

Ministerul Educației al Republicii Moldova
Universitatea de Stat „Alec Russo”
Facultatea „Tehnică, Fizică, Matematică și Informatică”
Catedra „Fizică și metodică predării fizicii”

Valeriu ABRAMCIUC

ELECTROTEHNICĂ
ȘI ECHIPAMENTE ELECTRICE

Curs universitar

Pentru studenții specialității „Educație tehnologică”

BĂLȚI, 2010

INTRODUCERE

Aplicațiile tehnice ale fenomenelor electromagnetice au o importanță din ce în ce mai mare în toate sectoarele economiei naționale și au devenit o componentă firească și necesară în cele mai diferite domenii de activitate. Utilizarea largă a electricității, pătrunderea măsurărilor și acționărilor electrice în toate domeniile, marea importanță a automatizărilor și a tehnicilor de calcul electronic, impun ca fiecare profesor, independent de locul de activitate (liceu, colegiu, gimnaziu etc.) să cunoască temeinic principalele probleme teoretice din domeniul electromagnetismului și, în special, cele cu caracter aplicativ.

Cursul universitar “Electrotehnică și echipamente electrice” este destinat studenților facultăților tehnice ale instituțiilor superioare de învățământ, specialitatea “Educație tehnologică”, însă poate fi util și pentru alte specialități înrudite. Programul de studiu prevede, pentru această disciplină, 30 ore prelegeri, 15 ore seminare și 45 ore laborator, cursul promovându-se în semestrul trei.

Obiectivul principal al cursului normativ universitar “Electrotehnică și echipamente electrice” este studiul fenomenelor electrice și magnetice din punct de vedere al aplicațiilor tehnice. Aceasta impune ca fiecare specialist să cunoască temeinic legile câmpului electromagnetic, metodele de calcul ale circuitelor electrice, folosirea acestora în diverse situații practice.

Evoluția societății moderne nu poate fi concepută fără dezvoltarea corespunzătoare a electrificării, adică a utilizării pe scară largă a energiei electromagnetice (electrice) în toate ramurile economiei, în sectorul social, cultural și în cel casnic. De altfel, producția și consumul specific de energie electrică reprezintă în societatea contemporană indici semnificativi ai nivelului tehnic și social atins. Într-un cadru mai general, dezvoltarea economiei ca și progresul social apar strâns legate de dezvoltarea corespunzătoare a bazei energetice a țării și de gospodărirea rațională atât a resurselor energetice primare, cât și a energiei transformate (electrică, termică). Realizarea unor utilaje și instalații cu un grad de complexitate și automatizare din ce în ce mai pronunțat, caracteristică generală a progresului științei și tehnicii contemporane, presupune temeinice cunoștințe de specialitate în domeniile respective, bazate pe o largă

și aprofundată pregătire teoretică. În acest context se poate sublinia și importanța disciplinei “Electrotehnică și echipamente electrice”, menită să contribuie la pregătirea fundamentală a studenților în domeniul folosirii energiei electromagnetice în diverse domenii.

O pregătire solidă care să conducă nu numai la cunoaștere, dar și la capacitatea de a utiliza practic cunoștințele dobândite, necesită dezvoltarea unor aptitudini și deprinderi care se formează și pe calea rezolvării problemelor cu caracter practic. Pentru viitorul specialist o importanță deosebită o au lucrările de laborator, în cadrul cărora el trebuie să-și dezvolte deprinderi de cercetare a caracteristicilor instalațiilor electrotehnice și a fenomenelor electromagnetice, să posede deprinderi practice de montaj a circuitelor electrice, de efectuare a diferitelor măsurări, de prelucrare a datelor experimentale, de reprezentare grafică și interpretare a rezultatelor.

În cadrul cursului dat se folosesc cunoștințele obținute la disciplinele studiate la liceu și în semestrele precedente, îndeosebi “Fizica” (compartimentul “Electricitate și magnetism”) și “Matematica”.

Cursul prezent constituie opt capitole principale și reprezintă baza teoretică generală, care se concretizează separat în cadrul fiecărei lucrări de laborator.

BIBLIOGRAFIE

1. Ursea P.C., Rouădedeal F., Ursea B.P. Electrotehnica aplicată. Ghidul electrotehnicianului. - București, Editura Tehnică, 1995. – 333 p. [cota 621.3 U84]
2. Saimac A., Cruceru C. Electrotehnica. - București, 1981.
3. Șora C. Bazele electrotehnicii. - București, 1982.
4. Novac I., Micu E., Atanasiu Gh. ș. a. Mașini și acționări electrice. - București, 1982.
5. Tunsoiu Gh. Seracin E., Saal C. Acționări electrice. - București, 1982.
6. Isac E. Măsurări electrice și electronice. - București, 1986.
7. Electrotehnica generală. Sub redacția lui Blajchin A. T. - Chișinău, 1971.
8. Popov V. S., Nicolaev S. A. Electrotehnica. - Chișinău, 1970.
9. Касаткин А. С., Немцов М. В. Электротехника. - Москва, 1983.
10. Электротехника: Общий курс. /Под ред. Пантюшина В. С. - Москва, 1959.
11. Прищеп Л. Г. Учебник сельского электрика. - Москва, 1982.
12. Чаткин М. Р., Бодин А. П. Электротехника и электрификация сельского хозяйства. - Москва, 1963.
13. Камнев В.Н. Чтение схем и чертежей электроустановок. Изд. 2-е, перераб. и доп.. М.: Высшая школа, 1990. – 144 с. [cota 607(075) K184]
14. Каминский Е.А. Практические приёмы чтения схем электроустановок. М., Энергоатомиздат, 1988. – 368 с. [cota 6П2.1 K182]
15. Евсюков А. А. Электротехника. - Минск, 1979.
16. Китунович Ф. Г. Электротехника. - Минск, 1982.
17. Иванов И. И., Равдоник В. С. Электротехника. - Москва, 1984.
18. Бараш Н. В., Бладько В. М. Общая электротехника. - Москва, 1968.
19. Арутюнов В.О. Электрические измерительные приборы и измерения. М. – Л., Государственное энергетическое издательство, 1958. – 631 с. [cota 6П2.108 A86]
20. Шульц Ю. Электроизмерительная техника. 1000 понятий для практиков: Справочник. - Москва, 1989.
21. Шпаннеберг Х. Электрические машины. 1000 понятий для практиков: Справочник. - Москва, 1988.

22. Вольдек А. И. Электрические машины. - Ленинград, 1974.
23. Preda M., Cristea P., Manea Fl. ș. a. Probleme de electrotehnică și mașini electrice. - București, 1982.
24. Cristea P. Aplicații și probleme de electrotehnică teoretică. - București, 1977.
25. Гайях Т., Мелузин Г., Бернат И. Простейшие электротехнические расчеты. - Москва, 1968.
26. Поляков В. А. Практикум по электротехнике. - Москва, 1964.
27. Лабораторные работы по электротехнике. /Под ред. Пантюшина В. С. - Москва, 1977.
28. Рекус Г. Г., Чесноков В. Н. Лабораторные работы по электротехнике и основам электротехнике. - Москва, 1989.
29. Усик В. П., Вахольский Б. М. Лабораторные работы по общей электротехнике. - Москва, 1972.
30. Атабеков В. Б., Живов М. С. Монтаж осветительных электроустановок. - Москва, 1979.
31. Лепаев Д. А., Штехман Н. Я. Бытовые электроприборы. - Москва, 1973.

Electrotehnica este știința care studiază fenomenele electrice și magnetice și aplicarea acestora în practică.

Capitolul I. Curentul alternativ monofazat

1.1. Noțiuni generale

Se numește *curent alternativ* curentul care variază în timp. Pot fi evidențiate **trei tipuri de variație a curentului alternativ**:

- a) valoarea absolută a curentului rămâne constantă, iar sensul variază în timp. Un astfel de curent periodic este exemplificat în **fig 1.1**;

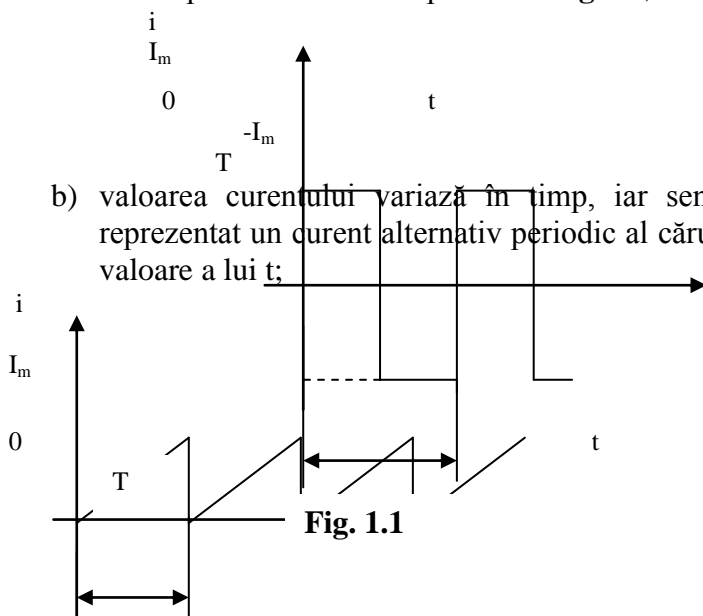


Fig. 1.1

- b) valoarea curentului variază în timp, iar sensul lui rămâne constant. În **fig. 1.2** este reprezentat un curent alternativ periodic al cărui valoare este pozitivă sau nulă pentru orice valoare a lui t ;

Fig. 1.2

c) variază atât modulul cât și sensul curentului. De exemplu, ca în **fig. 1.3**.

În continuare, se vor studia curenții sinusoidali (cosinusoidali), care se numesc *curenți armonici*. De asemenea, se vor analiza și alte mărimi armonice (tensiunea, t.e.m., fluxul magnetic etc.).

Avantajele curenților armonici în comparație cu alți curenți alternativi:

1. calculul matematic al circuitelor și descrierea matematică a curenților sinusoidali sunt mai simpli;
2. dacă tensiunea sau t.e.m. de alimentare a circuitului este sinusoidală, atunci și curentul din circuit va fi sinusoidal;
3. dacă tensiunea de alimentare a circuitului este nesinusoidală, circuite apar pierderi suplimentare față de cazul tensiunii sinusoidale;
4. constructiv, dispozitivul (generatorul) de obținere a curenților sinusoidali este simplu;
5. construcția cea mai simplă a generatorului de curent alternativ.

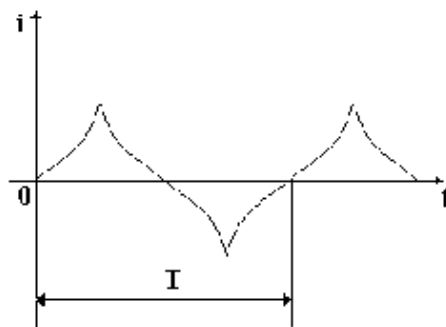


Fig. 1.3

în

Întrebări de control și exerciții:

1.2. Formele de reprezentare a mărimilor sinusoidale

Forma analitică

Se exprimă printr-o expresie matematică mărimea dată, spre exemplu:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$$

unde:

i – valoarea momentană (instantanee) a intensității curentului;

I_m – amplitudinea curentului (valoarea maximă, pozitivă a lui);

$\omega t + \varphi_i$ – faza sau argumentul funcției, având unitatea de măsură [rad] sau [rad];

ω – frecvența ciclică; $\omega = 2\pi f$ [$\frac{\text{rad}}{\text{s}} = \text{s}^{-1}$]; $f = \frac{1}{T}$ [Hz = $\frac{1}{\text{s}}$]; $T = \frac{2\pi}{\omega}$ [s].

φ_i – faza inițială a curentului, care determină valoarea curentului în momentul, când $t = 0$;

t – timpul.

Orice curent (tensiune, t.e.m., flux magnetic) nesinusoidal, dar periodic, poate fi exprimat, conform teoremei Fourier, printr-o sumă algebrică a unei constante și a mărimilor sinusoidale de diferite frecvențe:

$$a = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + A_k \sin(k\omega t + \varphi_k)$$

unde:

A_0 - termenul constant (de exemplu, componenta continuă a curentului);

A_1, A_2, \dots, A_k - amplitudinile componentelor (armonicilor);

ω – frecvența ciclică;

$\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k$ – fazele inițiale ale armonicilor;

t – timpul.

Forma grafică

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i), \text{ A.}$$

Vom folosi un exemplu:

$$i = 2 \sin\left(314t + \frac{\pi}{3}\right), \text{ A.}$$

unde: $I_m = 2 \text{ A}; \quad \omega = 314 \frac{\text{rad}}{\text{s}};$

$$\varphi_i = \frac{\pi}{3} \text{ rad} = 60^\circ; \quad f = \frac{\omega}{2\pi} = 50 \text{ Hz}; \quad T = \frac{1}{f} = 0,02 \text{ s.}$$

Graficul marimii date este prezentat in **fig. 1.4**.

Dacă faza inițială a mărimii sinusoidale este pozitivă, atunci graficul este deplasat față de axa ordonatelor în stânga cu unghiul respectiv, și invers.

Această formă de prezentare a curenților sinusoidali are și neajunsuri:

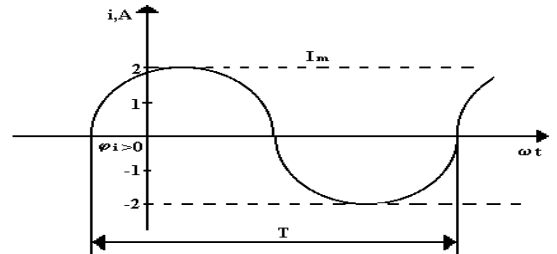
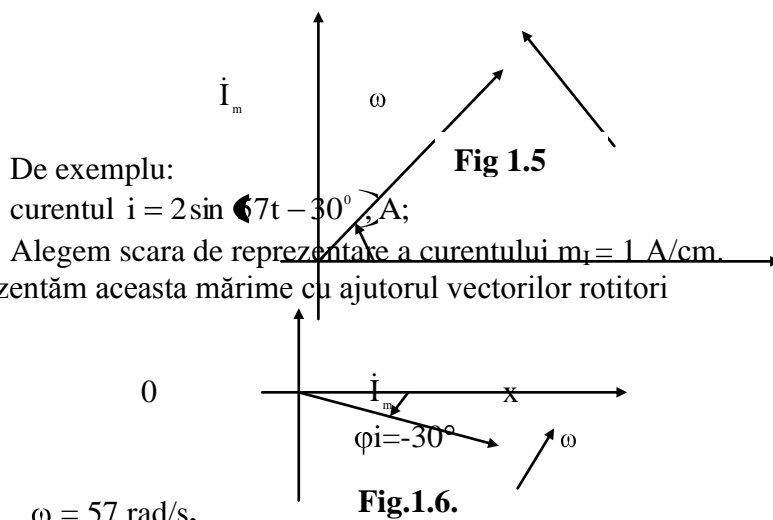


Fig. 1.4

- 1) necesită volum mare de lucru la construcția graficelor;
- 2) e greu de adunat sau de scăzut două sau mai multe mărimi sinusoidale.

Metoda vectorilor rotitori

Oricare mărime sinusoidală se reprezintă în plan printr-un vector, modulul căruia este egal cu amplitudinea, iar direcția lui e determinată de faza inițială. Acest vector se rotește în sensul contra acelor de ceasornic cu viteza unghiulară, egală cu frecvența ciclică. Unghiurile se depun, de obicei, de la semiaxa orizontală, contra acelor de ceasornic – cele pozitive și după acele de ceasornic - cele negative.



Această metodă permite de a opera

simply cu mărimile sinusoidale.

De exemplu: Avem doi curenți:

$$i_1 = I_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1),$$

$$i_2 = I_{m2} \sin(\omega t + \varphi_2),$$

$$\varphi_1, \varphi_2 > 0; \quad \varphi_2 > \varphi_1.$$

De determinat suma lor:

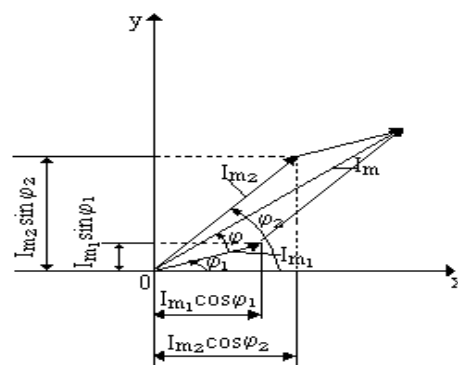


Fig. 1.7

$$i = i_1 + i_2.$$

Reprezentăm curenții i_1 și i_2 sub formă de vectori rotitori (vezi **fig. 1.7**).

Determinăm proiecțiile acestor doi vectori rotitori pe

axele OX și OY:

$$\text{Pr } I_{m1x} = I_{m1} \cos \varphi_1;$$

$$\text{Pr } I_{m2x} = I_{m2} \cos \varphi_2;$$

$$\text{Pr } I_{mx} = I_m \cos \varphi;$$

$$\text{Pr } I_{m1y} = I_{m1} \sin \varphi_1;$$

$$\text{Pr } I_{m2y} = I_{m2} \sin \varphi_2;$$

$$\text{Pr } I_{my} = I_m \sin \varphi.$$

Sumând și ridicând la pătrat, obținem:

$$I_m^2 \cos^2 \varphi + I_m^2 \sin^2 \varphi = \left(I_{m1} \cos \varphi_1 + I_{m2} \cos \varphi_2 \right)^2 + \left(I_{m1} \sin \varphi_1 + I_{m2} \sin \varphi_2 \right)^2;$$

deoarece $\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi = 1$, primim:

$$I_m = \sqrt{\left(I_{m1} \cos \varphi_1 + I_{m2} \cos \varphi_2 \right)^2 + \left(I_{m1} \sin \varphi_1 + I_{m2} \sin \varphi_2 \right)^2}.$$

Cu această formulă determinăm amplitudinea I_m a curentului necunoscut. Apoi determinăm faza inițială a lui – unghiul φ :

$$\text{tg} \varphi = \frac{I_{m1} \sin \varphi_1 + I_{m2} \sin \varphi_2}{I_{m1} \cos \varphi_1 + I_{m2} \cos \varphi_2};$$

$$\varphi = \text{arctg} \frac{I_{m1} \sin \varphi_1 + I_{m2} \sin \varphi_2}{I_{m1} \cos \varphi_1 + I_{m2} \cos \varphi_2};$$

În rezultat, expresia curentului determinat va avea forma:

$$i = i_1 + i_2 = I_m \sin(\omega t + \varphi).$$

Diagramele vectoriale se construiesc pentru mărimi de aceeași frecvență, adică la rotirea lor unghiurile între aceste mărimi rămân constante.

Întrebări de control și exerciții

1.3. Obținerea curentului sinusoidal

T.e.m. (curenții) sinusodali se obțin cu ajutorul generatorului de curenți sinusoidali.

Cel mai simplu generator reprezintă un cadru din conductor de formă dreptunghică, care constă din w de spire, este așezat pe o axă, care se introduce între polii unui magnet permanent sau a unui electromagnet (vezi **fig. 1.8**).

Cadrul se rotește cu viteza ciclică (unghiulară) constantă $\omega = \text{const}$. Câmpul magnetic are inducția magnetică constantă $B = \text{const}$. În poziția inițială, când $t = 0$, cadrul formează cu axa orizontală unghiul φ . Conform legii inducției electromagnetice, într-o parte activă a cadrului se induce o t.e.m.:

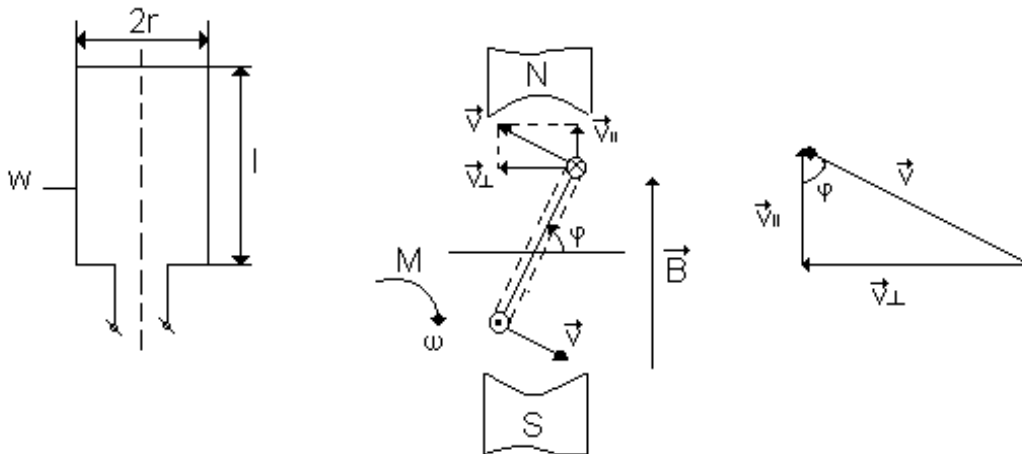


Fig. 1.8.

$$e' = IBv_{\perp} = IBv \sin \varphi .$$

Dar într-o spiră:

$$e_0 = 2IBv \sin \varphi = 2e' .$$

Deoarece cadrul conține w spire t.e.m. totală va fi:

$$e = we_0 ,$$

unde: w – numărul de spire
sau

$$e = 2IBvw \sin \varphi ;$$

$$v = r\omega ; \omega = \frac{\varphi}{t} ; \varphi = \omega t ; e = 2IBrw\omega \sin \omega t ;$$

$$S = 2rl ; e = BS\omega \sin \omega t = E_m \sin \omega t ;$$

$$\text{Deci, } e = E_m \sin \omega t .$$

Amplitudinea t.e.m. a generatorului depinde de: B , S , ω , w .
De obicei:

1.4. Valorile medie și efectivă ale curentului sinusoidal

Fie dat un curent sinusoidal:

$$i = I_m \sin \omega t.$$

- I. *Valoarea medie* I_{med} a unui curent alternativ este valoarea unui așa curent continuu, care transportă prin secțiunea transversală a conductorului, în același interval de timp, aceeași sarcină electrică ca și curentul alternativ.

$$i = \frac{dq}{dt};$$

Dacă $dt \rightarrow 0$, atunci $i_1, i_2 \rightarrow i$;

Deci, $idt = dq$;

Cavaloare numerică $dS = dq$.

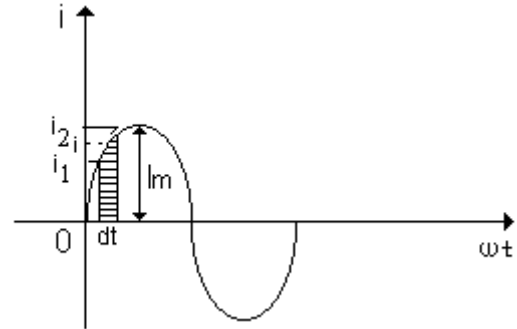


Fig. 1.9

În **fig. 1.9** aria suprafeței mărginite de grafic și axa OX a sistemului de coordonate, numeric este egală cu cantitatea de sarcină electrică, transportată prin secțiunea transversală a conductorului în intervalul dat de timp:

$$I_{medT} = 0; \quad I_{medT} = \int_0^T \frac{idt}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T I_m \sin \omega t dt = \frac{I_m}{T\omega} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \sin \omega t d\omega t \stackrel{(*)}{=} 0.$$

Concluzie: Valoarea medie a curentului (U_{med} , E_{med} , Φ_{med}) pentru o perioadă sau un număr întreg de perioade este egală cu zero, dacă el se schimbă după legea sinusoidală sau cosinusoidală.

De aceea, pentru marimi sinusoidale, valoarea medie se calculează pentru o jumătate de perioadă.

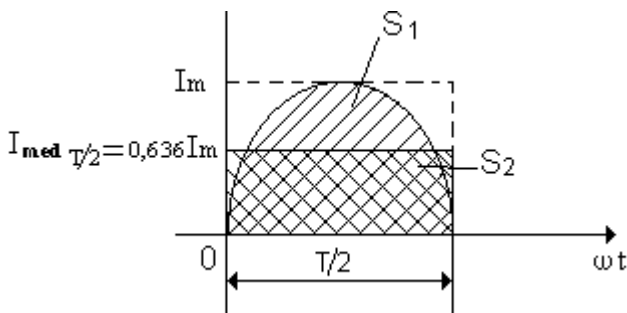


Fig. 1.10

S_2 - aria determinată de graficul curentului continuu.

$$S_1 = S_2$$

S_1 – aria determinată de graficul curentului alternativ;

Pentru orice valoare sinusoidală obținem:

$$I_{med \frac{T}{2}} = \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{idt}{\frac{T}{2}} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} idt = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} I_m \sin \omega t dt = \frac{2I_m}{T\omega} \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} \sin \omega t d\omega t \stackrel{(*)}{=}$$

$$= \frac{2I_m}{T\omega} \left[\cos \omega t \right]_0^{T/2} = 0.636I_m;$$

$$U_{\text{med}\frac{T}{2}} = 0.636U_m;$$

$$E_{\text{med}\frac{T}{2}} = \frac{2E_m}{T} = 0.636E_m.$$

Sensul fizic: $\int i dt = 0$:

În prima jumătate de perioadă prin conductor curentul trece într-o direcție, în a doua jumătate – în sens opus, în mediu valoarea curentului prin conductor este zero.

$$i = I_m \sin \omega t.$$

Valoarea medie se folosește la cercetarea transformatoarelor și mașinilor electrice și poate fi măsurată cu galvanometrul școlar.

II. *Valoarea eficace a unui curent alternativ* este valoarea unui așa curent continuu care degajă în același interval de timp, aceeași cantitate de căldură ca și curentul alternativ.

Avem un conductor cu rezistența R pentru curent continuu și alternativ.

În rezultatul trecerii curentului continuu cu intensitatea I în timpul t se va degaja cantitatea de căldură Q:

$$Q = I^2 RT.$$

Dacă prin conductorul cu rezistența R va circula curentul alternativ i, atunci:

$$i = I_m \sin \omega t;$$

$$dQ = i^2 R dt;$$

$$Q = \int_0^T i^2 R dt;$$

$$Q = Q \Rightarrow I^2 R t = \int_0^T i^2 R dt;$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}.$$

$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$ - formula generală pentru oricare curent sinusoidal. În același mod – pentru alte mărimi sinusoidale.

Calculăm valoarea eficace a curentului sinusoidal pentru o perioadă:

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = \frac{1}{T} I_m^2 \int_0^T \sin^2 \omega t dt = \frac{I_m^2}{T} \int_0^T \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt =$$

$$= \frac{I_m^2}{T} \left[\int_0^T dt - \int_0^T \cos 2\omega t dt \right] = \frac{I_m^2}{2};$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}};$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0.71U_m;$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0.71E_m.$$

Valorile eficace se măsoară cu aparatele de măsurat, la care momentul de rotație este direct proporțional cu pătratul curentului. La rețelele electrice se indică valorile eficace ale curentului, tensiunilor, t.e.m.

$$U = 220 \text{ V};$$

$$U_m = U\sqrt{2} = 1.41 \cdot 220 \approx 311 \text{ V}.$$

Se numește *coeficient de amplitudine* k_A raportul dintre valoarea amplitudinii și valoarea eficace:

$$k_A = \frac{I_m}{I};$$

$$k_A = \frac{U_m}{U};$$

$$k_A = \frac{E_m}{E};$$

$$k_A = \frac{I_m}{I} = \frac{I_m}{I_m/\sqrt{2}} = \sqrt{2} \approx 1,41.$$

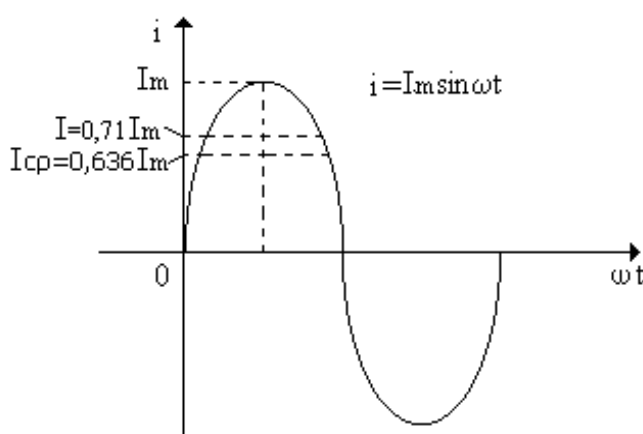


Fig. 1.11

Se numește *coeficientul formei curbei* k raportul dintre valoarea eficace și valoarea medie:

$$k = \frac{I}{I_{med}} = \frac{I_m/\sqrt{2}}{\frac{2I_m}{\pi}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1,11.$$

Valorile eficace și medie a curentului sunt reprezentate în **fig. 1.11**.

1.5. Circuit de curent sinusoidal cu rezistor ideal

Rezistența (sau rezistența ohmică) este rezistența conductorului la curent continuu:

$$r = \rho \frac{l}{S},$$

unde: ρ - rezistența specifică (rezistivitatea);

l și S - dimensiunile geometrice ale conductorului (lungimea și aria secțiunii transversale).

Dacă prin acest conductor circulă un curent alternativ el posedă rezistența activă:

$$R = \frac{P}{I^2},$$

unde P - puterea activă disipată în conductor;

I - valoarea eficace a curentului.

Obținem că $R \geq r$ datorită efectului de suprafață (efectul pelicular).

Prin rezistor ideal vom înțelege acel conductor, care nu posedă nici inductanță nici capacitate ($L = 0$, $C = 0$) (vezi **fig. 1.12**).

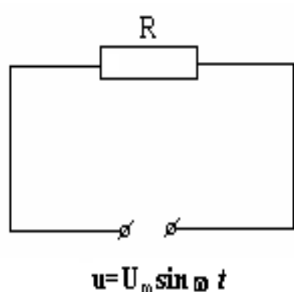


Fig. 1.12

Graficul și diagrama vectorială sunt prezentate în **fig. 1.13**.

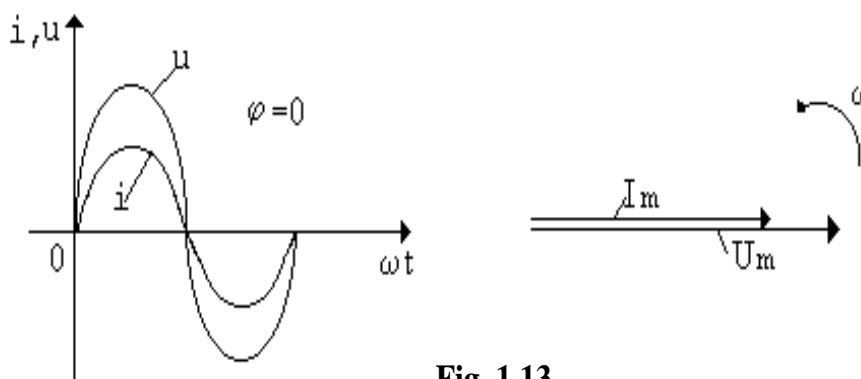


Fig. 1.13

Conform legii lui Ohm, pentru valorile momentane, obținem:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t;$$

1.6. Circuit de curent sinusoidal cu inductanță ideală

Orice conductor prin care circulă curent alternativ posedă inductanță.

În cazul ideal: $R = 0$, $C = 0$ **fig. 1.14**.

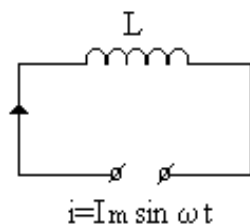


Fig. 1.14

Fie că avem un circuit cu curent sinusoidal cu inductanță ideală. La variația curentului i , conform legii autoinducției, în bobină apare o t.e.m.

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = -LI_m \omega \cos \omega t = -E_m \cos \omega t$$

semnul "−" se determină conform regulii lui Lentz.

Conform legii a II-a a lui Kirchhoff:

$$u + e_L = iR \text{ unde } R = 0$$

$$u = -e_L = I_m \omega L \cos \omega t = I_m \omega L \sin(\omega t + 90^\circ)$$

$$= U_m \sin(\omega t + 90^\circ);$$

$$U_m = I_m \omega L = I_m X_L;$$

$$X_L = \omega L = 2\pi fL,$$

unde: X_L – rezistența inductivă (reactanța inductivă).

$U_m = I_m X_L$ – legea lui Ohm pentru valorile amplitudice. Dacă împărțim la $\sqrt{2}$:

$U = IX_L$ – legea lui Ohm pentru valorile eficace.

$$i = I_m \sin \omega t;$$

$$u = U_m \sin(\omega t + 90^\circ);$$

Comparînd aceste 2 relații facem concluzia: defazajul de fază dintre curent și tensiune este de 90° .

Diagrama vectorială și graficul sunt reprezentate în **fig. 1.15**.

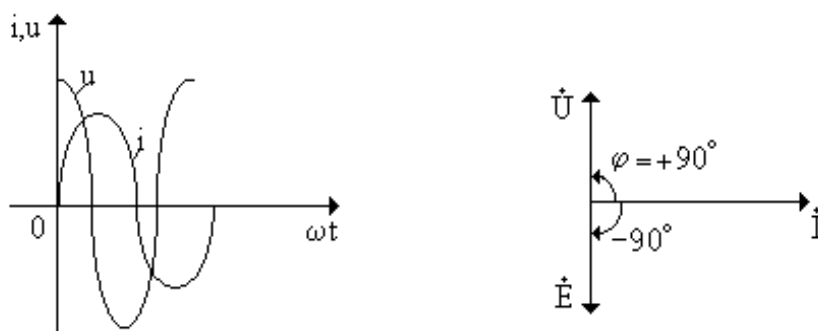


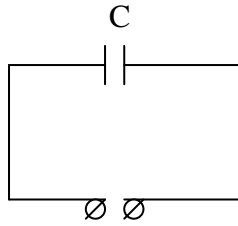
Fig. 1.15

$U_m = X_L I_m$ - legea lui Ohm pentru circuit cu inductanța ideală exprimat prin valoarea amplitudică.

$U = IX_L$ – legea lui Ohm exprimată prin valori eficace.

1.7. Circuit de curent sinusoidal cu capacitate ideală

Prin condensator ideal vom înțelege cazul, când dielectricul este ideal, perfect (n-are curenți de scurgere). Condensatorul în schemă se înseamnă în așa fel cum este prezentat în **fig. 1.16**:



Însemnările:

- Φ - farada
- mΦ – milifaradă
- μΦ – microfaradă
- pΦ – picofaradă
- nΦ - nanofaradă

Fig. 1.16

Este necesar de a determina care este dependența intensității curentului de timp:

$$i = \frac{dq}{dt};$$

$$C = \frac{q}{U};$$

$$C = \frac{dq}{du} \Rightarrow dq = Cdu;$$

$$i = \frac{Cdu}{dt} = CU_m \frac{d(\sin \omega t)}{dt} = U_m \omega C \cos \omega t;$$

$$i = I_m \cos \omega t = I_m \sin (\omega t + 90^\circ);$$

$$I_m = U_m \omega C = \frac{U_m}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{U_m}{X_c}.$$

Însemnăm prin X_c reactanța inductivă:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f} \Omega.$$

$$I_m = \frac{U_m}{X_c} - \text{legea lui Ohm exprimată prin valorile amplitudice.}$$

$$I = \frac{U}{X_c} - \text{legea lui Ohm pentru valorile eficace.}$$

Dacă comparăm legea variației tensiunii u cu legea variației curentului i (vezi și **fig. 1.17**), observăm că curentul întrece tensiunea cu 90° .

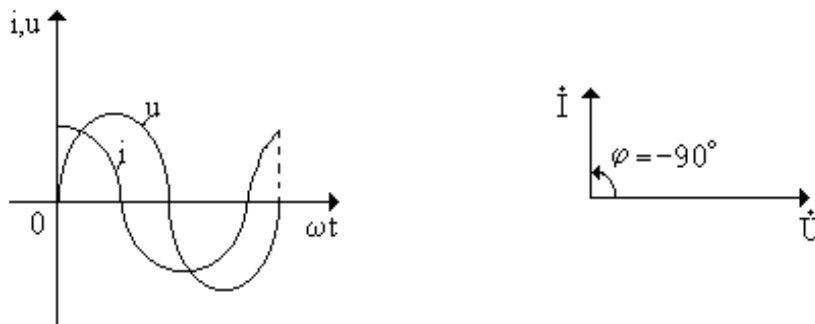


Fig. 1.17

1.8. Procese energetice în circuitele de curent sinusoidal

1. Circuit cu rezistor ideal

Se știe că pentru un astfel de circuit avem:

$$i = I_m \sin \omega t;$$

$$u = U_m \sin \omega t;$$

$$\varphi = 0.$$

Se numește *valoare momentană a puterii* energia degajată în momentul dat de timp în circuitul dat:

$$p = ui.$$

Deci:

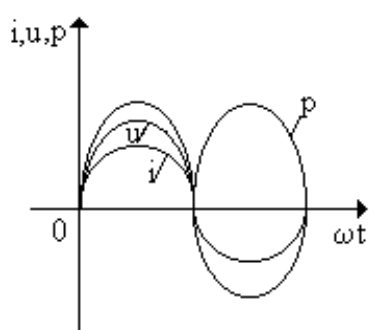


Fig. 1.18

$$p = I_m U_m \sin^2 \omega t \frac{2}{\sqrt{2}\sqrt{2}} = 2IU \sin^2 \omega t = IU (1 - \cos 2\omega t).$$

Deoarece $p = I_m U_m \sin^2 \omega t$, puterea momentană este pozitivă tot timpul (fig. 1.18), vom nota prin P – energia degajată într-o unitate de timp, ceea ce se numește *putere activă* (deoarece elementul este activ).

$$P \text{ [W]};$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} IU \int_0^T (1 - \cos 2\omega t) dt = \frac{IU}{T} \left[\int_0^T dt - \int_0^T \cos 2\omega t dt \right] =$$

$$= IU - 0 = IU;$$

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R} \text{ [W]};$$

$$I = \frac{U}{R}.$$

Sensul fizic al puterii active: este cantitatea de căldură degajată într-o unitate de timp în rezistorul dat (reprezintă, în unele cazuri, pierderile, adică transformarea energiei electrice în energie termică).

2. Circuit cu inductanță ideală

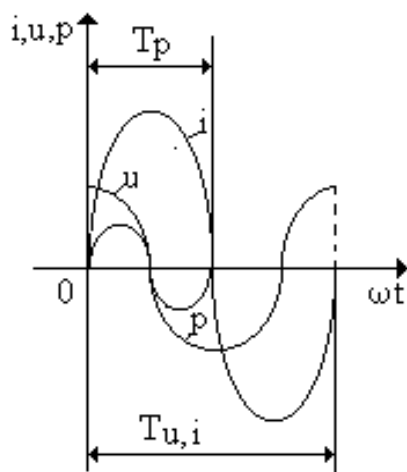


Fig. 1.19

Se știe că pentru un astfel de circuit avem:

$$i = I_m \sin \omega t;$$

$$u = U_m \cos \omega t;$$

$$\varphi = 90^\circ;$$

$$p = ui.$$

$p = \frac{2}{\sqrt{2}\sqrt{2}} I_m U_m \sin \omega t \cos \omega t = IU \sin 2\omega t \Rightarrow$ puterea momentană variază cu frecvența dublă (fig. 1.19).

1.9. Circuit de curent sinusoidal cu elemente R, L, C legate în serie

Fie dat un circuit (vezi **fig.1.20**).

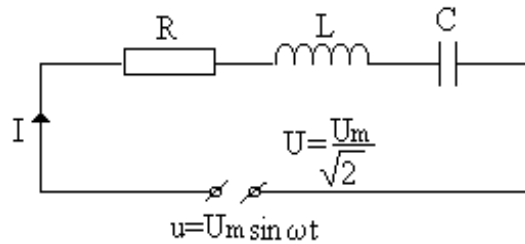


Fig. 1.20

Conform legii lui Ohm pentru fiecare element al circuitului avem:

$$U_R = IR;$$

$$U_L = IX_L;$$

$$U_C = IX_C;$$

unde:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}};$$

$$X_L = \omega L = 2\pi fL;$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}.$$

Deoarece se îndeplinesc condițiile pentru apariția curentului în acest circuit (circuitul este închis, în el acționează o tensiune sau t.e.m., el este alcătuit din conductori) în el va apărea un curent cu valoarea efectivă I.

Conform legii a II-a a lui Kirchhoff, avem:

$$U = U_C = +U_R + U_L.$$

Diagrama fazorială pentru circuitul electric cu elementele R, L, C legate în serie este prezentată în **fig. 1.21**:

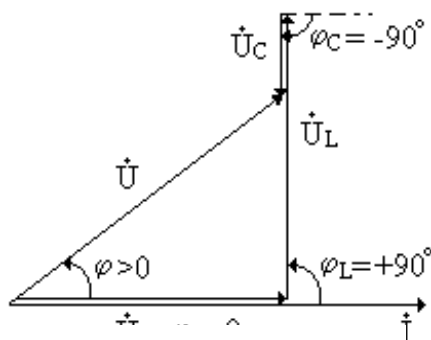


Fig. 1.21

φ – defazajul de fază dintre curent și tensiunea aplicată la bornele circuitului.

Dacă $U_L < U_C$, atunci $\varphi < 0$.

Dacă $U_L = U_C$, atunci $\varphi = 0$.

Dacă $U_L > U_C$, atunci $\varphi > 0$.

1.10. Rezonanța tensiunilor

Se numește *rezonanța tensiunilor* fenomenul care are loc într-un circuit cu elementele R, L, C legate în serie, când defazajul de fază între curent și tensiunea la bornele circuitului este egală cu zero ($\varphi = 0$).

Consecințele rezonanței tensiunilor:

- 1) $\varphi = 0$;
- 2) $U_L = U_C$ (se vede din diagrama **fig. 1.22**);
- 3) $\dot{U}_L = -\dot{U}_C$;

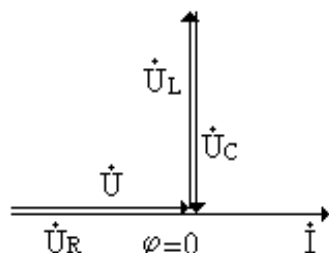


Fig. 1.22

- 4) $\dot{U}_r = \dot{U}_L - \dot{U}_C = 0$;
- 5) $\dot{U} = \dot{U}_a$ - la rezonanța tensiunilor, tensiunea la bornele circuitului este egală cu căderea de tensiune pe rezistența activă, deci întregul circuit se comportă ca o rezistență activă (ca și cum ar lipsi elementele L și C);
- 6) $IX_L = IX_C$;
 $X_L = X_C \rightarrow$ condiția matematică a rezonanței tensiunilor.

$$\text{Deoarece } X_L = X_C, \text{ avem } \omega L = \frac{1}{\omega C};$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0;$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0;$$

unde ω_0 – frecvența de rezonanță.

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC};$$

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \text{ – formula lui Thompson.}$$

Există *trei metode* de obținere a rezonanței tensiunilor:

1. când L variază, iar C, f sunt constanți;
2. când C variază, iar L, f sunt constanți;
3. când f variază, iar L C sunt constanți.

În practică, pentru a obține rezonanța tensiunilor, se face:

- 1) pentru a varia inductanța se scoate (se introduce) miezul de fier din bobină;
- 2) pentru a varia cu capacitatea, se conectează în serie sau în paralel mai multe condensatoare;
- 3) pentru a varia cu frecvența se folosesc generatoare de frecvență variabilă sau sintetizatoare care sintetizează oscilații de diferite frecvențe.

1.11. Triunghiul tensiunilor, triunghiul impedanțelor, triunghiul puterilor

Triunghiul tensiunilor

Din diagrama fazorială de mai sus (vezi **fig. 1.21**) se poate obține triunghiul dreptunghic din **fig. 1.25**:

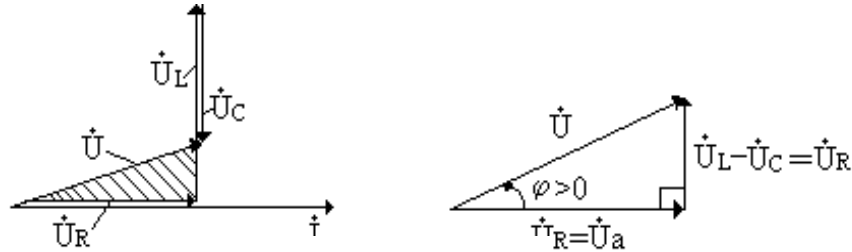


Fig. 1.25.

Laturile acestui triunghi reprezintă tensiuni. Din acest triunghi se poate determina:

$$U_a = U \cos \varphi;$$

$$U_r = U \sin \varphi;$$

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_r^2} = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_r}{U_a};$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{U_r}{U_a}.$$

Triunghiul impedanțelor

Se cunoaște că:

$$\dot{U}_a = \dot{I}R;$$

$$\dot{U}_r = \dot{I}X_L - \dot{I}X_C = \dot{I}(X_L - X_C)$$

Folosind teorema lui Pitagora, se obține:

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{U_a^2 + U_r^2} = \sqrt{I^2 R^2 + I^2 (X_L - X_C)^2} = \\ &= I \sqrt{R^2 + \left(2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C}\right)^2} = I \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \\ &= I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = IZ; \end{aligned}$$

$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ – impedanța elementelor R, L și C, legate în serie (impedanța circuitului).

$$U = IZ.$$

CAPITOL II. CIRCUITE RAMIFICATE DE CURENT ALTERNATIV

2.1. Calculul circuitelor ramificate prin metoda grafo-analitică

Fie dat un circuit care conține două ramuri (**fig. 2.1**):

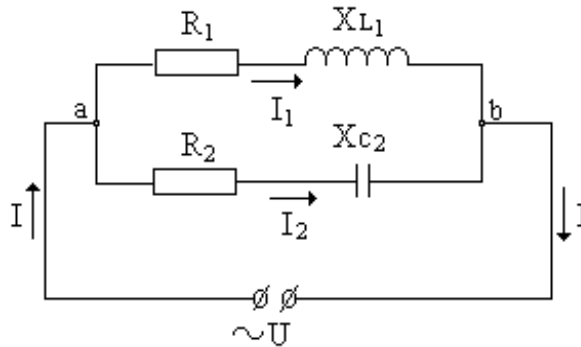


Fig. 2.1

Se numește *nod* un punct în care se unesc nu mai puțin de trei conductoare. Consecutivitatea elementelor montate între două noduri se numește *ramură*.

Fie că sânt cunoscute valorile: R_1 ; X_{L1} ; R_2 ; X_{C2} ; U .

De calculat: I , I_1 și I_2 .

De construit diagrama vectorială.

În metoda grafo-analitică parametri se calculează analitic (conform formulelor) și/sau grafic (din diagrama vectorială).

Tensiunea între nodurile a și b este egală cu tensiunea de la borne:

$$U_{ab} = U.$$

Calculăm impedanța pentru ambele ramuri:

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2} \Rightarrow I_1 = \frac{U_1}{Z_1} = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2}};$$

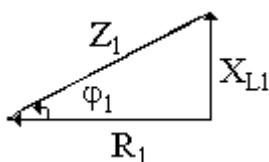
$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{C2}^2} \Rightarrow I_2 = \frac{U_2}{Z_2} = \frac{U_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{C2}^2}}.$$

Deoarece ramurile 1 și 2 sunt conectate între ele în paralel, la ele este aplicată una și aceeași tensiune:

$$U = U_1 = U_2.$$

Calculăm curentul din prima ramură:

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_1} = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2}}.$$



Direcția (sensul) curentului I_1 se determină din triunghiul rezistențelor pentru prima ramură.

2.2. Rezonanța curenților

Se numește *rezonanța curenților* fenomenul, ce are loc în circuite de curent alternativ, unele ramuri ale căruia conțin inductanțe, iar altele capacități și defazajul de fază între curentul neramificat și tensiunea la bornele circuitului este egal cu zero.

Cel mai simplu circuit în care poate fi obținut acest fenomen este prezentat în **fig. 2.3**:

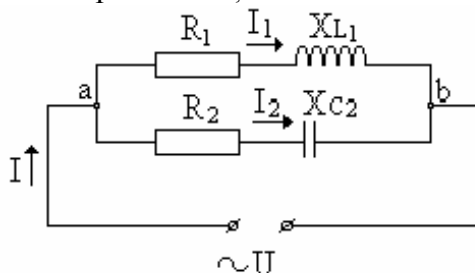


Fig. 2.3

În caz general, pentru acest circuit, triunghiul conductanțelor este prezentat în **fig. 2.4**:

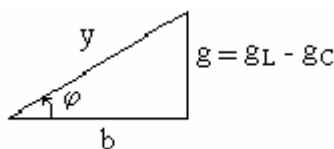


Fig. 2.4

Consecințele rezonanței curenților:

1. $b = 0$;
2. $b_L = b_C$ - condiția matematică de rezonanță a curenților,

$$\left\{ \begin{array}{l} b_L = b_{L1} \\ b_C = b_{C2} \end{array} \right\} \Rightarrow b_{L1} = b_{C2};$$
3. $y = g$;
4. $I = I_{1a} + I_{2a}$;
5. $I_{1r} = I_{2r}$;
6. $\dot{I}_{1r} = -\dot{I}_{2r}$;
7. $I = I_a$; $I_r = 0$ (circuitul se comportă ca și cum ar lipsi elementele L și C);
8. $\cos \varphi = 1$ (factorul de putere este maximal);
9. $I_{rez} = I_{min}$.

Construim diagrama vectorială pentru cazul rezonanței **fig. 2.5**:

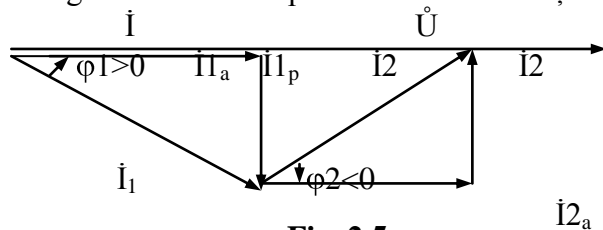


Fig. 2.5

Fie, că $R_2 = 0$, atunci circuitul se transformă în circuitul prezentat în **fig. 2.6**.

La rezonanța curenților obținem:

2.3. Factorul de putere. Importanța lui tehnico-economică. Metodele de majorare a lui

$$P = IU \cos \varphi;$$

$\cos \varphi$ - factorul de putere;

$$\cos \varphi = \frac{P}{IU} = \frac{P}{S}.$$

Factorul de putere $\cos \varphi$, ne arată ce parte din puterea totală S , reprezintă puterea activă.

Exemplu: Fie că avem doi consumatori. Ambii se alimentează de la tensiunea de 220 V, ambii au o putere activă de 660 W.

$U_1 = 220 \text{ V}$	$U_2 = 220 \text{ V}$
$P_1 = 660 \text{ W}$	$P_2 = 660 \text{ W}$
$\cos \varphi_1 = 1$	$\cos \varphi_2 = 0,5$
$I_1 - ?$	$I_2 - ?$

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi} \Rightarrow I_1 = 3 \text{ A};$$

$$I_2 = 6 \text{ A!}$$

Consumatorii ce au factor de putere mai mic, consumă la aceeași tensiune și putere un curent mai mare, în comparație cu consumatorii, care au factori de putere mai mare.

Consumatorii ce au factorul de putere $\cos \varphi = 0$, se numesc *consumatori activi* (becuri electrice cu incandescență, reșouri electrice și alte tipuri de încălzitoare).

Cel mai răspândit consumator de energie electrică este motorul de curent alternativ și diferite tipuri de consumatoare. Pentru ele $\cos \varphi < 1$, independență de faptul, în ce regim funcționează:

- mers în gol (fără sarcină);
- regimul de sarcină;
- suprasarcină;
- scurtcircuit.

Dacă la un consumator $\cos \varphi \ll 1$, el consumă un curent mare, firele de conexiune trebuie să fie groase, deci consumul de cupru și aluminiu este mare. Nu este convenabil din punct de vedere economic.

Concluzia: Consumatorul cu factorul de putere mic este rău.

Sunt trei metode de majorare a factorului de putere:

1. Metoda naturală

Motoarele de curent alternativ, transformatoarele, au o dependență a puterii de factorul de putere care este prezentat în **fig. 2.8**:

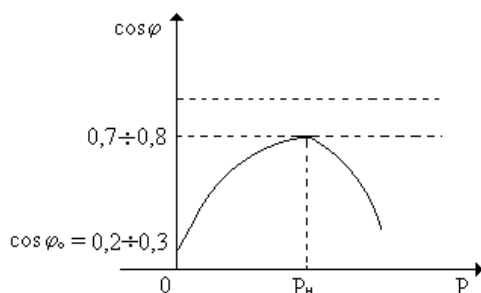


Fig. 2.8

unde P - putere dezvoltată la axul motorului.

Dacă $P = 0$, avem regim de mers în gol: $\cos \varphi \approx 0,1 \div 0,3$.

unde P_n - puterea nominală (din pașaport).

Când punerea mecanismului, pus în funcțiune de motor este egală cu puterea nominală a motorului, $\cos \varphi$ este maximal posibil.

Dacă $P > P_n$ - avem regim de suprasarcină.

Dacă $P < P_n$ - avem regim de subsarcină

2.4. Reprezentarea numerilor în complex

Numarul $a + ib$,

unde $a; b$ – numere reale, se numesc *numere complexe*;

$i = \sqrt{-1}$ – unitatea imaginară;

unde: a - partea reală;

b - partea imaginară;

R_e - partea reală;

I_m - partea imaginară.

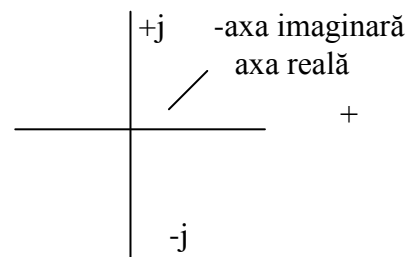


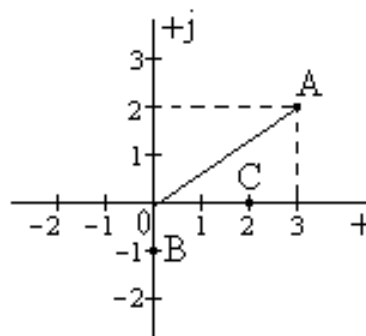
Fig. 2.11

Grafic numarul complex poate fi reprezentat în sistemul de coordonate din **fig. 2.11**.

De exemplu **fig. 2.12**.

În electrotehnică: oricărei mărimi sinusoidale i se atribuie numai un singur număr complex și invers, oricare număr complex se exprimă numai printr-o singură mărime sinusoidală.

Deoarece mărimile sinusoidale se exprimă prin vectori, atunci fiecărui vector îi corespunde un număr complex și numai unul singur.



$$A = 3 + j2$$

$$B = 0 - j$$

$$C = 2$$

Fig. 2.12

Operații cu numere complexe:

1) adunare: $a + jb; c + jd$

$$(a + jb) + (c + jd) = (a + c) + j(b + d);$$

2) scădere:

$$(a + jb) - (c + jd) = \begin{cases} (a - c) + j(b - d) \\ (a - c) - j(d - b) \end{cases};$$

3) înmulțire:

$$(a + jb)(c + jd) = ac + jad + jbc + j^2bd = (ac - bd) + j(ad + bc);$$

4) împărțire:

$$\frac{a + jb}{c + jd} = \frac{a + jb}{c + jd} \frac{c - jd}{c - jd} = \frac{ac - jad + jbc + bd}{c^2 - (jd)^2} = \frac{(ac + bd) - j(ad - bc)}{c^2 + d^2} = \frac{ac + bd}{c^2 + d^2} - j \frac{ad - bc}{c^2 + d^2}.$$

Se numesc *numere complexe conjugate* numerele complexe de forma:

$$a + jb \Rightarrow \text{conjugata: } a - jb$$

Reprezentarea numerelor complexe

Orice număr complex se reprezintă în planul complex printr-un punct. Axa orizontală este axa numerelor reale, axa verticală este axa numerelor imaginare.

Fie dat un număr complex $A = a + jb$:

2.5. Calculul circuitelor ramificate prin metoda complexă (simbolică)

Fie dat circuitul din **fig. 2.14**.

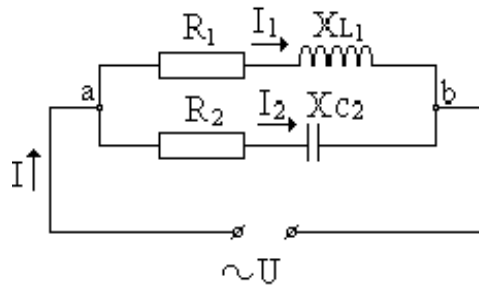


Fig. 2.14

Se dă:

$$R_1, R_2, X_{L1}, X_{C2}, U;$$

De aflat:

$$I_1, I_2, P_1, Q_1, S_1;$$

$$I, P_2, Q_2, S_2;$$

$$P, Q, S;$$

$$\cos \varphi_1, \cos \varphi_2, \cos \varphi.$$

De rezolvat prin metoda simbolică și de construit diagrama vectorială în planul numerelor complexe.

1. Exprimăm rezistențele totale ale ramurilor în formă complexă:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_{L1};$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 - jX_{C2}.$$

2. Determinăm curenții I_1 și I_2 :

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_1};$$

$$\underline{U} = U = U + j0;$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}}{R_1 + jX_{L1}} \cdot \frac{R_1 - jX_{L1}}{R_1 - jX_{L1}} = \frac{UR_1}{R_1^2 + X_{L1}^2} - j \frac{UX_{L1}}{R_1^2 + X_{L1}^2} = I_{1a} - jI_{1L};$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}}{R_2 - jX_{C2}} \cdot \frac{R_2 + jX_{C2}}{R_2 + jX_{C2}} = \frac{UR_2}{R_2^2 + X_{C2}^2} + j \frac{UX_{C2}}{R_2^2 + X_{C2}^2} = I_{2a} + jI_{2C}.$$

3. Determinăm curentul I :

$$\begin{aligned} \underline{I} &= \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = I_{1a} - jI_{1L} + I_{2a} + jI_{2C} = \\ &= I_{1a} + I_{2a} - j(I_{1L} - I_{2C}) = I_a - jI_r. \end{aligned}$$

4. Determinăm modulul curenților I_1, I_2, I :

2.6. Metoda conductanțelor

Fie dat un circuit ramificat cu n ramuri (fig.2.17):

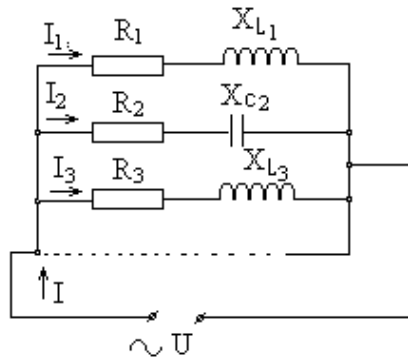


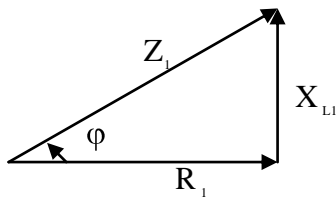
Fig. 2.17

Se dă: $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$;
 $X_{L1}, X_{C2}, X_{L3}, \dots, X_{kn}$
 U

De găsit: $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n - ?$
 $I - ?$

Din triunghiul rezistențelor pentru prima ramură vedem că:

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1}$$



$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1 = \frac{UR_1}{Z_1^2} = Ug_1;$$

$$g_1 = \frac{R_1}{Z_1^2} > 0;$$

unde g_1 se numește *conductanța activă* a primei ramuri.
 Ea se socoate pozitivă.

$$I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2 = \frac{UR_2}{Z_2^2} = Ug_2;$$

$$g_2 = \frac{R_2}{Z_2^2} > 0;$$

unde g_2 se numește *conductanța activă* a ramurii a doua.

$$I_{3a} = Ug_3;$$

$$I_{na} = Ug_n > 0;$$

$$g_n = \frac{R_n}{Z_n^2} > 0.$$

2.7. Calculul circuitelor mixte

(elemente sunt legate în serie și în paralel)

Circuitele mixte se calculează prin câteva metode:

- 1) metoda conductanțelor (forma obișnuită);
- 2) metoda conductanțelor complexe;
- 3) metoda simbolică (complexă)

Fie dat un circuit mixt pe rezistor (se alimentează cu curent continuu) **fig. 2.19**.

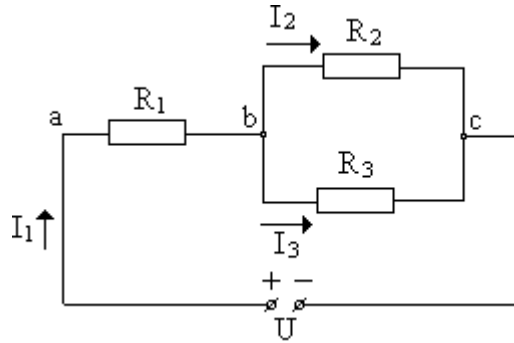


Fig. 2.19

Se dă: R_1, R_2, R_3, U

De aflat: $I_1, I_2, I_3 - ?$

$U_{ab} - ?$

$U_{bc} - ?$

1. Determinăm: $R_{bc} = R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$

Circuitul echivalent este reprezentat în **fig. 2.20**.

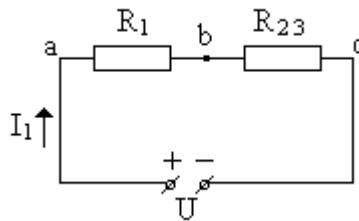


Fig. 2.20

$$2. \quad R = R_{ac} = R_{ab} + R_{bc} = R_1 + R_{23} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$

$$3. \quad I = \frac{U}{R_{ec}}; \quad R_{ec} = R_{echivalent}$$

$$4. \quad U_{ab} = IR_1;$$

$$5. \quad U_{bc} = U - U_{ab} = U - IR_1;$$

2.8. Factorul de rotație a vectorului

Fie dat un vector $\underline{A} = a + jb$.

De construit vectorul $j\underline{A}$.

După formula lui Euler:

$$e^{+j\varphi} = \cos \varphi + j \sin \varphi$$

Fie:

$$\varphi = +\frac{\pi}{2};$$

$$e^{j\frac{\pi}{2}} = \cos \frac{\pi}{2} + j \sin \frac{\pi}{2} = 0 + j \cdot 1 = j;$$

$$j = e^{j\frac{\pi}{2}};$$

$$j\underline{A} = e^{j\frac{\pi}{2}} \underline{A} = e^{j\frac{\pi}{2}} \sqrt{a^2 + b^2} e^{j\varphi} = \sqrt{a^2 + b^2} e^{j(\varphi + \frac{\pi}{2})};$$

Vectorul $j\underline{A}$ va fi rotit cu 90° .

Concluzia: Dacă este dat vectorul complex \underline{A} , atunci vectorul $j\underline{A}$ va fi un vector cu același modul ca și vectorul \underline{A} numai că rotit cu 90° contra acelor de ceasornic.

Determinăm vectorul $-j\underline{A}$.

Din formula lui Euler, dacă $\varphi = -\frac{\pi}{2}$, obținem:

$$e^{-j\frac{\pi}{2}} = \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) - j \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) = -j;$$

$$-j\underline{A} = e^{-j\frac{\pi}{2}} \underline{A} = e^{-j\frac{\pi}{2}} \sqrt{a^2 + b^2} e^{j\varphi} = e^{j(\varphi - \frac{\pi}{2})} \sqrt{a^2 + b^2}.$$

$$\pm j\underline{A} = \underline{A} e^{\pm j\frac{\pi}{2}} \text{ - factorul de rotație a vectorului.}$$

Grafic vectorii \underline{A} , $-j\underline{A}$ și $j\underline{A}$ sunt prezentați în **fig. 2.22**.

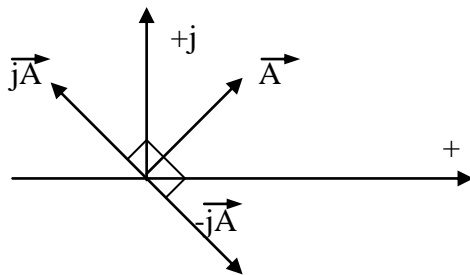


Рис. 2.22

CAPITOL III. CIRCUITE TRIFAZATE

3.1. Generatorul trifazat

Se numește *circuit trifazat* circuitul în care concomitent acționează trei t.e.m. de aceeași amplitudine, defazate una față de alta.

Dacă defazajele de fază dintre t.e.m. sânt egale între ele cu câte 120° (sau $\frac{2\pi}{3}$), se spune că circuitul este simetric, iar dacă defazajele sânt diferite, circuitul este asimetric.

Pentru obținerea rețelelor trifazate se folosește generatorul inductiv sincron (fig. 3.1). Construcția și principiul de funcționare a generatorului principal, nu se deosebește de generatorul de curent alternativ monofazat.

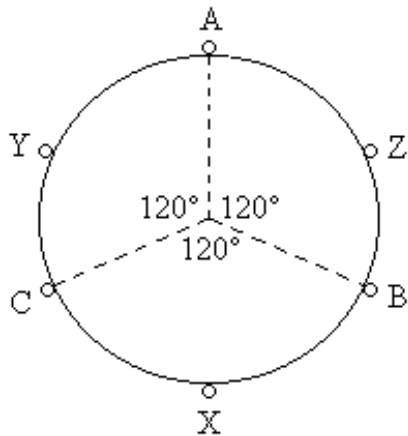


Fig. 3.1

Cel mai răspândit generator trifazat reprezintă:

- partea imobilă (stator) care conține, de obicei trei bobine identice aranjate una față de alta cu câte 120° . Începutul bobinelor se notează prin A, B, C sfârșiturile – respectiv prin X, Y, Z.
- partea mobilă (rotorul). El reprezintă un magnet permanent aranjat pe axă (pentru generatorul de putere mică) sau un electromagnet alimentat cu curent continuu.

Mașina primară (motoare, turbine ...) rotește rotorul cu turații constante care determină frecvența forței electromotrice. Conform legii inducției electromagnetice, în fiecare din bobinele statorului se induce o t.e.m. de aceeași amplitudine și frecvență, însă defazate una față de alta cu câte 120° .

$$\begin{aligned} e_A &= \varepsilon_m \sin \omega t \text{ V}; \\ e_B &= \varepsilon_m \sin (\omega t - 120^\circ) \text{ V}; \\ e_C &= \varepsilon_m \sin (\omega t + 120^\circ) \text{ V}. \end{aligned}$$

Fiecare înfășurare a statorului se numește *faza generatorului*. Din această cauză generatorul se numește *trifazat*.

Diagrama vectorială a forțelor electromotrice a generatorului este prezentată în **fig. 3.2**.

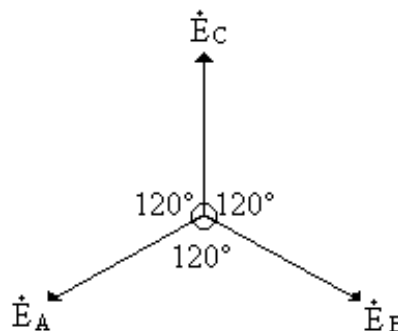


Fig. 3.2

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_A + \dot{\varepsilon}_B + \dot{\varepsilon}_C &= 0; \\ \varepsilon_A = \varepsilon_B = \varepsilon_C &= \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{2}}. \end{aligned}$$

3.2. Conectarea în stea a generatorului

Dacă la fiecare fază a generatorului se conectează aparte consumatori, atunci obținem sistemul trifazat *nelegat*.

Dacă toate sfârșiturile firelor se unesc (se conectează) la un loc, așa o conectare se numește conectare *în stea a generatorului* (fig. 3.3).

S-a primit, că t.e.m. să aibă direcția de la sfârșit la începutul fazei. Pentru circuitele trifazate

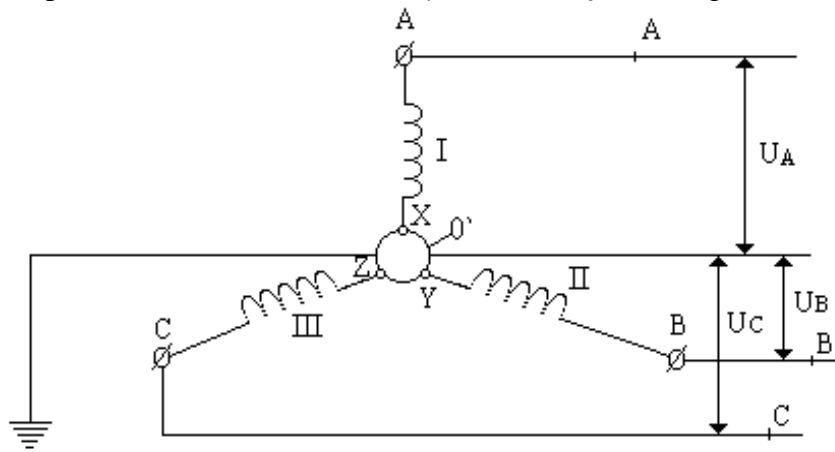


Fig. 3.3

se știe, că rezistența fazelor este foarte mică. De aceea t.e.m. sînt egale ca modul cu tensiunea din faza respectivă.

În cazul conectării în stea consumatorul se conectează prin conductoarele care vin la începuturile fazelor.

Firele care se conectează sarcina cu începutul fazelor generatorului se numesc *fire de linii*: A, B, C.

Punctul unde se unesc sarcinile fazelor generatorului se notează prin O și se numește *nodul generatorului*. Potențialul electric al generatorului este egal cu zero.

$$\varphi_0 = 0$$

Tensiunea care revine unei faze (între începutul fazei și sfârșitul ei) se numește *tensiune de fază*.

$$U_A = \varphi_A - \varphi_0 = \varphi_A = \varepsilon_A;$$

$$U_B = \varphi_B - \varphi_0 = \varphi_B = \varepsilon_B;$$

$$U_C = \varphi_C - \varphi_0 = \varphi_C = \varepsilon_C.$$

Tensiunea dintre două începuturi ale fazelor generatorului (între două fire de linii) se numește *tensiune de linie*.

În caz general este tensiunea U_l . S-a convenit să se știe tensiunile de linie într-o anumită consecutivitate (mai răspîndită consecutivitatea directă).

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B = \dot{\varphi}_A - \dot{\varphi}_B;$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C = \dot{\varphi}_B - \dot{\varphi}_C;$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A = \dot{\varphi}_C - \dot{\varphi}_A.$$

3.3. Conectarea în triunghi a generatorului

A conecta în triunghi fazele generatorului înseamnă a conecta sfârșitul fazei A cu începutul fazei B (**fig. 3.5**).

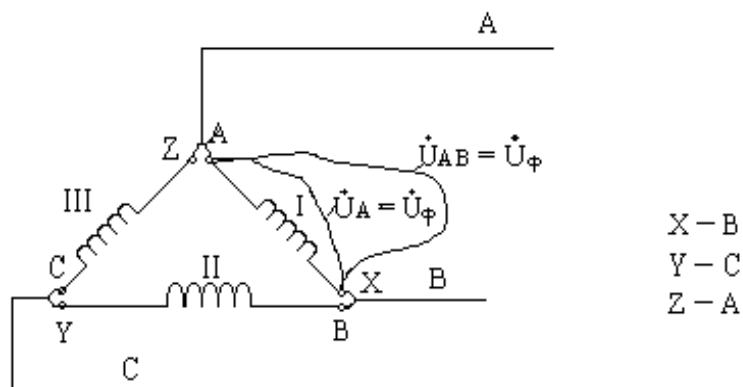


Fig. 3.5

Schema este următoarea: X cu B;
Y cu C;
Z cu A.

Consumatorul se conectează prin fire (linii) care unesc vârfurile triunghiului:

$$U_f = U_l$$

Diagrama vectorială pentru conectarea în triunghi este prezentată în **fig. 3.6**.

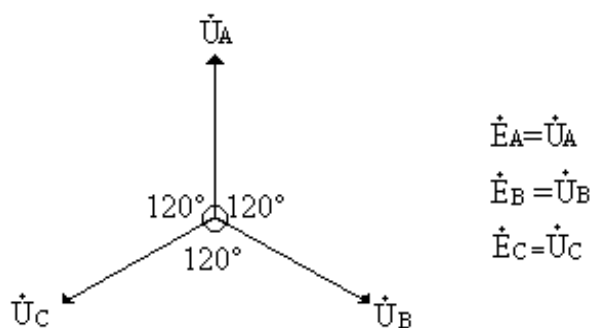


Fig. 3.6

3.4. Conectarea în stea a sarcinii sau a consumatorului

Fazele generatorului de cele mai multe ori se conectează în stea (**fig. 3.7**), fiindcă obținem două tensiuni diferite de linie și de fază. Consumatorii pot fi la fel conectați în stea sau în triunghi.

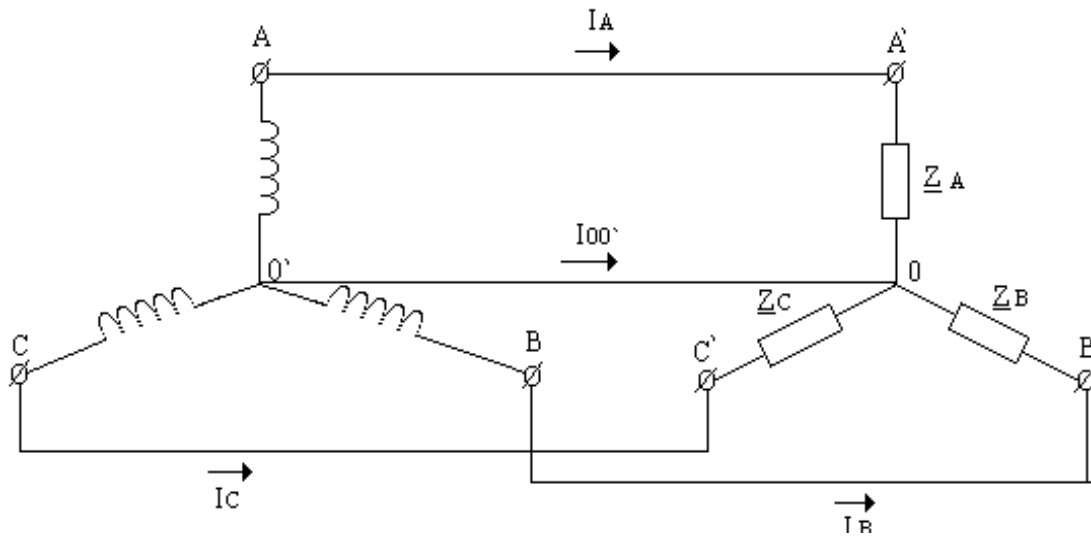


Fig. 3.7

Fie că și generatorul și consumatorul sânt conectați în stea:

Curentul care circulă prin linie se numește *curent de linie* I_l

$$I_A; I_B; I_C - \text{curenți de linie.}$$

Curentul care circulă prin faza consumatorului, se numește *curent de fază*.

La conectarea în stea curentul de linie este egal cu curentul de fază.

$$I_l = I_f$$

Se numește *sarcină simetrică* (echilibrată) sarcina pentru care se îndeplinește condiția:

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C$$

Sarcina pentru care rezistențele fiecărei faze sânt egale și au acelaș caracter.

Dacă:

$$\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C$$

atunci sarcina nu este simetrică (este nesimetrică).

3.5.Sarcina simetrică și nesimetrică

Fie dată o rețea trifazată cu generatorul conectat în stea și consumatorul – la fel, în stea și sarcina este simetrică și activă (**fig. 3.8**).

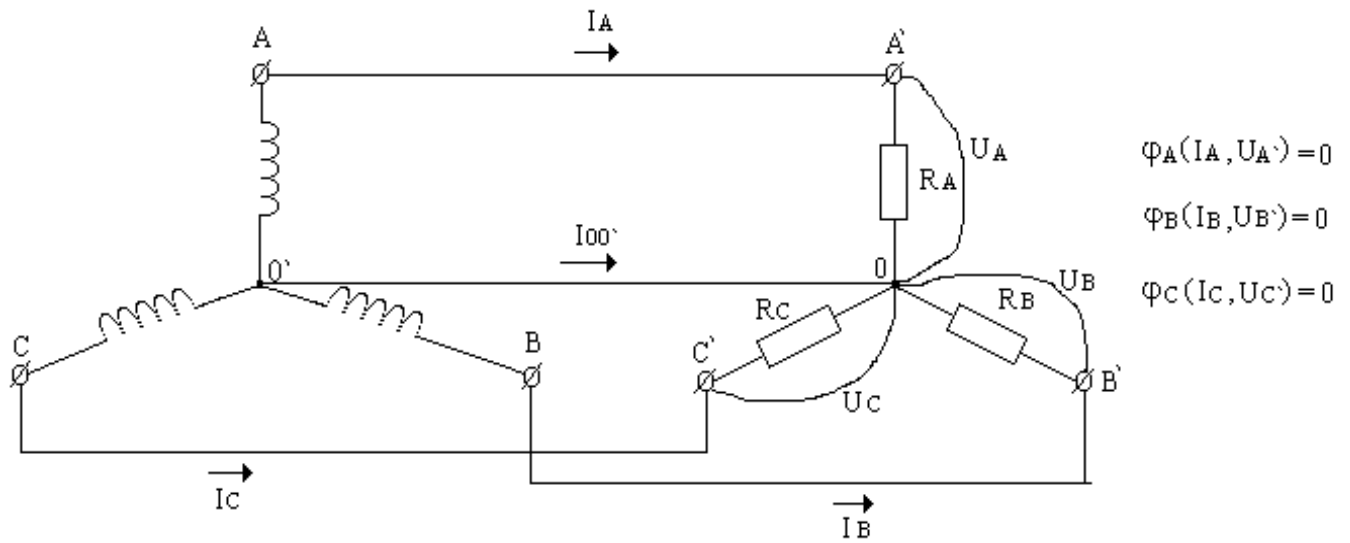


Fig. 3.8

$$\underline{Z}_A = R_A$$

$$\underline{Z}_B = R_B$$

$$\underline{Z}_C = R_C$$

$$R_A = R_B = R_C$$

$$I_A - ?, I_B - ?, I_C - ?$$

De construit diagrama vectorială.

$$U_f = \frac{U_l}{\sqrt{3}} = U_A = U_B = U_C;$$

Conform legii lui Ohm:

$$I_A = \frac{U_A}{R_A} = \frac{U_f}{R} \quad \varphi_A = 0;$$

$$I_B = \frac{U_B}{R_B} = \frac{U_f}{R} \quad \varphi_B = 0;$$

$$I_C = \frac{U_C}{R_C} = \frac{U_f}{R} \quad \varphi_C = 0;$$

$$I_A = I_B = I_C \text{ (numai când sarcina este simetrică);}$$

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0.$$

Dacă sarcina este nesimetrică (neechilibrată) și e conectată în stea, atunci:

3.6. Conectarea în stea fără fir neutru la schimbarea sarcinii în una din faze

Fie: $R_A=R_B=R$;

$0 \leq R_C \leq \infty$;

$R_C=0$ – scurtcircuit (**fig. 3.12**);

$R_C=\infty$ - ruperea firului.

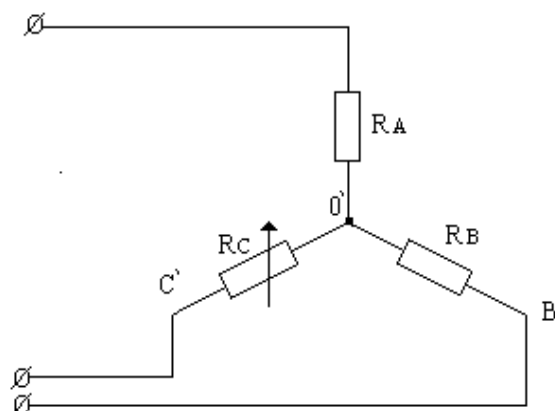


Fig. 3.12

1) Fie $R_C=0$

$$Z_{00'} = \infty;$$

$$E_A = E_B = E_C = U_A = U_B = U_C;$$

$$Y_{00'} = \frac{1}{Z_{00'}} = 0;$$

$$Y_C = \frac{1}{Z_C} = \infty;$$

$$\dot{U}_{00'} = \frac{\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_{00'}};$$

$$Y_A = Y_B = \frac{1}{R};$$

$$\dot{U}_{00'} = \frac{\frac{1}{R} (\dot{E}_A + \dot{E}_B)}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_{00'}} + \frac{\dot{E}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_{00'}} = \frac{\frac{1}{R} (\dot{E}_A + \dot{E}_B)}{\frac{2}{R} + Y_C} + \frac{\frac{\dot{E}_C Y_C}{Y_C}}{\frac{2}{R} + \frac{Y_C}{Y_C}} = 0 + \frac{\dot{E}_C}{0+1} = \dot{E}_C.$$

Dacă va fi scurtcircuit în faza C atunci tensiunea:

$$\dot{U}_{00'} = \dot{E}_C = \dot{U}_f.$$

Diagrama vectorială pentru cazul dat este prezentată în **fig. 3.13**, unde punctul zero a generatorului și consumatorului nu coincid.

- 1) se construiesc t.e.m. a generatorului;
- 2) se construiesc tensiunile de linie.

3.7. Conectarea sarcinii în triunghi

1) Sarcina simetrică:

Fie: $Z_{AB}=R_{AB}$;
 $Z_{BC}=R_{BC}$ (fig. 3.18).

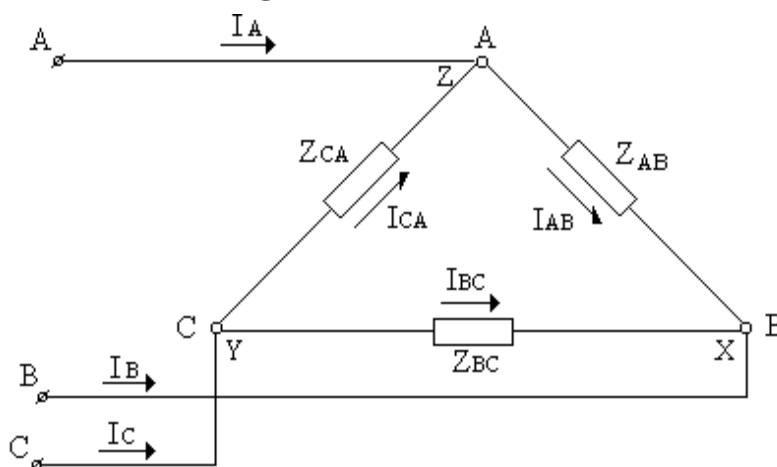


Fig. 3.18

$Z_{CA}=R_{CA}$;
 $R_{AB}=R_{CA}=R_{BC}=R$.
 La conectarea în triunghi:
 $U_l=U_f$.

De aflat:
 Curenții de fază: I_{AB} , I_{BC} ,
 I_{CA} - ?
 Curenții de linie: I_A , I_B , I_C
 - ?

$$I_{AB} = \frac{U_{AB}}{Z_{AB}} = \frac{U_f}{R};$$

$$I_{BC} = \frac{U_{BC}}{Z_{BC}} = \frac{U_f}{R};$$

$$I_{CA} = \frac{U_{CA}}{Z_{CA}} = \frac{U_f}{R};$$

$$I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_f;$$

$$\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = 0.$$

Pentru calculul curenților de linie se folosesc cu diagrama vectorială sau se calculează curenții în forma complexă și se aplică legea a II a lui Kirchhoff pentru nodurile consumatorului:

$$\begin{aligned} ZA: \dot{I}_A + \dot{I}_{CA} &= \dot{I}_{AB} & \dot{I}_A &= \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \\ XB: \dot{I}_B + \dot{I}_{AB} &= \dot{I}_{BC} & \dot{I}_B &= \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}; \\ YC: \dot{I}_C + \dot{I}_{BC} &= \dot{I}_{CA} & \dot{I}_C &= \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}. \end{aligned}$$

Diagrama vectorială este prezentată în fig. 3.19.

3.8. Puterile în circuitele trifazate

1. Conectarea sarcinii în stea:
a) sarcina este simetrică

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C;$$

$$U_1 = \sqrt{3}U_f;$$

$$I_1 = I_f;$$

$$I_A = I_B = I_C = I_f;$$

$$U_A = U_B = U_C = U_f;$$

$$\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi;$$

$$P_A = I_A U_A \cos \varphi = I_f U_f \cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{3}} I_1 U_1 \cos \varphi;$$

$$P_B = I_B U_B \cos \varphi = I_f U_f \cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{3}} I_1 U_1 \cos \varphi;$$

$$P_C = I_C U_C \cos \varphi = I_f U_f \cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{3}} I_1 U_1 \cos \varphi;$$

$$P = 3P_A = 3I_f U_f \cos \varphi = \sqrt{3} I_1 U_1 \cos \varphi.$$

La fel se calculează și puterile reactive:

$$Q_A = I_A U_A \sin \varphi_A;$$

$$Q_B = I_B U_B \sin \varphi_B;$$

$$Q_C = I_C U_C \sin \varphi_C;$$

$$Q_A = Q_B = Q_C = I_f U_f \sin \varphi = \frac{1}{\sqrt{3}} I_1 U_1 \sin \varphi;$$

$$S_A = I_A U_A;$$

$$S_A = I_A U_A;$$

$$S_C = I_C U_C;$$

$$S_A = S_B = S_C = I_f U_f = \frac{1}{\sqrt{3}} I_1 U_1;$$

$$S = 3S_A = 3I_f U_f = \sqrt{3} I_1 U_1.$$

- b) sarcina este nesimetrică

$$\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C;$$

Dacă firul nul este bun atunci are loc egalitatea: $U_1 = U_f$, dar $I_1 = I_f$ – întotdeauna la conectarea sarcinii în stea.

$$\text{Dar: } I_A \neq I_B \neq I_C,$$

$$U_A = U_B = U_C = U_f, \quad \text{când } U_{00} = 0.$$

În acest caz puterile se calculează aparte pentru fiecare fază.

CAPITOLUL IV. APARATE ELECTRICE DE MĂSURAT

4.1. Clasificarea aparatelor electrice de măsurat


A măsura un parametru oarecare înseamnă a compara acest parametru cu un etalon (unitate de măsură) și rezultatul măsurării va fi de câte ori etalonul se cuprinde în parametrul dat.


Aparatele electrice de măsurat se clasifică după câteva principii:


1. După felul curentului:

— curent continuu;


 curent alternativ monofazat;


 curent alternativ monofazat și continuu;


 curent alternativ trifazat;

 pentru circuite trifazate nesimetrice.


2. După parametrul pe care-l măsoară

I[A],kA,mA,μA.  — ampermetru;

 — galvanometru;

U[V],kV,mV,μV.  — voltmetru;

E [V] – la mers în gol

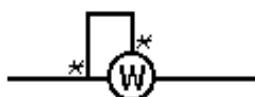
R[Ω]  — ohmetru;

Se conectază în rețea în dependență de construcția aparatului.

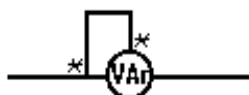
$$R = \frac{P}{I^2},$$

unde: R – rezistența activă nu se măsoară direct ea se calculează conform formulei la curent alternativ.

P[W] – puterea activă

 — wattmetru;

Q[VAr] – puterea reactivă

 — varmetru;

4.2. Sistema magneto-electrică

Această sistemă poate fi:

- cu cadru mobil:
- cu magnet permanent:

Principiu de funcționare a sistemii magneto-electrice se bazează pe interacțiunea dintre curentul care parcurge cadrul și câmpul magnetic al magnetului permanent.

În cazul cadrului mobil se folosește un magnet permanent în formă de potcoavă.

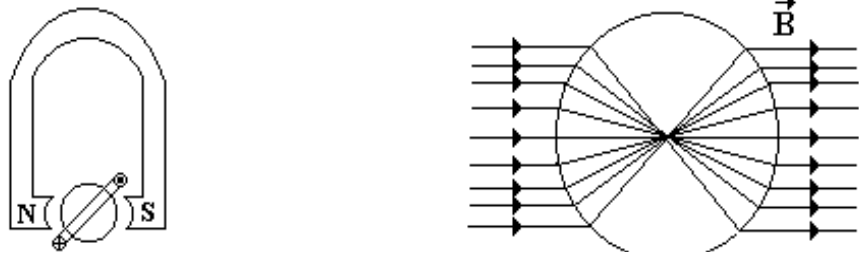


Fig. 4.1

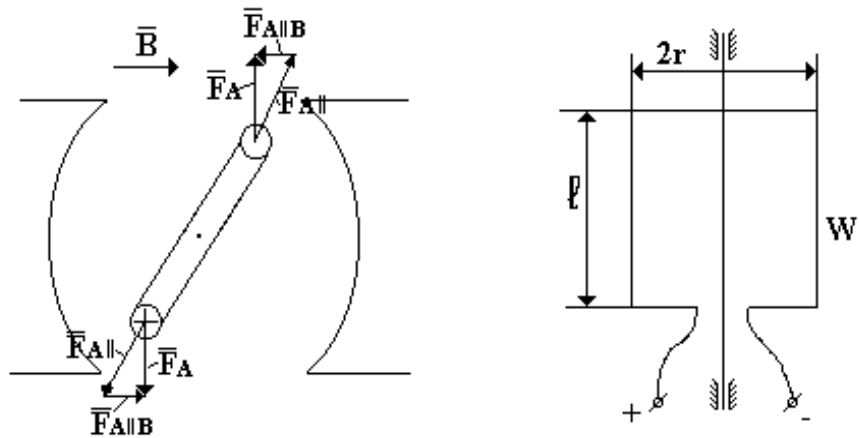
Construcția este prezentată pe **fig. 4.1**.

Între poli magnetului permanent se aranjează pe o axă un cadru, confecționat din conductor de (C)

În cilindrul de oțel electrotehnic vectorul inducției câmpului magnetic este orientat de-a lungul razelor suprafeței lui de bază, adică este orientat ca și curentul din spire.

Dacă prin cadru va circula un curent cu intensitatea I atunci:

$$F_A = IB \sin \alpha .$$



Din cauza că câmpul magnetic este radial, avem:

B coincide cu I după direcție ($\alpha = 90^\circ$)

$$\sin 90^\circ = 1 \Rightarrow F_A = IB ;$$

$$M_{rot} = M_a = F_A * 2r .$$

Pe axul cadrului se instalează acul indicator. Capetele cadrului sânt legate prin arcuri spiralice formează momentul (cuplul) de contraacțiune:

$$M_{ca} \sim \alpha : M_{ka} = k\alpha ;$$

unde: k - rigiditatea arcurilor spiralice.

Acul indicator se va opri în acea poziție, când se va îndeplini condiția:

$$2rIB = k\alpha ;$$

4.3. Sistema electromagnetica

Principiul de funcționare a acestei sisteme se bazează pe apariția forței de atracție a unei petale din oțel electrotehnic din partea unei bobine parcurse de curent.

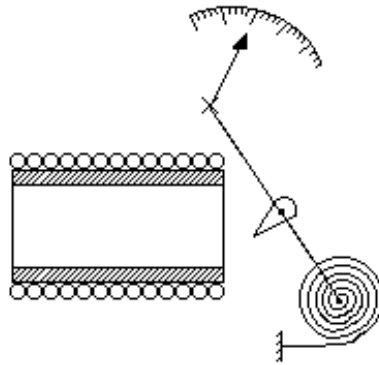


Fig. 4.3

Construcția este prezentată pe **fig. 4.3**.

O bobină de o formă specială este parcursă de curent (continuu sau alternativ). La trecerea curentului prin bobină petala din oțel electrotehnic este atrasă în interiorul bobinei. Axul pe care este instalat acul și petala se sucește.

Forța de atracție a petalei în interiorul bobinei depinde de intensitatea câmpului magnetic al bobinei, adică de intensitatea curentului care circulă prin bobină:

$$F = kI^2.$$

Această forță atrage petala și răsucesce axul deci ne crează moment de rotație:

$$M_{\text{rot}} = M_{\text{act}} k_1 I^2;$$
$$M_{\text{ca}} \text{ (contraacțiune)} = k_0 \alpha.$$

Forma petalei se alege în așa fel ca inductanța bobinei să nu varieze în cazul atragerii petalei în interior. Acul se va opri în momentul când:

$$M_a = M_{ca}.$$

$$k_0 \alpha = k_1 I^2 \Rightarrow \alpha = k_3 I^2 \text{ - formula de lucru a sistemului electromagnetice (ampermetru).}$$

La fel ca și pentru sistemele magneto-electrice, el se folosește și pentru măsurarea tensiunilor. Scara este patratică (neuniformă).

$$\alpha \sim I^2.$$

Calitățile sistemului electromagnetice

- se folosește în circuitele de curent alternativ monofazat și continuu;
- are o clasă de precizie de aproximativ 2,5;
- suportă suprasarcini;

4.4 Sistema electrodinamică

Această sistemă are *principiul de funcționare* bazat pe interacțiunea câmpurilor magnetice a două bobine.

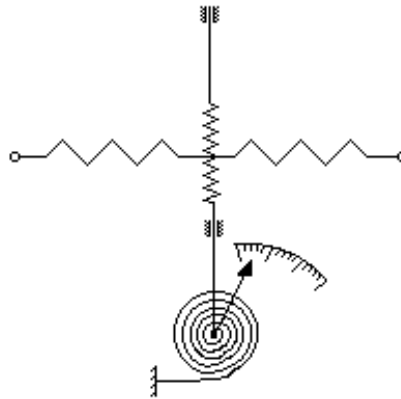


Fig. 4.4

Construcția este prezentată pe **fig. 4.4**.

Două bobine: una fixă și una mobilă. Bobina fixă este compusă din două jumătăți. Ea este confecționată din conductor de diametru mare și are puține spire. În interiorul ei (între jumătățile ei) se aranjează o bobină mobilă (pe un ax), care este confecționată din conductoare cu diametru mic și are multe spire.

Dacă ambele bobine vor fi parcurse de curent, atunci fiecare bobină va crea câmpuri magnetice care vor interacționa între ele. În rezultatul acestei interacțiuni bobina mobilă va tinde să se rotească în jurul axei atâta timp până când va coeștiga direcția câmpurilor magnetice. Pe axul bobinei mobile se instalează acul și arcurile spiralice ce ne crează un moment de contracțiune.

În rezultatul interacțiunii câmpurile magnetice apare un moment de rotație:

$$M_{rot} = M_a = I_1 I_2 \cos \varphi,$$

unde: I_1 - curentul ce circulă prin bobina imobilă;
 I_2 - curentul ce circulă prin bobina mobilă;
 φ - defasajul de fază dintre curenții I_1 și I_2 .

$$M_{ca} = k\alpha;$$

$$M_a = M_{ca};$$

$$k\alpha = I_1 I_2 \cos \varphi;$$

$$\alpha = \frac{I_1 I_2 \cos \varphi}{k} = k_1 I_1 I_2 \cos \varphi - \text{formula de lucru a sistemului electrodinamic.}$$

1. Dacă bobinele se conectează în serie rezistența interioară este mare prin ambele bobine va trece același curent, deci $\varphi=0$; $\cos\varphi=1$.

$$\alpha = k_1 I_1^2 = k_1 I_2^2;$$

(ampermetru este rău, deoarece rezistența interioară este mare)

$$I = \frac{U}{R};$$

4.5. Sistema de inducție

Principiul de funcționare a acestei sisteme se bazează pe interacțiunea a doi curenți induși într-un disc de aluminiu (curenți sânt defazați) în rezultatul căreia apare moment de rotație.

Construcția este prezentată în **fig 4.5**.

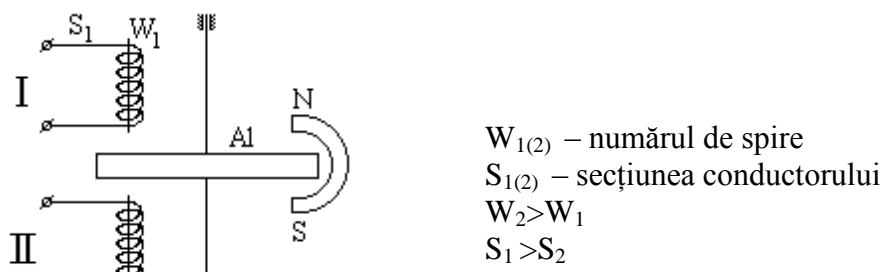


Fig. 4.5

Un disc de aluminiu aranjat pe o axă, care poate să se rotească. Doi electromagneți care sunt aranjați în dreptul discului în așa fel că ei sânt defazați: o bobină are rezistența pur activă (fire groase și puține), cealaltă are și rezistență inductivă. Între curenții ce parcurg aceste bobine este un defazaj de fază φ .

Bobinele se alimentează cu curent alternativ, deci dau naștere la fluxuri magnetice alternative, care întretaie discul de aluminiu. Conform legii de inducției electromagnetice în disc se induce t.e.m. De inducție, care dau naștere la curenți de inducție (curenți turbionari, curnții Foucaunt). Deoarece acești curenți sânt defazați în rezultatul interacțiunilor discul se va roti:

$$M_a = k_1 I_1 I_2 \sin \varphi .$$

La marginea discului este aranjat un magnet permanent, care servește pentru a crea momentul de frânare sau de contraacțiune (pentru a evita rotirea discului, când printr-o bobină nu va circula curent și pentru a micșora accelerația unghiulară la pornirea și la oprirea discului:

$$M_{ca} = k_2 \omega = k_2 \frac{d\alpha}{dt} .$$

Discul se va roti uniform atunci, când se va respecta condiția:

$$M_a = M_{ca} .$$

Deci:

$$k_2 \frac{d\alpha}{dt} = k_1 I_1 I_2 \sin \varphi ;$$

$d\alpha = k I_1 I_2 \sin \varphi dt$ - formula generală de lucru a aparatului.

Acest aparat poate fi:

1. ampermetru;
2. voltmetru;
3. wattmetru.

4.6. Sistema electrostatică

Principiul de funcționare a acestei sisteme se bazează pe interacțiunea electrostatică dintre plăcuțele imobile și plăcuța mobilă.

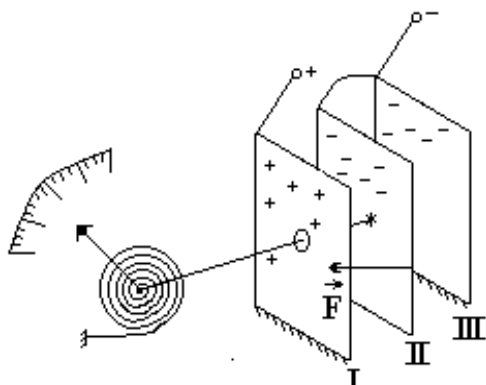


Fig. 4.6

Construcția este prezentată pe **fig. 4.6**.

Două plăcuțe imobile (1 și 3) și una mobilă:

$$M_{ca} = k\alpha, \text{ unde: } k - \text{rigiditatea unui arc.}$$

$$F = kU^2 ;$$

$$M_a = k_2 U^2 ;$$

$$\alpha = k_3 U^2 - \text{formula de lucru a acestui aparat.}$$

Aparatul lucrează ca voltmetru cu scară patrată.

Rezistența interioară a aparatului este infinită deci consumul de energie este zero.

Sistema electrostatică este cel mai bun voltmetru ce se folosește pentru măsurări precise și tensiuni înalte.

Clasa de precizie este mare. Acest aparat trebuie ecranizat de câmpurile electrice exterioare.

4.7. Sistema de vibrație

Principiul de funcționare a acestei sisteme se bazează pe fenomenul rezonanței mecanice.

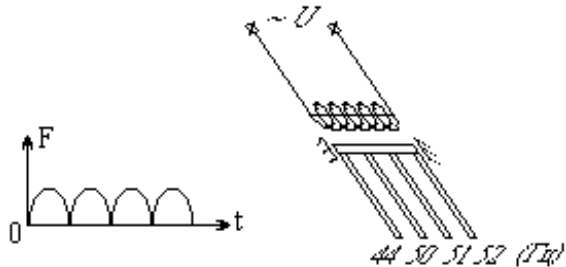


Fig. 4.7

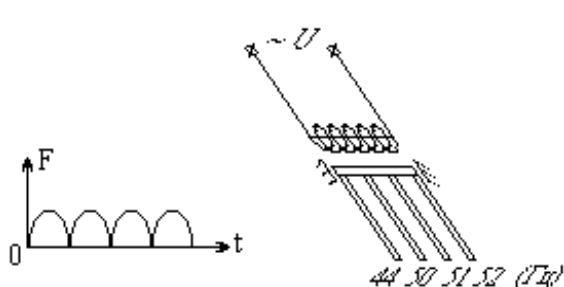
Construcția este prezentată în **fig. 4.7**. Avem un șir de plăcuțe care au frecvențele proprii de oscilații. Deasupra plăcuțelor se aranjează un electromagnet care se alimentează cu curent alternativ. Dacă frecvența curentului alternativ este f , atunci din partea electromagnetului asupra plăcuțelor va acționa o forță de atracție cu frecvența $2f$. Dacă frecvența proprie a unei plăcuțe va coincide cu frecvența forței de atracție, atunci plăcuța va intra în rezonanță mecanică. Amplitudinea de vibrație a plăcuței crește. Acest

aparat este **hertmetru** (Hz). Se conectează în rețea ca și voltmetru.

- precizia- $\approx 2,5$;
- consum de energie – relativ mic;
- acționează vibrațiile exterioare.

4.8. Sistema termică

Principiul de funcționare a acestei sisteme se bazează pe efectul termic al curentului. Construcția este prezentată în **fig. 4.8**. Dacă se folosește plăcuța bimetalică, atunci ea se îndoaie în rezultatul încălzirii ei și printr-un sistem de pârghii, acționează asupra acului indicator. Dacă se folosește elementul încălzitor, atunci la trecerea curentului prin el elementul se alungește și printr-un sistem de pârghii acționează asupra acului indicator. Momentul de rotație al echipajului mobil este direct proporțional cu patratul curentului (reese din legea Joule-Lentz). Aceste aparate se folosesc ca ampermetre sau voltmetre.



$$M_{a1} = k_1 I^2;$$

$$M_{a2} = k_2 U^2$$

Momentul de contra acțiune este creat de arcuri:

$$M_{ca} = k\alpha \Rightarrow \alpha k_3 I^2; \alpha = k_4 U^2 .$$

Fig. 4.8

În ambele cazuri scara este neuniformă. Au un consum de energie relativ mare. Principalul avantaj al acestor aparate este că momentul de rotație, deci și unghiul de abatere a acului nu depinde de frecvența curentului (se folosesc de obicei pentru curenți de frecvență înaltă) dar depinde de valorile eficace.

CAPITOLUL V. MAȘINI DE CURENT CONTINUU

5.1. Construcția mașinii de curent continuu

Mașinile de curent continuu pot fi generatoare sau motoare de curent continuu. Una și aceeași mașină în principiu poate funcționa cât într-un regim atât și în altul.

Construcția:

- 1) statorul;
- 2) rotorul.

Statorul reprezintă o carcasă cilindrică pe partea interioară a căruia se aranjază simetric polii magnetici principali (pot fi 1; 2; 3;... perechi). Ei reprezintă niște electromagneți cu miezurile confecționate din plăcuțe de oțel electrotehnic pe care se înfășoară bobinele de excitație. Înfășurările de excitație sânt parcurse de curent de excitație care ne crează fluxul magnetic principal Φ_m

Între polii magnetici principali se aranjază simetric polii secundari care îmbunătățesc comutația. Pe miezul polilor magnetici principali pot fi uneori înfășurate bobinele de compensație care compensează reacțiunea ancorei.

Rotorul reprezintă o bobină secționată aranjată pe miez și capetele secțiilor ei sânt conectate cu plăcuțele din cupru care crează colectorul.

În dependență de modul de excitație mașinile de curent continuu se clasifică în:

1. cu magneți permanenți;
2. cu excitația independentă;
3. cu autoexcitație:
 - 3.1. cu excitație în paralel (șunt);
 - 3.2. cu excitație consecutivă (series);
 - 3.3. cu excitație mixtă (compound).

5.2. Principiul de funcționare a generatorului

Independent de metoda de excitație generatorul funcționează astfel:

Bobinele de excitație fiind parcurse de curent creează fluxul magnetic principal. Valoarea lui depinde numai de valoarea curentului de excitație.

Mașina primară rotește rotorul cu un număr n de turații care poate fi variabil. Secțiunile bobinelor rotorului la rotație intersectează liniile de forță a câmpului magnetic principal. Conform legii inducției electromagnetice în secțiunile bobinelor rotorului se induce t.e.m. variabile. Colectorul și periutele ce vin în contact cu el servesc ca redresor. Deci la bobinele generatorului vom avea o tensiune continuă. Dacă consumatorul nu e conectat avem regimul de mers în gol. Dacă e conectat - regim de sarcină.

Fie că bobina rotorului are o spiră. Ea este din două jumătăți (**fig. 5.1**).

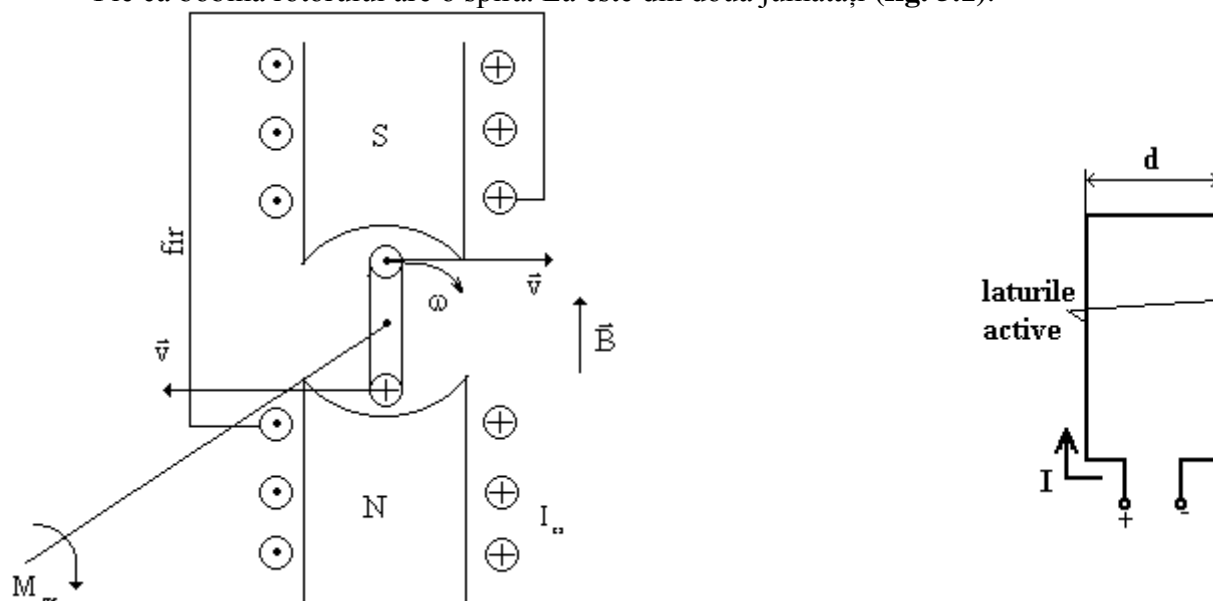


Fig. 5.1

Ecuatia t.e.m. a generatorului. Forța electromotrică generată depinde de:

$$\varepsilon = f(\Phi; B; n)$$

$$B = f(I_{ex})$$

$$\varepsilon = \Phi n C_e$$

C_e - calitățile constructive ale mașinii.

5.3. Principiul de funcționare a motorului

Motorul se conectează la o rețea de curent continuu. Prin bobinele de excitație va circula un curent de excitație ce ne crează fluxul magnetic principal. Prin secțiile bobinei rotorului va circula curent (curentul ancorei). Avem conductoare parcurse de curent (secțiile bobinei rotorului) introduse într-un câmp magnetic. Asupra conductoarelor va acționa forța F_A , care ne crează moment de rotație (**fig. 5.2**).

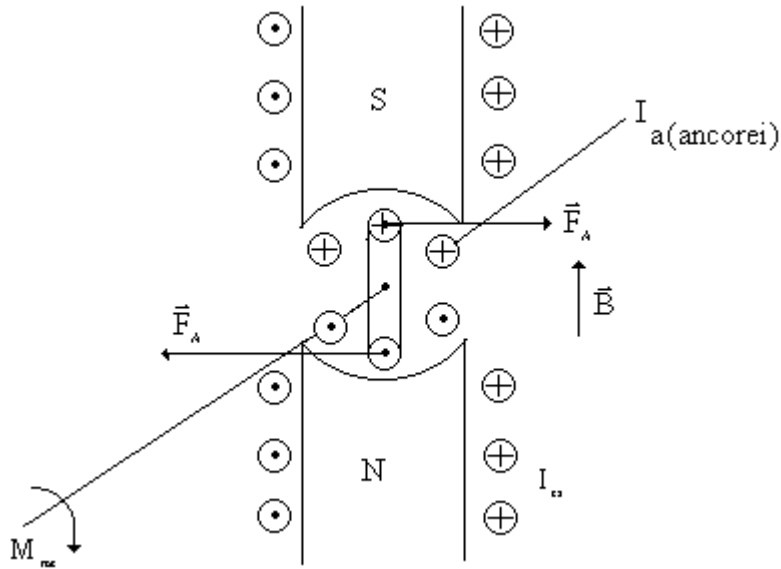


Fig. 5.2

$$M_{rot} = \vec{F}_A d;$$

$$\vec{F}_A = I_a B l \sin \alpha = I_a B l;$$

$$M_{rot} = I_a B l d = I_a \Phi = C_\mu \Phi I_a .$$

C_μ - particularitățile constructive.

$$\left(C_\mu = \frac{PN}{60} \right)$$

5.4. Funcționarea generatoarelor și caracteristicile lor

1. Reacțiunea ancorei

Reacțiunea ancorei reprezintă modificarea câmpului magnetic principal al mașinii de către curentul ancorei. La mersul în gol al generatorului curentul ancorei este practic egal cu zero de aceea reacțiunea ancorei lipsește. Când generatorul funcționează în regim de sarcină t.e.m. a lui

$$\varepsilon = C_e \Phi n.$$

ne va crea un curent ce va circula prin ancora: I_a ; B_a - câmpul magnetic creat de curentul electric în ancoră (**fig. 5.3**).

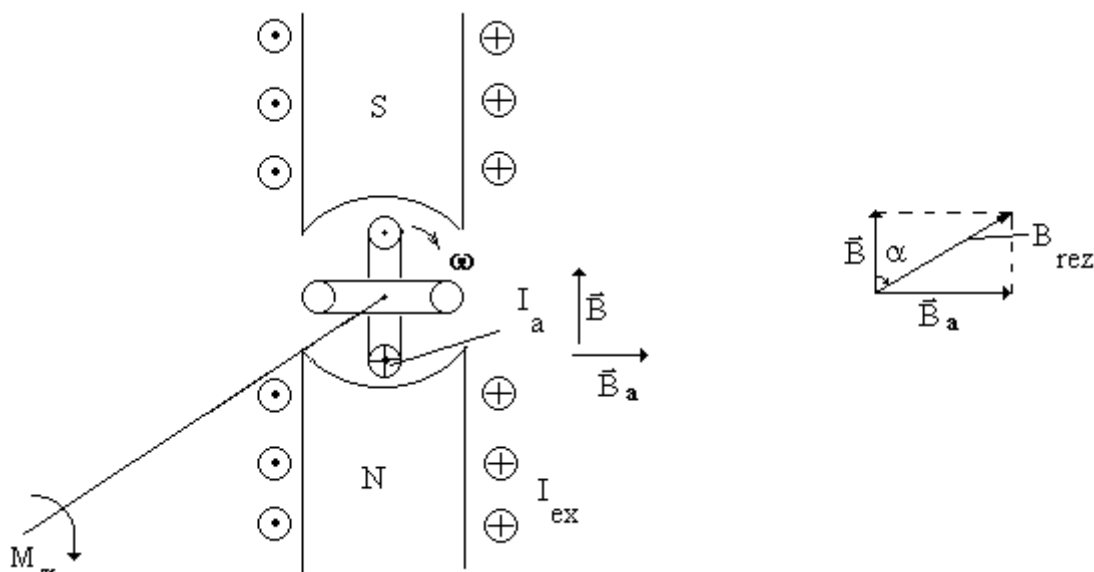


Fig. 5.3

$$\vec{B} + \vec{B}_a = \vec{B}_{rez} \text{ (fig. 5.3).}$$

Câmpul magnetic rezultat și-a schimbat direcția față de câmpul magnetic principal B cu un unghi α în direcția de rotație a ancorei.

Valoarea lui α depinde de B_a care este determinat de curentul I_a .

În teoria mașinilor se demonstrează că periuțele trebuie să fie aranjate pe colimator în așa fel ca linia care le unește să fie perpendiculară pe câmpul magnetic principal la mersul în gol sau pe câmpul magnetic rezultat la regim de sarcină.

a. mers în gol:

$$I_a = 0 \Rightarrow B_a = 0;$$

$$\vec{B}_r = \vec{B}.$$

b. sarcină:

$$B_a \neq 0.$$

Linia perpendiculară pe B_r se numește *linie neutră geometrică* și ea trebuie să unească periuțele. La variația sarcinei se schimbă și I_a , și B_a și în rezultat variază și unghiul α .

Reacțiunea ancorei duce la aceea că la variația sarcinei periuțele ar trebui deplasate permanent ceea ce nu este convenabil.

Dacă periuțele nu sânt conectate corect (nu-s conectate pe linia neutră) apar scânteeri puternice la trecerea periuței de pe o plăcuță pe alta. În rezultat se distruge colectorul și periuțele.

5.5. Funcționarea generatoarelor

1. Generator cu magneți permanenți

Generatorul cu magneți permanenți se folosește la unele feluri de autovehicole.

Principiul de funcționare și caracteristicile sânt asemănătoare cu ale generatorului cu excitație independentă, dacă I_{ex} se menține constant.

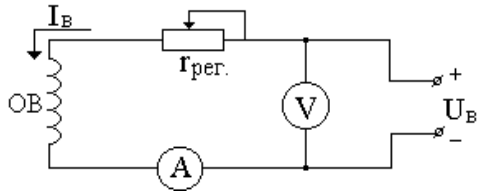


Fig. 5.4

2. Generator cu excitație independentă

Excitare independentă înseamnă că înfășurarea de excitație nu este legată electric cu generatorul. Ea se alimentează printr-un reostat de reglare de la o sursă independentă (fig. 5.4).

$$I_{ex} = \frac{U_{ex}}{R_{ex} + R_{regl}};$$

$$I_a = 0;$$

$$I_{ex} \Rightarrow \Phi_m.$$

Aceasta este schema la mers în gol.

Se numește *caracteristica mersului în gol*, dependența t.e.m. (sau a tensiunii) la bornele mașinii de curentul de excitație la turații nominale și constante a ancorei (fig. 5.5).

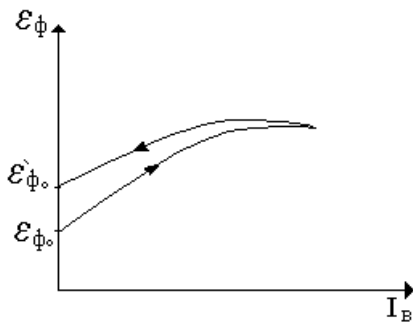


Fig. 5.5

$$\varepsilon = f(I_{ex});$$

$$n = n_n = \text{const.}$$

Dacă $I_{ex}=0$ datorită inducției remanente a miezului bobinei de excitație în ancoră se va induce o t.e.m. ε_0 . Cu creșterea I_{ex} fluxul magnetic principal al bobinei crește, deoarece

$$\varepsilon = C_e \Phi n \quad (n = \text{const});$$

$$\Phi \uparrow \Rightarrow \varepsilon \uparrow.$$

Dacă I_{ex} crește mai departe are loc saturația bobinei de excitație.

Caracteristica exterioară (fig. 5.6) reprezintă dependența tensiunii la sarcină de curentul de sarcină, dacă

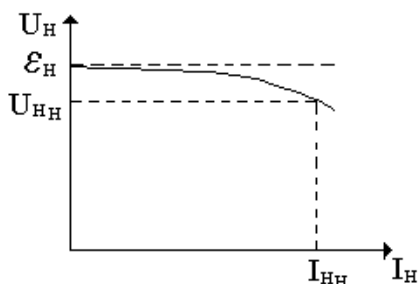


Fig. 5.6

și

$$I_{ex} = I_{exn} = \text{const}$$

$$n = n_n = \text{const.},$$

adică

$$U_s = f(I_s).$$

1. La mers în gol ($R = \infty$) se stabilește un $I_{ex} = I_{exn}$ cu r_{reg} , ca tensiunea $U = \varepsilon = U_n$.

5.6. Motoare de curent continuu

1. Construcția este aceea ca și la generatoare.
2. Modurile de excitație sânt aceleași ca și la generatoare.
3. Principiul de funcționare a motoarelor cu auto excitație.

Înainte de conectarea motorului la rețeaua de curent continuu $n=0$ (numărul de turații). Sub acțiunea tensiunii rețelei prin bobina de excitație va circula curentul I_{ex} , prin ancoră va trece curentul I_a . Acest curent va da naștere la fluxul magnetic principal al mașinii și secțiunile bobinei rotorului, fiind parcurse de curentul I_a sânt acționate de forțele Ampere care ne crează cuplul de rotație M_{rot} . La rotirea ancorei în înfășurarea ei se induce o t.e.m. care se notează prin ϵ_a .

Formula tensiunilor oricărui motor este:

$$U = e_a + I_a r_a,$$

unde: U este tensiunea rețelei de alimentare.

Motorul cu excitație paralelă

La pornirea motorului $n=0$; t.e.m. $\epsilon_a = C_e \Phi_n = 0$ deci:

$$I_{ex} = \frac{U}{r_a}.$$

Deoarece r_a este de ordinul câtorva ohmi: I_{ex} este foarte mare aproximativ de 30-50 ori mai mare decât I_{an} . Acest curent poate să accidenteze motorul (apar scânteeeri mari la periuțele colectorului se încălzesc tare sârmele). Pentru a limita curentul de pornire se folosește reostatul de pornire R_p care se calculează pentru fiecare motor aparte.

La pornire $R_p = R_{pmax}$ și atunci:

$$I_a = \frac{U}{r_a + R_{pmax}};$$

deci $I_a \downarrow$. Cu mărirea turațiilor motorului $e_a \neq 0$ și $I_a = \frac{U - \epsilon_a}{r_a}$ reostatul de pornire se scoate.

Schema electrică este prezentată în **fig. 5.15**.

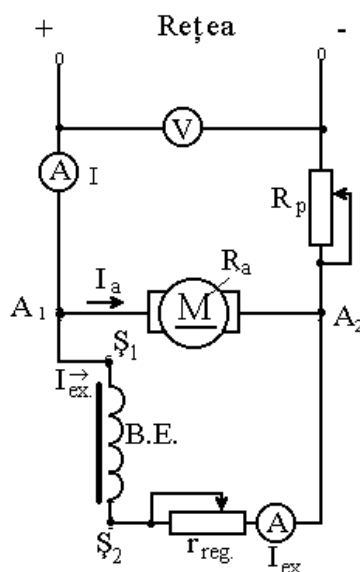


Fig. 5.15

CAPITOLUL VI. TRANSFORMATOARE ELECTRICE

Se numește *transformator* aparatul static (care n-are părți mobile) de sistemă electromagnetică destinat pentru transformarea energiei electrice de o tensiune în energie electrică de altă tensiune fără a-i schimba frecvența.

Transformatorul funcționează numai la curent alternativ, deoarece principiul de funcționare a lui se bazează pe legea inducției electromagnetice.

6.1. Clasificarea transformatoarelor

Transformatoarele se clasifică:

1. După forma miezului

- a. miez în formă de Π .

El se stringe din plăcuțe de forma



- b. miez în formă de III .

Plăcuțele au forma de



În cazul a) bobinele pot fi aranjate în orice loc.

În cazul b) pe miezul din mijloc.

- c. miez toroidal



2. După numărul fazelor

- a) monofazate;
b) trifazate;
c) polifazate.

3. După destinație

- a) transformatoare de ridicare (la ieșire avem o tensiune mai mare ca la intrare);
b) de coborâre;
c) de ajustare.

4. După modul de folosire

- a) cu impuls (lucrează un timp scurt);
b) pentru sudare;
c) de măsurat (de curent și de tensiune).

Vom studia cel mai simplu transformator manofazat cu două bobine.

Construcția este prezentată în **fig. 6.1**. Două bobine și un miez de fier. Bobinele nu sânt legate electric între ele. Bobina ce se conectează la rețeaua de alimentare se numește bobină primară.

Capetele ei sânt: AøØX. Bobina, la care se conectează consumatorul, se numește bobină secundară.

Capetele ei: aøøx. Toți parametrii ce se atribue bobinei primare au indicii (1), iar cei ce se atribue bobinei secundare au indicii (2).

Miezul de fier este confecționat din oțel electrotehnic, care-i bun feromagnet. Plăcuțele au grosimea de:

$$h=0,35\text{mm} \quad \text{sau} \quad h=0,5\text{mm}$$

Plăcuțele se izolează între ele cu un lac special sau cu oxid de fier.

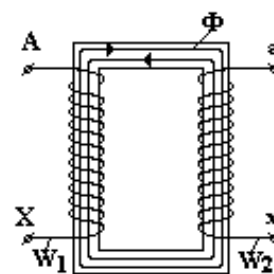


Fig. 6.1

6.2 Regim de mers în gol

Deosebim trei regimuri de funcționare a transformatorului:

1. mers în gol când la bobina secundară nu este conectat consumatorul;
2. rezistența sarcinii: $R=\infty$; $I_2=0$;
3. regim de sarcină;
4. regim de scurtcircuit ($R=0$).

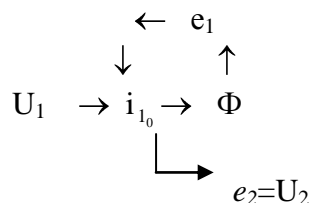
Mersul în gol

$$\underline{Z}_2=\infty;$$

$$I_2=0;$$

I_1 -valoarea curentului la mers în gol

Schema logică de lucru a transformatorului



Conform legii II-a a lui Kirchhoff în bobina primară acționează tensiunea U_1 și t.e.m. ei (de autoinducție) și circulă un curent i_{10} care trecând prin rezistența activă a bobinmei 1 ne dă o cădere de tensiune:

$$u_1+e_1=i_{10}r_1.$$

Conform legii lui Lentz t.e.m. în orice moment de timp este opusă tensiunii aplicate, deci legea II-a a lui Kirchhoff pentru valorile eficace va fi:

$$U_1-E_1=I_{10}r_1;$$

$$I_{01}=\frac{U_1-E_1}{r_1}.$$

Conform deducerii efectuate anterior:

$$E_1=4,44 \oint \omega_1 \phi_m .$$

Pentru un transformator bun E_1 diferă după valoare de U_1 cu câteva zecimi volți până la câțiva volți (la mersul în gol). Deaceia I_{10} este mic. La mersul în gol transformatorul absoarbe din rețea un curent mic.

În schema logică $e_1 \Rightarrow i_1$.

6.3. Pierderile în oțel și cupru

1. Pierderile în cupru (P_{cu})

Prin pierderea în cupru înțelegem puterea activă degajată în bobina primară sau secundară a transformatorului.

$$P_{cu10}=I_{10}^2 r;$$

$$P_{cu20}=0.$$

P_{cu} - depinde de regimul de funcționare a transformatorului.

2. Pierderile în fier (P_{fe}).

P_{fe} au două componente:

1. datorită curenților Foucault (**fig. 6.2**): $P_{fe}=P_F$;
2. datorită efectului de histerezis magnetic.

$$P_{fe}=P_F+P_h.$$

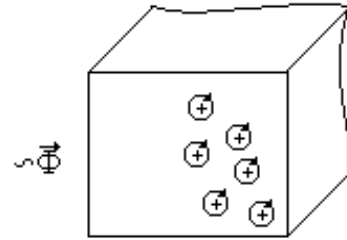


Fig. 6.2

Pierderile la histerezis

Din caracteristica veber-amperică (**fig. 6.3**) a feromagnetului avem:

B_r - inducția remanentă;

H_c - forța coercitivă.

La variația ciclică a câmpului magnetic exterior, domeniile se reorientează ciclic și din partea câmpului magnetic exterior se consumă o anumită energie, care pentru o unitate de masă a fluxului magnetic este proporțională cu aria petalei de histerezis pentru un ciclu de magnetizare. Din acest punct de vedere sânt flux și magnetici moi și dure (la cei duri aria suprafeței este mică).

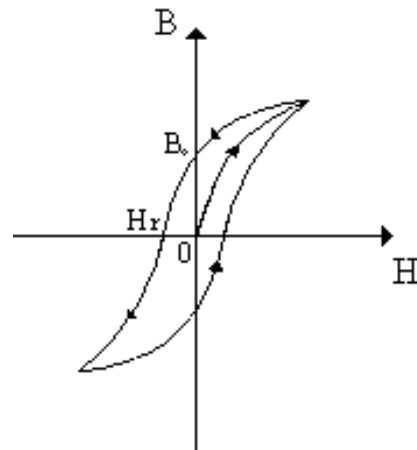


Fig. 6.3

Formula empirică pentru P_h :

$$P_h=kh^2 B_m^2 \varphi f^2,$$

unde: k - coeficient de proporționalitate;

h - grosimea plăcuței;

$\varphi = \frac{1}{\rho}$ - conductibilitatea specifică;

f - frecvența liniară.

$$S \downarrow \Rightarrow r \uparrow \Rightarrow I_i \downarrow \Rightarrow P_F \downarrow;$$

$$P_F = \frac{Q}{t} = I^2 r = \frac{U_i}{r}.$$

Destinația miezului de fier este:

1. pentru a închide liniile de forță ale câmpului magnetic (conductorul câmpului magnetic);
2. pentru întărirea câmpului magnetic (el este confecționat din feromagnet, care are permeabilitatea magnetică de ordinul miilor);
3. pentru mărirea rezistenței inductive a bobinei.

Pierderile în fier datorită curenților Foucault se calculează după formulă empirică:

$$P_{Fe}=cfB_m^2.$$

6.4. Bobina în circuitul de curent alternativ

1. *Bobină fără miez de fier* (bobina reală). Bobina reală are rezistență activă R , care la frecvențe mici poate fi primită ca rezistență omică: $R \approx r$.

În acest caz bobina reală poate fi înlocuită printr-o schemă echivalentă în care se desparte rezistența activă de cea inductivă. Schema echivalentă este prezentată în **fig. 6.4**.

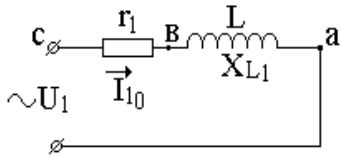


Fig. 6.4

Curentul I_1 trecând prin rezistența r_1 ne va da o cădere de tensiune:

$$\dot{U}_{cd} = \dot{I}_{10} r_1.$$

Curentul I_{10} , trecând prin rezistența inductivă X_{L1} conform legii inducției electromagnetice va autoinduce în ea o t.e.m.:

$$\varepsilon_1 = L \frac{di_{10}}{dt};$$

$$\varepsilon_1 = I_{10} X_{L1}.$$

T.e.m. ε_1 rămâne în urmă față de curentul I_{10} cu unghiul $\varphi = -90^\circ$. Dacă curentul este variabil:

$$i_{10} = I_{10m} \sin \omega t,$$

unde: i_{10} - dă naștere la: $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$.

$$\varepsilon_1 = -\omega_1 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega_1 \Phi_m \omega \cos \omega t;$$

$$\varepsilon_1 = \omega_1 \Phi_m \omega \sin(\omega t - 90^\circ).$$

Dacă curentul este sinusoidal, și Φ tot va fi sinusoidal, t.e.m. - tot sinusoidal (defazată cu 90°).

Dacă numărul se înmulțește cu j el se rotește contra acelor de ceasornic **fig. 6.5**.

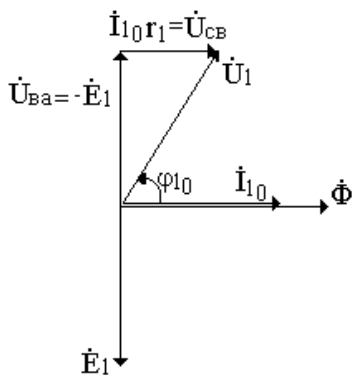


Fig. 6.5

$$\varepsilon_i = I_{10} X_{L1};$$

$$\underline{\varepsilon}_i = -j I_{10} X_{L1}.$$

Dacă înmulțim \dot{U}_L cu “-j” obținem ε_L (vezi diagrama pentru bobina ideală).

Conform regulii lui Lentz:

$$\dot{U}_{ba} = -\dot{\varepsilon}_a;$$

$$\dot{U}_{ba} = j I_{10} X_{L1}.$$

Conform legii II-a a lui Kirchhoff:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{cb} + \dot{U}_{ba} = \dot{I}_{10} r_1 + j \dot{I}_{10} X_{L1}.$$

$\dot{U}_1 = \dot{I}_{10} r_1 + j \dot{I}_{10} X_{L1}$ - ecuația tensiunii și a t.e.m. bobinei reale fără miez de fier;

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_{10} r_1 - \dot{\varepsilon}_1.$$

Diagrama vectorială (**fig. 6.5**):

1. depunem I_{10} ;

6.5. Experiența mersului în gol al transformatorului

Scopul experienței:

1. determinarea pierderilor în cupru a bobinei primare;
2. determinarea pierderilor în fier;
3. determinarea parametrilor schemei echivalente:

$$r_1; X_{L1}; R_{Fe} (X_{IS} = 0).$$

Schema electrică după care se efectuează experiența este prezentată în **fig. 6.11**.

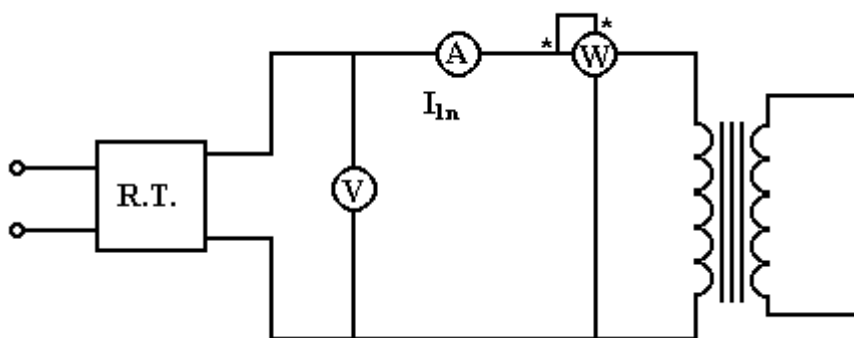


Fig. 6.11

U_{1n} - tensiunea nominală (necesitatea de bobina primară, adică tensiunea indicată în pașaportul tehnic al transformatorului).

Mărimile $U_{1n}; I_{10}; P_{10}$ - se măsoară.

Cu un ohmmetru sau cu un ampermetru, voltmetru și cu o sursă de curent continuu măsurăm rezistența ohmică r_1 care este aproximativ egală cu rezistența bobinei pentru curentul de frecvență joasă.

1. Calculăm P_{Cu1} :

$$P_{Cu1} = I_{10}^2 r_1;$$

2. Calculăm P_{Fe} :

$$P_{10} = P_{Cu1} + P_{Fe1} \Rightarrow P_{Fe} = P_{10} - P_{Cu1};$$

$$P_{Fe} \equiv U_1^2;$$

$$U_1 = U_{1n} \Rightarrow P_{Fe} = P_{Fen} = \text{const};$$

$$3. I_a = \frac{U_{ba}}{R_{Fe}};$$

$$P_{Fe} = \frac{U_{ba}^2}{R_{Fe}} = I_a U_{ba} = I_a^2 R_{Fe};$$

$$\dot{U}_{ba} = -\varepsilon_1 \Rightarrow U_{ba} = \varepsilon_1;$$

ε_1 - se determină din diagrama vectorială.

$$U_1 = U_{1n};$$

$$R_{Fe} = \frac{U_{ba}^2}{P_{Fe}} = \frac{\varepsilon_1^2}{P_{Fe}};$$

4. $P_{Fe} = I_a U_{ba} = I_a \varepsilon_1;$

$$I_a = \frac{P_{Fe}}{\varepsilon_1} = \frac{P_{Fe}}{U_{ba}};$$

6.6. Transformatorul însărcinat

Scheme logică de funcționare este prezentată în **fig. 6.12**.

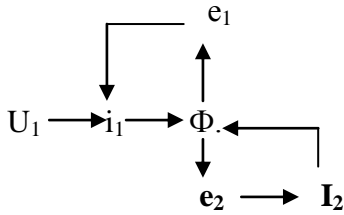


Fig. 6.12

Ecuția constantei fluxului de magnetizare se numește *forța (sau flux) de magnetizare* a unei bobine ce conține w spire și este parcursă de curentul I produsul:

$$\dot{F} = \dot{I} w \mathbf{A} \text{ * spire } \bar{.}$$

La mersul în gol prin bobina primară circulă curentul I_{10} și el ne crează fluxul magnetic principal Φ . Când transformatorul este însărcinat prin bobina primară circulă curentul I_1 , care ne crează $\dot{F}_1 = I_1 w_1$ și mai crează un flux Φ_1 . Curentul din bobina secundară ne crează $\dot{F}_2 = I_2 w_2$ și un flux Φ_2 .

Conform regulii lui Lentz fluxul Φ_2 este opus după direcție fluxului Φ_1 . Deci fluxul magnetic principal va fi suma vectorială a fluxurilor Φ_1 și Φ_2 :

$$\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_1 - \dot{\Phi}_2 .$$

Legea constantei fluxului magnetic este: în orice regim de lucru a transformatorului fluxul magnetic este o mărime constantă.

$$\begin{aligned} \dot{\Phi} &= \dot{\Phi}_1 - \dot{\Phi}_2 ; \\ k \dot{I}_{10} w_1 &= k \dot{I}_1 w_1 - k \dot{I}_2 w_2 ; \\ \dot{I}_{10} &= \dot{I}_1 - \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} = \dot{I}_1 - \frac{\dot{I}_2}{\frac{w_1}{w_2}} = \dot{I}_1 - \frac{\dot{I}_2}{k_{12}} ; \end{aligned}$$

k_{12} - coeficientul de transformare a transformatorului.

$$\begin{aligned} k_{12} &= \frac{w_1}{w_2} ; \\ \dot{I}_{10} &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 ; \\ \dot{I}_2 &= -\frac{\dot{I}_2}{k_{12}} \text{ - curent secundar raportat.} \\ \varepsilon_1 &= 4,44 w_1 \Phi_m f ; \\ \varepsilon_2 &= 4,44 w_2 \Phi_m f ; \end{aligned}$$

6.7. Transformatorul raportat

Prin transformatorul raportat vom înțelege un transformator închipuit la care parametrii bobinei secundare sânt raportați la parametrii bobinei primare însă se ține cont că toate puterile și defazațele de fază din bobina secundară a transformatorului raportat să fie aceleași ca și în bobina secundară a transformatorului real.

În transformatorul real există legătură magnetică între bobine, care nu poate fi socotită precisă. De aceea în transformatorul raportat obținem legătura galvanică (electrică) între bobine și schema echivalentă nu conține legături magnetice, adică poate fi calculată precis prin unele din metodele studiate.

Schema echivalentă a transformatorului real este prezentată în **fig. 6.15**.

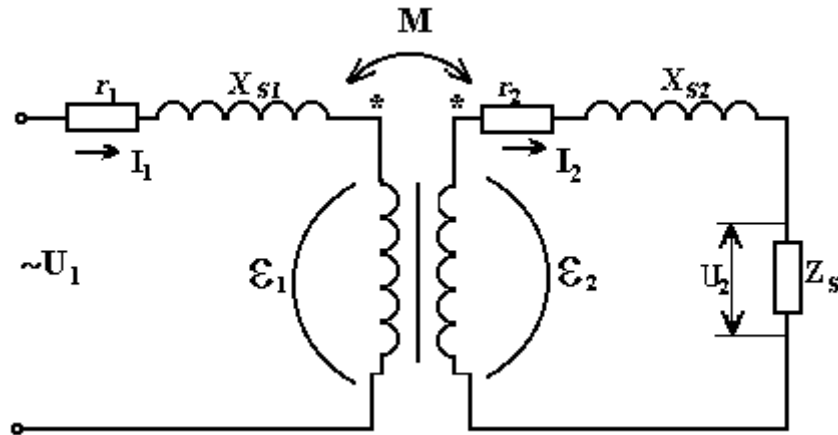


Fig. 6.15

În transformatorul raportat toți parametrii bobinei secundare vor avea indici primi. Se socotește că:

$$\varepsilon_2' = \varepsilon_1;$$

însă se știe:

$$k_{12} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2};$$

$$\varepsilon_1 = k_{12} \varepsilon_2;$$

$$\varepsilon_2' = k_{12} \varepsilon_2.$$

Deoarece $\varepsilon_2' = \varepsilon_1$ reiese că în schema echivalentă potențialele electrice în cazul transformatorului raportat a punctelor aa' și bb' sânt egale între ele, schema echivalentă a transformatorului raportat, care se numește *schema în formă de T* (**fig. 6.16**).

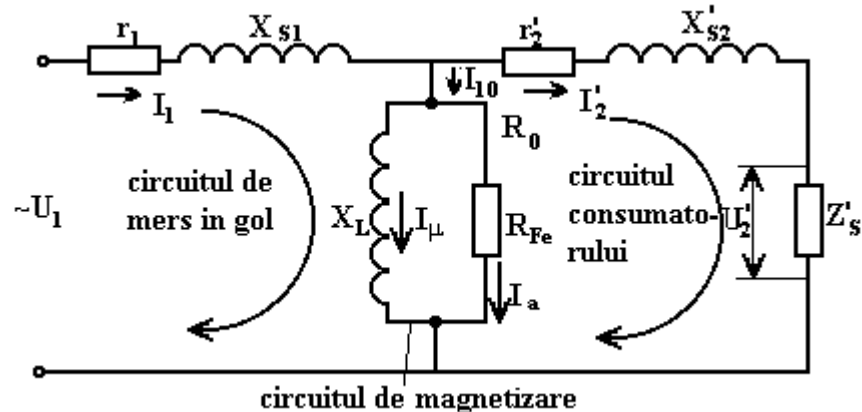


Fig. 6.16

6.8. Experiența de scurtcircuit a transformatorului

Scopurile experienței:

1. determinarea parametrilor schemei de înlocuire X_0, R_0 ;
2. determinarea pierderilor nominale în cupru.

Experiența se efectuează conform schemei electrice prezentate în **fig. 6.18**.

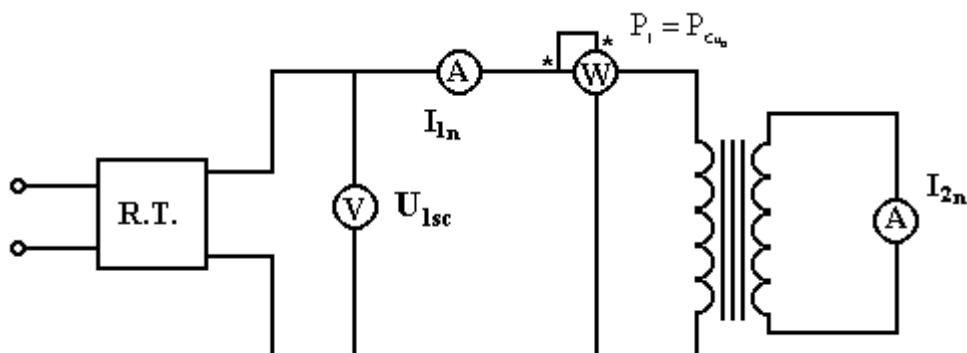


Fig. 6.18

Cu reglatorul de tensiune se alege o așa tensiune U_1 , ca curenții $I_1; I_2$ să devină nominali $U_{1sc} \ll U_{1n}$. Această tensiune U_1 se numește tensiune de scurt circuit.

Puterea totală a transformatorului:

$$S = U_{1n} I_{1n} = I_{2n} U_{2n},$$

de obicei este cunoscută și sînt cunoscute tensiunile nominale $U_{1n}; U_{2n}$. De aici putem calcula:

$$I_{1n} = \frac{S}{U_{1n}};$$

$$I_{2n} = \frac{S}{U_{2n}}.$$

Deoarece $U_{1sc} \ll U_{1n} \Rightarrow R_{Fe} \equiv U_1^2$ - pierderile în fier sînt direct proporționale cu U_1^2 . În experiența de scurt circuit ele sunt foarte mici: $R_{FeSc} \approx 0$. Wattmetrul ne va indica pierderile în cuprul nominal de aceea și curenții sînt nominali.

Schema de înlocuire a transformatorului în experiența de scurtcircuit este prezentată în **fig. 6.19**.

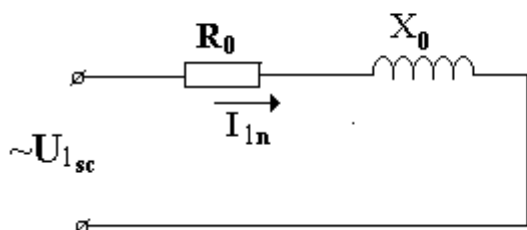


Fig. 6.19

6.9. Diagrama energetică a transformatorului. Randamentul

Prin diagrama energetică vom înțelege distribuția puterilor în transformator (**fig. 6.20**). Din rețea transformatorul absoarbe puterea P_1 ; P_2 - puterea activă (ce se degajă pe sarcina).

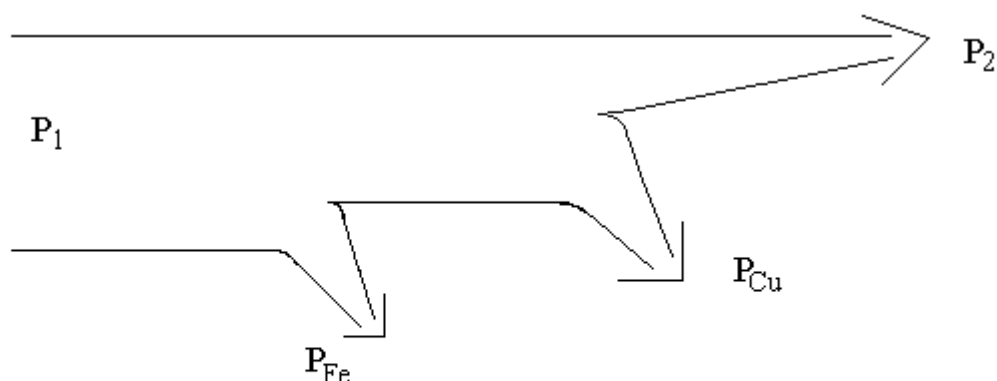


Fig 6.20

$$\eta = \frac{P_2}{P_1};$$

$$P_1 = P_2 + P_{Fe} + P_{Cu};$$

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

$$P_2 = I_2' U_2' \cos \varphi;$$

$$\eta = \frac{I_2' U_2' \cos \varphi}{I_2' U_2' \cos \varphi + P_{Fe} + I_2'^2 R_0} = \frac{\beta I_{2n} U_2' \cos \varphi}{\beta I_{2n} U_2' \cos \varphi + P_{Fe} + \beta^2 I_{2n}^2 R_0};$$

$$P_{Fe} \equiv U_1^2;$$

$$U_1 = U_{1n} = \text{const};$$

$$P_{Fe} = \text{const.}$$

Se numește *coeficient de însărcinare a transformatorului*, raportul dintre:

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2n}} = \frac{I_2'}{I_{2n}} \Rightarrow \eta = \frac{\beta S_n}{\beta S_n + P_{Fe} + \beta^2 P_{Cun}};$$

$$S_n = U_n I_n.$$

6.10. Autotransformatorul

Autotransformatorul reprezintă un transformator în care bobina secundară reprezintă o parte din bobina primară. Deci bobinele autotransformatorului sunt legate galvanic.

Principiul de funcționare a autotransformatorului este același ca și la transformator.

Schema electrică a unui tip de autotransformator este prezentată în **fig. 6.21**.

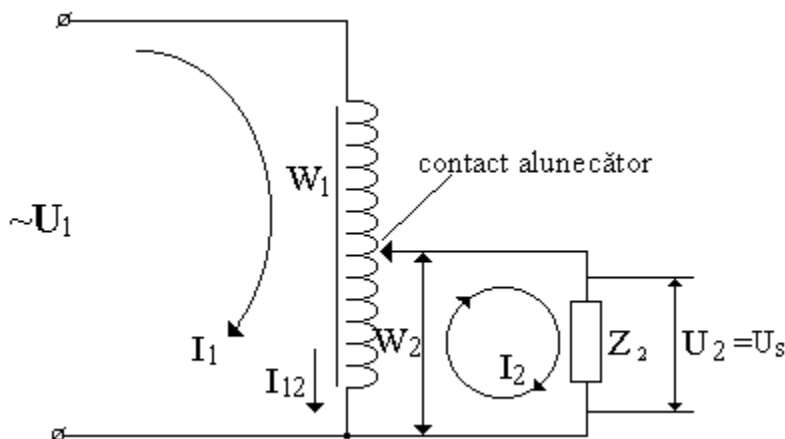


Fig. 6.21

Avem o bobină principală cu miez de fier. Prin ea circulă curentul I_1 .

Pentru bobina secundară vom avea un curent I_{12} și conform legii I-a a lui Kirchhoff vom avea:

$$\dot{I}_{12} = \dot{I}_1 - \dot{I}_2; I_{12} < I_1.$$

Deci prin bobina secundară va circula un curent mai mic decât în cazul când am folosit un transformator. Deci bobina secundară poate avea secțiunea transversală a firelor mai mică. Obținem economia în cupru.

Autotransformatorul se folosește pentru un coeficient de transformare $k_{1,2} = 1 \div 2$ și în acest regim el are un randament mai ridicat decât al transformatorului. Miezul lui este mai mic pentru aceeași putere.

Un neajuns principal al autotransformatorului este: legătura electrică dintre bobina primară și cea secundară ceea ce în unele cazuri este periculos pentru personal.

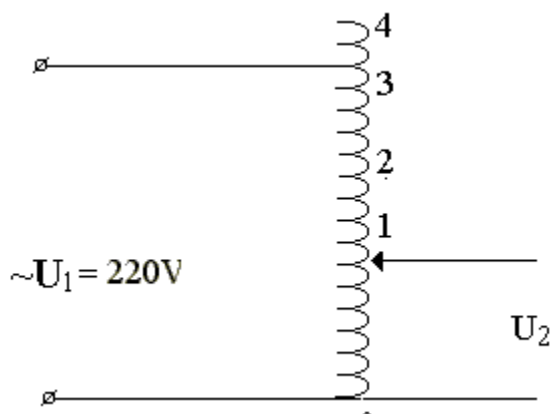


Fig. 6.22

Dacă cursorul va fi în poziția "0", atunci $U_2 = 0$ (**fig. 6.22**).

CAPITOLUL VII. MAȘINA ASINCRONĂ

7.1. Construcția mașinii asincrone

Se numește *mașină asincronă* acea mașină la care numărul de turații ale câmpului magnetic al statorului diferă de numărul de turații a rotorului.

Regimul de motor este atunci când numărul de turații a câmpului magnetic al statorului este mai mare decât numărul de turații a rotorului:

$$n_1 > n_2 .$$

Construcția. Mașina asincronă este alcătuită din două părți principale:

1. partea imobilă (stator);
2. partea mobilă (rotor).

Statorul are aceeași construcție ca și generatorul trifazat. Numărul bobinelor poate fi: 3; 6; 9; 12; 15; 18; 21; 24 ...

Se poate de arătat trei bobine aranjate una față de alta simetric pe stator care crează un câmp magnetic învârtitor în cavitatea statorului. (Căpătarea câmpului magnetic învârtitor - de sine stătător).

Numărul de rotații a câmpului magnetic al statorului se calculează după formula:

$$n_1 = \frac{f}{p} \left[\frac{\text{rot}}{s} \right] = \frac{60f}{p} \left[\frac{\text{rot}}{\text{min}} \right],$$

unde: f - frecvența tensiunii de alimentare;

p - numărul perechilor de poli magnetici a câmpului statorului.

Dacă pe stator sânt trei bobine, ele crează o pereche de poli magnetici.

Numarul de bobine pe stator	P	f , Hz	n_1 [rot/min]
3	1	50	3000
6	2	-//-	1500
9	3	-//-	1000
12	4	-//-	750
15	5	-//-	600
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

Turațiile sincrone n_1 pot fi schimbate dacă variem cu frecvența din rețea numărul bobinelor de pe stator.

După construcția rotorului deosebim:

- a) cu rotor fazat;
- b) cu rotor cu scurt circuit.

7.2. Motorul cu rotor scurtcircuitat. Principiul de funcționare

Rotorul reprezintă două inele din cupru sau aluminiu care sânt scurtcircuitate cu bare de cupru sau aluminiu. Barele se numesc *faze ale rotorului*. Inelele de la capete scurtcircuitază fazele. Această schemă se numește “*cușcă pentru veverițe*”. Cavitătea coliviei se umple cu plăcuțe din oțel electrotehnic deci avem pierderi în fier la histerezis și datorită curenților Foucault.

Principiul de funcționare

Pe stator sânt aranjate simetric una față de alta bobine identice ale statorului (**fig. 7.1**).

Fie că pe stator avem trei bobine:

$$P = 1 \text{ (o pereche de poli);}$$

$$n_1 = 3000 \text{ rot/min dacă } f = 50\text{Hz};$$

A, B, C - începuturile bobinelor;

x, y, z - sfârșiturile lor.

La pornirea motorului numărul de turații ale rotorului sau viteza asincronă: $n_2 = 0$.

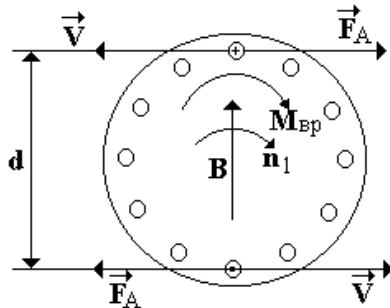


Fig. 7.1

Câmpul magnetic al statorului se rotește cu viteza $n = const$. El întretaie cu liniile de forță barele rotorului. Fiecare bară (vergea) a rotorului se numește *fază a rotorului*.

Conform legii inducției electromagnetice în vergele se înduc t.e.m. direcția cărora se determină aplicând legea mâinii drepte. Curentul este orientat ca și t.e.m.. Circuitul se închide între bara de sus și bara de jos. Însă asupra unui conductor parcurs de curent introdus în câmp magnetic acționează forța Ampere:

$$F_A = IB \sin \alpha;$$

$$\alpha = 90^\circ \Rightarrow \sin \alpha = 1.$$

Direcția forței Ampere se determină conform legii mâinii stângi:

$$M_{\text{rot}} = F_A \cdot d,$$

n_2 este orientat după acele de ceasornic. Rotorul se va roti ca și câmpul magnetic al statorului.

Deoarece $n_2 < n_1$ avem rotația asincronă sau neconcomitentă a rotorului și câmpul magnetic al statorului. De aceea și motorul se numește *asincron*.

7.3. Schema de înlocuire a motorului

Se numește *alunecare* S , valoarea:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%$$

care ne arată în (%) cu cât rotorul rămâne în urmă față de câmpul magnetic al statorului.

Mai departe toți parametrii statorului vor avea indicii 1, iar ai rotorului - 2.

Transformatorul se aseamănă foarte mult cu mașina asincronă de aceea schema de înlocuire a mașinii asincrone este asemănătoare cu schema de înlocuire a transformatorului.

Ca și la transformator, la mașina asincronă este valabilă legea constanței fluxului magnetic.

La mersul în gol o fază a statorului absoarbe curentul I_{10} . Fie că numărul de spire al unei faze a statorului este w_1 , atunci forța de magnetizare a unei faze este:

$$F_{10} = I_{10} w_1 k_1,$$

unde k_1 - coeficient al înfășurării statorice, care este egal

$$k_1 \approx 0,95 \div 0,97.$$

La însărcinarea transformatorului, observăm aceleași fenomene ca și la însărcinarea motorului asincron.

Curenții I_1 și I_2 vor crea fluxurile:

$$I_1 \rightarrow F_1 = I_1 w_1 k_1 \rightarrow \Phi_1;$$

$$I_2 \rightarrow F_2 = I_2 w_2 k_2 \rightarrow \Phi_2.$$

Fluxul Φ_2 este opus fluxului Φ_1 și, conform legii constanței fluxului magnetic obținem:

$$\dot{\Phi}_{10} = \dot{\Phi}_1 - \dot{\Phi}_2 = \dot{\Phi};$$

$$\dot{I}_{10} w_1 k_1 = \dot{I}_1 w_1 k_1 - \dot{I}_2 w_2 k_2$$

Dacă ecuația obținută va fi împărțită la $w_1 k_1$, atunci vom obține:

$$\dot{I}_{10} = \dot{I}_1 - \dot{I}_2 \frac{w_2 k_2}{w_1 k_1} = \dot{I}_1 - \frac{\dot{I}_2}{\frac{w_1 k_1}{w_2 k_2}}.$$

$k_1 = \frac{w_1 k_1}{w_2 k_2}$ - coeficient de transformare a curentului. În rezultat, obținem:

$$\dot{I}_{10} = \dot{I}_1 - \frac{\dot{I}_2}{k_1} = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2,$$

7.4. Diagrama energetică a mașinii asincrone

Din rețea motorul absoarbe puterea P_1 care poate fi obținută conform formulei:

$$P_1 = m_1 I_{1f} U_{1f} \cos \varphi .$$

O parte se consumă la pierderile în cupru al statorului:

$$P_{Cu1} = m_1 I_{1f}^2 r_1 .$$

Puterea ce rămâne - puterea magnetică (puterea câmpului magnetic învârtitor al statorului). O parte din ea se pierde în fierul statorului.

$$P_{Fe1} = m_1 I_{1f} \varepsilon \sin \alpha ;$$

unde α - unghiul pierderilor în fier.

Puterea rămasă se numește *putere electromagnetică* (puterea ce se transmite rotorului). O parte din ea duce la încălzirea fazelor rotorului P_{cu2} (pentru motorul raportat) avem:

$$P_{cu2} = m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_2^2 \frac{r_2'}{S} .$$

$P_{Fe} \approx 0$ (în comparație cu celelalte pierderi).

O parte din puterea rămasă se cheltuie la frecarea în rulmenții arborelui și datorită rezistenței aerului și pentru ventilator P_{mec} .

Din cauza că câmpul magnetic creat de stator nu este strict sinusoidal mai avem și pierderi adiționale P_{ad} .

P_2 este puterea utilă, dezvoltată de motor la arborele lui. Diagrama energetică a mașinii asincrone are forma prezentată în **fig. 7.6**.

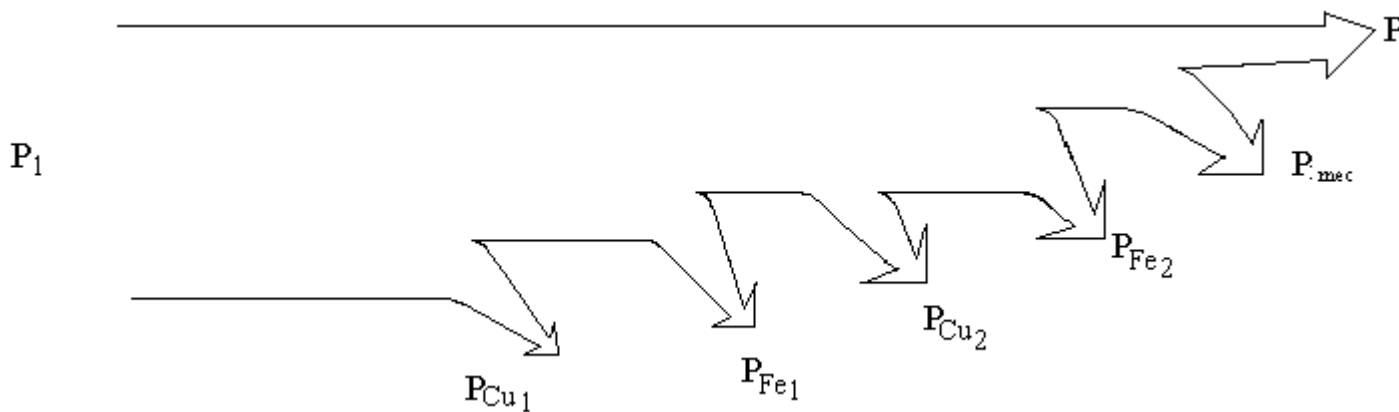


Fig. 7.6

Randamentul:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} \quad (\%) .$$

Pierderile în motor se determină experimental din experiențele de mers în gol și de scurtcircuit:

7.5. Momentul de rotație al mașinii asincrone

Momentul de rotație:

$$M_{rot} = \frac{P_{Cu2}}{\omega_1};$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} \cdot n_1 \quad \text{[rot/min]};$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{60f_1}{P} = \frac{2\pi f_1}{P};$$

$$M_{rot} = \frac{m_1 I_2'^2 r_2' P}{2\pi f_1 S}.$$

Din ultima schemă echivalentă determinăm curentul I_2' :

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_k + r_2' \frac{1-S}{S}\right)^2 + X_k^2}},$$

Atunci:

$$M_{rot} = \frac{m_1 P U_1^2 \frac{r_2'}{S}}{2\pi f_1 \left[\left(r_k + r_2' \frac{1-S}{S}\right)^2 + X_k^2 \right]}.$$

Observăm că M_{rot} este direct proporțional cu U_1^2 . Deci la micșorarea tensiunii de două ori, momentul de rotație se va micșora de 4 ori.

Pe tablă indicatoare a motorului se indică următorii parametri:

1. motorul este sincron sau asincron;
2. numărul de faze;
3. modul de confecționare a motorului (cu rotorul fazat sau în scurtcircuit);
4. modul de conectare a înfășurărilor statorului (Δ/λ , Δ sau λ);

După aceasta urmează tensiunile ce revin unei faze (de linie, de fază) a rețelei.

Exemplu:

$$\Delta/\lambda \quad 220/380V,$$

Δ - tensiunea de linie este egală cu cea de fază.

$$U_1 = U_f = 220V \quad ;$$

$$\lambda - U_1 = \sqrt{3}U_f = 380V.$$

5. curenții la conectările în Δ și λ (curenții consumați de o fază din rețea);
6. factorul de putere $\cos\varphi$;
7. randamentul;
8. numărul de turații ale rotorului;
9. puterea dezvoltată de motor;
10. frecvența tensiunii de alimentare;
11. masa motorului.

Se numește *caracteristică mecanică a motorului asincron* dependența momentului de rotație, dezvoltat de motor de alunecare.

Caracteristica mecanică are forma prezentată în **fig. 7.7**.

7.6. Motorul asincron cu rotorul bobinat (fază)

Construcția rotorului (**fig. 7.8**): el reprezintă trei bobine conectate în Δ sau Δ și capetele sânt scoase la trei inele de contact, la care, prin intermediul periștelor se conectează un reostat triplu (cu trei brațe).

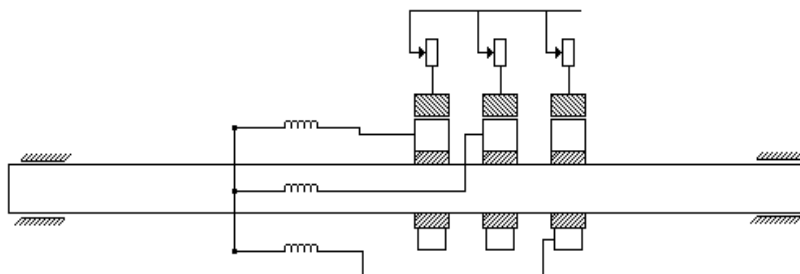


Fig. 7.8

Avantajele acestui motor față de cel cu rotor în scurtcircuit este:

1. prin intermediul reostatului trifazat putem concomitent să variem rezistența fazelor rotorului. Aceasta duce la schimbarea caracteristicii mecanice și poate fi aleasă așa o rezistență a reostatului, pentru care, la pornirea motorului $\cos \phi = 1$ momentul de pornire să fie:

$$M_p = M_{\max}.$$

Aceasta duce la micșorarea timpului de accelerare a rotorului și dă posibilitate de a porni motorul cu sarcină mare deodată.

2. mărirea rezistenței fazelor rotorului la pornire micșorează curentul rotoric: I_2 sau I_2' care duce la micșorarea curentului absorbit din rețea I_1 . La motoarele cu rotor scurtcircuitat avem:

$$\frac{I_{1 \text{ pornire}}}{I_{1n}} = 7 \div 10.$$

Curentul la pornire este mare și influențează negativ asupra celorlalți consumatori ai rețelei. La motorul cu rotor bobinat, acest lucru se exclude.

Variația rezistenței fazelor rotorice ne permite schimbarea lentă în limite mari a vitezei rotorului ω_2 , ceea ce este practic imposibil de realizat la motoarele cu rotor scurtcircuitat.

Dezavantajul acestor motoare este: randamentul scăzut, instalație mai complicată. Ele se folosesc la instalațiile, ce necesită momente mari la pornire și variații de viteză în limite mari.

7.7. Determinarea capetelor și începuturilor, sfârșiturilor înfășurărilor motorului (generatorului) trifazat

Pe capete poate fi scris:

- C_1 - începutul primei înfășurări;
- C_2 - începutul înfășurării a doua;
- C_3 - începutul înfășurării a treia;
- C_4 - sfârșitul primei înfășurări;
- C_5 - sfârșitul înfășurării a doua;
- C_6 - sfârșitul înfășurării a treia.

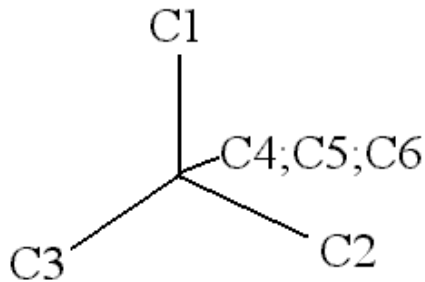


Fig. 7.9

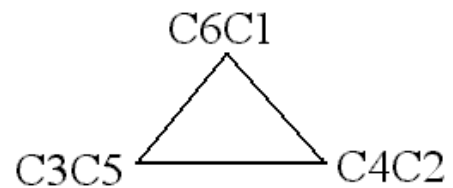


Fig. 9.10

Conectare în stea este prezentată în **fig. 7.9**, iar conectarea în triunghi în **fig. 7.10**.

Dacă nu este indicat nimic, atunci:

1. determinăm capetele bobinelor: cu ohmmetrul, megaohmmetrul **fig. 7.11**.
2. determinăm începuturile și sfârșiturile:
 - a) oricare două capete a două bobine diferite le conectăm împreună. La capete aplicăm o tensiune de două ori mai mică decât tensiunea nominală a unei bobine. La capetele bobinei a treia se conectează un voltmetru cu limita de pînă la 30 V (**fig. 7.12**).

Concluzie: Dacă acul voltmetrului se va abate, atunci, în locul unde bobinele au fost conectate împreună avem: sfârșitul unei bobine și începutul celeilalte. Aceasta înseamnă că bobinele au fost conectate în acord, adică cîmpurile magnetice create de ele au aceeași orientare și induc în bobina a treia o t.e.m., măsurată de voltmetru.

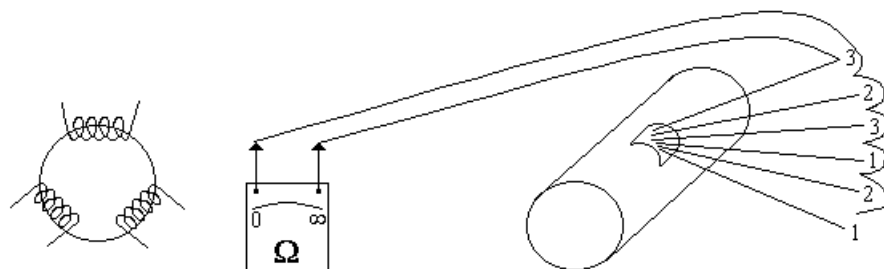


Fig. 7.11

CAPITOLUL VIII. MAȘINA SINCRONĂ

8.1. Construcția mașinii sincrone

Se numește *mașină sincronă* acea mașină, la care numărul de turații al rotorului este strict constant și determinat de frecvența tensiunii de alimentare a statorului:

$$n_2 = n_1 = \frac{60f_1}{p} \left[\frac{\text{ot}}{\text{min}} \right] = \text{const.}$$

Construcția:

Mașina sincronă constă din stator, pe care sânt înfășurate 3;6;9;... bobine identice aranjate simetric. Ele pot fi conectate în triunghi sau în stea, însă mai răspândit - în stea.

Rotorul reprezintă: la mașinile de putere mică - un magnet permanent, la mașinile de putere mare - un electromagnet cu o pereche (sau mai multe) de poli magnetici. Bobina electromagnetului se alimentează cu curent continuu prin intermediul inelelor de contact și a periuțelor.

Bobina electromagnetului se numește *bobină de excitație*, iar curentul care circulă prin ea se numește *curent de excitație* I_{ex} .

Câmpul magnetic creat de bobină se numește *câmp magnetic principal*.

Mașina sincronă are trei regimuri de funcționare:

1. generator sincron;
2. motor sincron;
3. compensator.

Una și aceeași mașină poate funcționa în oricare din cele trei regimuri.

Generatoarele sincrone, se folosesc pentru obținerea rețelelor trifazate și polifazate de curent alternativ sinusoidal.

Motoarele sincrone se folosesc în cazurile, când e necesară o viteză de rotație constantă (în liniile automatizate, la procesele robotizate ș.a.).

Compensatorul sincron se folosește pentru majorarea factorului de putere a rețelelor.

8.2 Generatorul sincron. Mersul în gol

Fie, că bobinele statorului sânt unite în stea.

Statorul, în cazul generatorului, se numește *indus*.

Bobina electromagnetului rotorului se numește *inductor* sau *înfășurarea de excitație*.

$$I_{ex} = \frac{U_{ex}}{r_p + r_{reg}},$$

unde: r_p - rezistența înfășurării de excitație;

r_{reg} - reostat de reglare.

Acest circuit se numește *circuit de excitație*.

$$U_f = \frac{U_l}{\sqrt{3}}.$$

Se numește *caracteristică a mersului în gol a generatorului* dependența t.e.m. de fază sau de linie a generatorului, de valoarea curentului de excitație, când la generator nu e conectată sarcina (consumator), iar mașina primară rotește inductorul cu turații:

$$n_2 = n_{2n} = \text{const.};$$

$$\varepsilon_f = f(\tilde{I}_{ex});$$

$$\varepsilon_l = f(\tilde{I}_{ex}).$$

La mersul în gol avem:

$$\varepsilon_l = U_l;$$

$$\varepsilon_f = U_f.$$

Trebuie să construim graficul:

$$U_f = f(\tilde{I}_{ex}).$$

Experiența se face în felul următor:

1. se antrenează mașina primară, până când:

$$n_2 = n_{2n};$$

2. se face ca $I_{ex} = 0$, se măsoară U_f :

$$U_0 = \varepsilon_0 \quad (0 - 11V).$$

Această tensiune este determinată de magnetizarea remanentă a miezului rotorului.

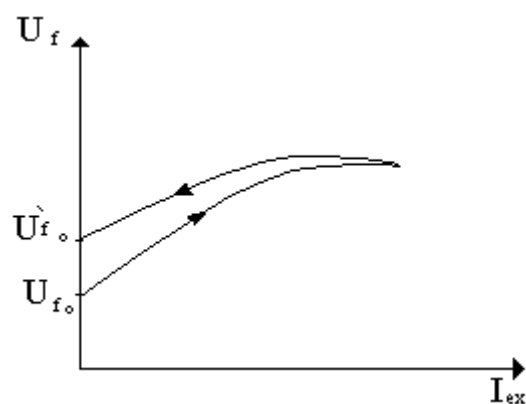


Fig. 8.1

8.3. Reacțiunea ancorei

Prin reacțiunea ancorei/indusului vom înțelege modificarea câmpului magnetic al inductorului de către câmpul magnetic al indusului (statorului), când la generator e conectată sarcina.

Vom cerceta un generator cu două bobine pe indus:

1. Reacțiunea indusului pentru sarcină pur activă.

Curentul de sarcină I_1 are aceeași direcție ca și tensiunea de sarcină sau t.e.m.

Fie, că statorul are două bobine (**fig. 8.2**).

Fie, că indicatorul are o poziție indicată **fig. 8.2**:

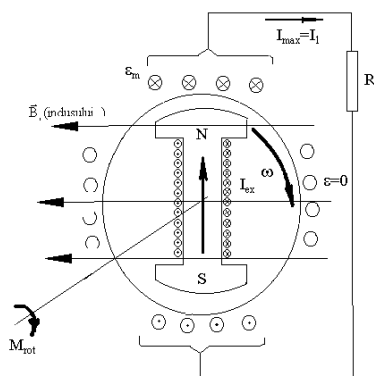


Fig. 8.2

Conform regulii burghiului determinăm direcția câmpului magnetic al inductorului.

Conform regulii mâinii drepte, determinăm direcția t.e.m. și a curentului indusului. Câmpul magnetic al inductorului ne crează un flux magnetic principal $\vec{\Phi}$, orientat ca și \vec{B} ($\Phi = BS$). Curentul sarcinii ne va crea un câmp magnetic, direcția căruia se determină conform regulii burghiului.

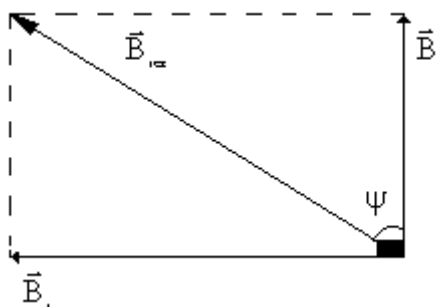


Fig. 8.3

Reacțiunea indusului are un caracter transversal

(deoarece $\vec{B}_i \perp \vec{B}$) **fig. 8.3**.

Câmpul magnetic rezultat își schimbă direcția față de câmpul magnetic \vec{B} . În cazul mersului în gol al generatorului:

$$I_1 = 0;$$

$$B_i = 0;$$

$$\vec{B}_{rez} = \vec{B}.$$

Modificarea câmpului magnetic rezultat depinde de rezistența de sarcină. Valoarea unghiului va depinde de valoarea lui R. Deoarece B_{rez} variază la schimbarea lui R și t.e.m. a generatorului va varia, deoarece:

$$\varepsilon = -\omega \frac{dB_{rez}}{dt}.$$

Acest generator este rău, în sensul, că t.e.m. scade.

2. Sarcina pur inductivă.

În acest caz curentul rămâne în urmă față de tensiunea U sau t.e.m ε cu $\frac{\pi}{2}$ rad., deci poziția

inductorului trebuie să fie, față de cea precedentă (la sarcină activă) cu 90° deplasată în direcția de rotire (**fig. 8.4**).

8.4. Diagrama vectorială și ecuația t.e.m. și a tensiunilor a generatorului sincron

Fie, că sarcina are caracter activ-inductiv. Fluxul magnetic al inductorului Φ induce în indus o t.e.m. $\dot{\varepsilon}$ (fig. 8.12).

$$I_{ll} = I_1 \sin \Psi;$$

$$I_{lt} = I_1 \cos \Psi.$$

Diagrama fazorială a generatorului sincron

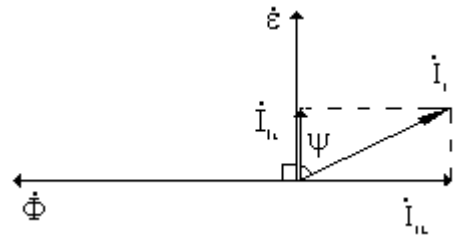


Fig. 8.12

este prezentată în fig. 8.13.

Pentru sarcina activă: $\Psi = 0$.

Pentru sarcina inductivă: $\Psi = 90^\circ$.

Pentru sarcina capacitivă: $\Psi = -90^\circ$.

În cazul dat $0 < \Psi < 90^\circ$.

Componenta longitudinală a curentului indusului I_{ll} dă naștere la o t.e.m. de autoinducție:

$$\dot{\varepsilon}_{ll} = -j \dot{I}_{ll} X_l,$$

unde X_l - rezistența indusului în direcția longitudinală.

$$\dot{\varepsilon}_{lt} = -j \dot{I}_{lt} X_t,$$

unde X_t - rezistența indusului în direcție transversală.

În bobina statorului, curentul I_1 dă naștere la o cădere de tensiune egală cu produsul dintre I_1 și rezistența activă a bobinei, adică este echivalentă cu o t.e.m. de autoinducție, opusă acestei căderi de tensiune.

$$\varepsilon_{1r} = -I_1 r.$$

Componenta longitudinală a curentului indusului I_{ll} dă naștere la o t.e.m. de autoinducție:

$$\dot{\varepsilon}_{ll} = -j \dot{I}_{ll} X_l,$$

unde X_l - rezistența indusului în direcția longitudinală.

$$\dot{\varepsilon}_{lt} = -j \dot{I}_{lt} X_t,$$

unde X_t - rezistența indusului în direcție transversală.

În bobina statorului, curentul I_1 dă naștere la o cădere de tensiune egală cu produsul dintre I_1 și rezistența activă a bobinei, adică este echivalentă cu o t.e.m. de autoinducție, opusă acestei căderi de tensiune.

$$\dot{\varepsilon}_{1r} = -\dot{I}_1 r.$$

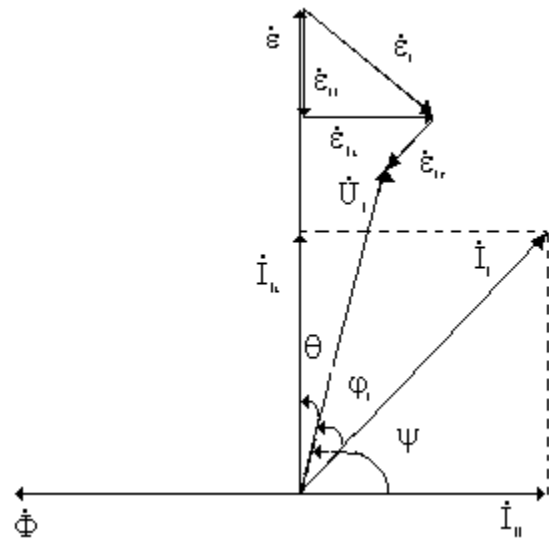


Fig. 8.13

8.5. Conectarea mașinii la lucru în paralel cu rețeaua

Pentru a conecta mașina sincronă la lucru în paralel cu rețeaua sânt necesare următoarele condiții:

1. frecvența tensiunii din rețea trebuie să fie egală cu frecvența mașinii sincrone:

$$f_2 = f_{MS}.$$

2. consecutivitatea fazelor mașinii sincrone trebuie să coincidă cu consecutivitatea fazelor rețelei:

A B C - rețeaua

A B C - generatorul

$\left. \begin{array}{l} A B C \\ B C A \\ C A B \end{array} \right\}$ - variante cu conectare

3. tensiunea de fază sau de linie a rețelei trebuie să fie egală cu tensiunea de fază sau de linie a mașinii sincrone:

$$U_{fr} = U_{IMS};$$

$$U_{lr} = U_{IMS}.$$

4. tensiunea de linie/fază a rețelei trebuie să fie opusă după direcția tensiunii de linie/fază a mașinii sincrone:

$$\dot{U}_{fr} = -\dot{U}_{IMS};$$

$$\dot{U}_{lr} = -\dot{U}_{IMS}.$$

Neîndeplinirea uneia din aceste condiții duce la determinarea mașinii sincrone.

Pentru a introduce mașina sincronă la lucru în paralel cu rețeaua ne folosim de schemă electrică indicată în **fig. 8**.

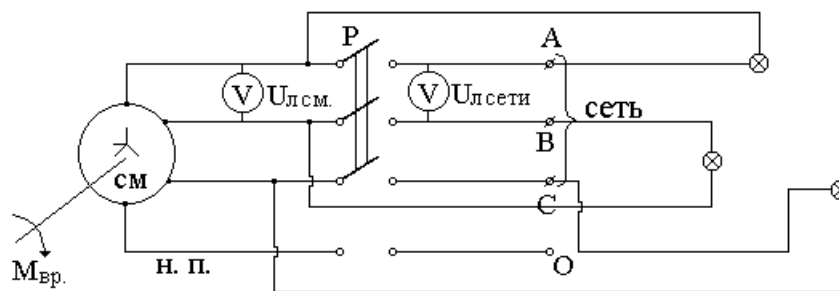


Fig. 8.

Aceste trei becuri ne crează un sincronoscop care ne dă posibilitatea să vedem îndeplinirea acestor 4 condiții.

Dacă nu se îndeplinește condiția 1.: $f_r \neq f_{MS}$ - becurile vor clipi cu frecvența egală cu diferența frecvențelor:

$$|f_r - f_{MS}|.$$

8.6. Caracteristica de reglare a generatorului sincron

Se numește *caracteristică de reglare* dependența curentului de excitație de curentul de sarcină, la o tensiune a sarcinii constantă și egală cu cea nominală și la turații nominale și constante ale inductorului (**fig. 8.15**).

$$U_1 = U_{1n} = \text{const};$$

$$n = n_n = \text{const.}$$

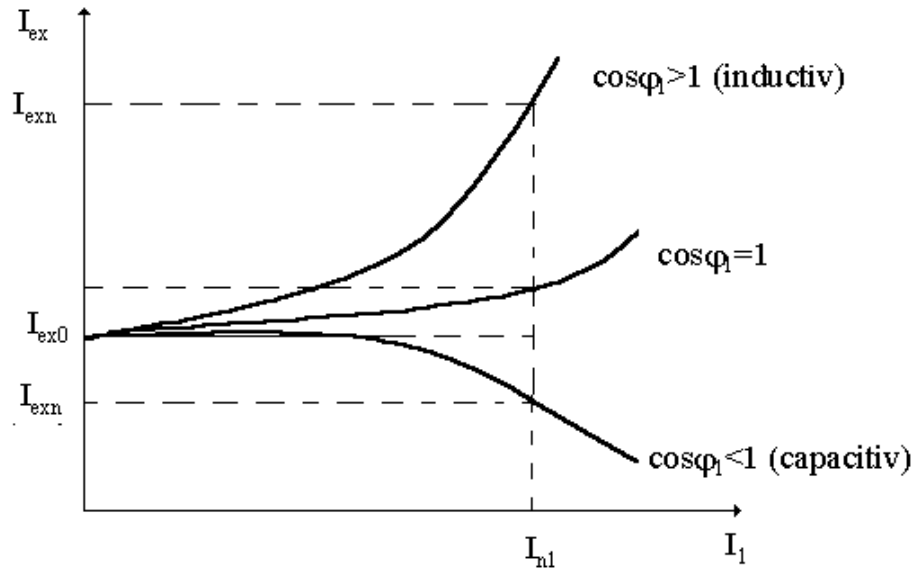


Fig. 8.15

1. Sarcina activă:

$$\cos \varphi_1 = 1.$$

Reeșind din cauza reacțiunii indusului, care într-o măsură mică demagnetizează mașina, deci t.e.m. se micșorează și se micșorează tensiunea la sarcină. Pentru menținerea tensiunii la sarcină constantă la creșterea sarcinii, I_{ex} trebuie mărit.

$$\left(I_1 \uparrow; B_i \uparrow; B_{rez} \downarrow; \varepsilon_i \downarrow; U_1 \downarrow \left(\dot{\varepsilon} = U_{1-j} \dot{I}_{ex} \right) = 0 \quad \Psi = \text{const} \quad \vec{I}_{ex} \uparrow \right).$$

2. $\cos \varphi_1 > 1$ (inductiv) I_{ex} crește mai repede.

$\cos \varphi_1 < 1$ (capacitiv) I_{ex} scade:

$$\left(\Psi \uparrow; B_i \uparrow; B_{rez} \uparrow; \varepsilon \uparrow U_1 \uparrow I_{ex} \downarrow \right).$$

8.6. Motorul sincron

O mașină sincronă, sincronizată cu rețeaua, va funcționa în regim de motor, dacă momentul de rotație a mașinii primare se va micșora. Atunci câmpul magnetic al statorului va trage după el câmpul magnetic al rotorului. Deci mașina va consuma din rețea energie, adică va fi motor.

Dacă Φ_2 trage după sine Φ_s , avem generator: adică mașina va da în rețea energie. În acest caz M_{rot} trebuie mărit.

Puterea mașinii sincrone în orice regim se calculează după formula:

$$P_{em} = \frac{m_1 \varepsilon_1 U_1}{X} \sin \theta .$$

unde: m_1 - numărul de faze ale statorului;

U_1 - tensiunea de fază;

ε - t.e.m. de fază;

X - reactanța sincronă;

θ - unghiul dintre Φ_s și Φ_r .

În cazul generatorului $\theta > 0$; $P_{em} > 0$ (cedează energie în rețea).

Dacă $\theta = 0$; $P_{em} = 0$ (compensator).

Principiul de funcționare a motorului sincron este același ca și la mașina asincronă, însă în momentul sincronizării mașinii cu rețeaua, fluxul magnetic al statorului și Φ_{mrot} au aceeași direcție și se rotesc cu aceeași viteză (viteză sincronă) și aceasta se menține pentru orice alt regim de lucru al mașinii.

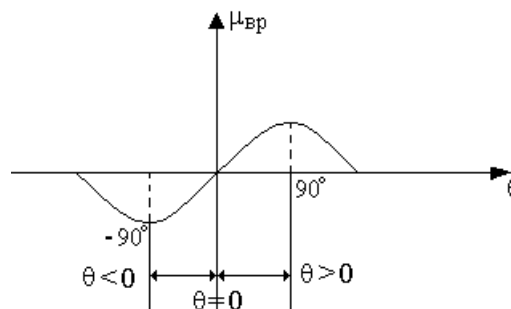
Diagrama unghiulară a mașinii sincrone reprezintă dependența dintre puterea electromagnetică de unghiul θ , pentru diferite valori a curentului de excitație. Unghiul θ poate varia:

$$-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2} \text{ - limita de lucru.}$$

$\theta < 0$ – motor;

$\theta > 0$ – generator;

$\theta = 0$ – compensator.



8.8. Diagramele vectoriale ale mașinii sincrone

Mașina sincronă poate fi supraexcitată sau subexcitată.

Supraexcitată înseamnă că t.e.m. ε este mai mare decât tensiunea U_1 .

Subexcitată înseamnă că $\varepsilon < U_1$. Aceasta se referă la toate genurile de funcționare a mașinii.

Cazul 1 - generator.

a) Generator supraexcitat

În momentul sincronizării mașinii cu rețeaua, curentul $I_1 = 0$ și t.e.m. a mașinii trebuie să fie egală cu tensiunea rețelei.

$$\varepsilon = U_r.$$

La mersul în gol avem diagrama vectorială prezentată în **fig. 8.16**.

Dacă mașina lucrează în regim de generator $\theta > 0$;

Φ_m se va deplasa contra acelor de ceasornic cu un unghi θ față de poziția lui la mersul în gol (**fig. 8.17**).

$$\dot{\varepsilon} = \dot{U}_1 + j \dot{I}_1 X.$$

Curentul I_1 va rămâne în urmă față de t.e.m. ε din cauza că rezistența activă a mașinii sincrone este cu mult mai mică decât rezistența ei inductivă.

$$\psi > 0.$$

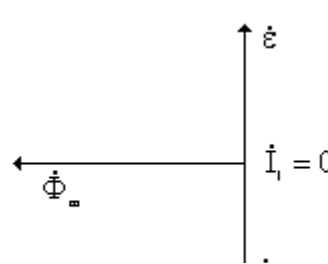


Fig. 8.16

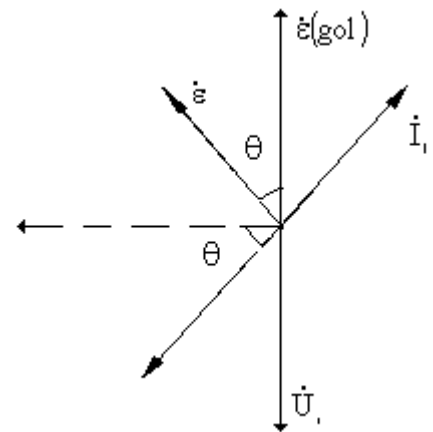


Fig. 8.17

Însă conform condiției de sincronizare:

$$\dot{U}_1 = -\dot{U}_{ref}.$$

$\varepsilon > U_1$ condiția, că generatorul este supraîncărcat.

$$\varphi_1 > 0;$$

$$\psi = \varphi_1 + \theta.$$

Unghiul ψ pentru generatorul supraîncărcat poate varia în limitele:

$$0 < \psi < 90^\circ.$$

Diagrama vectorială finală este prezentată în **fig. 8.18**.

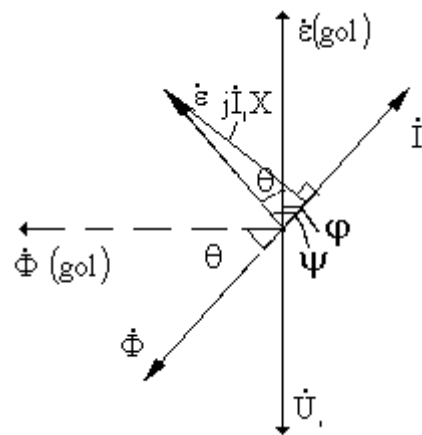


Fig. 8.18

b) Generator subexcitat

$$-90 < \theta < 0;$$

$$\varepsilon < U_1;$$

$$\psi < 0;$$

CUPRINS

CAPITOLUL I. CURENTUL ALTERNATIV MONOFAZAT

- 1.1. Noțiuni generale
- 1.2. Formele de reprezentare a mărimilor sinusoidale
- 1.3. Obținerea curentului sinusoidal
- 1.4. Valorile medie și eficace ale curentului sinusoidal
- 1.5. Circuite de curent sinusoidal cu rezistența activă
- 1.6. Circuit de curent sinusoidal cu inductanță ideală
- 1.7. Circuit de curent sinusoidal cu capacitate ideală
- 1.8. Procesele energetice în circuitele de curent sinusoidal
- 1.9. Circuit de curent sinusoidal cu elementele R, L, C legate în serie
- 1.10. Rezonanța tensiunilor
- 1.11. Triunghiul tensiunilor, triunghiul rezistențelor, triunghiul puterilor

CAPITOL II. CIRCUITE RAMIFICATE DE CURENT ALTERNATIV

- 2.1. Calculul circuitelor ramificate prin metoda grafo-analitică
- 2.2. Rezonanța curenților
- 2.3. Factorul de putere. Importanța lui tehnico-economică. Metodele de majorare a lui
- 2.4. Reprezentarea numerilor în complex
- 2.5. Calculul circuitelor ramificate prin metoda complexă (simbolică)

CAPITOL III. CIRCUITE TRIFAZATE

- 3.1. Generatorul trifazat
- 3.2. Conectarea în stea a generatorului
- 3.3. Conectarea în triunghi a generatorului
- 3.4. Conectarea în stea a sarcinii/consumatorului
- 3.5. Sarcină simetrică și nesimetrică
- 3.6. Conectarea în stea fără fir neutru la schimbarea sarcinii în una din faze
- 3.7. Conectarea sarcinii în triunghi
- 3.8. Puterile în circuitele trifazate

CAPITOLUL IV. APARATE ELECTRICE DE MĂSURAT

- 4.1. Clasificarea aparatelor electrice de măsurat

- 4.2. *Sistema magneto-electrică*
- 4.3. **Sistema electromagnetică**
- 4.4. **Sistema electrodinamică**
- 4.5. **Sistema de inducție**
- 4.6. **Sistema electrostatică**
- 4.7. **Sistema de vibrație**
- 4.8. **Sistema termică**

CAPITOLUL V. MAȘINI DE CURENT CONTINUU

- 5.1. **Construcția mașinii de curent continuu**
- 5.2. **Principiul de funcționare a generatorului**
- 5.3. **Principiul de funcționare a motorului**
- 5.4. **Funcționarea generatoarelor și caracteristicile lor**
- 5.5. **Funcționarea generatoarelor**
- 5.6. **Motoare de curent continuu**

CAPITOLUL VI. TRANSFORMATOARE ELECTRICE

- 6.1. **Clasificarea transformatoarelor**
- 6.2. **Regim de mers în gol**
- 6.3. **Pierderile în oțel și cupru**
- 6.4. **Bobina în circuitul de curent alternativ**
- 6.5. **Experiența mersului în gol al transformatorului**
- 6.6. **Transformatorul însărcinat**
- 6.7. **Transformatorul raportat**
- 6.8. **Experiența de scurtcircuit a transformatorului**
- 6.9. **Diagrama energetică a transformatorului. Randamentul.**
- 6.10. **Autotransformatorul**

CAPITOLUL VII. MAȘINA ASINCRONĂ

- 7.1. **Construcția mașinii asincrone**
- 7.2. **Motorul cu rotor scurtcircuitat. Principiul de funcționare**
- 7.3. **Schema de înlocuire a motorului**

CAPITOLUL VIII. MAȘINA SINCRONĂ

- 8.1. Construcția mașinii sincrone**
- 8.2. Generatorul sincron. Mersul în gol**
- 8.3. Reacția indusului (ancorei)**
- 8.4. Diagrama vectorială și ecuația t.e.m. și a tensiunilor a generatorului sincron**
- 8.5. Conectarea mașinii sincrone la lucru în paralel cu rețeaua**
- 8.6. Caracteristica de reglare a generatorului sincron**
- 8.7. Motorul sincron**
- 8.8. Diagramele vectoriale ale mașinii sincrone**