3 = \frac{1200}{750} = 1,6.$$

În această situație cuplurile rezistente statice raportate la arborele motorului sînt:

$$M_{r1} = M_{s1} \cdot \frac{1}{i_2} \cdot \frac{1}{\eta_2} = 120 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{0,9} = 66,6 \text{ Nm}$$



și

$$M_{r2} = M_{s2} \cdot \frac{1}{i_3} \cdot \frac{1}{\eta_3} = 480 \cdot \frac{1}{1,6} \cdot \frac{1}{0,9} = 370 \text{ Nm,}$$

Fig. 7.5. Schema de acționare pentru aplicația 7.3.

și deci cuplul rezistent static total la arborele motorului va fi:

$$M_r = M_{r1} + M_{r2} = 66,6 + 370 = 436,6 \text{ Nm.}$$

CAPITOLUL 8

CARACTERISTICILE MECANICE ȘI REGIMURILE DE FUNCȚIONARE ALE MAȘINILOR DE LUCRU

A. NOȚIUNI INTRODUCTIVE

Pentru a putea aprecia modul de comportare al unui sistem de acționare, este necesar să se țină seama de interdependența funcțională dintre elementele componente ale acestuia (motor de acționare, mașină de lucru, organ de transmisie). Pentru aceasta se are în vedere ecuația fundamentală a mișcării, scrisă, de exemplu, sub forma (7.7). Înlocuind valorile cuplului rezistent static și ale momentului de volant cu valorile lor raportate la arborele motorului, date de relațiile (7.8), și respectiv (7.14), se obține:

$$M = M_s \cdot \frac{1}{i \cdot \eta} + \left[\frac{(GD^2)_m}{375} + \frac{(GD^2)_s}{375} \cdot \frac{1}{i^2 \cdot \eta} \right] \cdot \frac{dn}{dt} \quad (8.1)$$

În această formă, se pune în evidență legătura dintre parametrii motorului de acționare (cuplul M , momentul de volant $(GD^2)_m$ și viteza n), parametrii mașinii de lucru (cuplul rezistent static M_s și momentul de volant $(GD^2)_s$ și parametrii organului de transmisie dintre motor și mașina de lucru (raportul de transmisie i și randamentul transmisiei η).

Deoarece atât cuplul motorului cât și cel al mașinii de lucru depind de mai mulți parametri, este necesar să se cunoască aceste dependențe. Ele sînt puse în evidență de *caracteristicile mecanice* ale motoarelor electrice și ale mașinilor de lucru. De asemenea, deoarece așa cum arată ecuația (8.1) mărimile considerate variază în timp, este necesar să se cunoască aspectul acestei variații ceea ce se pune în evidență prin *regimurile de funcționare* ale motoarelor și ale mașinilor de lucru.

În cele ce urmează, vor fi prezentate caracteristicile mecanice și regimurile de funcționare ale mașinilor de lucru, urmînd ca ulterior să fie expuse caracteristicile mecanice și regimurile de funcționare ale motoarelor electrice.

B. CLASIFICAREA MAȘINILOR DE LUCRU ÎN FUNCȚIE DE CARACTERISTICILE LOR MECANICE

Din cele arătate, rezultă că prin *caracteristică mecanică a unei mașini de lucru* se înțelege *modul de variație a cuplului rezistent al acesteia în funcție de un parametru care determină valoarea acestui cuplu*. Numărul și diversitatea foarte mare de mașini de lucru întîlnite în practică determină dependența cuplului rezistent al acestora de diverși parametri. Astfel, se întîlnesc mașini de lucru la care cuplul rezistent este funcție de:

- viteza de deplasare liniară sau de rotație;
- un unghi pe care un organ al mașinii îl face cu o anumită poziție de referință (dependență întîlnită la mașini cu mecanism bielă-manivelă);
- drumul parcurs de mașină;
- mai mulți parametri, fără a se putea stabili o dependență precisă și regulată a cuplului de un anumit parametru.

1. MAȘINI DE LUCRU CU CUPLU REZISTENT STATIC DEPENDENT DE VITEZĂ

Acestei categorii îi aparțin cele mai numeroase mașini de lucru întâlnite în practică. Formele de variație a cuplului rezistent în funcție de viteză întâlnite mai frecvent sînt reprezentate în figura 8.1. El poate fi constant, descrescător cu viteza, crescător liniar sau crescător cu pătratul vitezei.

● **Mașini de lucru cu cuplu rezistent static constant, deci independent de viteză** (curba *a*). La aceste mașini, indiferent de valoarea vitezei, cuplul rezistent rămîne constant și egal cu valoarea sa de regim M_{sr} . Din această categorie de mașini de lucru fac parte, de exemplu: mecanismele de ridicare și deplasare ale podurilor rulante pe tot timpul cît sarcina nu se modifică, ascensoarele cu sarcină utilă constantă, benzile transportoare cu sarcină utilă uniformă de-a lungul lor, laminoarele reversibile, calandrelle din industria hîrtiei, mașinile de imprimat etc. .

● **Mașini de lucru cu cuplu rezistent static descrescător cu viteza** (curba *b*). În acest caz, unui cuplu rezistent static M_{sr} îi corespunde un anumit punct *A* de funcționare de pe caracteristică, deci o anumită viteză de regim n_r . Din această categorie de mașini fac parte unele mașini așchietoare, care se recomandă să funcționeze cu viteze mici la cupluri mari și; invers, mașini de depănat, mașini de bobinat etc.

● **Mașini de lucru cu cuplu rezistent static crescător liniar cu viteza** (curba *c*). În acest caz, pentru $n = 0$ corespunde un cuplu static $M_s = M_0$, care este cuplul de frecări, cuplul util al mașinii de lucru în punctul de funcționare *A* fiind $M_{sr} = M_0$. Astfel de mașini de lucru sînt: calandrelle din industria textilă, valțurile din industria cauciucului, unele mașini de bobinat etc. Se menționează că în realitate, pentru asemenea mașini caracteristica mecanică nu este chiar o dreaptă, ci doar apropiată de această formă.

● **Mașini de lucru cu cuplu rezistent static crescător cu pătratul vitezei** (curba *d*). Din această categorie fac parte ventilatoarele, turbo-compresoarele, pompele centrifuge, elicele de pe navele marine etc.

De menționat că există și mașini de lucru la care cuplul rezistent crește cu viteza la o putere mai mare ca doi; de exemplu, în cazul centrifugelor sau ultracentrifugelor din industria chimică, cuplul rezistent static variază cu puterea a cincea și chiar a șasea a vitezei.

2. MAȘINI DE LUCRU CU MECANISM BIELĂ-MANIVELĂ

Din această categorie de mașini fac parte: ferăstraiele mecanice, foarfecele de tăiat metale, ciocane mecanice, pompele și compresoarele cu piston, pompele de adîncime pentru extracția țiteiului și în general toate mașinile de lucru care au în componența lor mecanisme bielă-manivelă.

Pentru a stabili caracteristica mecanică a mașinilor de lucru din această categorie, se consideră mecanismul bielă-manivelă din figura 8.2, în care *OB* este manivela de lungime *r*, *BC* este biela de lungime *b*, *B* este fusul mecanismului, *C* este glisiera ce se deplasează pe direcția *AC*. Se cunoaște că pentru astfel de mecanisme spațiul *s* parcurs de glisieră este aproximativ :

$$s \cong r (1 - \cos \alpha). \quad (8.2)$$

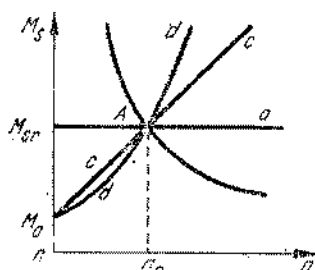


Fig. 8.1. Caracteristicile mecanice ale mașinilor de lucru cu cuplul rezistent static dependent de viteză.

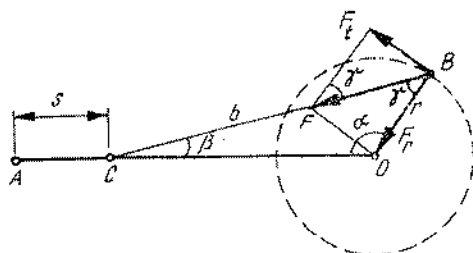


Fig. 8.2. Mecanism bielă-manivelă.

Viteza fiind derivata spațiului în raport cu timpul, rezultă că viteza liniară v_c de deplasare a glisierii C este:

$$v_c = \frac{ds}{dt} = r \cdot \sin \alpha \cdot \frac{d\alpha}{dt} = r \cdot \Omega \cdot \sin \alpha, \quad (8.3)$$

unde $\Omega = \frac{d\alpha}{dt}$ este viteza unghiulară a fusului B al mecanismului. Rezultă deci că viteza glisierii C depinde de unghiul α pe care îl face manivela cu direcția AC de deplasare a glisierii.

Se mai observă că forța care imprimă mișcarea fusului B al mecanismului și deci și glisierii C , cu alte cuvinte, forța care produce cuplul rezistent static util este forța tangențială F_t (fig. 8.2). Din figură se observă că $F_t = F \cdot \sin \gamma$. Deoarece $\gamma = 180^\circ - (\alpha + \beta)$ și deci din $\gamma = \sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta$ și cum $\frac{d}{r} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$ și deci $\cos \beta = \sqrt{1 - \frac{r^2 \sin^2 \alpha}{b^2}}$ rezultă în final $\sin \gamma = \sin \alpha + \frac{r}{2b} \cdot \sin 2\alpha$, în ipoteza neglijării raportului $\frac{r^2}{2b^2}$, care de obicei este mic. Prin urmare,

$$F_t = F \cdot \sin \gamma = F \cdot \left(\sin \alpha + \frac{r}{2b} \sin 2\alpha \right),$$

Deoarece brațul de aplicare al acestei forțe este r , rezultă că cuplul rezistent tangențial dezvoltat de mecanismul bielă-manivelă este

$$M_{st} = F_t \cdot r = M \cdot \left(\sin \alpha + \frac{r}{2b} \sin 2\alpha \right). \quad (8.4)$$

Se observă că dacă s-ar neglija cel de-al doilea termen din paranteză, cuplul rezistent M_{st} ar varia sinusoidal în funcție de unghiul α , așa cum se indică în figura 8.3. Dacă se ține cont și de-al doilea termen din paranteză, forma cuplului rezistent este periodică, dar nesinusoidală.

3. MAȘINI DE LUCRU LA CARE CUPLUL REZISTENT DEPINDE DE DRUMUL PARCURS

Din această categorie de mașini de lucru fac parte în general vehiculele (tramvaie, troleibuze, locomotive electrice sau vehicule acționate mecanic). Cuplul rezistent static depinde în acest caz atât de greutatea și viteza vehicu-

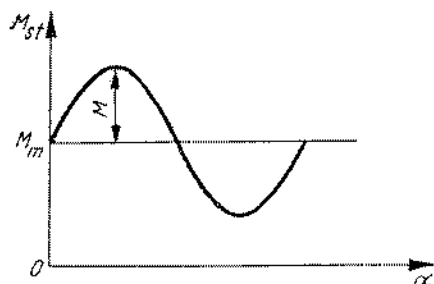


Fig. 8.3. Variația cuplului rezistent pulsatoriu.

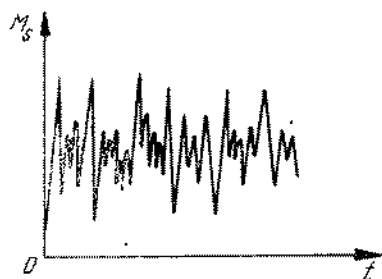


Fig. 8.4. Cuplul rezistent variabil foarte neregulat în timp (sarcină aleatoare).

lului, dar și de drumul parcurs, și anume: drum drept, curbe, pante sau rampe. Este evident că cuplul rezistent este mai mare dacă vehiculul urcă în pantă sau se înscrie în curbă, decât în cazul deplasării pe drum drept, fără pante.

4. MAȘINI DE LUCRU PENTRU CARE CUPLUL REZISTENT STATIC VARIAZĂ FOARTE NEREGULAT ÎN TIMP (ALEATOR)

Din această categorie fac parte, de exemplu: ferăstraiele pentru lemn, malaxoarele, morile cu bile, sondele de foraj etc. Cuplul rezistent static la asemenea mașini de lucru depinde de un număr apreciabil de parametri, care se modifică permanent, fiind dificil de stabilit o lege de variație a acestora în timp. Astfel, la un ferăstrău pentru lemn (gater) cuplul rezistent static depinde de textura lemnului, de umiditatea sa, de faptul dacă prezintă sau nu noduri etc. Forma de variație a cuplului rezistent este din această cauză neregulată în timp, ca în figura 8.4.

C. CLASIFICAREA MAȘINILOR DE LUCRU ÎN FUNCȚIE DE REGIMUL LOR DE FUNCȚIONARE

Regimul de funcționare reprezintă, așa cum s-a mai arătat, *modul cum se modifică cuplul rezistent static în timp*. În figurile 8.5 . . . 8.10 sînt prezentate cîteva moduri posibile de variație în timp a cuplului rezistent static, cărora le corespunde următoarea clasificare a mașinilor de lucru în funcție de regimul lor de funcționare.

1. MAȘINI DE LUCRU CU FUNCȚIONARE CU SARCINI DE DURATĂ INVARIABILE ÎN TIMP

În acest caz, pe toată durata de funcționare (chiar de ordinul orelor), cuplul rezistent static rămîne practic constant (fig. 8.5). Acest regim se poate întîlni la pompe centrifuge, ventilatoare, mașini de fabricat hîrtie etc.

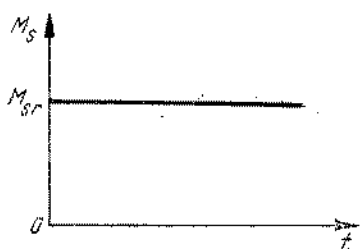


Fig. 8.5. Funcționarea în regim de durată cu sarcină constantă.

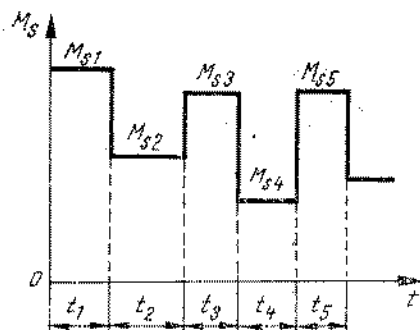


Fig. 8.6. Funcționarea în regim de durată cu sarcină în trepte.

2. MAȘINI DE LUCRU CU FUNCȚIONARE ÎN REGIM DE DURATĂ CU SARCINI ÎN TREPTE

La aceste mașini funcționarea este de durată, dar după intervale de timp relativ scurte (t_1, t_2, t_3, \dots) cuplul rezistent static ia diferite valori ($M_{sr1}, M_{sr2}, M_{sr3}, \dots$) (fig. 8.6). Exemple de astfel de mașini de lucru sînt: mașinile unelte, la care cuplul rezistent static depinde de grosimea și lățimea șpanului tăiat de cuțit; mașinile de ridicat, la care cuplul rezistent static depinde de greutatea sarcinii, de faptul dacă sarcina urcă sau coboară; transportoarele, convelele etc.

3. MAȘINI DE LUCRU CU FUNCȚIONARE ÎN REGIM DE LUCRU INTERMITENT

Ele sînt caracterizate, în general, printr-un timp de acționare t_a , urmat de un timp de pauză t_p și de ciclul total de lucru t_c . Se menționează că în timpul acționării cuplul rezistent static poate să rămână constant (fig. 8.7, a) sau se poate modifica la intervale scurte de timp t_{a1}, t_{a2}, \dots (fig. 8.7, b), așa cum se întâmplă mai des. La aceste mașini de lucru se definește *durata relativă de acționare* ($D_A\%$), care — în cazul figurii 8.7, a este dată de relația $D_A [\%] = \frac{t_a}{t_a + t_p} \cdot 100$, iar în cazul figurii 8.7, b este

$$D_A [\%] = \frac{t_{a1} + t_{a2} + t_{a3} + t_{a4}}{t_{a1} + t_{a2} + t_{a3} + t_{a4} + t_p} \cdot 100. \quad (8.5)$$

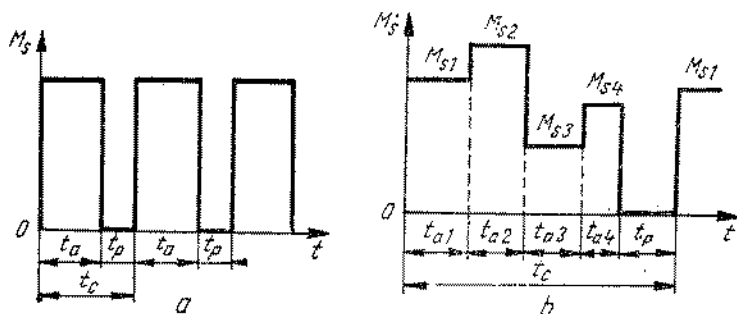


Fig. 8.7. Funcționarea în regim de lucru intermitent.

La stabilirea puterii motorului de acționare, aceste durate se aproximează cu duratele de acționare standardizate, care la noi în țară sînt de 25% și 40%. La fel, este standardizată și durata ciclului de lucru t_c la valoarea de 10 minute.

Drept exemple de mașini de lucru din această categorie se pot da mașini de ridicat de diferite tipuri, excavatoare, unele mașini unelte.

4. MAȘINI DE LUCRU CU FUNCȚIONARE ÎN REGIM DE SCURTĂ DURATĂ

Ele sînt caracterizate printr-un timp de acționare t_a cu cuplul rezistent constant sau în trepte (cazul din figura 8.8) și un timp de pauză t_p , mult mai lung ca timpul t_a . Din această categorie fac parte polizoarele din sculării, mecanismele de prindere a pieselor de prelucrat, servomotoarele pentru comenzi la distanță etc.

5. MAȘINI DE LUCRU CU FUNCȚIONARE ÎN REGIM PULSATORIU

Acestea conțin un mecanism bielă-mă-nivelă. Ele pot funcționa după o curbă sinusoidală (fig. 8.9,a) sau nesinusoidală, cum este cea din figura 8.9,b, înălțată de exemplu la un foarfece de tăiat metal.

6. MAȘINI DE LUCRU CU FUNCȚIONARE CU ȘOCURI DE SARCINĂ

Sînt caracterizate prin aceea că, după perioade de mers în gol, în care cuplul rezistent este M_0 , urmează perioade scurte în care cuplul static M_s crește de 3—4 ori și chiar mai mult decît M_0 (fig. 8.10). Din această categorie fac parte laminoarele, mașinile de ștanțat etc.

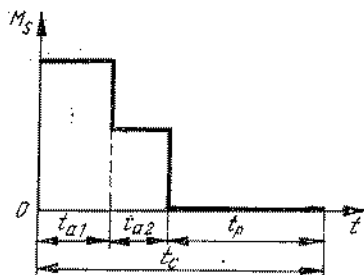


Fig. 8.8. Funcționarea în regim de scurtă durată.

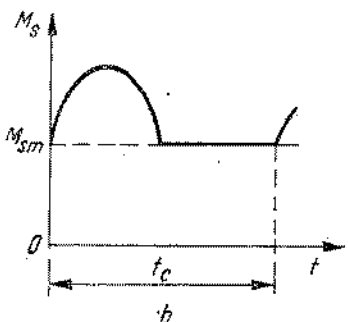
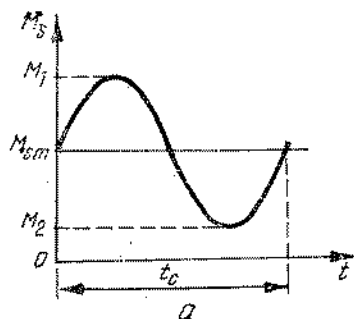


Fig. 8.9. Funcționarea în regim pulsatoriu.

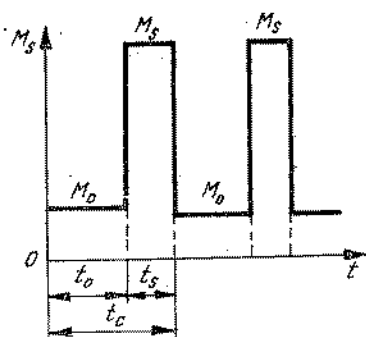


Fig. 8.10. Funcționarea cu șocuri de sarcină.

7. MAȘINI DE LUCRU CU CUPLU REZISTENT STATIC CU VARIAȚII ALEATOARE ÎN TIMP

Acestea se confundă cu categoria de mașini prezentată în paragraful 8.B.4 (fig. 8.4).

Așa cum s-a mai arătat, cunoașterea caracteristicilor mecanice și a regimurilor de lucru va fi folosită la rezolvarea corectă a tuturor problemelor de acționări, ce se vor prezenta în continuare.

CAPITOLUL 9

CARACTERISTICILE MECANICE ȘI REGIMURILE DE FUNCȚIONARE ALE MOTOARELOR ELECTRICE.

A. NOȚIUNI INTRODUCTIVE

1. CARACTERISTICI MECANICE

Prin *caracteristică mecanică a unui motor electric* se înțelege *dependența dintre cuplul dezvoltat pe arborele motorului și viteza acestuia*, exprimată analitic printr-o relație de forma $M = f(n)$.

Cu excepția motorului sincron, caracteristicile mecanice ale tuturor motoarelor sînt *căzătoare* (fig. 8.1), adică la o creștere a cuplului pe arborele motorului corespunde o scădere a vitezei acestuia. La motorul sincron, viteza rămîne constantă, independent de cuplul pe arbore.

După cum se observă, la un anumit cuplu de sarcină pe arborele motorului (de exemplu la cuplul nominal M_n) corespunde un anumit punct de funcționare *A* pe caracteristica mecanică și deci o anumită viteză n_n (viteza nominală). Pentru cuplul $M = 0$ (punctul B) corespunde viteza $n = n_0$. Această viteză se numește *viteză de mers în gol ideal*, deoarece cuplul $M = 0$ presupune că este nul și cuplul dezvoltat de motor pentru învingerea propriilor sale frecări, ceea ce nu corespunde unui caz real.

Diferența $\Delta n_n = n_0 - n_n$ se numește *cădere nominală de viteză* și ea definește *rigiditatea caracteristicii mecanice*, adică înclinarea ei față de orizontală. *Gradul de rigiditate* al unei caracteristici mecanice este dat de relația

$$|\%| = \frac{\Delta n_n}{n_n} \cdot 100 = \frac{n_0 - n_n}{n_n} \cdot 100. \quad (9.1)$$

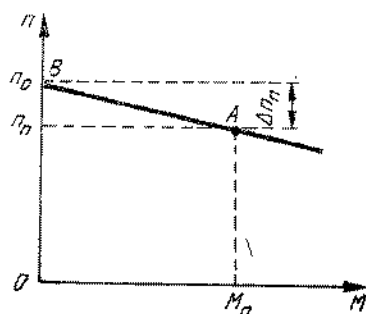


Fig. 9.1. Caracteristica mecanică căzătoare a motoarelor electrice.

● În funcție de mărimea gradului de rigiditate, caracteristicile mecanice ale motoarelor electrice pot fi:

- *suprarigide* ($\delta[\%] = 0$), întâlnite la motoarele sincrone;
- *rigide* ($\delta[\%] \leq 10\%$), întâlnite la motoarele de curent continuu cu excitație derivație și la motoarele asincrone;
- *semirigide* ($10\% \leq \delta \leq 20\%$), întâlnite la motoarele de curent continuu cu excitație mixtă și la unele motoare asincrone de construcție specială;
- *moi* ($\delta > 20\%$), întâlnite la motoarele de curent continuu cu excitație serie.

● Caracteristicile mecanice ale motoarelor electrice se mai clasifică și în funcție de valorile parametrilor de care depind (tensiunea de alimentare a motorului, fluxul de excitație al motorului și rezistența înfășurărilor pentru motoarele de curent continuu și respectiv tensiunea de alimentare, frecvența tensiunii de alimentare și rezistența înfășurărilor, în cazul motoarelor asincrone).

¹ Atunci când parametrii menționați au valoarea *nominală*, adică valoarea pentru care a fost proiectat motorul, sau valoarea trecută în catalog sau pe tablăta indicatoare a mașinii, caracteristicile mecanice obținute se numesc *caracteristici mecanice naturale*.

Dacă unul sau mai mulți dintre parametrii menționați diferă de valoarea lor nominală, se obțin *caracteristici mecanice artificiale*.

2. REGIMURI DE FUNCȚIONARE

Se știe că orice mașină electrică clasică poate funcționa în *regim de motor* sau în *regim de generator* (sau de *frinare*).

● În **regim de motor**, mașina este alimentată cu energie electrică, se rotește și dezvoltă un cuplu egal cu cuplul rezistent total (static și dinamic) raportat la arborele motorului. În acest caz, viteza și cuplul dezvoltat de motor au *același sens* așa cum rezultă din figura 9.2. (cadranul I și III). În figură se observă că în cadranul III cuplul și viteza au sensuri inverse celor din cadranul I. Având însă același sens, mașina funcționează în regim de motor, dar în sens invers de rotație față de cadranul I.

● În cadranele II și IV cuplul având sens invers față de viteză, mașina funcționează în **regim de frinare**. Se observă că în acest caz motorul dezvoltă un cuplu de sens invers rotirii sale, deci acest cuplu este de frinare. În acționările electrice se pot obține diferite moduri de frinare, și anume: *frinare cu recuperare de energie electrică*, *frinare dinamică* sau *reostatică* și *frinare prin cuplare inversă* sau în contracurent. Posibilitățile de obținere ale acestor moduri de frinare, avantajele și dezavantajele lor vor fi examinate ulterior, pentru fiecare tip de motor electric în parte.

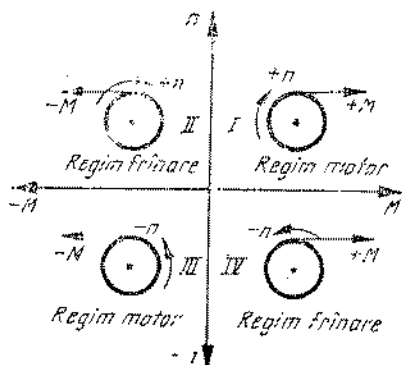


Fig. 9.2. Regimurile de funcționare ale mașinilor electrice.

B. CARACTERISTICILE MECANICE ȘI REGIMURILE DE FRÎNARE ALE MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU CU EXCITAȚIE DERIVAȚIE

1. CARACTERISTICA MECANICĂ NATURALĂ

Schema de principiu a unui motor de curent continuu cu excitație derivație este indicată în figura 9.3, pe care s-a notat cu 1 înfășurarea de excitație (inductoare) a motorului, iar cu 2 — indusul (rotorul) motorului; U este tensiunea de alimentare a motorului de la rețea, iar I — curentul prin indus.

Se știe că rotind rotorul unei mașini electrice cu o viteză n , în prezența unui flux de excitație Φ , la bornele sale apare o tensiune electromotoare E , proporțională cu n și Φ , adică

$$E = k_e \cdot \Phi \cdot n, \quad (9.2)$$

unde k_e este un coeficient de proporționalitate, dependent de datele constructive ale motorului. Se observă că dacă fluxul de excitație $\Phi = \text{const.}$, ceea ce se întâmplă frecvent la acest tip de motoare, atunci

$$E = c_e \cdot n, \text{ unde } c_e = k_e \cdot \Phi. \quad (9.3)$$

Conform legii lui Kirchhoff pentru un circuit în care există o sursă de curent, rezultă că tensiunea aplicată la bornele circuitului

$$U = E + I \cdot R_a, \quad (9.4)$$

unde R_a este rezistența circuitului (în cazul figurii 9.3 ea fiind tocmai rezistența interioară a indusului), iar produsul $I \cdot R_a$ este căderea de tensiune din circuitul indusului.

Pe de altă parte, se știe că cuplul dezvoltat de un motor de curent continuu este proporțional cu fluxul de excitație al motorului și cu curentul ce străbate indusul motorului, adică

$$M = k_m \cdot \Phi \cdot I = c_m \cdot I. \quad (9.5)$$

Ținând cont de relațiile (9.3) și (9.5), relația (9.4) se mai scrie $U = c_e \cdot n + \frac{M \cdot R_a}{c_m}$, de unde rezultă ușor că

$$n = \frac{U}{c_e} - \frac{M \cdot R_a}{c_e \cdot c_m}. \quad (9.6)$$

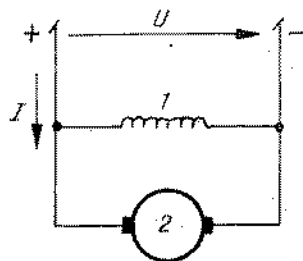


Fig. 9.3. Schema de principiu a motorului de curent continuu cu excitație derivație.

Ecuația (9.6) exprimă dependența dintre viteza n a motorului și cuplul M dezvoltat de motor, deci este *ecuația caracteristicii mecanice* a motorului de curent continuu cu excitație derivație. După cum rezultă din ecuație, caracteristica mecanică a motorului este o dreaptă, așa cum se indică în figura 9.1.

Din ecuația (9.6), pentru $M = 0$ rezultă viteza de mers în gol ideal: $n_0 = \frac{U}{c_e}$. Pentru $U = \text{const.}$ și $c_e = \text{const.}$, rezultă $n_0 = \text{const.}$, punctul B

fiind un punct al caracteristicii mecanice. Pentru trasarea caracteristicii este necesar să se stabilească încă un punct al dreptei. Se alege punctul A, corespunzător cuplului și vitezei nominale.

Căderea nominală de viteză a motorului se deduce ușor din (9.6), ținând cont că $n_0 = \frac{U}{c_e}$; rezultă $\Delta n_n = \frac{M_n \cdot R_a}{c_e \cdot c_m}$, unde M_n este cuplul nominal al motorului.

Pentru a urmări modul de trasare a caracteristicii mecanice naturale a unui motor de curent continuu cu excitație derivație, se va considera o aplicație numerică.

Aplicația 1. Să se traseze caracteristica mecanică naturală a unui motor derivație de curent continuu cu următoarele date nominale: $P_n = 19$ kW, $U_n = 220$ V, $I_n = 103$ A, $n_n = 770$ rot/min, $R_a = 0,06 R_n$.

Pentru a determina rezistența R_a , se stabilește mai întâi rezistența nominală $R_n = \frac{U_n}{I_n} = \frac{220}{103} = 2,14 \Omega$; deci $R_a = 0,06 R_n = 0,06 \cdot 2,14 = 0,128 \Omega$.

Din ecuațiile (9.5) și (9.6) rezultă $n = \frac{1}{c_e} (U - I \cdot R_a)$ și deci se poate calcula $c_e = \frac{U - I \cdot R_a}{n} = \frac{220 - 103 \cdot 0,128}{770} = 0,268$. Rezultă $n_0 = \frac{U}{c_e} = \frac{220}{0,268} = 822$ rot/min. Deci un punct al caracteristicii mecanice a motorului este punctul B, de coordonate $M = 0$ și $n_0 = 822$ rot/min.

Pentru a stabili al doilea punct al caracteristicii mecanice, este necesar să se cunoască valoarea cuplului nominal M_n , în care scop se folosește relația (9.5). Constanta c_m se determină cu relația $\frac{c_e}{c_m} = \frac{k_e}{k_m} = 1,03$, deci $c_m = \frac{c_e}{1,03} = 0,26$ și aplicând relația (9.5) rezultă:

$$M_n = 0,26 \cdot 103 = 26,78 \text{ kgfm, sau } M_n = 262,7 \text{ Nm.}$$

Al doilea punct al caracteristicii este deci punctul A (fig. 9.1) de coordonate $M_n = 262,7$ Nm și $n_n = 770$ rot/min.

2. CARACTERISTICILE MECANICE ARTIFICIALE

Scriind ecuația caracteristicii mecanice (9.6) pentru flux de excitație variabil, se obține

$$n = \frac{U}{k_e \cdot \Phi} - \frac{M \cdot R_a}{k_e \cdot c_m \cdot \Phi^2} \quad (9.7)$$

Această ecuație arată că parametrii ce pot fi modificați în vederea obținerii caracteristicilor mecanice artificiale sînt: tensiunea de alimentare U , rezistența circuitului indusului motorului R_a și fluxul de excitație Φ .

● În cazul modificării rezistenței circuitului indusului, care se poate realiza prin introducerea unei rezistențe suplimentare R_s în serie cu înfășurarea rotorică, rezistența totală a acestui circuit fiind $R = R_a + R_s$. Atunci ecuația caracteristicii mecanice a motorului devine:

$$n = \frac{U}{c_e} - \frac{M \cdot (R_a + R_s)}{c_e \cdot c_m} \quad (9.8)$$

Examinînd această ecuație, se constată că viteza de mers în gol ideal $n_0 = \frac{U}{c_e}$ rămîne neschimbată; în schimb căderea de viteză $\Delta n_1 = \frac{M \cdot (R_a + R_s)}{c_e \cdot c_m}$ crește.

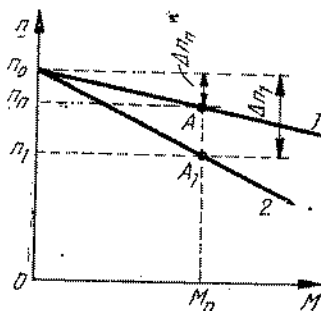


Fig. 9.4. Caracteristică mecanică artificială obținută prin modificarea rezistenței în circuitul indusului.

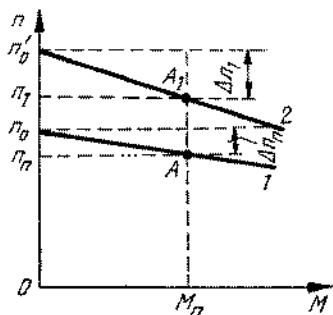


Fig. 9.5. Caracteristică mecanică artificială obținută prin modificarea fluxului de excitație.

În figura 9.4 s-a notat cu 1 caracteristica mecanică naturală, iar cu 2 — caracteristica mecanică artificială obținută prin introducerea unei rezistențe suplimentare în circuitul indusului. Cu cât rezistența suplimentară este mai mare, cu atât caracteristica artificială este mai înclinată. Ambele caracteristici trec prin punctul n_0 .

Pentru un anumit cuplu de sarcină (de exemplu M_n), pe fiecare caracteristică va corespunde un alt punct de funcționare (A și respectiv A_1) și ca atare, o altă viteză a motorului (n_n și respectiv $n_1 < n_n$). Rezultă deci că *prin trecerea funcționării motorului de pe caracteristica mecanică naturală pe o caracteristică artificială, se poate realiza o reglare a vitezei motorului.*

● În cazul modificării fluxului de excitație Φ al motorului, care se poate realiza prin introducerea unei rezistențe reglabile în serie cu circuitul de excitație al motorului — după cum rezultă din ecuația (9.7) — se modifică atât viteza de mers în gol ideal $n_0 = \frac{U}{k_e \Phi}$, cât și căderea de viteză $\Delta n = \frac{M \cdot R_a}{k_e \cdot k_m \cdot \Phi^2}$.

Deoarece prin introducerea unei rezistențe în circuitul înfășurării de excitație curentul de excitație scade, va scădea și fluxul de excitație Φ al motorului și ca urmare, atât viteza de mers în gol ideal n_0 , cât și căderea de viteză Δn vor crește. Creșterea căderii de viteză la scăderea lui Φ este mai rapidă decât a vitezei n_0 , deoarece este proporțională cu pătratul fluxului Φ . În figura 9.5 s-a notat cu 1 caracteristica mecanică naturală, iar cu 2 — caracteristica artificială obținută pentru un flux de excitație mai mic decât cel nominal ($\Phi_1 < \Phi$).

Ca și în cazul precedent, se observă că la același cuplu M_n se obțin pe cele două caracteristici puncte de funcționare diferite, A și A_1 , cărora le corespund și vitezele diferite n_n și respectiv $n_1 > n_n$. Deci și, *în acest caz, prin trecerea de pe caracteristica mecanică naturală pe o caracteristică mecanică artificială, se obține reglarea vitezei.*

Observație. În timp ce la reglarea vitezei prin modificarea rezistenței din circuitul indusului se obțin viteze sub cea nominală, la reglarea vitezei prin modificarea fluxului de excitație, se obțin viteze mai mari ca cea nominală.

● În cazul modificării tensiunii de alimentare, care se poate face prin mijloace ce vor fi prezentate ulterior, se observă că plecând de la ecuația caracteristicii mecanice (9.6), se modifică numai primul termen din membrul al doilea, deci numai viteza de mers în gol ideal. În realitate — după cum se

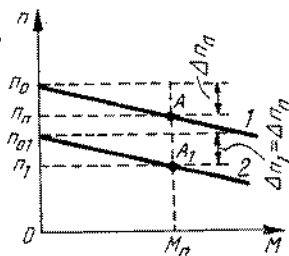


Fig. 9.6. Caracteristică mecanică artificială obținută prin modificarea tensiunii de alimentare.

vede și din schema din figura 9.3 — prin modificarea tensiunii U , se schimbă și curentul de excitație, deci fluxul de excitație Φ , deci are loc și o modificare a căderii de viteză Δn . De fapt, în cazul modificării tensiunii de alimentare, se preferă folosirea motorului de curent continuu cu excitație separată. În acest caz, înfășurarea de excitație rămâne alimentată la tensiune constantă, deci și fluxul de excitație rămâne constant.

De obicei tensiunea de alimentare se modifică în sens descrescător, pentru a nu se depăși tensiunea nominală, atunci, dacă 1 este caracteristica mecanică naturală corespunzătoare tensiunii U_n (fig. 9.6), caracteristica mecanică artificială corespunzătoare unei tensiuni $U_1 < U_n$ va fi de forma 2, căreia îi corespunde viteza de mers în gol ideal $n_{01} = \frac{U_1}{c_e} < n_0$ și căderea de viteză $\Delta n_1 = \frac{MR_a}{c_e c_m} = \Delta n_n$. Deci cele două caracteristici mecanice (1 și 2) sînt paralele.

Ca și în cazurile precedente, pentru același cuplu M_n corespund puncte de funcționare diferite (A și A_1) pe cele două caracteristici și respectiv viteze diferite: n_n și $n_1 < n_n$. Rezultă deci că și prin modificarea tensiunii de alimentare a motorului se poate obține o reglare a vitezei acestuia. Asupra acestui mod de reglare a vitezei se va reveni ulterior.

3. REGIMURI DE FRÎNARE ALE MOTORULUI DE CURENT CONTINUU CU EXCITAȚIE DERIVAȚIE

a. FRÎNAREA CU RECUPERARE DE ENERGIE ELECTRICĂ

Pentru a înțelege mai bine sensul fizic al acestui regim de frînare, se va considera cazul unui vehicul acționat electric care coboară o pantă. Presupunem că inițial punctul de funcționare pe caracteristica mecanică este în A (fig. 9.7), căruia îi corespunde un cuplu de regim M_r și o viteză n_r . La coborîre, cuplul rezistent dat de vehicul fiind negativ, ajută mișcarea motorului și deci cuplul dezvoltat de acesta va fi din ce în ce mai mic. Deoarece motorul funcționează pe caracteristica mecanică 1, punctul de funcționare se deplasează treptat din A spre B , motorul funcționînd cu viteze tot mai mari. Atunci cînd vehiculul este acționat numai sub acțiunea cuplului său rezistent, cuplul dat de motor $M = 0$ și motorul se rotește cu viteza de mers în gol ideal n_0 . Acționînd în continuare cuplul rezistent negativ, prin energia potențială înmagazinată în vehicul, acesta se accelerează și viteza roților

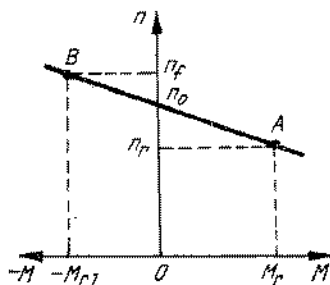


Fig. 9.7. Caracteristica mecanică la frînarea cu recuperare.

vehiculului devine mai mare ca n_0 , deci motorul începe să fie antrenat de vehicul cu o viteză mai mare decât n_0 . În această situație, cuplul motorului devine negativ, deci motorul funcționează în *regim de frinare*. Rămânând cuplat la rețea, în loc să absoarbă energie electrică din rețea, va debita energie electrică în rețea. Se spune că motorul funcționează în acest caz în *regim de generator cu recuperare de energie electrică în rețea*.

Viteza motorului continuă să crească pînă cînd cuplul negativ de pe arboarele motorului atinge valoarea de regim M_{r1} , adică funcționarea motorului se va stabili în punctul B , corespunzător unei viteze de frinare $n_f > n_0$.

Avantajul acestei metode de frinare constă în posibilitatea recuperării energiei electrice în rețea, dar faptul că frinarea are loc la viteze mult mai mari ca viteza de regim, face ca metoda să fie folosită doar în anumite situații.

b. FRINAREA DINAMICĂ

Frinarea dinamică a motorului derivație de curent continuu constă în decuplarea indusului motorului de la rețeaua de alimentare și cuplarea lui pe o rezistență de frinare R_f , înfășurarea de excitație continuînd să rămînă alimentată în continuare. Prin urmare, plecînd de la schema inițială din figura 9.3, se realizează schema din figura 9.8. În această situație, ținînd cont că în circuitul indusului intervine suplimentar rezistența R_f și că $U = 0$, ecuația caracteristicii mecanice (9.6) devine:

$$n = - \frac{M (R_a + R_f)}{c_e c_m}.$$

Din această relație rezultă cuplul motorului:

$$M = - \frac{c_e c_m n}{R_a + R_f}. \quad (9.9)$$

Acest cuplu fiind negativ, iar viteza rămînînd pozitivă, rezultă că motorul va funcționa în regim de frinare. Notînd raportul $\frac{c_e c_m}{R_a + R_f} = K$, rezultă că $M = -K \cdot n$, deci caracteristica mecanică este o dreaptă (2) ce trece prin origine (fig. 9.9), paralelă cu caracteristica mecanică artificială a motorului, obținută prin introducerea rezistenței suplimentare R_f în circuitul indusului. Trecerea de la schema din figura 9.3 (regim de motor) la cea din figura 9.8 (regim de frinare dinamică) corespunde în figura 9.9 trecerii din punctul de funcționare

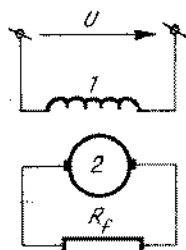


Fig. 9.8. Schema electrică la frinarea dinamică.

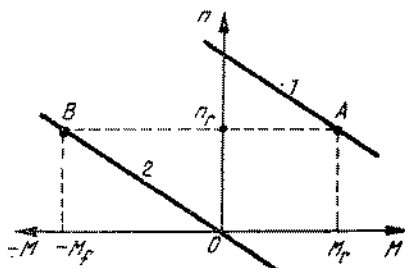


Fig. 9.9. Caracteristica mecanică la frinarea dinamică.

A în punctul de funcționare B, considerind că în intervalul de trecere viteza rămâne practic constantă.

După cum se observă, cuplul de frînare corespunzător punctului B este suficient de mare și el crește prin reducerea rezistenței R_f . Rezistența R_f este necesară pentru a limita valoarea cuplului de frînare M_f și a curentului prin motor, care în absența rezistenței de frînare ar putea lua valori inadmisibile de mari.

c. FRINAREA PRIN CUPLARE INVERSA

Acest regim de frînare se obține prin inversarea polarității tensiunii de alimentare. În acest caz, viteza de mers în gol ideal își schimbă semnul, devenind $n_0 = -\frac{U}{c_e}$. De asemenea, își schimbă semnul și cuplul dezvoltat de motor, deoarece ecuația (9.6) devine $n = -n_0 - \frac{M R_a}{c_e c_m}$, de unde rezultă că

$$M = -\frac{c_e c_m (n + n_0)}{R_a + R_f},$$

(ca și în cazul precedent, se limitează valoarea inițială a cuplului de frînare prin introducerea unei rezistențe de frînare).

Se observă că prin inversarea polarității tensiunii, funcționarea motorului trece de pe caracteristica mecanică 1 pe o caracteristică mecanică 2, simetrică față de prima în raport cu originea (fig. 9.10). Trecerea se face la viteza de regim n_r din punctul A în B. Acestui punct îi corespunde cuplul inițial de frînare negativ M_f și viteza pozitivă n_r ; motorul funcționează deci în regim de frînare, viteza sa scade, punctul de funcționare deplasându-se din B spre C. Dacă atunci cînd se ajunge în C (pentru care $n = 0$) motorul este decuplat de la rețea, el se oprește. Dacă însă motorul continuă să fie alimentat, întrucît pe arborele său mai există disponibil un cuplu $M > M_r$, punctul de funcționare continuă să se deplaseze către D, unde se stabilizează funcționarea motorului. În punctul D, atât cuplul cît și viteza sînt de același semn (negative) și deci motorul funcționează în regim de motor, cu sens invers de rotație față de punctul A. Deci, la inversarea polarității tensiunii de alimentare, funcționarea trece din A în B; din punctul B pînă în C motorul funcționează în regim de frînare prin cuplare inversă, apoi, din punctul C pînă în D, are loc funcționarea în regim de motor, dar cu sens invers de rotație față de cel inițial.

Se observă că dacă motorul funcționează în punctul D, la o nouă inversare a polarității, funcționarea motorului trece din D în E; din punctul E

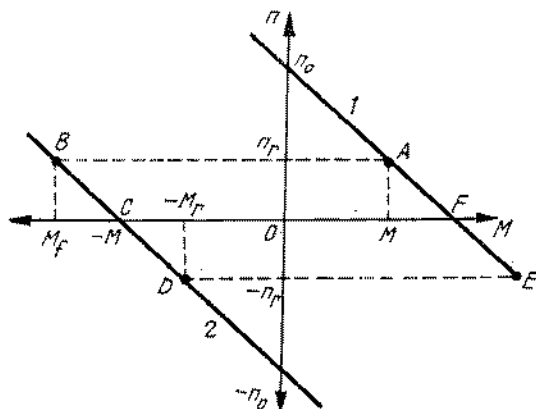


Fig. 9.10. Caracteristica mecanică la frînarea prin cuplare inversă.

pînă în F funcționează din nou în regim de frînare prin cuplare inversă, din punctul F pînă în A funcționează în regim de motor cu sens direct de rotație, funcționarea motorului stabilizîndu-se din nou în A .

Observație. Toate cele prezentate în legătură cu caracteristicile mecanice și regimurile de funcționare pentru motorul de curent continuu cu excitație derivație sînt valabile și în cazul motoarelor de curent continuu cu excitație separată.

C. CARACTERISTICILE MECANICE ȘI REGIMURILE DE FUNCȚIONARE ALE MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU CU EXCITAȚIE SERIE ȘI MIXTĂ

1. MOTOARE DE CURENT CONTINUU CU EXCITAȚIE SERIE

Schema de principiu a unui motor de curent continuu cu excitație serie este indicată în figura 9.11, în care 1 este înfășurarea de excitație, iar 2—indusul motorului; U este tensiunea de alimentare, iar I —curentul de sarcină, care străbate atît înfășurarea de excitație, cît și indusul.

a. CARACTERISTICI MECANICE

Deoarece curentul de excitație se modifică cu sarcina pe arborele motorului, odată cu aceasta se schimbă și fluxul de excitație Φ al motorului. Ca urmare, forma caracteristicii mecanice nu va mai fi o dreaptă, ci — așa cum se poate demonstra — are aproximativ forma unei hiperbole echilaterale (fig. 9.12).

Fără a insista prea mult asupra acestui tip de motor, cu o utilizare practică ceva mai restrînsă, din examinarea caracteristicii se pot desprinde unele concluzii privind funcționarea sa și anume:

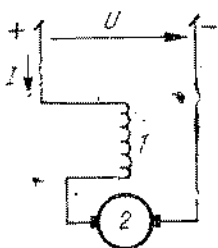


Fig. 9. 11. Schema de principiu a motorului cu excitație serie.

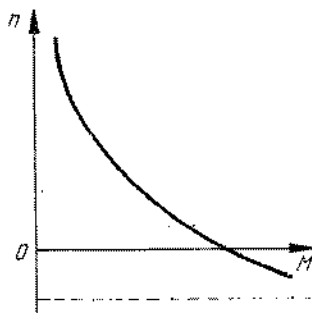


Fig. 9.12. Caracteristica mecanică naturală a motorului cu excitație serie.

— la cuplu de sarcină mic, apropiat de cuplul de mers în gol, motorul se rotește cu viteză foarte mare, uneori inadmisibilă din punct de vedere al rezistenței mecanice. Deci, o primă concluzie: *motorul serie nu poate fi folosit la mersul în gol*;

— caracteristica mecanică a motorului serie este o caracteristică moale, ceea ce îl face utilizabil pentru acționarea mașinilor de lucru ce trebuie să funcționeze cu viteze mici la cupluri rezistente mari și invers. Datorită acestui fapt, se spune că motorul serie este *autoregulator de viteză*;

— întrucât caracteristica mecanică nu taie axa ordonatelor, motorul serie obișnuit *nu poate funcționa în regim de frînare cu recuperare*;

— deoarece fluxul de excitație se modifică în funcție de curentul de sarcină al motorului, pentru motorul serie se *pot obține caracteristici mecanice artificiale numai prin introducerea de rezistențe în circuitul indusului și prin modificarea tensiunii de alimentare*.

Notă. Cele arătate cu privire la aceste caracteristici mecanice artificiale la motorul derivație sînt valabile și în cazul motorului serie, cu respectarea formei caracteristicii acestui motor.

b. REGIMURI DE FRÎNARE

Regimurile de frînare posibile la motorul serie sînt: *frînarea dinamică* și *frînarea prin cuplare inversă*, care se obțin la fel ca la motorul derivație de curent continuu.

2. MOTOARE DE CURENT CONTINUU CU EXCITAȚIE MIXTĂ

În afara motoarelor de curent continuu discutate, există și motoare cu excitație mixtă. Fiind prevăzute cu două înfășurări de excitație, una derivație și alta serie, aceste motoare au o caracteristică mecanică naturală 3 (fig. 9.13) intermediară între caracteristica mecanică naturală 1 a motorului

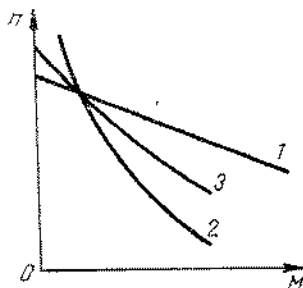


Fig. 9.13. Caracteristicile mecanice naturale ale motoarelor cu excitație: derivație (1); serie (2) și mixtă (3).

derivație și a celui serie (2), păstrînd proprietățile intermediare ale celor două tipuri de motoare, mai apropiate totuși de ale motorului serie. Spre deosebire de motorul serie, caracteristica 3 taie axa ordonatelor, deci este posibilă funcționarea în regim de frînare cu recuperare de energie. De asemenea, se pot obține în acest caz caracteristici mecanice artificiale prin modificarea fluxului de excitație derivație.

D. CARACTERISTICILE MECANICE ȘI REGIMURILE DE FUNCȚIONARE ALE MOTOARELOR ASINCRONE TRIFAZATE

Motorul asincron trifazat este foarte frecvent folosit în instalațiile industriale, datorită avantajelor care le prezintă: preț de cost mai scăzut, construcție simplă, lipsa colectorului — care determină o robustețe și o siguranță în funcționare mai mari și o întreținere mai ușoară. Cu toate acestea, motorul asincron nu poate înlocui complet motorul de curent continuu, din cauza posibilităților limitate de reglare a vitezei.

Deoarece stabilirea expresiei analitice a caracteristicii mecanice a motorului asincron necesită efectuarea unor calcule complexe, care intervin în prea mică măsură în rezolvarea problemelor de acționare electrică, în cele ce urmează se va pleca direct de la această expresie:

$$M = \frac{2 M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}, \quad (9.10)$$

unde:

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}, \quad (9.11)$$

este alunecarea motorului asincron (în care $n_0 = \frac{60f_1}{p}$ este viteza sincronă sau viteza de mers în gol ideal a motorului, iar p — numărul de perechi de poli ai mașinii); M_k și s_k sînt *cuplul critic* și *alunecarea critică* a motorului asincron. Se demonstrează că:

$$M_k = \pm K_1 \frac{V_1^2}{f_1^2} \quad (9.12)$$

iar

$$s_k = \pm K_2 \frac{r_2'}{f_1} \quad (9.13)$$

în care K_1 și K_2 sînt constante care depind de parametrii constructivi ai motorului; V_1 este tensiunea de alimentare pe o fază a circuitului statoric; f_1 este frecvența tensiunii de alimentare; r_2' este rezistența circuitului rotor, raportată la stator.

Notă. În expresia (9.10) caracteristica mecanică a motorului asincron este dată de forma $M = f(s)$, care este mai simplă decît forma $M = f(n)$. Pe baza relației (9.11), se poate însă trece ușor și la forma $M = f(n)$.

Forma caracteristicii mecanice a motorului asincron dată de ecuația (9.10) este reprezentată în figura 9.14. Se observă că în cadranul I cuplul motorului crește aproape liniar cu alunecarea de la 0 pînă la punctul A, corespunzător valorilor critice s_k și M_k . Dacă alunecarea $s > s_k$, cuplul motorului scade.

Din relația (9.11) se observă că pentru $s = 1$, viteza motorului $n = 0$. Deci punctul B corespunde pornirii motorului, cuplul motorului fiind egal cu cel de pornire ($M = M_p$).

Dacă $s > 1$, din relația (9.11) se vede că viteza n devine negativă, cuplul rămânând pozitiv, deci pe porțiunea BC motorul funcționează în regim de frinare.

La $s < 1$, pe porțiunea OA cuplul crește cu alunecarea (deci crește odată cu scăderea vitezei) și ca atare, funcționarea motorului este stabilă. Pe porțiunea AB , la scăderea cuplului, crește alunecarea, deci scade viteza și motorul tinde să se oprească (punctul B), cu alte cuvinte, funcționarea motorului este instabilă.

Deoarece motorul funcționează stabil numai pe porțiunea OA , putând dezvolta un cuplu maxim egal cu cuplul critic, pentru a se evita oprirea motorului atunci când cuplul rezistent static ar crește în mod accidental peste valoarea M_k , motorul asincron se proiectează astfel, încât cuplul său nominal să fie mai mic ca M_k (fig. 9.14). Raportul $\lambda = \frac{M_k}{M_n}$, care se numește *coeficient de suprasarcină* a motorului, se ia între 2 și 2,5 pentru motorul asincron și el arată că pentru a se evita trecerea funcționării motorului pe porțiunea instabilă, se impune ca încărcarea la arbore să nu depășească 2—2,5 ori cuplul nominal.

Pentru $s < 0$, caracteristica mecanică este situată în cadranul III și corespunde funcționării motorului asincron în regim de generator, deci în regim de frinare, deoarece cuplul este negativ și viteza pozitivă (alunecarea fiind negativă, conform relației 9.11, viteza este pozitivă și mai mare ca n_0).

În cele ce urmează, se va urmări modul de trasare a caracteristicii mecanice pentru un motor asincron.

Aplicația 2. Să se traseze caracteristica mecanică naturală pentru un motor asincron cu următoarele date nominale: $P_n = 80$ kW, $U_n = 380$ V, $n_n = 487$ rot/min, $I_n = 163$ A, $\lambda = 2$.

Pentru trasarea caracteristicii mecanice $M = f(s)$, în ecuația (9.10) trebuie cunoscute valorile critice M_k și s_k .

Cuplul critic se poate determina din relația $\lambda = \frac{M_k}{M_n}$, dacă se cunoaște cuplul nominal M_n .

Acesta se poate determina cu relația $M_n = 9\,550 \cdot \frac{P_n}{n_n} = 9\,550 \cdot \frac{80}{487} = 1\,570$ Nm (coeficientul 9 550 provine din transformări de unități). Rezultă deci că $M_k = \lambda \cdot M_n = 2 \cdot 1\,570 = 3\,140$ Nm.

Pentru determinarea alunecării critice se pleacă de la relația (9.10), care se poate scrie sub forma:

$$s_k = \frac{s_n (M_k \pm \sqrt{M_k^2 - M_n^2})}{M_n} \quad (9.14)$$

Este deci necesar să se cunoască s_n , care poate fi determinat cu ajutorul relației (9.11), dacă se cunoaște viteza sincronă n_0 a motorului. Se știe că $n_0 = \frac{60 f_1}{p}$ și întrucât $f_1 = 50$ Hz, se observă că în funcție de numărul de perechi de poli satorici, vitezele sincrone pot fi: 3 000,

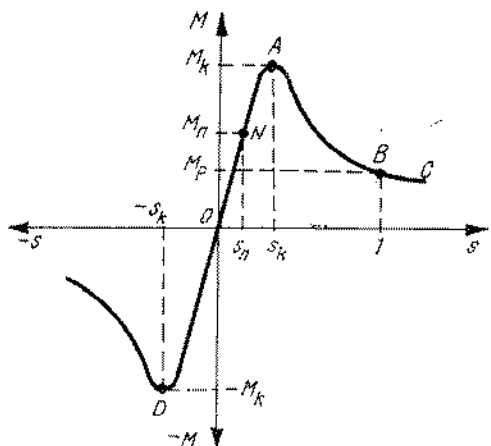


Fig. 9.14. Caracteristica mecanică naturală a motorului asincron trifazat.

1 500, 1 000, 750, 600, 500, ... rot/min, după cum $p = 1, 2, 3, 4, 5, 6, \dots$. Deoarece în exemplul considerat $n_n = 487$ rot/min, viteza sincronă imediat superioară este $n_0 = 500$ rot/min. Din relația 9.11) rezultă că $s_n = 0,026$ și din relația (9.14) rezultă $s_k = 0,097$.

Pe baza relației (9.10) se întocmește tabelul de valori:

s	0	0,015	0,026	0,06	0,097	0,15	0,5	1
M(Nm)	0	948,6	1 570	2 770	3 140	2 863	1 847	634

Avind coordonatele acestor puncte, se poate trasa caracteristica.

Observație. Din figura 9.14 și din tabelul anterior se observă că $M_p < M_n$, adică cuplul de pornire este mai mic ca cel nominal (în tabel $M_p = 634$ Nm, față de $M_n = 1 570$ Nm). Acest fapt constituie un dezavantaj al motorului asincron, deoarece el nu poate porni încărcat cu sarcina nominală, pe arbore, decât în condiții speciale, după cum se va indica ulterior.

După cum s-a menționat, pe baza relației (9.11), se poate trece la reprezentarea caracteristicii mecanice naturale a motorului asincron sub forma $M = f(n)$. În adevăr, se observă că alunecării $s = 1$ îi corespunde viteza $n = 0$, iar pentru $s > 1$ corespund viteze negative. De asemenea, pentru $s = 0$, viteza $n = n_0$ (viteza sincronă), iar pentru alunecări negative corespund viteze $n > n_0$. Făcînd ca ordonata OM să treacă prin punctul de alunecare $s = 1$,

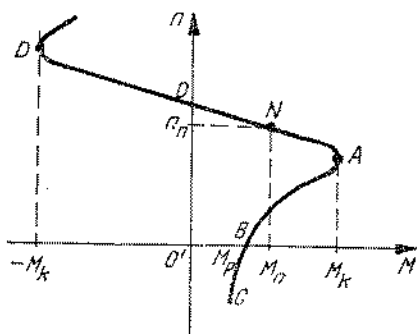


Fig. 9.15. Caracteristica mecanică $n=f(M)$ a motorului asincron trifazat.

adică de viteză $n = 0$, se obține caracteristica mecanică naturală din figura 9.15, pe care — pentru comparație — s-au păstrat notațiile din figura 9.14. Pe această figură, porțiunea OA corespunde funcționării stabile, iar porțiunea AB funcționării instabile. Ramura din cadranul II corespunde funcționării în regim de generator, iar porțiunea BC — regimului de cuplare inversă.

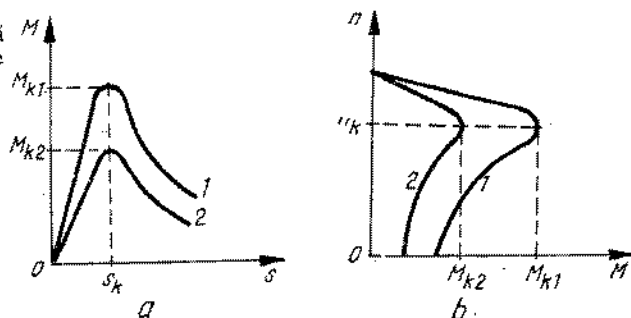
Observație. Porțiunea de caracteristică AD se aseamănă mult cu caracteristica motorului derivație de curent continuu, fiind aproape liniară și rigidă.

1. CARACTERISTICI MECANICE ARTIFICIALE ALE MOTOARELOR ASINCRONE

Din ecuația (9.10) se constată că obținerea caracteristicilor mecanice artificiale este posibilă fie prin modificarea cuplului critic M_k , fie prin modificarea alunecării critice s_k . Din relațiile (9.12) și (9.13) se observă că aceste mărimi pot fi modificate prin schimbarea tensiunii de alimentare V_1 , prin modificarea rezistenței circuitului rotoric r_2 și prin modificarea frecvenței f_1 a tensiunii de alimentare.

● Prin modificarea tensiunii de alimentare se modifică numai cuplul critic M_k . Dacă 1 este caracteristica mecanică naturală (fig. 9.16, a), corespunzătoare tensiunii nominale V_1 de alimentare a statorului motorului, atunci, pentru o tensiune $V_1' < V_1$, cuplul critic scade ($M_{k2} < M_{k1}$), caracteristica

Fig. 9.16. Caracteristică mecanică artificială obținută prin modificarea tensiunii de alimentare.



artificială avînd forma 2. În figura 9.16, *b* se prezintă aceleași caracteristici în coordonate $n = f(M)$.

Notă. La scăderea tensiunii de alimentare, cuplul critic scăzînd cu pătratul tensiunii de alimentare, se micșorează în aceeași măsură și coeficientul de suprasarcină al motorului, ceea ce diminuează mult posibilitatea motorului de a prelua unele suprasarcini accidentale pe arbore,

● **Modificarea rezistenței din circuitul rotoric** se realizează prin introducerea unor rezistențe suplimentare egale pe fiecare fază a circuitului rotoric. Acest lucru este posibil numai la motoarele asincrone cu rotor bobinat, deoarece la motoarele asincrone cu rotor în scurtcircuit, circuitul rotoric nu este accesibil. Din relațiile (9.12) și (9.13) se observă că în acest caz se modifică numai alunecarea critică, care crește proporțional cu rezistența introdusă. În figurile 9.17, *a* și *b* sînt reprezentate caracteristicile mecanice naturală 1 și artificiale 2 și 3, obținute prin introducerea de rezistențe în circuitul rotoric. Se observă că, cu cît aceste rezistențe sînt mai mari, crește și cuplul de pornire al motorului: $M_{p2} > M_{p1} > M_p$. Bineînțeles, această creștere este posibilă numai pînă la valoarea $M_p = M_k$, obținută pentru $s_k = 1$. Peste această valoare, la o creștere a rezistenței din circuitul rotoric, cuplul de pornire scade.

Din figura 9.17, *b* se observă că pentru un cuplu M_n fiecărei caracteristici mecanice îi corespunde o anumită viteză (n_n, n_1, n_2), descrescătoare cu rezistența introdusă în circuitul rotoric. Rezultă că introducerea de rezistențe suplimentare permite reglarea vitezei motorului asincron, ca și în cazul motorului de curent continuu derivație.

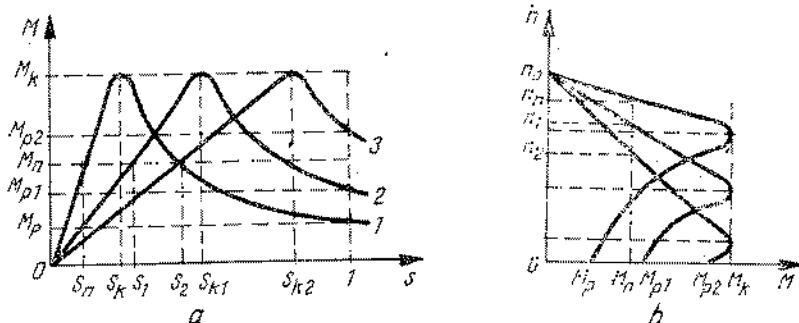


Fig. 9.17. Caracteristică mecanică artificială obținută prin modificarea rezistenței din circuitul rotoric.

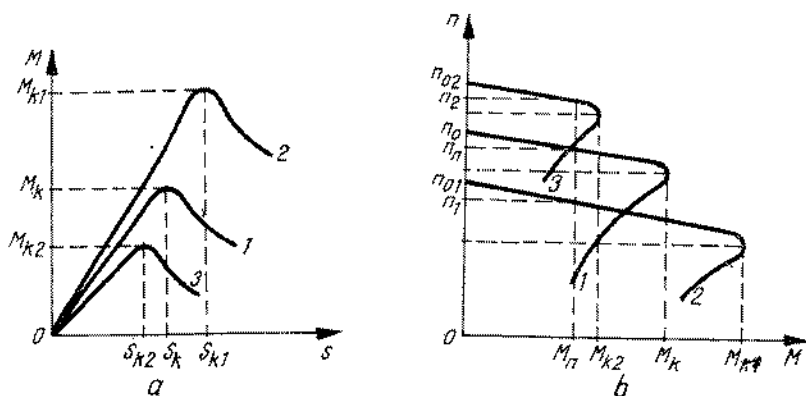


Fig. 9.18. Caracteristică mecanică artificială obținută prin modificarea frecvenței tensiunii de alimentare.

● **Modificarea frecvenței tensiunii de alimentare** duce — așa cum rezultă din relațiile (9.12) și (9.13) — atât la modificarea alunecării critice, invers proporțional cu frecvența, cât și la modificarea cuplului critic, invers proporțional cu pătratul frecvenței. Caracteristicile mecanice sînt reprezentate în figurile 9.18 *a* și *b*, în care: 1 este caracteristica mecanică naturală, corespunzătoare frecvenței f_1 , 2 este caracteristica mecanică artificială corespunzătoare unei frecvențe $f'_1 < f_1$, iar 3 — caracteristica artificială ce corespunde unei frecvențe $f'_1 > f_1$. Se observă că la creșterea frecvenței cuplul critic scade mult, conducînd la o scădere — în aceeași măsură — a coeficientului de supra-sarcină λ , ceea ce constituie un dezavantaj important.

Pe caracteristica mecanică $n = f(M)$ din figura 9.18, *b* se pune în evidență faptul că odată cu frecvența se modifică și viteza sincronă $n_0 = \frac{60f_1}{p}$ și ca atare, caracteristicile mecanice nu mai pleacă din același punct. Tot din figura 9.18, *b* se observă că pentru un cuplu constant pe arbore, de exemplu M_n , pe cele trei caracteristici mecanice se obțin viteze diferite și anume, cu atât mai mari cu cît frecvența este mai ridicată.

2. REGIMURI DE FRINARE ALE MOTOARELOR ASINCRONE TRIFAZATE

Ca și la motoarele de curent continuu derivație, și în cazul motoarelor asincrone trifazate se pot obține regimurile de *frînare cu recuperare de energie electrică*, *frînare dinamică* și *frînare prin cuplare inversă*.

● De pe figura 9.15 nu este dificil de observat că **regimul de frînare cu recuperare de energie** pentru motorul asincron se obține la fel ca la motorul de curent continuu derivație.

● **Regimul de frînare dinamică** în cazul motorului asincron se obține prin decuplarea statorului motorului de la rețeaua de alimentare și alimentarea a două faze ale statorului cu curent continuu. În acest scop se realizează schema din figura 9.19. La funcționarea normală, în regim de motor, întrerupătorul I_1 este închis, iar I_2 — deschis. Pentru trecerea în regim de frînare dina-

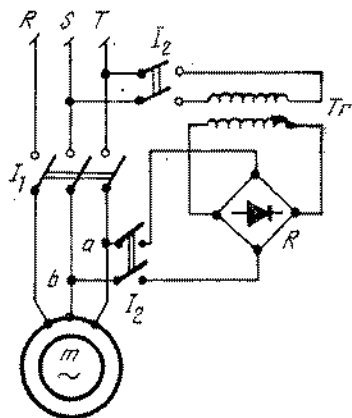


Fig. 9.19. Schema electrică la funcționarea în regimul de frinare dinamică la motorul asincron trifazat.

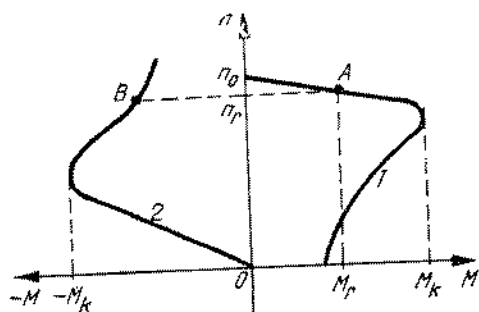


Fig. 9.20. Caracteristica mecanică la frinarea dinamică.

mică, se deschide I_1 și imediat se închid întreruptoarele I_2 . Prin aceasta se alimentează primarul transformatorului Tr , în secundarul căruia se află montată o punte redresoare R . La bornele de ieșire ale punții redresoare se obține o tensiune continuă, cu care sînt alimentate două faze ale circuitului statoric în punctele a și b .

Motorul fiind în mișcare și fiind excitat cu curent continuu pe două faze, va funcționa în regim de generator (cadranul II, fig. 9.15), însă fiind decuplat de la rețea, tinde să se oprească. Caracteristica mecanică a motorului în această situație este de forma 2 (fig. 9.20). Trecerea de la funcționarea în regim de motor (punctul A de pe caracteristica 1) la funcționarea în regim de frinare dinamică se face plecînd din A și trecînd în punctul B la viteză practic constantă n_r . Din B punctul se deplasează spre O , cînd motorul atinge viteza zero.

● **Regimul de frinare prin cuplare inversă la motorul asincron** se obține prin inversarea legăturilor a două faze ale statorului. În acest caz, funcționarea motorului trece pe caracteristica mecanică 2, din punctul A în B (fig. 9.21). Pe porțiunea BC motorul funcționează în regim de cuplare inversă, apoi trece din nou în regim de motor cu sens invers de rotație (cadranul III). Comparînd figurile 9.21 și 9.10, se observă că procesul se desfășoară la fel ca în cazul motorului derivație.

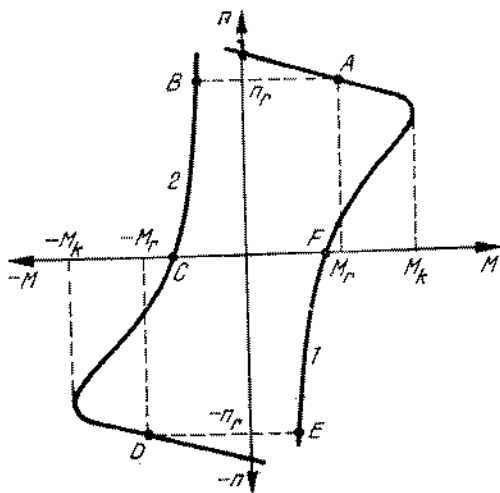


Fig. 9.21. Caracteristica mecanică la frinarea prin cuplare inversă.

Observație. Din prezentarea regimurilor de frinare dinamică și prin cuplare inversă în cazul motorului asincron, se observă că la trecerea pe caracteristicile de frinare nu este obligatorie folosirea rezistențelor de frinare, cum era în cazul motorului de curent continuu derivație și aceasta deoarece la motorul asincron cuplul inițial de frinare este limitat, prin forma caracteristicii mecanice, la valoarea cuplului M_k .

E. CARACTERISTICA MECANICĂ UNGHIULARĂ A MOTORULUI SINCRON

Motorul sincron are o caracteristică mecanică suprarigidă, adică se rotește cu viteză constantă, egală cu viteza sincronă n_0 , indiferent de sarcina de pe arborele său (fig. 9.22). Examinînd această caracteristică s-ar putea trage concluzia greșită că motorul sincron ar putea fi încărcat cu un cuplu oricît de mare. Or, se știe că acest lucru nu este posibil. Pentru a se putea delimita cuplul de sarcină al motorului sincron, se impune ca în locul caracteristicii mecanice $M = f(n)$, să se folosească un alt tip de caracteristică, numită *caracteristică mecanică unghiulară*.

Se știe că alimentînd înfășurarea statorică trifazată a motorului cu un sistem trifazat de tensiuni, apare un cîmp magnetic rotitor care se rotește cu viteza sincronă n_0 . Pe de altă parte, înfășurarea de excitație rotorică, alimentată cu curent continuu, creează și ea un cîmp. Antrenînd rotorul motorului, printr-un mijloc oarecare, pînă în apropierea vitezei de sincronism, există posibilitatea ca motorul să se *sincronizeze*, datorită tendinței celor două cîmpuri de a se roti cu aceeași viteză (sincronă). Mașina funcționează în continuare în regim de motor, deoarece rotorul este obligat să se rotească cu viteza sincronă n_0 . Cele două cîmpuri se rotesc cu aceeași viteză, însă cîmpul rotoric este decalat în urma (se rotește în urma) cîmpului statoric cu un unghi θ . Acest unghi, numit *unghi intern al motorului*, depinde de cuplul rezistent la arborele motorului. Se demonstrează că între cuplul motor care echilibrează cuplul rezistent și unghiul intern există relația:

$$M = M_{max} \cdot \sin \theta, \quad (9.15)$$

unde M_{max} este o constantă ce depinde de parametrii constructivi ai motorului și de tensiunile de alimentare statorice și rotorice.

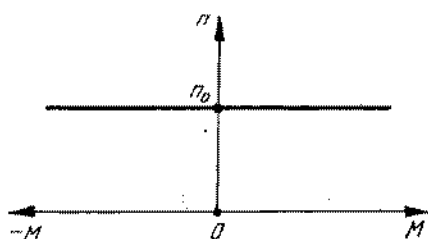


Fig. 9.22. Caracteristica mecanică a motorului sincron.

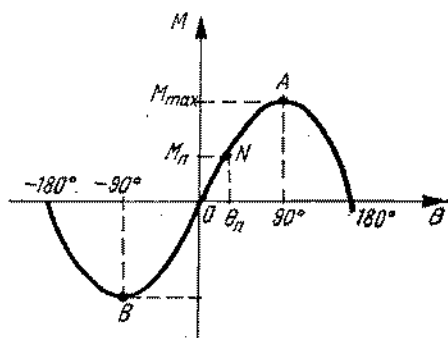


Fig. 9.23. Caracteristica mecanică unghiulară a motorului sincron.

Expresia (9.15) care dă dependența $M=f(\theta)$ este expresia caracteristicii mecanice unghiulare a motorului sincron. Această caracteristică este reprezentată în figura 9.23 și se observă că pentru $\theta = 90^\circ$, $M = M_{max}$.

Ca și la motorul asincron, se disting și aici o porțiune de funcționare stabilă (OA), pentru unghiuri interne θ cuprinse între 0° și 90° , și o porțiune de funcționare instabilă (pentru unghiuri interne θ cuprinse între 90° și 180°). Porțiunea de caracteristică din cadranul III corespunde regimului de funcționare ca generator (regim de frinare). Și în acest caz, dacă cuplul rezistent la arborele motorului este mai mare decât M_{max} motorul se oprește. De aceea și la acest tip de motor, cuplul nominal pentru care se proiectează trebuie limitat în vederea asigurării unui coeficient de suprasarcină $\lambda = \frac{M_{max}}{M_n}$, a cărui valoare se ia 2,5—3.

Motorul sincron poate fi frinat dinamic sau prin cuplare inversă, acestea realizându-se ca și în cazul motorului asincron. De obicei se preferă folosirea regimului de frinare dinamică.

Menționăm că pornirea motorului sincron se face mai dificilă ca la altele tipuri de motoare, actualmente fiind utilizate scheme speciale de comandă, care permit sincronizarea automată a motorului.

Exemplul 9.1. Se consideră motorul derivație de curent continuu pentru care: $P = 21 \text{ kW}$, $U_n = 220 \text{ V}$, $I_n = 113 \text{ A}$, $n_n = 980 \text{ rot/min}$ și $R_a = 0,13 \Omega$. Să se determine valoarea rezistenței ce trebuie introdusă în circuitul indusului pentru ca la cuplul său nominal viteza motorului să devină $n_1 = 450 \text{ rot/min}$.

Ținându-se seama de expresia caracteristicii mecanice a motorului dată de relația (9.6) și de relația $M = c_m I$, rezultă că:

$$n_n = \frac{U_n}{c_e} - \frac{I_n R_a}{c_e},$$

de unde rezultă că:

$$c_e = \frac{U_n - I_n R_a}{n_n} = \frac{220 - 113 \cdot 0,13}{980} = 0,209$$

și deci viteza de mers în gol ideal va fi $n_0 = \frac{U}{c_e} = \frac{220}{0,209} = 1050 \text{ rot/min}$, căderea nominală de viteză fiind $\Delta n_n = 1050,2 - 980 = 70,2 \text{ rot/min}$.

Pentru a se obține viteza $n = 450 \text{ rot/min}$, căderea de viteză trebuie să fie $\Delta n_1 = 1050,2 - 450 = 600,2 \text{ rot/min}$, care se obține cu relația $\Delta n_1 = \frac{I_n(R_a + R_x)}{c_e}$ unde R_x este rezistența ce trebuie introdusă în circuitul indusului motorului și este dată de relația:

$$R_x = \frac{c_e \Delta n_1 - I_n R_a}{I_n} = \frac{0,209 \cdot 600,2 - 113 \cdot 0,13}{113} = 0,98 \Omega.$$

Exemplul 9.2. Considerându-se motorul derivație din exemplul 9.1, să se determine valoarea rezistenței R_f astfel încât pentru un cuplu de frinare dinamică egal cu cuplul nominal, motorul să se rotească cu o viteză $n = 350 \text{ rot/min}$.

Ținându-se seama de relația $n = -\frac{M(R_a + R_f)}{c_e c_m}$ (v. 9. B.3.b) și de faptul că $M = c_m I$, rezultă că $n = -\frac{I_n(R_a + R_f)}{c_e}$, de unde rezultă, având în vedere că cuplul de frinare și deci curentul la frinare sînt negative:

$$R_f = \frac{c_e \cdot n - I_n \cdot R_a}{I_n} = 0,52 \Omega.$$

Exemplul 9.3. Se consideră motorul asincron trifazat având $P_n = 92 \text{ kW}$, $U = 380 \text{ V}$, $n_n = 480 \text{ rot/min}$, $I_n = 180 \text{ A}$, $\lambda = 2,2$ iar rezistența interioară pe o fază a rotorului $r_2' = 0,15 \Omega$. Se cere:

— să se determine viteza motorului la încărcare nominală, atunci când pe fiecare fază din rotor se introduce o rezistență suplimentară de $0,2 \Omega$;

— să se stabilească cu cât scade cuplul critic al motorului, dacă este alimentat la o frecvență de 60 Hz (în loc de 50 Hz);

— să se stabilească cu cât trebuie crescută tensiunea motorului pentru ca cuplul critic să nu se modifice, atunci când frecvența crește de la 50 Hz la 60 Hz .

Ținând seama de relația (9.13), în ipoteză că frecvența rămâne constantă rezultă $s_k = K_2' \cdot r_2 \left(K_2' = \frac{K_2}{f_1} \right)$. Dacă rezistența pe fază crește de la r_2 la $r_2 + r_s$, se obține $s_k' = K_2' \cdot (r_2 + r_s)$. Făcînd raportul alunecărilor critice rezultă:

$$\frac{s_k'}{s_k} = \frac{r_2 + r_s}{r_2} \text{ de unde } s_k' = \frac{s_k (r_2 + r_s)}{r_2} = \frac{s_k (0,15 + 0,2)}{0,15} = 2,33 s_k.$$

Pentru a se determina viteza, este necesar să se determine valoarea alunecărilor critice s_k și s_k' . Alunecarea s_k se determină cu relația (9.14) dacă se cunoaște cuplul nominal M_n și cuplul critic M_k . Cuplul nominal este $M_n = 9\,550 \cdot \frac{P}{n_n} = 9\,550 \cdot \frac{92}{480} = 1\,830 \text{ Nm}$. Cunoscînd coeficientul de suprasarcină λ se poate determina $M_k = \lambda \cdot M_n = 2,2 \cdot 1\,830 = 4\,026 \text{ Nm}$. Alunecarea nominală se determină din relația (9.11):

$$s_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0} = \frac{500 - 480}{500} = 0,04.$$

Aplicînd relația (9.14), rezultă:

$$s_k = \frac{s_n (M_n + \sqrt{M_k^2 - M_n^2})}{M_n} = \frac{0,04 (1\,830 + \sqrt{4\,026^2 - 1\,830^2})}{1\,830} = 0,118$$

și deci $s_k' = 2,33 \cdot s_k = 2,33 \cdot 0,118 = 0,275$.

Plecînd de la relația (9.14) în care în loc de s_k se introduce s_k' și în loc de s_n — valoarea alunecării ce trebuie determinată, rezultă:

$$s = \frac{s_k' M_n}{M_n + \sqrt{M_k^2 - M_n^2}} = \frac{0,275 \cdot 1\,830}{1\,830 + \sqrt{4\,026^2 - 1\,830^2}} = 0,092.$$

Cunoscînd alunecarea, cu ajutorul relației (9.11) se poate determina viteza corespunzătoare rezistenței suplimentare introduse în rotor:

$$n = n_0 \cdot (1 - s) = 500 \cdot (1 - 0,092) = 454 \text{ rot/min}.$$

Pentru determinarea cuplului critic la creșterea frecvenței tensiunii de alimentare, se pleacă de la relația (9.12), în care, se consideră că tensiunea de alimentare rămîne constantă; deci:

$$M_k = \frac{K_1'}{f_1^2} \text{ (unde } K_1' = K_1 \cdot V_1^2). \text{ Scriînd valorile cuplului critic pentru frecvența de } 50 \text{ Hz}$$

și pentru frecvența de 60 Hz , adică $M_k = \frac{K_1'}{50^2}$ și $M_k' = \frac{K_1'}{60^2}$ și făcînd raportul lor, rezultă

$$\frac{M_k'}{M_k} = \frac{60^2}{50^2} = 1,44 \text{ și cunoscînd } M_k = 4\,026 \text{ Nm rezultă că } M_k' = \frac{M_k}{1,44} = \frac{4\,026}{1,44} = 2\,795 \text{ Nm}.$$

Din relația (9.12) se observă că, pentru ca cuplul critic să nu-și modifice valoarea la creșterea frecvenței tensiunii de alimentare, este necesar ca raportul $\frac{V_1^2}{f_1^2}$ să rămână constant, adică $\frac{V_1^2}{f_1^2} = \frac{V_1'^2}{f_1'^2}$, de unde:

$$V_1' = V_1 \sqrt{\frac{f_1'^2}{f_1^2}} = 220 \sqrt{\frac{60^2}{50^2}} = 316,8 \text{ V.}$$

Tensiunea $V_1 = 220 \text{ V}$ este tensiunea pe fază.

CAPITOLUL 10

ALEGEREA MOTOARELOR ELECTRICE DE ACȚIONARE, ÎN FUNCȚIE DE CARACTERISTICILE MECANICE ALE MAȘINILOR DE LUCRU

A. EXEMPLE DE SISTEME DE ACȚIONARE

După cum s-a arătat în cap. 7, în regim stabilizat de funcționare, cuplul motor M este egal cu cuplul rezistent static M_r , raportat la arborele motorului. Condiția $M = M_r$ de funcționare în regim stabilizat se traduce prin aceea că cele două caracteristici mecanice — a motorului 1 și a mașinii de lucru 2 — trebuie să se intersecteze într-un punct comun A (fig. 10.1, *a*).

Rezultă deci că dacă s-ar presupune un sistem de acționare pentru care cele două caracteristici mecanice (1 și 2) nu au nici un punct de intersecție comun în cadranul I (fig. 10.1, *b*), nu ar exista nici un punct stabil de funcționare, deci sistemul nu ar fi utilizabil. Dacă însă aceeași mașină de lucru ar fi acționată cu un motor de curent continuu cu excitație serie (fig. 10.2) funcționarea sistemului ar fi posibilă în punctul stabil de funcționare A . Se observă (fig. 10.1, *b*) că funcționarea sistemului este stabilă și în cazul acționării cu motor derivație, dar funcționând pe o caracteristică artificială $1'$ obținută prin introducerea unei rezistențe suplimentare în circuitul indusului.

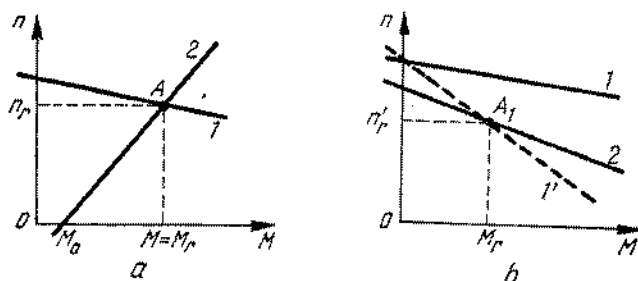


Fig. 10.1. Caracteristicile mecanice ale motorului (1) și mașinii de lucru (2);

a — funcționare stabilă;
b — funcționare stabilă numai pe caracteristica artificială $1'$.

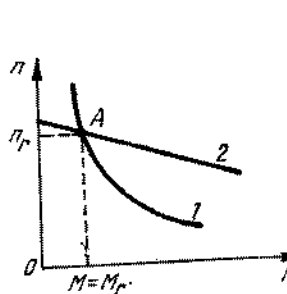


Fig. 10.2. Caracteristicile mecanice la acționarea cu un motor de curent continuu cu excitație serie.

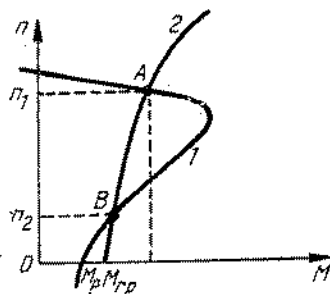


Fig. 10.3. Caracteristicile mecanice la acționarea unei pompe centrifuge cu un motor asincron trifazat.

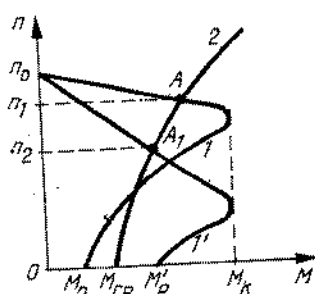


Fig. 10.4. Creșterea cuplului de pornire prin modificarea rezistenței din circuitul rotoric.

Un alt exemplu: se consideră cazul unei pompe centrifuge cu caracteristica mecanică 2 (fig. 10.3), acționată de un motor asincron cu caracteristica 1. Cele două caracteristici au două puncte de intersecție: A la viteza n_1 , și B la viteza n_2 . În realitate, ținându-se seama că punctul B este pe porțiunea instabilă a caracteristicii mecanice a motorului asincron, funcționarea stabilă a sistemului este posibilă doar în punctul A. Dealtfel, examinând figura 10.3, se observă că în situația dată sistemul nici nu poate porni, deoarece cuplul de pornire M_p al motorului este mai mic decât cuplul rezistent static de pornire al pompei M_{rp} și deci motorul nu poate porni pompa. În asemenea condiții, dacă motorul este cu rotorul în scurtcircuit, trebuie ales un motor de putere mai mare, sau un motor cu cuplu de pornire mai mare. Dacă însă motorul este cu rotor bobinat, la pornire se introduc rezistențe pe fazele circuitului rotoric și funcționarea va trece de pe caracteristica mecanică 1 (fig. 10.4) pe caracteristica mecanică artificială 1', pentru care cuplul de pornire $M'_p > M_p$ și totodată mai mare decât cuplul rezistent de pornire al pompei.

După realizarea pornirii, se scot rezistențele din circuitul rotoric și punctul de funcționare trece în A, la viteza n_1 . Dacă s-ar menține rezistențele în circuitul rotoric, funcționarea s-ar stabiliza în A₁ la o viteză $n_2 < n_1$, ceea ce are drept consecință reducerea debitului pompei. O altă consecință a menținerii rezistențelor este consumul suplimentar de energie electrică pe aceste rezistențe.

Din exemplele prezentate rezultă că la alegerea motorului de acționare este necesar să se cunoască caracteristica mecanică a mașinii de lucru, pentru că numai plecând de la aceasta se poate alege corect motorul și caracteristica mecanică pe care acesta trebuie să funcționeze. În cele ce urmează se vor mai prezenta și alte exemple de acest fel, care vor confirma această concluzie.

B. ALEGEREA TIPULUI DE MOTOR

● De cele mai multe ori se alege ca motor de acționare un motor asincron, care este cel mai ieftin, mai robust și mai ușor de întreținut. Se preferă în primul rând motoarele asincrone cu rotor în scurtcircuit, dar atunci când

apar dificultăți la pornire, mai ales la puteri mari, se recomandă motoarele asincrone cu rotor bobinat.

● În cazul când acționarea trebuie să se realizeze cu reglare de viteză se recomandă **motoarele de curent continuu** cu excitație derivație sau separată, pentru care reglajul de viteză se realizează mai simplu ca la motoarele asincrone.

● **Menționăm** că se evită reglajul de viteză obținut prin introducerea de rezistențe în circuitul motorului, întrucât apare un consum suplimentar de energie.

Motoarele de curent continuu se utilizează în special în tracțiunea electrică.

● **Motoarele sincrone** se folosesc în anumite acționări de putere ridicată, unde nu se cere modificarea vitezei. Față de motoarele asincrone prezintă avantajul că pot lucra cu un factor de putere ($\cos \varphi$) mult mai ridicat și prin aceasta se înlătură unele inconveniente, cum ar fi pierderi suplimentare în rețeaua de alimentare și în motor.

C. ALEGEREA TIPULUI CONSTRUCTIV DE MOTOR DE ACȚIONARE

Funcționarea în condiții normale a unui motor electric este posibilă dacă construcția sa corespunde condițiilor de lucru impuse de mediul înconjurător și de acest fapt trebuie ținut cont la alegerea tipului constructiv de motor, pentru a-l proteja de acțiunea prafului, umezelii, gazelor, vaporilor acizi etc. Există de asemenea situații când motorul este pus să lucreze în medii cu pericol de incendiu sau în mediu exploziv, cum este cazul în întreprinderi chimice, petroliere sau în mine.

Alegerea corectă a tipului de motor trebuie să țină seama de tipul de protecție ce se impune pentru motor.

● Conform STAS-5375-70, motoarelor electrice de acționare li se pot asigura prin construcție două **tipuri de protecție**:

— *protecția persoanelor* contra atingerii părților interioare aflate sub tensiune sau în mișcare și *protecția motorului* contra pătrunderii corpurilor străine solide, simbolizată cu litera I;

— *protecția motorului* contra pătrunderii apei, simbolizată cu P.

● **Gradul de protecție realizat este simbolizat** cu cifre de la 0 la 6 pentru protecție de tip I și de la 0 la 8 pentru protecție de tip P; de exemplu:

I0 — fără protecția persoanelor și contra pătrunderii corpurilor străine;

I2 — nu este posibilă atingerea părților interioare aflate sub tensiune sau în mișcare cu degetele și pătrunderea corpurilor străine cu dimensiuni mai mari de 12 mm;

P0 — fără protecție contra pătrunderii apei;

P4 — cu protecție contra stropirii cu apă din orice direcție;

P8 — motoare submersibile, puse să lucreze timp îndelungat sub apă.

Dacă motoarele sînt prevăzute cu ambele tipuri de protecții, se folosesc simboluri compuse, de exemplu:

IP32 — motor protejat contra pătrunderii corpurilor străine cu grosimi mai mari de 2,5 mm și contra picăturilor de apă ce cad sub un unghi maxim de 15° față de verticală.

Motoarele ce lucrează în medii cu pericol de incendiu sau de explozie sînt de două tipuri: cu *protecție antigrizutoasă* sau cu *protecție antiexplozivă*.

● Adeseori, pentru acționări electrice se pot folosi **motoarele electrice de construcție specială**, cum ar fi de exemplu:

— motoarele electrice cu ax vertical, pentru acționarea mecanismelor componente ale unor mașini unelte;

— motoare electrice de frecvență ridicată, folosite în acționări pe bordul navelor aeriene, sau pentru unele mașini-unelte portabile, în vederea realizării unor gabarite mici;

— micromotoare de construcție specială pentru realizarea unor servomecanisme sau dispozitive de automatizare etc.

ACȚIONĂRI HIDRAULICE ȘI PNEUMATICE

A. NOȚIUNI GENERALE

În unele cazuri, acționarea anumitor agregate (sarcini) se realizează cu ajutorul unor motoare neelectrice, în speță folosind energia unui lichid sub presiune (motoare hidraulice) sau a unui gaz sub presiune (motoare pneumatice). Au apărut astfel *acționările hidraulice* folosind de obicei uleiul sub presiune și *acționările pneumatice* folosind aerul comprimat.

Dacă în cazul acționărilor electrice se dispune în general, de un sistem energetic național care asigură sursa de energie electrică, în cazul acționărilor hidraulice sau pneumatice acestea având un caracter local, apare necesară realizarea unor surse „generatoare” de energie hidraulică (de exemplu o pompă de ulei sau mai multe constituind instalația de ulei sub presiune) sau de energie pneumatică (de exemplu o instalație de aer comprimat).

Schema structurală a unei acționări hidraulice sau pneumatice (fig. 11.1) cuprinde în principiu generatorul hidraulic (pneumatic) G antrenat de obicei de motorul electric E și care transmite fluidului energetic F (ulei sau aer comprimat) motorului M care antrenează sarcina (utilajul) S .

Se constată că, față de o schemă de acționare electrică, între motorul E și sarcina S s-a interpus sistemul generator motor ($G-M$) hidraulic sau pneumatic având propria sa comandă (hidraulică sau pneumatică). Acest sistem constituie, de fapt, o acționare electrohidraulică (electropneumatică).

În locul motorului electric, mai ales pe instalațiile mobile, se poate prevedea un motor cu ardere internă, de exemplu un motor Diesel. Un asemenea sistem poartă denumirea de acționare diesel-hidraulică (ca, de exemplu, acela folosit la locomotiva diesel-hidraulică ce se fabrică în țara noastră la Întreprinderea 23 August din Capitală).

Paralel cu introducerea acționărilor hidraulice și pneumatice au luat naștere și s-au dezvoltat elemente de automatizare hidraulice și pneumatice (traductoare, amplificatoare, relee etc.) precum și „elementele fluidice” construite pe baza efectului Coandă, care folosind aerul comprimat îndeplinesc „funcții logice” (ȘI, SAU, NICI etc.) în cadrul unor scheme logice de automatizare fluidice similare cu schemele logice sau cu semiconductoare.

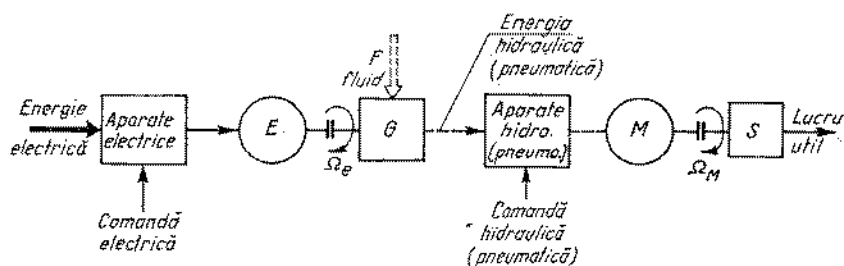


Fig. 11.1. Schema structurală a unei acționări hidraulice (pneumatice).

B. ELEMENTELE SISTEMELOR DE ACȚIONARE HIDRAULICĂ

1. STRUCTURA SISTEMELOR HIDRAULICE

În funcție de condițiile mașinii de lucru (sarcină) motoarele hidraulice pot realiza:

— *mișcare circulară (de rotație)*, ca de exemplu la locomotiva diesel-hidraulică;

— *mișcare liniară (deplasare)*, ca de exemplu la presa hidraulică.

Structural, sistemele de acționare hidraulică pot fi realizate *cu circuit închis* (fig. 11.2, *a*) sau *cu circuit deschis* (fig. 11.2, *b*). În ambele cazuri pompa *P* împinge uleiul sub presiune în motorul hidraulic *M* avînd mișcare circulară, iar uleiul uzat este adus direct la pompă (fig. 11.2, *a*), sau se scurge în rezervorul *R*, de unde este aspirat de pompă. În figura 11.2, *c* s-a prezentat schema unei acționări hidraulice cu circuit deschis și motor hidraulic cu mișcare liniară.

În acționările hidraulice se folosește în general uleiul mineral cu o viscozitate redusă (2—6° Engler la 50°C), realizat în condiții speciale de rafinare.

Avantajele principale ale *sistemelor de acționare hidraulică* sînt:

— posibilitatea *varierii continue* a vitezei de acționare, existența unui sistem de comandă hidraulică asigurînd posibilități multiple de manevrare;

— funcționare liniștită, fără zgomot și fără vibrații;

— posibilitatea realizării cu ușurință a forțelor (presiunilor) mari;

— organele componente funcționînd chiar în ulei nu necesită instalații de ungere;

— deși reprezintă o instalație în plus (în cascadă) într-un lanț de acționare, aceasta face posibilă eliminarea unor organe importante care altfel ar fi fost necesare. De exemplu, la locomotive diesel-hidraulice se elimină cutia de viteze și ambreiajul care în cazul unei locomotive diesel ar fi fost necesare. În plus, la puteri mari (1 000—2 000 kW) realizarea cutiei de viteze, dar mai ales a ambreiajului, devine practic imposibilă.

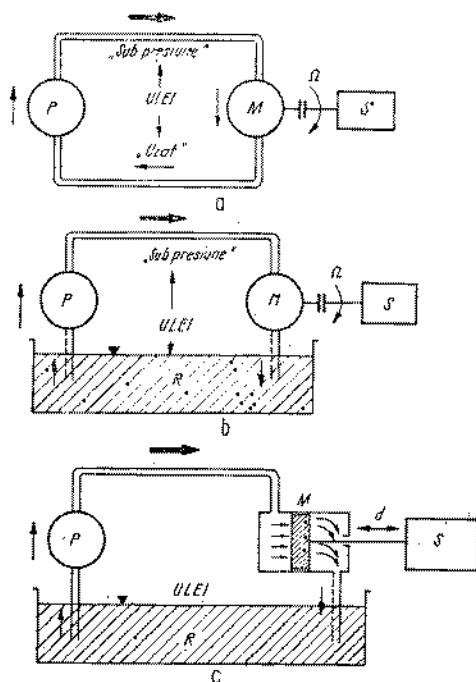


Fig. 11.2. Structura sistemelor hidraulice: *a* — cu circuit închis și mișcare circulară; *b* — cu circuit deschis și mișcare circulară; *c* — cu circuit deschis și mișcare liniară.

Dezavantajele sistemelor de acționare hidraulice sînt:

- pierderi relativ mari prin frecare în elementele componente (pompe, conducte etc.), pierderi care cresc rapid cu viteza de curgere a uleiului;
- cost relativ ridicat al elementelor componente datorită preciziei deosebite în prelucrarea acestora;
- pericol de incendiu datorită inflamabilității uleiului mineral.

2. GENERATOARE (POMPE) HIDRAULICE

Pompele folosesc pentru transformarea energiei mecanice primită de la motorul electric (diesel) în energie hidraulică.

Pompele hidraulice se pot clasifica astfel:

- *pompe cu debit variabil*: cu piston, cu paletă etc.;
- *pompe cu debit constant*: cu roți dințate, cu palete și dublă acțiune etc.

● În figura 11.3 este prezentată schematic o **pompă cu debit variabil și pistoane radiale**. Rotorul R are un număr de găuri cilindrice (de exemplu 6)

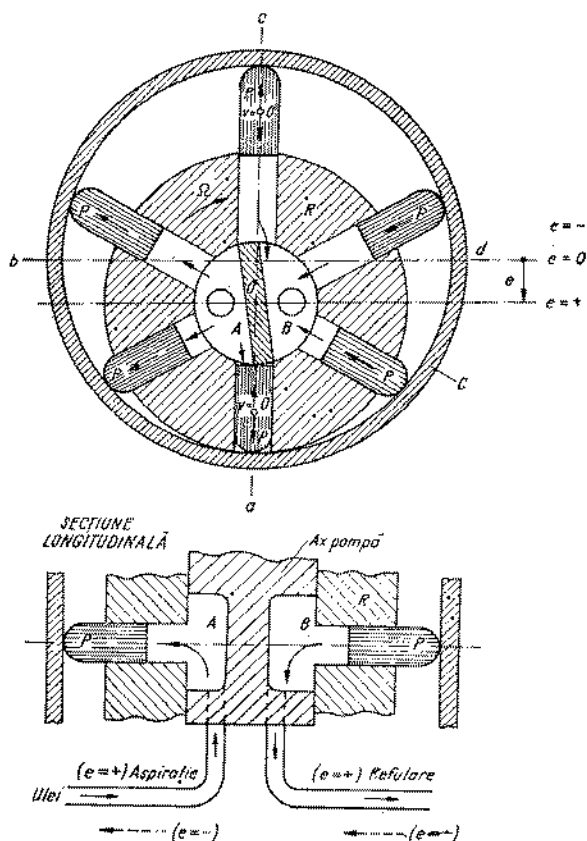


Fig. 11.3. Pompă (generator) hidraulică cu debit variabil și pistoane radiale.

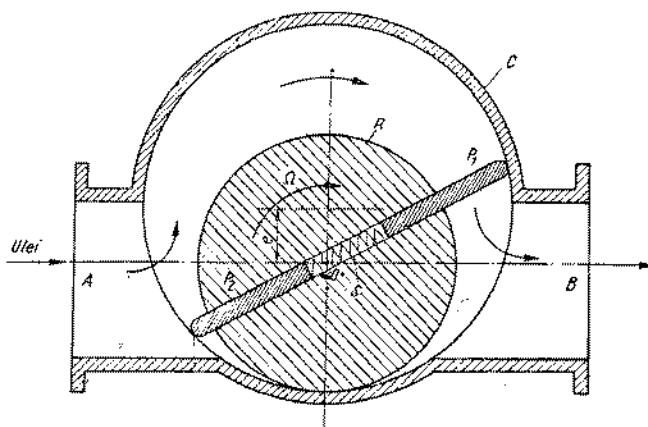


Fig. 11.4. Pompă hidraulică cu debit variabil și palete.

dispuse radial, în care se deplasează un număr corespunzător de pistoane P a căror extremitate semicirculară calcă pe inelul C al carcasei pompei.

Prin rotire, datorită excentricității e a rotorului față de carcasă, pistoanele capătă o mișcare radială în cilindri conform sensului de rotație Ω . În acest caz, în porțiunea $a-b-c$ pistoanele îndepărtându-se succesiv de centrul de rotație O , cilindrii se umplu cu ulei din camera de aspirație A (v. și secțiunea longitudinală), iar în porțiunea $c-d-a$ pistoanele apropiindu-se de centru împing uleiul din cilindri în conducta de refulare B .

Se observă că pompa își poate schimba sensul de refulare, prin modificarea excentricității e . Astfel, când $e=0$, adică rotorul este centrat față de carcasă, pistoanele se rotesc însă nu se mai deplasează radial, astfel că debitul pompei este zero, iar când e devine negativ (axul rotorului trece deasupra centrului carcasei), compartimentele A și B își inversează rolurile, deci sensul de pompare se schimbă.

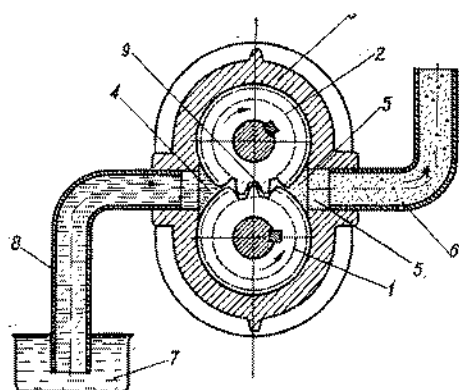


Fig. 11.5. Pompă hidraulică cu debit constant și roți dințate.

● În figura 11.4 este prezentată tot o pompă cu debit variabil însă cu palete. Principial, au fost arătate numai două palete P_1 și P_2 care, alunecând în rotorul R și fiind împinse radial cu ajutorul resortului spiral S sînt rotite în carcasa C . Datorită excentricității e a rotorului față de carcasă și corespunzător sensului de rotație Ω uleiul este absorbit prin conducta A și refulat în conducta B . Practic se construiesc pompe cu 4—12 palete.

● **Pompa cu roți dințate** din figura 11.5 funcționează la presiuni înalte ($P_{max} = 500 \text{ atm}$), însă la debit constant.

La rotirea roților dințate identice 1 și 2 închise în carcasa 3 se produce o rarefiere în camera de aspirație 4 și o presiune în camera de refulare 5. În acest mod uleiul din rezervorul 7 este absorbit prin conducta 8 și transportat pe periferia pompei de către dinții angrenajelor, pentru ca apoi să fie comprimat și refulat prin conducta 6.

3. MOTOARE HIDRAULICE

Toate pompele prezentate sînt reversibile, în sensul că fiind alimentate cu ulei sub presiune transformă energia acestuia în lucru mecanic, adică devin motoare hidraulice.

Practic, deși mașinile hidraulice sînt reversibile, ca și mașinile electrice, totuși, similar cu acestea, se construiesc în mod special motoare hidraulice. Astfel, în figura 11.6 este arătat un motor hidraulic cu mișcare circulară și pistoane axiale și cu disc fix. Blocul cilindrilor 1 se rotește solidar cu axul 2 al motorului, astfel că cele nouă pistoane se deplasează axial în mod succesiv, alunecînd pe discul înclinat 3 care are o înclinare fixă. Uleiul sub presiune intră prin orificiul din partea inferioară împingînd axial pistoanele care, pentru a-și mări volumul cilindric, sînt obligate să alunece pe discul 3, adică să rotească blocul cilindrilor 1, deci axul 2.

Motoarele hidraulice cu mișcare liniară sînt realizate sub forma unor pistoane ce se deplasează liniar în cilindri.

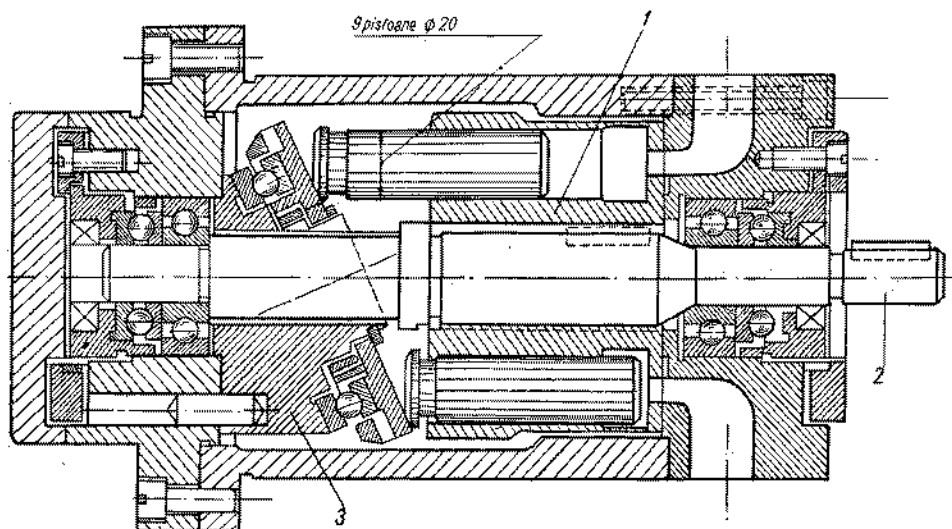


Fig. 11.6. Motor hidraulic cu pistoane axiale și disc fix.

4. APARATE HIDRAULICE

În circuitele sistemelor de acționare hidraulică se utilizează o serie de aparate avînd funcții similare celor folosite în circuitele electrice. Astfel, se întîlnesc *distribuitoare* (sertărașe), *vane*, *supape* etc.

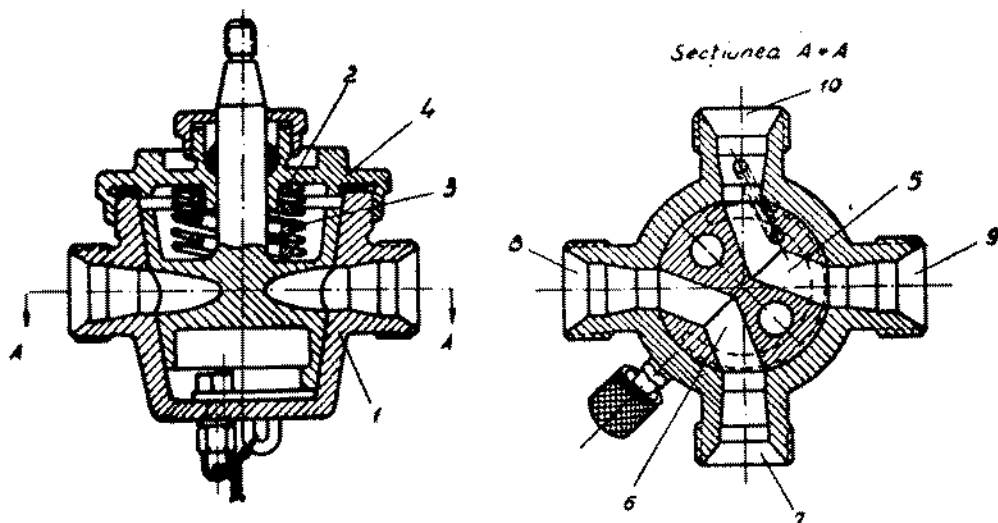


Fig. 11.7. Distribuitor rotativ cu cep (ax) conic.

● **Distribuitoarele** (omoloage întreruptoarelor electrice) asigură stabilirea — întreruperea circulației de ulei în anumite conducte; ca exemplu, în figura 11.7 este prezentat un distribuitor rotativ cu cep conic care cuprinde corpul 1 (din oțel sau fontă) de formă conică, în care se introduce capul (axul) conic 2 (din bronz), etanșarea între suprafețele conice identice ale cepului și corpului fiind asigurată prin resortul spiral 3 care sprijină pe capacul 4. Trecerea uleiului se realizează prin canalele 5 și 6 (secțiunea A—A). Într-o poziție a cepului se permite circulația uleiului între orificiile 7 și 8, respectiv 9 și 10, iar în altă poziție, prin rotirea cepului cu 90°, circulația se poate face între orificiile 7 și 9, respectiv 8 și 10.

● **Sertărașele** (distribuitoare liniare) au funcții similare cu distribuitoarele rotative, însă deplasarea lor este liniară.

● **Supapele** sînt elemente care asigură deschiderea unui circuit hidraulic atunci cînd presiunea într-un sens de circulație depășește o anumită valoare. Funcțional, supapele pot avea rol de protecție („supapă de siguranță”) deschizînd circuitul atunci cînd presiunea prea mare poate produce avariarea instalației respective; de asemenea supapele asigură circulația unidirecțională (ca o diodă electrică) într-o conductă, reținînd deplasarea lichidului în sens invers.

● În afara acestor aparate, în acționările hidraulice se mai întîlnesc: relee hidraulice, conducte, filtre, rezervoare etc.

C. ELEMENTELE SISTEMELOR DE ACȚIONARE PNEUMATICĂ

1. STRUCTURA SISTEMELOR PNEUMATICE

Schema de principiu a acționărilor pneumatice este similară cu a celor hidraulice: generator-motor-sarcină, cu observația că ele se realizează numai cu circuit deschis (v. fig. 11.2 b și c). Agentul motor folosit în sistemele de acționări pneumatice este, de obicei, aerul comprimat la presiuni de 5—6 atm.

Acționările pneumatice prezintă următoarele *avantaje* specifice în raport cu cele hidraulice:

- precizia mai redusă de executare a pieselor componente;
- se pot folosi în medii explozive sau cu pericol de incendiu;
- rapiditatea acționării mecanismelor comandate datorită destinderii bruște a aerului comprimat.
- funcționarea la temperaturi scăzute, neexistînd pericol de congelare sau sporirea viscozității agentului motor.

Similar, *dezavantajele* acționărilor pneumatice sînt:

- datorită compresibilității gazelor, presiunile, deci forțele realizabile, sînt mai mici;
- prin comprimare și destindere rapidă (transformări adiabactice) temperatura variază*, fapt care implică necesitatea unor instalații de răcire a gazului (la comprimare) și posibilitatea condensării vaporilor de apă din aer (la destindere), apa fiind agent corosiv pentru instalație;
- gazele nu au proprietatea de ungere a pieselor în mișcare, ceea ce impune o întreținere suplimentară.

2. GENERATOARE PNEMATICE

Generatoarele pneumatice sînt similare celor hidraulice și se clasifică astfel:

- *compresoare cu piston*;
- *compresoare rotative*;
- *turbocompresoare*.

● **Compresoarele cu piston** (fig. 11.8) cuprind pistonul P care, deplasîndu-se în jos în cilindrul C , absoarbe aerul din conducta A prin supapa S_A , iar la deplasarea în sus îl comprimă și îl refulează în conducta R (supapa S_A se închide) prin supapa S_R care se deschide la creșterea presiunii.

Compresoarele în cascadă sînt realizate din mai multe compresoare monocilindrice acționate de un ax comun, la care refularea unei trepte corespunde cu admisia în treapta următoare, fapt care asigură presiuni mari de aer (20—30 atm).

● **Compresoarele rotative** (fig. 11.9) sînt compuse dintr-un stator cilindric și un rotor cilindric cu o serie de palete plasate oblic în niște creștături ale rotorului. În funcționare, datorită forțelor centrifuge paletetele sînt proiectate spre periferie, absorbînd aerul din galeria de admisie și comprimîndu-l în camera de ieșire. Compresorul respectiv este răcit cu apă.

Turbocompresoarele, de asemenea rotative, sînt generatoare pneumatice pentru debite mari (3 000—4 000 m³/min) și presiuni relativ mici ($p < 6$ atm), funcționînd la puteri și turații mari.

* Conform relației $PV = RT$, în care P este presiunea, V = volumul molar, R = constanta gazelor și T — temperatura absolută pentru gazul respectiv.

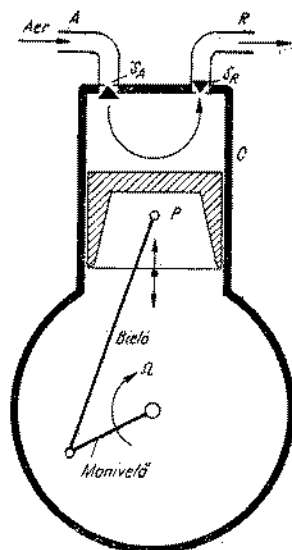


Fig. 11.8. Compresor cu piston.

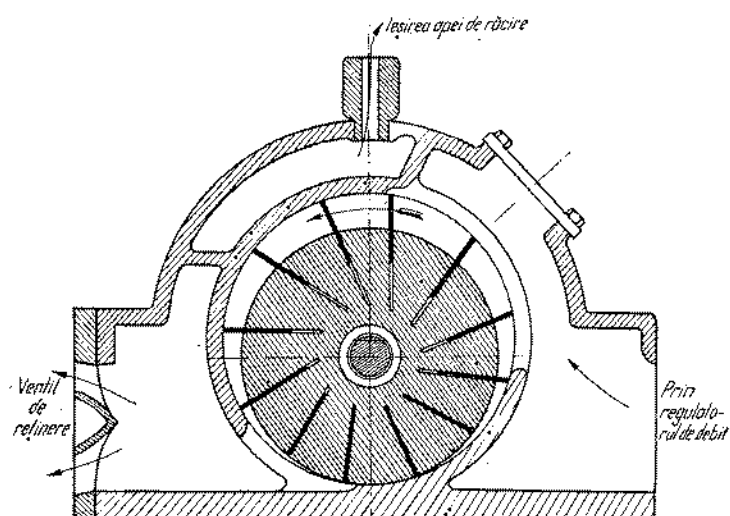


Fig. 11.9. Compresor rotativ cu palete.

3. MOTOARE PNEUMATICE

Motoarele pneumatice pot fi: *rotative* și *liniare*, acestea din urmă putând fi: *cu piston* sau *cu membrană*.

- **Motoarele pneumatice rotative** se realizează de obicei cu palete, fiind principal identice cu compresoarele rotative (v. fig. 11.9).

- **Motoarele pneumatice liniare cu piston** sînt folosite în cazul cînd sînt necesare deplasări mai mari.

Asemenea tipuri de motoare sînt folosite și în acționările hidraulice.

- **Motoarele pneumatice liniare cu membrană** sînt formate dintr-o capsulă manometrică prevăzută cu o membrană elastică.

4. APARATE PNEUMATICE

Sînt identice ca funcțiuni cu cele folosite la acționările hidraulice: *distribuitoare*, *sertărașe*, *supape*, *conducte*, *filtre* etc.

D. SURSE DE ALIMENTARE

1. INTRODUCERE

În funcție de complexitatea sistemului de acționare hidraulică sau pneumatică, *pentru producerea agentului motor* (ulei sau aer comprimat) se folosește în cazul cel mai general o instalație completă denumită, ca și în cazul acționărilor electrice, *sursă de alimentare*.

Se vor distinge, aşadar, surse de alimentare hidraulice, respectiv pneumatice, care asigură uleiul sub presiune, sau aerul comprimat la parametrii impuşi de acţionarea respectivă.

Pentru ambele cazuri, sursele de alimentare (hidraulice sau pneumatice) se realizează sub forma a două tipuri diferite şi anume:

- surse pentru alimentarea elementelor de măsurare, comandă, reglare (ca, de exemplu: traductoare, amplificatoare, reglatoare etc.), caz în care interesează valoarea informaţională a presiunii uleiului sau a aerului comprimat. Aceste surse se caracterizează prin presiuni mici şi puteri reduse;

- surse pentru alimentarea motoarelor de acţionare hidraulice sau pneumatice, caz în care interesează valoarea energetică (puterea) a presiunii uleiului sau aerului comprimat. Aceste tipuri de surse care interesează în cazul de faţă sînt caracterizate prin presiuni şi puteri mari.

Trebuie precizat faptul că pentru ambele tipuri de surse arătate mai sus, structurile principale sînt în linii generale aceleaşi; ele vor fi descrise mai jos.

2. SURSE HIDRAULICE

În figura 11.10 este prevăzută *schema de principiu a unei surse de alimentare cu ulei sub presiune*. Pompa cu roţi dinţate P (v. fig. 11.5) acţionată de motorul electric M absoarbe uleiul dintr-un rezervor R cu „suprafaţă liberă”, adică la presiune atmosferică, printr-un filtru F_1 şi îl împinge într-un rezervor sub presiune A , numit conservator sau acumulator de ulei. În calea sa, uleiul străbate filtrul de ieşire F_2 „clapeta antiretur” C — supapă — care asigură circulaţia undirecţională a uleiului şi vana (ventil) de intrare V_A .

Rezervorul A este separat de o membrană elastică E în două compartimente (1 şi 2) în care se află ulei, respectiv aer comprimat adus de la un compresor prin vana V_B . În acest mod, aerul fiind compresibil asigură presiunea necesară uleiului, presiune care altfel nu ar fi putut să fie realizată întrucît uleiul (ca în general toate lichidele) este incompresibil. Uleiul sub presiune este transmis prin vana V_C la o „bară de distribuţie” C , de la care printr-o serie de vane individuale $V_1, V_2 \dots$ este trimis la „utilizare” (diverse motoare de acţionare hidraulică). Uleiul „uzat” adică practic la presiunea atmosferică, este colectat pe o bară B (conductă) şi prin conducta de „retur” este adus înapoi în rezervorul R , de unde îşi reia circuitul.

Rezervorul R mai cuprinde o serie de pereţi verticali S parţial despărţitori alternînd sus şi jos, care constituie „şicane” în drumul uleiului de la retur la filtrul de absorbţie F_1 . Acest lucru asigură decantarea (depunerea) particulelor solide care se formează în ulei. O vană de fund D permite eliminarea („purjarea”) reziduurilor solide din ulei în atmosferă. Sistemul mai este prevăzut la ieşirea din pompă cu o vană de strangulare cu supapă de siguranţă L , care îndeplineşte următoarele funcţiuni:

- conduce înapoi în rezervor surplusul de ulei pompat atunci cînd consumul de ulei este redus*;

- deschide brusc supapa de siguranţă care asigură circulaţia uleiului înapoi în rezervorul R , atunci cînd presiunea sa atinge o valoare inadmisibilă.

* Evident, pompa (generatorul) P care funcţionează continuu trebuie să asigure debitul necesar de ulei în cazul consumului maxim.

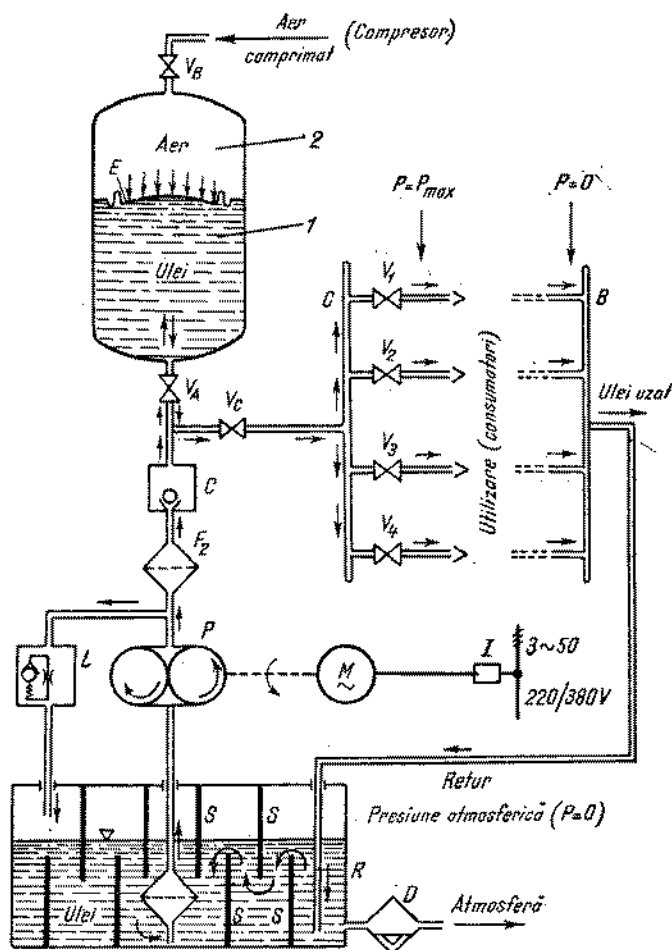


Fig. 11.10. Schema principală a unei surse hidraulice.

3. SURSE PNEUMATICE

În figura 11.11 este prezentată *schema principală a unei surse pneumatice*. Compresoarele — generatoarele pneumatice — C_1, C_2 antrenate de motoare electrice M_1, M_2 absorb aerul din atmosferă printr-un filtru F_1 , refulându-l prin schimbătoare de căldură S_1, S_2 , vane V_1, V_2 și un filtru F_2 în rezervorul („tampon”) de aer R .

Schimbătoarele de căldură (răcitoarele) răcite cu apă au rolul de a prelua căldura degajată de aerul comprimat (adiabatic) la ieșirea din compresoare.

Rezervorul asigură o anumită rezervă de aer („tampon”) în perioada în care compresoarele nu funcționează, motoarele electrice fiind comandate (pornite-oprite) prin „releele pneumatice” P_1, P_2 alimentate chiar cu aer din rezervor*.

* În acest mod se asigură pornirea motocompresoarelor când presiunea scade (de exemplu $P < 1,4$ atm) și oprirea acestora când presiunea depășește o anumită valoare ($P > 1,6$ atm).

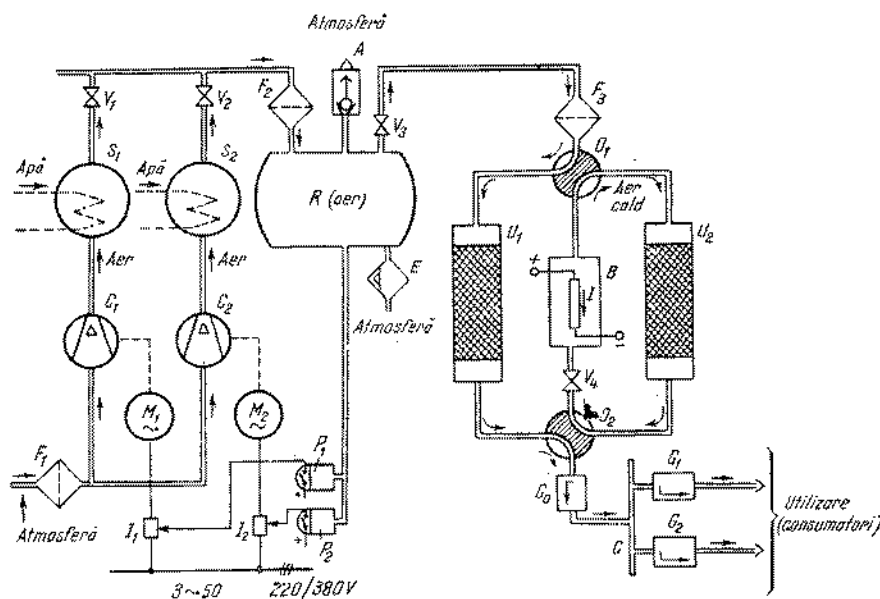


Fig. 11.11. Schema principală a unei surse pneumatice.

Rezervorul respectiv este prevăzut cu un ventil de curățire E — „purjor” — în atmosferă și cu o supapă de siguranță A — „eșapare rapidă” — care se deschide în atmosferă în cazul unei presiuni periculoase în rezervor. Din rezervor, aerul comprimat este trimis printr-o vană V_3 și un filtru F_2 printr-o coloană de uscare (U_1 sau U_2) către conducta de utilizare C .

Coloanele de uscare au rolul de a elimina vaporii de apă din aer care au fost absorbiți din atmosferă odată cu aerul.

Uscarea aerului se realizează de obicei pe cale chimică, folosind substanțe absorbante cum ar fi, de exemplu, oxidul de siliciu, sau alumina.

Atenție! Prezența vaporilor de apă sau a condensului în aerul comprimat riscă să infunde unele orificii sau să producă coroziunea metalelor din instalație.

Cu ajutorul unor distribuitoare cu două căi (D_1 și D_2) (v. figura 11.7) aerul este trecut printr-una din coloanele de uscare (U_1) cuprinzând oxidul de siliciu, în timp ce cealaltă (U_2) este „regenerată” prin suflarea cu aer cald de la un cuptor electric B . Prin manevrarea simultană a celor două distribuitoare, cele două coloane își inversează funcțiile. La intrarea pe bara de distribuție C , precum și pe fiecare conductă de alimentare a consumatorilor, se prevăd „regulate directoare” de presiune $G_0, G_1, G_2 \dots$ care asigură o presiune p_0 constantă la utilizare (de exemplu $p_0 = 1,4$ atn).

După folosire, aerul „uzat” este eliminat, bineînțeles, în atmosferă.

E. EXEMPLE DE ACȚIONĂRI HIDRAULICE ȘI PNEUMATICE

În figura 11.12 este prezentată principal schema de acționare a unei prese hidraulice. Uleiul sub presiunea p_1 (de exemplu $p_1 = 300$ atm) obținut de la sursa de alimentare este refulat prin distribuitorul D (canalul 1—2) în

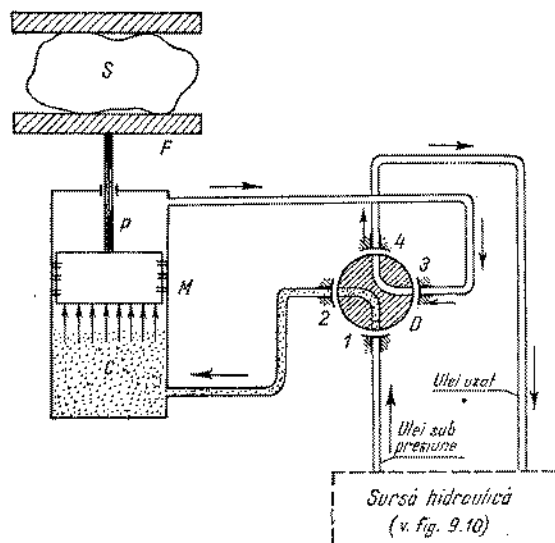


Fig. 11.12. Acționarea unei prese hidraulice.

împinge pistonul P în cilindrul C , acționând la închidere separatorul E . Se observă că aerul din spatele pistonului este evacuat în atmosferă prin conducta D și compartimentul 2.

cilindrul C al motorului liniar M . Pistonul P deplasează platforma F comprimând (presând) sarcina S . În același timp, uleiul uzat este condus prin distribuitor (canalul 3—4) înapoi la sursă. Prin rotirea cu 90° a distribuitorului D canalele 1—3 și 2—4), motorul liniar se deplasează invers.

● În figura 11.13 este prezentată schema de acționare pneumatică a unui separator electric. Prin manevrarea manetei M în poziția „închis”, sertărașul S (distribuitor liniar) se deplasează ca în figură, aerul comprimat din rezervorul R trece prin compartimentul 1 în conducta 1 și

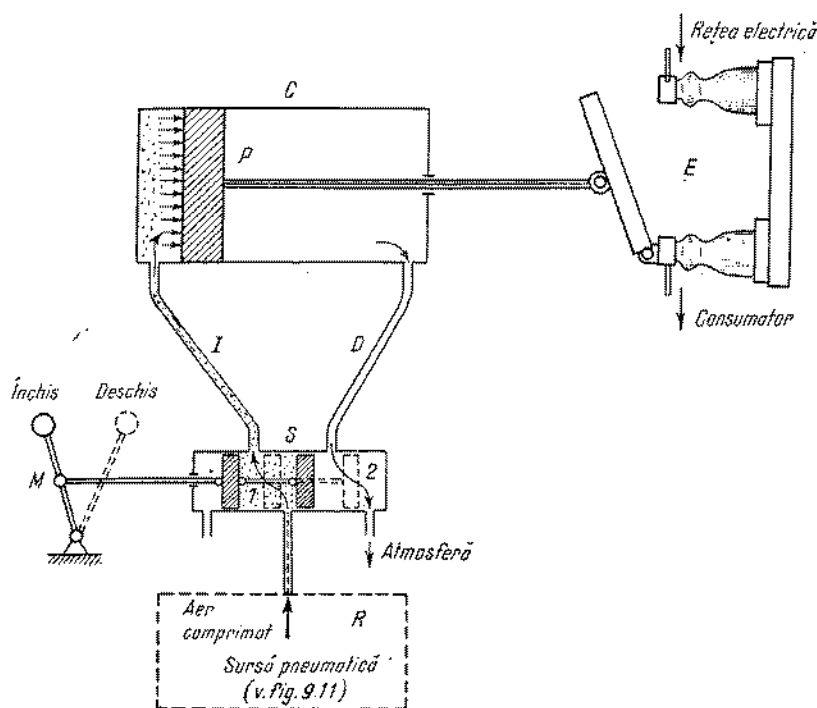


Fig. 11.13. Acționarea pneumatică a unui separator electric.

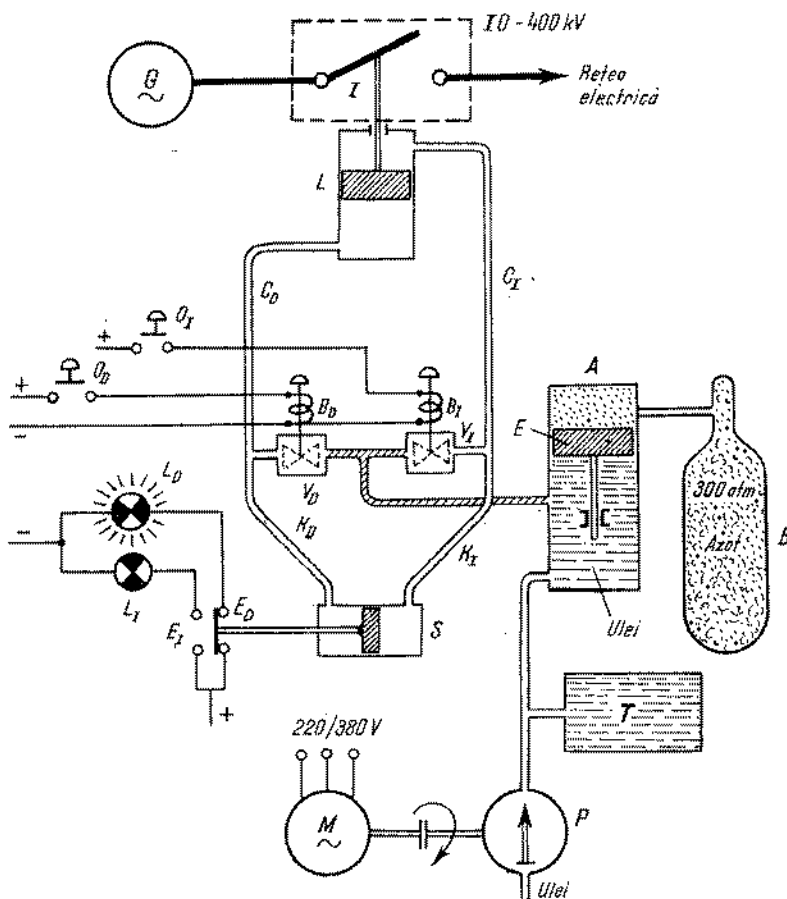


Fig. 11.14. Sistem de acționare oleopneumatic al întreruptorului IO.
110—400 KV.

La manevrarea manetei M în sens invers („deschis”) deplasarea sertărașului este inversă (desenată punctat), iar pistonul P este acționat invers producând deschiderea separatorului.

Observație. Exemplul cu separatorul reprezintă un caz din multe altele; este ușor de observat că în locul cuțitului separatorului se putea afla un organ de mașină cu o mișcare similară, de exemplu: ușa unui cuptor, o paletă de reglare în circuitul unui fluid, cîrma unui vas etc. De asemenea, în locul aerului comprimat se putea folosi ulei sub presiune, același exemplu fiind valabil și pentru o acționare hidraulică, cu observația că uleiul uzat trebuie recuperat.

● În unele cazuri pentru a îmbina avantajele sistemelor hidraulice și a celor pneumatice se folosesc sisteme de acționare mixte (hidraulice + pneumatice) numite și sisteme *oleopneumatice*. Astfel, de exemplu, în figura 11.14 este prezentat un sistem de acționare oleopneumatic (tip MOP) folosit la comanda întreruptoarelor de 110, 220 și 400 kV, de tip IO, fabricate la Întreprinderea „Electroputere” din Craiova.

Pompa (generatorul) de ulei P acționată de motorul electric M absoarbe uleiul uzat și îl împinge în acumulatorul de energie A (realizat sub forma unui

cilindru cu piston), precum și în rezervorul tampon T aflat în derivație. Presiunea înaltă a uleiului (circa 300 atm) este realizată cu ajutorul unei butelii B conținând azot sub presiune ($p > 300$ atm), ce acționează asupra pistonului E din acumulatorul A . Uleiul sub presiune este adus la intrarea „electroventilelor” de comandă V_I și V_D . Pentru închiderea întreruptorului I de înaltă tensiune este comandată electric de la distanță bobina B_I prin butonul de comandă O_I , ceea ce are ca efect deschiderea ventilului V_I . Uleiul sub presiune pătrunde prin conducta C_I și împingând în jos pistonul motorului liniar L produce închiderea întreruptorului I .

Totodată, prin conducta K_I este acționat tot cu ulei sub presiune „releul hidraulic” S care, închizând contactul electric E_I , aprinde lampa L_I și semnalizează astfel „întreruptor închis”. Similar, comanda electrică de declanșare dată prin butonul O_D și bobina B_D produce deschiderea electroventilului V_D și trimiterea uleiului sub presiune la motorul L , care este acționat în sens invers producând deschiderea întreruptorului I . Concomitent, prin conducta K_D este acționat în sens invers și releul de semnalizare S , care prin închiderea contactului electric E_D aprinde lampa L_D indicând astfel „întreruptor deschis”.

Constructiv, dispozitivul de acționare oleopneumatic prezentat mai cuprinde o serie de elemente care blochează manevrarea întreruptorului în anumite condiții ca, de exemplu: presiunea azotului este redusă, cantitatea de ulei este insuficientă etc.

CAPITOLUL 12

ACȚIONĂRI ELECTRICE CU GRUPURI DE MAȘINI

A. NOȚIUNI INTRODUCTIVE

Adeseori, se cere ca acționările electrice ale unor mașini de lucru să funcționeze la viteze strict constante sau să-și modifice viteza la anumite intervale de timp. În alte situații este necesar ca două motoare care acționează părți componente ale aceleiași mașini de lucru să se rotească cu aceeași viteză, sau între vitezele lor să se mențină un raport strict constant. De respectarea acestor cerințe depinde, de cele mai multe ori, funcționarea corectă a sistemului de acționare, dar mai ales calitatea produselor realizate de mașina de lucru. De exemplu, mașina de tras hîrtie este acționată de mai multe motoare electrice, fiecare motor acționînd o secțiune a mașinii. Pentru a se obține o hîrtie de o anumită calitate, este necesar ca între vitezele motoarelor ce acționează diferite secțiuni să se mențină un raport strict constant, pentru ca pasta din care se fabrică hîrtia să se întindă absolut uniform. O încetinire a vitezei motorului uneia dintre secțiuni față de secțiunea care o precede poate duce la aglomerare de pastă și deci la hîrtie de altă calitate, sau chiar la deșeuri, iar o creștere a vitezei duce la subțierea hîrtiei sau chiar la ruperea ei.

Cu ocazia studiului caracteristicilor mecanice artificiale ale motoarelor electrice (vezi 9.B.2 și 9.D.1) au fost indicate și unele posibilități de modi-

ficare a vitezei motoarelor electrice. Aceste posibilități sînt însă, în general limitate, fie datorită limitelor destul de înguste în care se poate regla viteza în mod convenabil, fie, mai ales, datorită mijloacelor prin care se pot modifica unii parametri ai motorului electric de acționare. De exemplu, s-a arătat că în cazul motorului de curent continuu derivație, o posibilitate convenabilă de reglare a vitezei este prin modificarea tensiunii de alimentare a motorului. Se știe însă că rețelele de distribuție a energiei electrice funcționează la tensiune constantă, deci pentru folosirea acestei metode de reglare a vitezei este necesară o sursă de energie cu tensiune reglabilă. Un alt exemplu: reglarea vitezei unui motor asincron se poate face prin modificarea frecvenței tensiunii de alimentare. Dar se știe că frecvența tensiunii rețelelor de curent alternativ este constantă ($f = 50 \text{ Hz}$). Deci, pentru aplicarea acestei metode este necesar să se dispună de o sursă de frecvență variabilă.

Soluționarea problemelor de acest fel, precum și a altor probleme este posibilă prin utilizarea unui grup de mașini electrice, în locul unui singur motor de acționare. În general, grupurile de mașini folosite în acționările electrice diferă mult între ele, în funcție de problemele pe care trebuie să le rezolve. În cele ce urmează vor fi prezentate principalele grupuri de mașini folosite în acționările electrice.

B. GRUPUL GENERATOR-MOTOR

Grupul generator-motor, numit și grup Ward-Leonard, este folosit pe scară largă pentru reglarea vitezei unui motor de curent continuu prin modificarea tensiunii de alimentare.

● Principal, acest grup este format din următoarele părți componente (fig. 12.1): generatorul G de curent continuu, care alimentează direct motorul de curent continuu M , cuplat cu mașina de lucru acționată ML . Pentru ca generatorul G să dea tensiunea U de alimentare a motorului, este necesar ca el să fie rotit la viteza sa nominală și să fie excitat. Rotirea generatorului se realizează cu motorul asincron MA , alimentat de la rețeaua de curent alternativ, iar excitarea generatorului G , ca și a motorului M , se face de la excitatoarele E (un generator de curent continuu, antrenat tot de MA). Inversorul I servește la inversarea sensului curentului de excitație al generatorului G și prin aceasta, la inversarea sensului tensiunii U , deci la inversarea sensului de rotație al motorului. Reostatul R_1 servește la modificarea curentului de excitație în înfășurarea EG , iar reostatul R_2 servește la modificarea curentu-

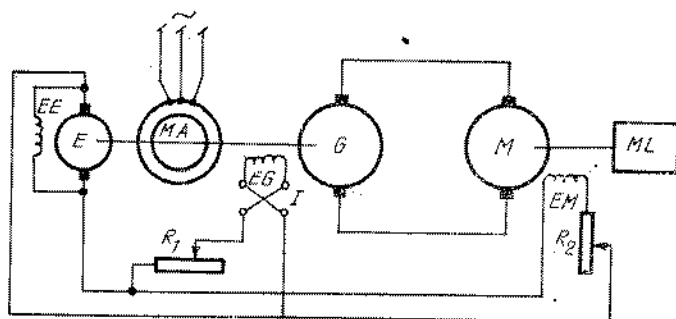


Fig. 12.1. Schema electrică a unui grup generator-motor.

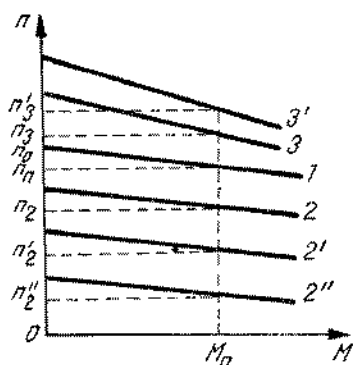


Fig. 12.2. Reglarea vitezei la acționarea cu grup generator-motor.

la scăderea tensiunii U la bornele generatorului, deci a tensiunii de alimentare a motorului. În această situație (v. 9.B.2), motorul va funcționa pe caracteristici mecanice artificiale situate sub caracteristica mecanică obținută pentru tensiunea maximă U (caracteristica 1, fig. 12.2) și anume pe caracteristicile 2, 2', 2'' etc.

Dacă ținem seama de expresia analitică a caracteristicii mecanice naturale (9.7) a unui motor de curent continuu cu excitație separată (identică cu cea a motorului derivație) și de faptul că în circuitul comun intervine rezistența R_a a indusului motorului și rezistența R_g a indusului generatorului, rezultă că expresia caracteristicii mecanice a motorului funcționând în sistemul generator-motor este:

$$n = \frac{U}{k_e \Phi} - \frac{M(R_a + R_g)}{k_g k_m \Phi^2}. \quad (12.1)$$

Rezultă deci că pentru sistemul generator-motor căderea de viteză și deci înclinarea caracteristicii mecanice este mai mare ca în cazul motorului alimentat direct de la o rețea de curent continuu.

Din relația (12.1) se mai observă că prin modificarea rezistenței reostatului R_2 din circuitul de excitație al motorului se poate modifica fluxul de excitație al motorului și deci (v. 9.B.2) se pot obține caracteristicile mecanice artificiale 3, 3' etc. (fig. 12.2).

● Din examinarea modului de funcționare a grupului generator-motor, rezultă că acesta prezintă numeroase **avantaje** și anume:

— permite o reglare în limite largi a vitezei și anume, în sens descrescător, prin modificarea rezistenței reostatului R_1 și în sens crescător prin modificarea rezistenței reostatului R_2 ;

— nu este necesară folosirea de trepte de rezistențe pentru pornirea motorului, deoarece limitarea curentului la pornire se poate face prin pornire la tensiune scăzută (valori mari ale rezistenței R_1) și prin aceasta se evită consumul suplimentar de energie pe rezistență;

— nu este necesară o rețea de curent continuu, deoarece alimentarea grupului generator-motor se face de la rețeaua de curent alternativ, prin intermediul motorului asincron MA ;

lui prin înfășurarea de excitație EM , deci la modificarea fluxului de excitație al motorului.

● Grupul generator-motor **funcționează în felul următor**: cuplînd motorul asincron MA la rețea, acesta va antrena atât generatorul G , cit și excitatoarea E , care va pune sub tensiune înfășurările de excitație EM și EG ale motorului și generatorului. În aceste condiții, generatorul va debita tensiunea U , care alimentează motorul M , care, fiind excitat, se va roti și va antrena mașina de lucru ML .

Tensiunea U este maximă atunci cînd reostatul R_1 este scos complet din circuit, adică cursorul său este la limita din stînga pe figură. Pe măsură ce cursorul se deplasează spre dreapta, scade curentul de excitație și deci fluxul de excitație al generatorului, ceea ce duce

— în montaje speciale, folosind mașini amplificatoare, grupul generator-motor poate fi folosit și pentru acționări electrice la viteză strict constantă, independent de valoarea cuplului rezistent pe arbore.

● Grupul generator-motor prezintă însă și unele **dezavantaje** și anume în locul unei singure mașini de acționare sînt necesare patru mașini, dintre care trei (M, G, MA) de puteri apropiate ca valoare, iar una (E) de putere mult mai mică. Acest lucru atrage după sine creșterea costului investițiilor, necesitatea unui spațiu mare pentru montare, exploatare mai grea, dat fiind numărul sporit de mașini rotative, zgomot crescut față de cazul utilizării unui singur motor de acționare.

C. CONVERTIZOARE DE FRECVENȚĂ ROTATIVE

După cum s-a arătat în paragraful 9.D.1, o posibilitate de reglare a vitezei motorului asincron este modificarea frecvenței tensiunii de alimentare. Principalul inconvenient este necesitatea unei surse de frecvență variabilă. Un alt inconvenient constă în aceea că, așa cum rezultă din relația (9.12), creșterea frecvenței duce la scăderea cuplului critic și deci la micșorarea coeficientului de suprasarcină al motorului.

Acest ultim inconvenient poate fi înlăturat dacă odată cu frecvența tensiunii de alimentare se modifică și tensiunea de alimentare, astfel încît raportul $\frac{V_1}{f_1} = \text{const.}$ (în acest caz, cuplul critic M_k rămîne constant). Primul inconvenient se poate înlătura prin alimentarea motorului asincron de la un convertizor de frecvență.

Convertizoarele de frecvență pot fi *statice* sau *rotative*. **Convertizoarele de frecvență rotative** se pot subîmpărți la rîndul lor în *convertizoare asincrone* și *convertizoare sincrone*.

● În figura 12.3 este prezentată **schema de principiu a unui convertizor asincron de frecvență**. Convertizorul de frecvență propriu-zis este format din mașina asincronă cu rotor bobinat CA , alimentat în rotor (excitat) cu o tensiune alternativă trifazată de frecvență $f_1 = \text{const.}$ și rotit cu o viteză variabilă de un motor de curent continuu (M), funcționînd în sistemul generator-motor. La bornele statorului mașinii CA se obține o tensiune alternativă de frecvență variabilă funcție de viteza de rotație a convertizorului asincron. Motorul a cărui viteză se reglează prin modificarea frecvenței se conectează la bornele de frecvență variabilă f_2 .

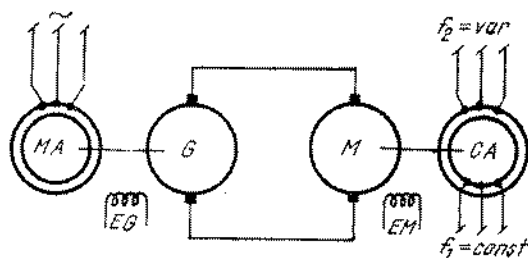


Fig. 12.3. Schema electrică a unui convertizor asincron de frecvență.

● În cazul **convertizorului sincron de frecvență**, în locul mașinii CA se folosește un generator sincron, a cărui viteză se poate regla prin reglarea vitezei motorului M (ca și în figura 12.3) și a cărui înfășurare rotorică este excitată în curent continuu.

● **Avantajul** acestor convertizoare constă în faptul că, menținând constant curentul de excitație rotoric, se menține constant raportul $\frac{V_1}{I_1}$ și deci se menține constant și cuplul critic M_k al motorului asincron a cărui viteză se reglează.

● **Dezavantajul** principal al acestor convertizoare constă în numărul mare de mașini ce trebuie folosite pentru realizarea grupului, care generează aceleași inconveniente ca și la grupul generator-motor.

D. ARBORELE ELECTRIC

În practică se întâlnesc adeseori situații în care diferitele părți componente ale unei mașini de lucru, situate la distanțe apreciabile între ele (3—4 m), trebuie să se rotească strict cu aceeași viteză. Acest lucru se poate realiza prin cuplarea părților componente pe un același ax mecanic. Această soluție creează dificultăți de instalare sau greutăți de exploatare, datorită deformărilor pe care le poate lua axul. În asemenea situații este preferabil să se folosească câte un motor pentru acționarea fiecărei părți componente a mașinii de lucru, fără legătură mecanică între ele, dar legate electric, astfel încât să se rotească cu aceeași viteză. În felul acesta se realizează un așa-numit *ax sau arbore electric*. Arborii electrici se pot realiza în mai multe variante, însă tipurile cele mai răspândite sînt: *cu mașini ajutătoare asincrone* și *cu reostat comun*.

1. ARBORELE ELECTRIC CU MAȘINI AJUTĂTOARE ASINCRONE

● **Schema de principiu** a unui asemenea arbore electric este indicată în figura 12.4 și conține motoarele principale de acționare M_1 și M_2 care acționează separat părțile componente I și II ce trebuie să le rotească cu aceeași

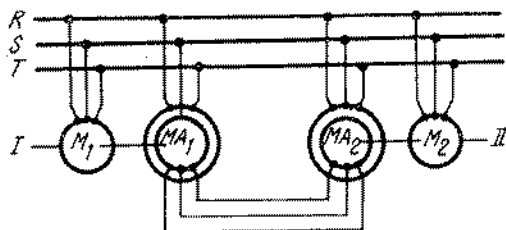


Fig. 12.4. Schema electrică a unui arbore electric cu mașini ajutătoare asincrone.

viteză, și motoarele asincrone auxiliare MA_1 și MA_2 , cuplate mecanic cu motoarele principale M_1 și respectiv M_2 . Motoarele auxiliare sînt cu rotor bobinat și au rotoarele legate electric (prin conductoare) între ele. Toate motoarele sînt alimentate de la rețeaua trifazată de curent alternativ. Se menționează că atît motoarele principale M_1 și M_2 cît și cele auxiliare MA_1 și MA_2 , trebuie să fie identice între ele.

● **Funcționare.** Dacă motoarele principale se rotesc cu aceeași viteză, tensiunile electromotoare în rotoarele motoarelor auxiliare sînt egale și, rotoarele fiind legate în opoziție, aceste tensiuni se anulează, deci prin circuitul rotoric comun al motoarelor auxiliare nu circulă curent.

Dacă însă viteza unuia dintre motoare, de exemplu a motorului M_1 , scade, se micșorează și viteza motorului auxiliar MA_1 , ceea ce duce la modificarea tensiunii electromotoare a acestuia. Tensiunile electromotoare ale celor două mașini auxiliare nu se mai compensează reciproc și în acest caz apare un curent în circuitul rotoric comun, numit *curent de egalizare*. Acest curent determină un cuplu suplimentar pe arborele motorului auxiliar MA_1 care, adunat cu cuplul dat de motorul principal M_1 , determină creșterea vitezei arborelui I, compensînd scăderea inițială a vitezei acestuia. Cînd vitezele motoarelor M_1 și M_2 devin egale, curentul de egalizare se anulează și instalația revine la funcționarea normală.

2. ARBORELE ELECTRIC CU REOSTAT COMUN

● **Schema de principiu** a unui asemenea arbore este reprezentată în figura 12.5 și conține motoarele de acționare identice M_1 și M_2 asincrone cu rotor bobinat. Cele două rotoare sînt legate electric între ele și pe această legătură comună se montează reostatul trifazat R .

● **Funcționare.** Dacă vitezele motoarelor M_1 și M_2 sînt egale, vor fi egale și tensiunile electromotoare rotorice, precum și curenții rotorici, debitați pe reostatul comun R .

Dacă însă viteza unui motor, de exemplu M_1 , scade, se modifică și tensiunea sa electromotoare rotorică și, datorită diferenței dintre cele două tensiuni

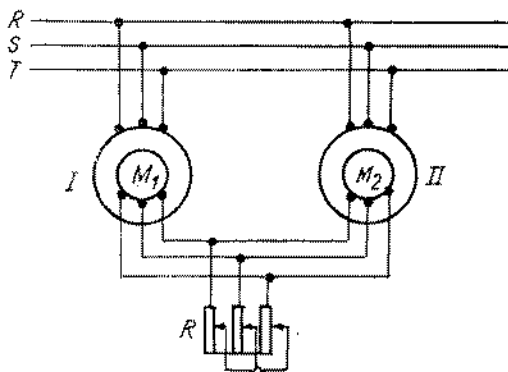


Fig. 12.5. Schema electrică a unui arbore electric cu reostat comun.

electromotoare rotorice, apare un curent de egalizare între cele două rotoare. Acest curent determină apariția unui cuplu suplimentar (de egalizare) la motorul M_1 , care se adună cu cuplul inițial, determinînd creșterea vitezei acestuia, pînă la egalizarea vitezelor celor două motoare, cînd curentul de egalizare se anulează.

Notă. Pe un principiu asemănător arborelui electric funcționează și *selsinele*, utilizate pentru transmiterea la distanță a unor deplasări unghiulare și nu pentru egalizări de viteze.

CUPRINS

PARTEA ÎNȚI

MAȘINI ELECTRICE

Cap. 1. Curentul alternativ trifazat	3
Cap. 2. Mașini electrice de curent continuu	8
Cap. 3. Transformatoare electrice	37
Cap. 4. Înfășurările statorului mașinilor de curent alternativ și producerea câmpurilor magnetice învârtitoare	58
Cap. 5. Mașini electrice sincrone	71
Cap. 6. Mașini electrice asincrone	87

PARTEA A DOUA

AȚIONĂRI

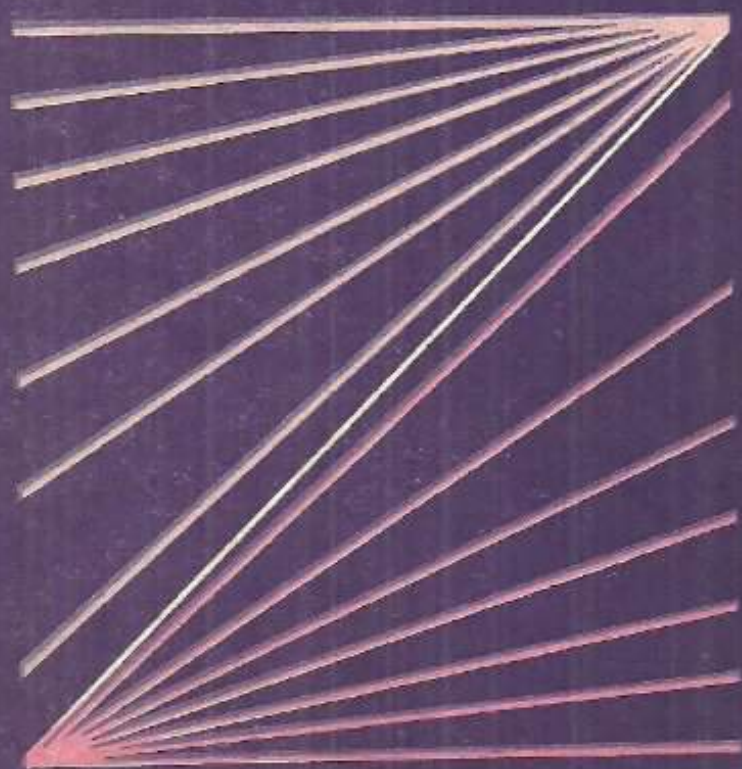
Cap. 7. Ecuația fundamentală a mișcării	110
Cap. 8. Caracteristicile mecanice și regimurile de funcționare ale mașinilor de lucru . .	120
Cap. 9. Caracteristicile mecanice și regimurile de funcționare ale motoarelor electrice	126
Cap. 10. Alegerea motoarelor electrice de acționare, în funcție de caracteristicile mecanice ale mașinilor de lucru	145
Cap. 11. Acționări hidraulice și pneumatice	149
Cap. 12. Acționări electrice cu grupuri de mașini	162

Plan editură nr. 15480.
Coli de tipar 10,50
Bun de tipar 29.06.80.



Tiparul executat la I. P. „Filaret”,
str. Fabrica de chibrituri nr. 9—11,
București
Republica Socialistă România
C-ța nr. 412

Lei 5,70



EDITURA DIDACTICĂ ȘI PEDAGOGICĂ, BUCUREȘTI 1980