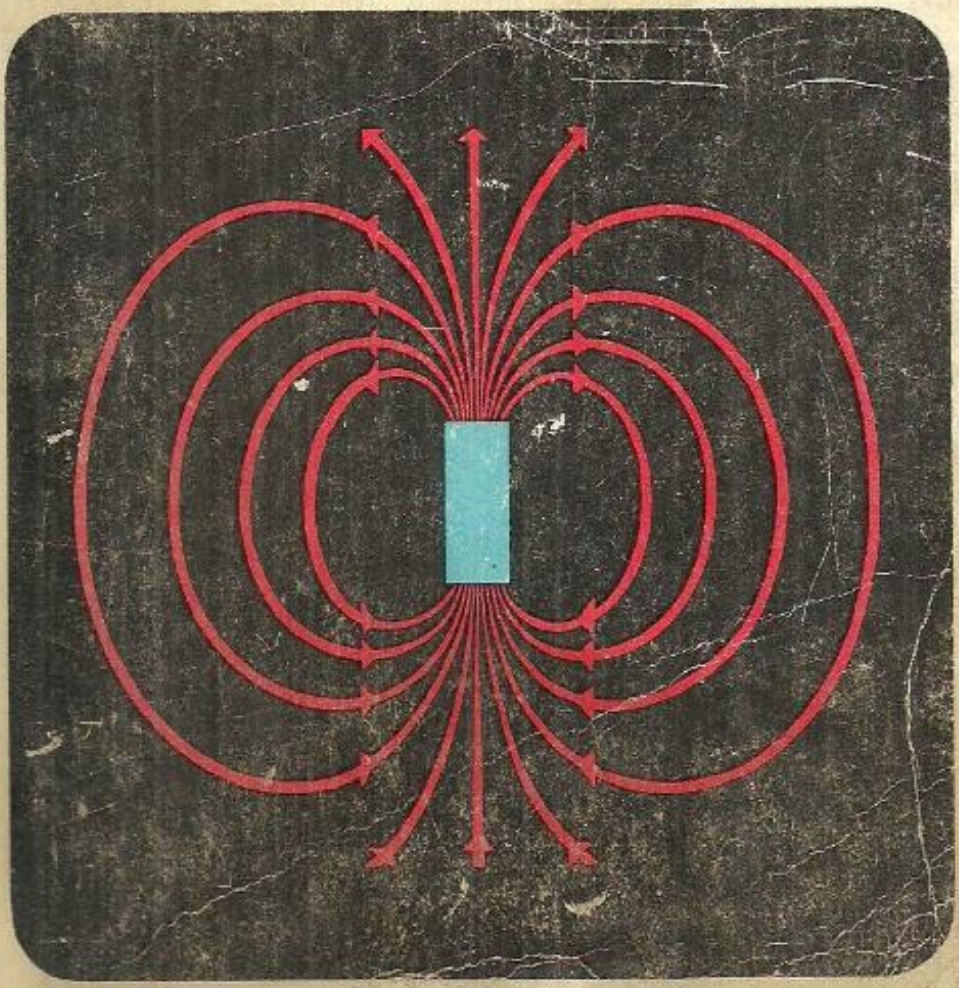
Gh. Cosma
L. Rădulescu
O. Florescu
M. Petrescu-Prahova

Fizica

Manual pentru anul III liceu

Secția umanistă



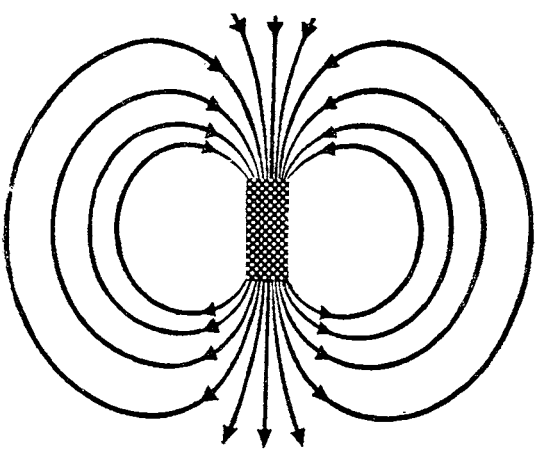
Gh. Cosma
L. Rădulescu

O. Florescu
M. Petrescu-Prahova

Fizica

Manual pentru anul III liceu

Secţia umanistă



Editura didactică şi pedagogică — Bucureşti

Manualul a fost elaborat
în anul 1967. A fost revizuit în 1969
Aprobat de Ministerul Educației și Învățământului,
cu nr. 40442/1967

Referenți:

Pentru pag.: 1–161 și lucrările de laborator I–XIV
conf. univ.: **C. Ruscior**
șef de lucrări: **A. Baltac**
cercetător științific **I.F.A.: M. Oncescu**
prof. emerită: **Aurelia Nicolau**

Pentru pag.: 162–197 și lucrările de laborator XV–XVII
Prof univ. dr. docent: **Margareta Giurgea**
Dr. **N. Martalogu**

Redactor: prof. **Gh. Enescu**
Tehnoredactor: **L. Antoniu**

Coperta executată de: **V. WEGEMANN**

Electrocinetica

I. Legile curentului electric continuu

A. Curentul electric

1. Noțiuni generale

Curentul electric privit în modul cel mai general apare ca un fenomen de deplasarea dirijată a unor particule cu sarcină electrică. Aceste particule încărcate pot fi: *electronii,* în metale, semiconductoare, gaze și în vid; *ionii,* în electroliți, gaze sau vid.

Mișcarea dirijată a particulelor încărcate în interiorul corpurilor este posibilă datorită proprietății acestora de a permite deplasarea particulelor ca urmare a aplicării unui cîmp electric.

Din acest punct de vedere, substanțele se clasifică în 3 categorii: *conductoare, semiconductoare, izolatoare.*

a. **Conductoarele** sînt acele substanțe prin care mișcarea dirijată a particulelor încărcate se poate face ușor. Ele sînt de două feluri:

— *metalele* (numite și conductoare de clasa I), care nu suferă nici o schimbare în natura lor chimică la trecerea curentului electric.

— *electroliții,* în care se produc procese chimice în timpul trecerii curentului electric prin ei, cum sînt: sărurile, acizii, bazele și unii oxizi metalici în stare topită sau în stare de soluție.

b. **Izolanții** sînt substanțe care în general nu conduc curentul electric. Astfel sînt: aerul, porțelanul, marmura etc.

c. **Semiconductoarele** sînt substanțe solide cristalizate la care purtătorii de sarcină capabili de mișcare dirijată sînt în număr redus și care ocupă un loc intermediar între metale și izolanți.

Numeroase substanțe sînt semiconductoare, de exemplu seleniul (Se), germaniul (Ge), siliciul (Si), sulfura de plumb (PbS), oxidul de fier (Fe_2O_3), oxidul de cupru (CuO) etc.

Această clasificare se înțelege mult mai bine dacă ne referim la o mărime ce caracterizează substanțele din punct de vedere electric — *conductibilitatea electrică* — și care se va defini mai tîrziu.

Pînă atunci putem spune că: conductoarele au conductibilitate electrică foarte mare, la semiconductoare conductibilitatea electrică este mică, iar izolanții prezintă o conductibilitate electrică extrem de mică.

Conductibilitatea electrică mare a conductoarelor metalice se datorește structurii particulare a metalelor.

Un metal se prezintă ca o rețea cristalină formată din ioni pozitivi, în jurul cărora se mișcă electronii de valență. O astfel de rețea spre deosebire de alte rețele cristaline se numește rețea metalică (fig. 1).

Deoarece distanța dintre doi ioni pozitivi este mai mică decît diametrul orbitei electronului de valență, orbitele electronilor periferici (de valență) se intersectează (fig. 2), slăbind astfel legătura dintre acești electroni și nucleul lor, ceea ce determină o trecere a acestor electroni din sfera de atracție a unor ioni în sfera altora deplasîndu-se astfel printre nodurile rețelei cristaline.

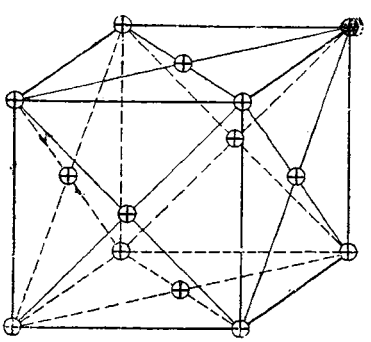


Fig. 1

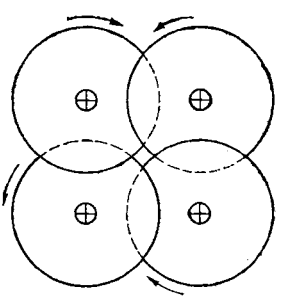


Fig. 2

S-a dat acestor electroni foarte slab legaţi de nucleul atomic numele de *electroni liberi.*

Mişcarea electronilor liberi din interiorul unui fir metalic nu constituie însă un curent electric.

Pentru a determina apariţia unui curent electric prin firul metalic, este necesar să i se aplice o tensiune electrică.

Aceasta va suprapune peste mişcarea dezordonată o mişcare ordonată a electronilor liberi şi astfel printr-o mişcare dirijată va apărea un curent electric.

Cîmpul electric necesar se obţine cu o tensiune electrică aplicată între extremităţile firului.

2. Generatorul electric

Să considerăm doi conductori izolaţi şi electrizaţi, unul pozitiv A şi celălalt negativ B, puşi la oarecare distanţă unul de altul. După cum se ştie din electrostatică, fiecare conductor are un potenţial electric conductorul A cu potenţialul V_A, conductorul B cu potenţialul V_B (fig. 3).

Între aceşti conductori există o diferenţă de potenţial electric $V_A - V_B$ şi deci un cîmp electric.

Dacă se întinde între A şi B un fir metalic C electronii din B, sub acţiunea forţelor cîmpului electric, se mişcă prin firul conductor C şi ajung pe conductorul A. Din această cauză potenţialul conductorului A scade, iar al conductorului B creşte şi deci tensiunea (diferenţa de potenţial) dintre A şi B se micşorează pînă devine zero. Această deplasare a electronilor din B spre A prin conductorul C constituie un *curent electric* prin conductorul metalic.

Deoarece curentul electric printr-un metal constă dintr-o deplasare de electroni, se spune că metalele prezintă o *conductibilitate electronică.*

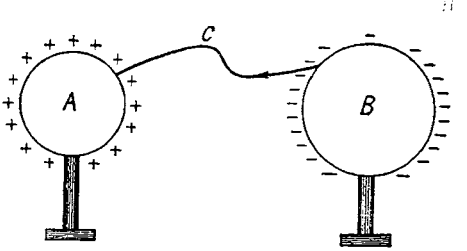


Fig. 3

O dată cu dispariţia tensiunii electrice dispare cîmpul electric şi deci şi curentul electric. În

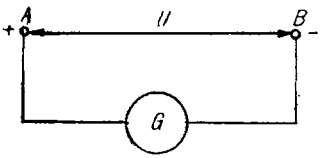


Fig. 4

cazul considerat, tensiunea electrică se anulează aproape instantaneu. Aplicațiile tehnice ale curentului electric cer curenți cu o durată mai lungă.

Pentru a obține astfel de curenți electrici, este nevoie de anumite dispozitive. Acestea sînt generatoarele electrice.

Nu trebuie să se înțeleagă prin aceasta că noțiunea de generator este legată de durata curentului. În general orice dispozitiv care poate produce curent electric — indiferent de durata lui — este un generator electric. El asigură un regim staționar al curentului într-un conductor, adică menține mărimile caracteristice curentului la aceleași valori, dacă nu intervin alți factori care să le modifice.

Fiindcă tensiunea electrică condiționează producerea curentului electric, *generatorul electric* sau *sursa de curent* este acel dispozitiv electric care poate produce și întreține o tensiune electrică.

Tensiunea electrică se obține între două puncte ale generatorului, numite borne *A, B* (fig. 4).

Pentru producerea tensiunii electrice între *A* și *B* trebuie să se consume energie. Generatorul electric va trebui deci să furnizeze această energie.

După felul energiei care se transformă generatoarele electrice sînt de mai multe feluri:

1. Generatoare chimice de curent — elemente galvanice și acumulatori.

2. Termoelementele în care se transformă energia termică în energie electrică.

3. Fotoelementele în care se transformă energia luminoasă în energie electrică.

4. Dinamul și alternatorul în care se transformă energia mecanică în energie electrică.

3. Circuitul electric

Curentul electric se produce dacă între bornele generatorului se leagă unu sau mai mulți conductori într-un lanț continuu.

Totalitatea conductorilor prin care trece un curent electric constituie *circuitul electric.*

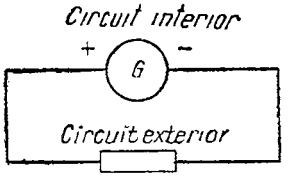


Fig. 5

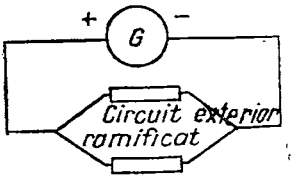


Fig. 6

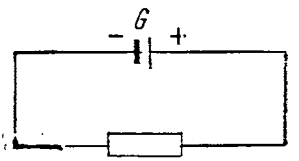


Fig. 7

Un circuit neîntrerupt este un *circuit închis*. Partea din circuit care se află în interiorul generatorului se numește *circuit interior*, iar partea din circuit de la o bornă a generatorului în afară prin consumator la cealaltă bornă a generatorului este *circuitul exterior* (fig. 5). Circuitul interior împreună cu circuitul exterior formează circuitul întreg sau total. Cînd există o întrerupere a circuitului, circuitul este *deschis*. Curentul electric nu poate exista decît dacă există un generator, iar circuitul este închis.

Circuitul electric poate fi: simplu (fig. 5) și ramificat (fig. 6).

În circuitul electric, electronii liberi se pot mișca fie mereu în același sens, fie schimbîndu-și periodic sensul; deci putem clasifica generatoarele de curent în: generatoare de curent continuu și în generatoare de curent alternativ.

Un circuit electric de curent continuu se reprezintă schematic ca în figura 7, în care *G* este generatorul electric. Borna negativă este reprezentată printr-o linie scurtă și groasă, iar cea pozitivă printr-o linie mai lungă și subțire.

4. Efectele curentului electric

Cu energia furnizată de generator, curentul electric produce numeroase efecte. Principalele efecte sînt:

a) *Efectul termic*, care constă în încălzirea conductorului parcurs de curent. Aplicații ale acestui efect întîlnim la reșou, ciocanul electric de lipit, becul electric etc.

b) *Efectul chimic*, numit și electroliză, care constă în dirijarea ionilor din electrolit prin trecerea curentului electric.

c) *Efectul magnetic* constă în producerea unui cîmp magnetic în jurul curentului (fig. 8). Acest efect însoțește întotdeauna curentul electric.

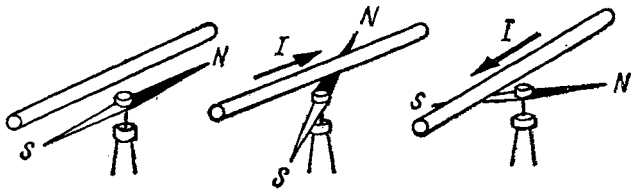


Fig. 8

Un dispozitiv electric în care se foloseşte curentul electric în scopul obţinerii unuia sau mai multor efecte simultan se numeşte *consumator de curent sau receptor.*

Experimental se constată că efectul chimic şi efectul magnetic depind de sensul curentului. S-a stabilit în mod convenţional ca sens al curentului sensul în care se mişcă sarcinile pozitive, sens admis în electrotehnică. Acest sens este în exteriorul generatorului de la polul pozitiv la polul negativ.

Deşi ulterior s-a stabilit că există cazuri în care curentul este o deplasare numai de electroni, totuşi a rămas definitiv în ştiinţă şi tehnică ca singur sens valabil al curentului sensul în care s-ar mişca sarcinile pozitive, dacă ar fi libere.

B. Intensitatea curentului electric

5. Definirea intensităţii curentului şi unitatea de măsură

Un curent electric continuu se caracterizează prin două elemente: sensul şi intensitatea.

Dacă se consideră un circuit electric şi o secţiune transversală a lui, prin această secţiune trece în timp de o secundă un număr de electroni n, fiecare purtînd aceeaşi sarcină electrică e.

Deci prin secţiunea transversală a circuitului parcurs de curent trece într-o secundă o cantitate de electricitate:

$$Q = n \cdot e.$$

Prin definiție se numește *intensitate a curentului electric mărimea fizică numeric egală cu cantitatea de electricitate care trece într-o secundă printr-o secțiune transversală a circuitului.*

Intensitatea curentului se notează cu I. Dacă intensitatea curentului este constantă, atunci cantitatea de electricitate transportată de curent în timpul t va fi:

$$Q = I \cdot t, \text{ deci } I = \frac{Q}{t}. \quad (1)$$

Unitatea de intensitate a curentului în SI este *amperul* (simbol A). Definiția lui va fi dată în capitolul „Electromagnetism".

Pentru măsurarea intensității curentului electric se folosesc galvanometrele și ampermetrele. Ele se construiesc pe baza unuia din efectele curentului electric și se montează în serie în circuit.

Unitatea de sarcină electrică în Sistemul Internațional se numește *coulomb* (simbol C). El se poate defini în funcție de amper conform relației (1):

Coulombul este cantitatea de sarcină electrică transportată în timp de o secundă de un curent continuu și constant cu intensitatea de 1 A.

$$1\text{C} = 1\text{A} \cdot 1\text{s}.$$

6. Intensitatea curentului electric într-un circuit

Fie un circuit electric simplu cu o sursă de curent continuu; se poate arăta experimental că oriunde, pe circuit, s-ar măsura intensitatea curentului electric, ea are aceeași valoare la un moment dat.

Pentru aceasta se pot monta 2—3 galvanometre pe circuit, în diferite locuri (fig. 9). Se constată că toate galvanometrele indică

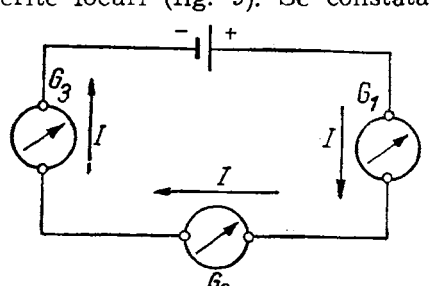


Fig. 9

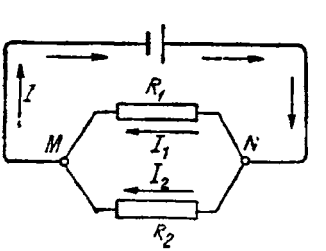


Fig. 10

aceeași intensitate. Acest lucru e ușor de înțeles dacă se ține seamă de faptul că un curent electric este o mișcare dirijată de purtători de sarcină. Electronii pornind de la borna negativă a generatorului trec prin receptoare și ajung la borna pozitivă a generatorului fără să se acumuleze în vreun punct al circuitului. Deci prin fiecare secțiune a circuitului trec în fiecare secundă același număr de electroni; ca urmare intensitatea curentului va fi aceeași.

La circuitul ramificat curentul are o intensitate în general diferită de la o ramură la alta (fig. 10).

C. Tensiunea și rezistența electrică. Legea lui Ohm

7. Tensiunea electrică pe circuit

Am arătat mai înainte că generatorul electric creează și întreține între două borne ale lui o tensiune electrică, care determină deplasarea purtătorilor de sarcină (electroni și ioni) printr-un receptor legat la cele două borne, constituind astfel curentul electric.

Această tensiune electrică determină un cîmp electric ale cărui forțe produc mișcarea electronilor (sau ionilor) prin circuit.

Între două puncte A și B luate în lungul unui circuit electric există de asemenea, o tensiune electrică V (fig. 11).

Deplasarea sarcinilor în cîmpul electric se face sub acțiunea forțelor electrice care efectuează un lucru dat de formula

$$L = Q \cdot U,$$

unde Q este sarcina electrică care străbate porțiunea de circuit, iar U tensiunea dintre A și B. Această relație o folosim pentru definirea tensiunii electrice între două puncte ale unui circuit electric.

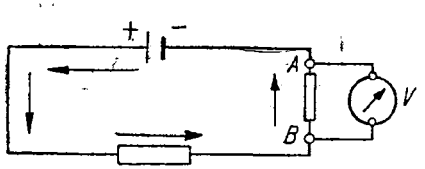


Fig. 11

Tensiunea electrică dintre două puncte ale unui circuit electric este o mărime electrică scalară numeric egală cu lucrul efectuat de

cîmpul electric pentru deplasarea unității pozitive de sarcină între cele două puncte:

$$U = \frac{L}{Q};$$

Relația mai poate fi scrisă și astfel:

$$U = \frac{\frac{L}{t}}{\frac{Q}{t}};$$

Dar $\frac{L}{t} = P$ (puterea electrică) și $\frac{Q}{t} = I$ (intensitatea curentului).

Astfel că $U = \frac{P}{I}$. Folosim această relație pentru definirea unității de tensiune.

Unitatea de tensiune electrică în SI este *voltul.*

Voltul este tensiunea electrică dintre extremitățile unei porțiuni de circuit în care un curent cu intensitate de 1 A *dezvoltă o putere de* 1 W.

Măsurarea tensiunii electrice se face cu voltmetrul.

Pentru măsurarea unei tensiuni electrice între două puncte ale unui circuit se leagă cele două borne ale voltmetrului cu cele două puncte, fără a întrerupe legătura dintre A și B, ca în figura 11. Spunem că voltmetrul este legat în paralel sau în derivație cu porțiunea de circuit la bornele căreia există tensiunea ce trebuie măsurată.

Dacă punctele A și B între care se măsoară tensiunea sînt bornele unui generator, atunci tensiunea dintre ele se numește tensiune la borne și se notează cu U_0.

Cu voltmetrul putem ușor verifica că orice porțiune de circuit parcurs de curent se află sub o tensiune electrică. Și deoarece există o porțiune de circuit și în interiorul generatorului, urmează că și acesteia îi corespunde o tensiune, pe care o notăm cu u. Ea se numește cădere de tensiune în generator.

Suma dintre tensiunea la borne și căderea de tensiune din interiorul generatorului formează tensiunea electromotoare.

Tensiunea electromotoare se notează cu litera E.

Deci

$$E = U_0 + u$$

Definiția tensiunii electromotoare reiese din definiția generală a unei tensiuni electrice.

Tensiunea electromotoare este o mărime electrică numeric egală cu lucrul produs pentru deplasarea unității de sarcină în întregul circuit.

Tensiunea electromotoare este o mărime caracteristică pentru orice generator de curent. Astfel elementul Leclanché are o tensiune electromotoare de 1,5 V.

8. Rezistența electrică

Experiențele sistematice au arătat că:

1) dacă se variază tensiunea electrică dintre extremitățile aceluiași conductor, intensitatea curentului ce îl străbate variază proporțional cu tensiunea. Ea nu se schimbă dacă tensiunea rămîne constantă;

2) dacă se aplică tensiuni electrice egale la doi conductori diferiți, curenții electrici ce îi parcurg au intensități diferite.

Din aceste experiențe se deduce în mod logic că intensitatea curentului electric într-un conductor depinde și de natura conductorului.

Deoarece electronii, în mișcarea lor, se deplasează printre ionii rețelei metalice, trebuie să admitem că ei se mișcă mai ușor printr-un conductor decît printr-altul din cauza deosebirilor de structură a rețelei metalice.

Ciocnirile electronilor cu ionii rețelei metalice împiedică mai mult sau mai puțin mișcarea lor prin conductor.

Această explicație ne conduce la ideea de *rezistență electrică*, rezistență pe care o opune conductorul, mișcării electronilor liberi ai curentului.

Orice conductor metalic prezintă o rezistență electrică și în general orice corp care permite trecerea curentului prin el are o rezistență electrică.

Dacă intensitatea curentului care străbate un conductor este de n ori mai mică decît intensitatea curentului care străbate un alt conductor, cînd i se aplică aceeași tensiune electrică, putem spune că rezistența electrică a primului conductor este de n ori mai mare ca a celui de-al doilea.

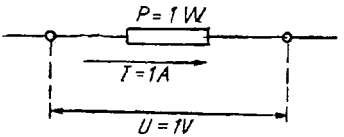


Fig. 12

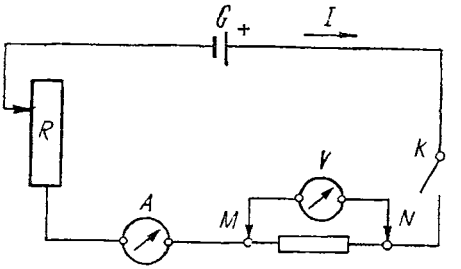


Fig. 13

De aici reiese că rezistența electrică este o mărime fizică caracteristică conductorului. Ea se notează cu r sau R și convențional se reprezintă ca în figura 12.

Conductorul care se utilizează — în diferite aplicații — pentru rezistența lui, se numește *rezistor*.

Unitatea pentru măsurarea rezistenței electrice în SI este *ohm-ul*.

Ohm-ul este rezistența electrică a unui conductor prin care trece un curent cu intensitatea de 1 A *cînd între capetele lui există o tensiune electrică* de 1 V. Simbolul este Ω.

9. Legea lui Ohm pentru o porțiune de circuit

Am văzut mai înainte că intensitatea curentului electric depinde de tensiunea electrică și de rezistența electrică a conductorului.

Relația de dependență între intensitatea curentului I, tensiunea electrică U și rezistența electrică R a fost stabilită experimental de către fizicianul german Georg Simon Ohm (1787—1854) și constituie legea lui Ohm:

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

adică:

Intensitatea curentului electric care străbate un conductor de rezistență R este proporțională cu tensiunea de la capetele conductorului U și invers proporțională cu rezistența R.

Legea a fost demonstrată mai tîrziu și teoretic.

Verificarea legii lui Ohm. *Experiență.* Se constituie un circuit electric dintr-un generator G, un reostat R (dispozitiv care permite

variația intensității curentului), un ampermetru A, așa cum se vede în figura 13.

În verificarea legii trebuie să arătăm experimental că raportul $\frac{U}{I}$ rămîne constant pentru un conductor dat, cînd variază tensiunea.

În acest scop punem în porțiunea MN a circuitului, un conductor; apoi cu ajutorul reostatului, variem tensiunea electrică între M și N. Această tensiune este măsurată de un voltmetru pus în derivație pe conductor.

Cu ampermetrul A se măsoară de fiecare dată și intensitatea curentului.

Se obțin astfel mai multe perechi de valori:

U_1, I_1	$U_1 = 6$ V	$I_1 = 3$ A
U_2, I_2 de ex:	$U_2 = 10$ V	$I_2 = 5$ A
U_3, I_3	$U_3 = 20$ V	$I_3 = 10$ A

Se constată că într-adevăr oricare ar fi numărul de determinări:

$$\frac{U}{I} = \text{constant.}$$

Relația este valabilă pentru orice conductor metalic.
Ea nu se aplică semiconductorilor.

10. Formula rezistenței electrice a unui conductor omogen de secțiune uniformă

Cu ajutorul legii lui Ohm se poate verifica că: *rezistența electrică a unui conductor metalic omogen cu secțiunea uniformă este proporțională cu lungimea conductorului, invers proporțională cu secțiunea lui transversală, depinde de natura substanței din care este făcut și de temperatură.*

Folosim același circuit ca în figura 13.

Cu reostatul R se menține tensiunea constantă între M și N, și se măsoară cu voltmetrul V.

Se experimentează cu conductori de lungimi diferite, de secțiuni diferite, de naturi diferite.

Experiențele decurg astfel:

a) Se pun în mod succesiv între M și N doi conductori de aceeași natură, de aceeași secțiune, dar de lungimi diferite, l_1 și l_2.

La aceeași tensiune U, curenții sînt diferiți I_1 și I_2, astfel că $\frac{I_1}{I_2}=\frac{l_2}{l_1}$, dar $I_1=\frac{U}{R_1}$ și $I_2=\frac{U}{R_2}$ după legea lui Ohm. Înlocuind valorile lui I_1 și I_2 în relația precedentă, se obține: $\frac{R_2}{R_1}=\frac{l_2}{l_1}$, adică rezistența electrică este *proporțională cu lungimea conductorului:* $R\sim l$.

b) Punînd succesiv între M și N doi conductori de aceeași natură, de aceeași lungime, dar de secțiuni diferite S', S'' pentru aceeași tensiune U, curenții sînt I' și I'', astfel că $\frac{I'}{I''}=\frac{S'}{S''}$ cum $I'=\frac{U}{R'}$ și $I''=\frac{U}{R''}$ prin înlocuire se obține $\frac{R''}{R'}=\frac{S'}{S''}$ și deci rezistența este *invers proporțională cu secțiunea:* $R\sim\frac{1}{S}$.

În concluzie se ajunge la stabilirea formulei

$$R=K\frac{l}{S} \qquad (2)$$

c) Pentru a dovedi dependența rezistenței electrice a unui rezistor de *natura substanței,* se consideră două sîrme: una de fier și alta de cupru de aceeași lungime și aceeași secțiune care se introduc succesiv între M și N.

Menținînd aceeași tensiune U la extremitățile lor, constatăm intensități diferite de curent I_1 și I_2. După legea lui Ohm rezultă că și rezistențele electrice ale celor doi rezistori sînt diferite:

$$U=I_1R_1=I_2R_2;\ I_1\neq I_2,\ \text{deci}\ R_1\neq R_2.$$

d) Pentru a arăta cum variază rezistența unui conductor cu *temperatura,* se procedează astfel:

Se folosește drept conductor un fir de sîrmă din fier cu diametrul de 0,2 mm și lungimea de circa 5—10 m. Sîrma se înfășoară pe un cadru de lemn, spiră lîngă spiră.

Acest cadru cu sîrma de fier se introduce într-un vas cu petrol (lichid izolant), iar vasul se pune într-un alt vas cu apă.

Pentru a-i da temperatura 0°C, se pune vasul cu petrol în gheață, care se topește.

Se măsoară rezistența electrică a sîrmei de fier la temperatura de 0°C și apoi rezistența ei la diferite temperaturi t_1, t_2,, t_3 etc.

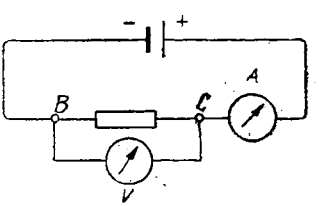


Fig. 14

În acest scop folosim un voltmetru

pentru măsurarea tensiunii electrice de la extremităţile sîrmei de fier şi un ampermetru pus în serie cu ea pentru măsurarea intensităţii curentului (fig. 14).

Prin aplicarea legii lui Ohm se determină rezistenţele sîrmei de fier R_1, R_2 ... etc., corespunzătoare temperaturilor t_1, t_2 ... etc.

Se calculează apoi valorile rapoartelor $\frac{R_1-R_0}{R_0t_1}$, $\frac{R_2-R_0}{R_0t_2}$ etc., care reprezintă variaţia unităţii de rezistenţă produsă de o variaţie de temperatură de 1°C.

Cînd măsurătorile sînt făcute cu precizie, se constată că aceste rapoarte au aceeaşi valoare.

Fie α valoarea lor comună. Atunci se poate scrie:

$$\frac{R_1-R_0}{R_0t_1}=\alpha; \quad \frac{R_2-R_0}{R_0t_2}=\alpha,$$

de unde:

$$R_1=R_0+\alpha R_0t_1 \text{ şi } R_2=R_0+\alpha R_0t_2,$$

deci

$$R_1=R_0(1+\alpha t_1); \quad R_2=R_0(1+\alpha t_2),$$

ceea ce ne permite să generalizăm:

$$R=R_0(1+\alpha t).$$

α este coeficientul de variaţie al rezistenţei electrice cu temperatura.

Acest coeficient este pozitiv şi are aproximativ valoarea 0,004 pentru metalele pure. La cărbune α este negativ cu valoarea — 0,0003. La aliaje este mult mai mic. Astfel constantanul (un aliaj ce conţine 54% Cu, 45% Ni şi 1% Mn) are $\alpha=0{,}00003$, iar manganinul (un aliaj cu următoarea compoziţie: 86% Cu, 2% Ni, 12% Mn), $\alpha=0{,}00001$.

11. Rezistivitatea

Experienţa a arătat că rezistenţele electrice a doi conductori, din substanţe diferite, dar de aceeaşi lungime, aceeaşi secţiune şi aceeaşi temperatură sînt diferite.

Observînd formula (2), înţelegem că coeficientul de proporţionalitate K determină dependenţa rezistenţei electrice de natura substanţei.

S-a convenit ca acest coeficient să fie notat cu litera ρ și a fost numit *rezistivitatea* substanței.

De aceea formula rezistenței electrice a unui conductor va fi scrisă sub forma:

$$R = \rho \frac{l}{S} \tag{3}$$

pentru o temperatură dată și

$$R = \rho_0 \frac{l}{S} (1 + \alpha t) \tag{4}$$

pentru diferite temperaturi.

ρ_0 este rezistivitatea substanței la 0°C.

În Sistemul Internațional, *rezistivitatea unei substanțe este rezistența electrică a unui conductor confecționat din această substanță cu lungimea de* 1 m *și secțiunea de* 1 m^2.

Scoatem valoarea lui ρ din formula (3): $\rho = R\frac{S}{l}$. Trecînd la unități vom avea:

$$\langle \rho \rangle_{SI} = \langle R \rangle \frac{\langle S \rangle}{\langle l \rangle} \text{ sau } \langle \rho \rangle_{SI} = \Omega \cdot m.$$

Deci unitatea de rezistivitate în SI este $\Omega \cdot m$ (ohmmetru). Deoarece unitatea internațională este foarte mare, numărul care exprimă valoarea rezistivității este foarte mic, de exemplu la Cu, $\rho = 0{,}000000017\ \Omega \cdot m = 17 \cdot 10^{-9}\ \Omega \cdot m$.

Cum aceste numere sînt foarte incomode de utilizat în calculele curente, în locul rezistivității din SI se preferă o unitate de rezistivitate folosită în *tehnică*, care este rezistența electrică a unui conductor cu lungimea de 1 m și secțiunea de 1 mm^2:

$$\langle \rho \rangle_{tehn} = \Omega \frac{mm^2}{m}.$$

Raportul celor două unități este:

$$\frac{\langle \rho \rangle_{SI}}{\langle \rho \rangle_{tehn}} = \frac{\Omega m}{\frac{\Omega mm^2}{m}} = \frac{m^2}{mm^2} = \frac{m^2}{(10^{-3} m)^2} = 10^6,$$

ceea ce ne arată că unitatea tehnică de rezistivitate este de 1 milion de ori mai mică ca cea din SI.

În cazul cuprului, rezistivitatea tehnică va fi:

$$\rho_{tehn} = 0{,}000000017 \times 10^6 = 0{,}017 \frac{\Omega mm^2}{m}.$$

Dăm mai jos un tabel de rezistivităţi al substanţelor mai des întîlnite în practică:

Substanţa	Rezistivitatea în SI $\Omega \cdot m$	Rezistivitatea în $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$
Aluminiul	$2{,}8 \cdot 10^{-8}$	0,028
Argintul	$1{,}6 \cdot 10^{-8}$	0,016
Cuprul	$1{,}75 \cdot 10^{-8}$	0,0175
Fierul	$9{,}8 \cdot 10^{-8}$	0,098
Nichelul	$1{,}5 \cdot 10^{-7}$	0,15
Constantan	$5 \cdot 10^{-7}$	0,5
Manganin	$4{,}3 \cdot 10^{-7}$	0,43
Nichelin	$4{,}2 \cdot 10^{-7}$	0,42

Mărimea $\frac{1}{\rho} = \gamma$ se numeşte *conductivitate* sau *conductibilitate* electrică a substanţei.

Unitatea de conductibilitate electrică în SI este $\Omega^{-1}m^{-1}$.

Mărimea electrică exprimată prin inversul rezistenţei electrice $\left(\frac{1}{R}\right)$ se numeşte conductanţă.

Revenind asupra conductibilităţii electrice a substanţelor, precizăm că:

metalele au $\gamma = 10^{7}—10^{6}\ \Omega^{-1}m^{-1}$;

semiconductorii $—\gamma = 10^{2}—10^{-8}\ \Omega^{-1}m^{-1}$;

izolanţii $—\gamma = 10^{-12}—10^{-16}\ \Omega^{-1}m^{-1}$.

12. Supraconductibilitatea

Am stabilit formula $R = R_0(1 + \alpha t)$. La unele metale $\alpha > 0$, deci cînd temperatura creşte, rezistenţa electrică a metalelor creşte şi ea; cînd scade temperatura, rezistenţa electrică descreşte.

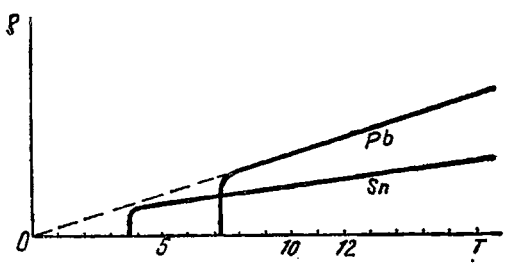


Fig. 15

Acest lucru a şi fost observat de Kammerling Ones, care a arătat că la unele metale, ca plumbul (Pb), staniul (Sn) rezistenţa electrică scade brusc pînă la zero în apropiere de 0 K (fig. 15).

Prin dispariția rezistenței electrice, metalul devine un supraconductor, iar fenomenul e cunoscut sub denumirea de supraconductibilitate.

Întrebări recapitulative

1. **Ce este curentul electric printr-un conductor?**
2. **Ce este circuitul electric și de cîte feluri este?**
3. **Ce se numește intensitate a curentului?**
4. **Cum este intensitatea curentului în lungul unui circuit simplu?**
5. **Cum se explică rezistența electrică a unui conductor metalic?**
6. **Cum se definește rezistivitatea?**
7. **Care este definiția ohm-ului?**

Exerciții

1. Printr-un conductor metalic a trecut în timp de 2 h un curent continuu și constant de 5 A. Care este cantitatea de electricitate transportată în acest timp de curent?

R: 36 000 C.

2. Tensiunea electrică aplicată unui reșou este de 220 V. Ce rezistență electrică are reșoul dacă intensitatea curentului este de 5 A?

R: 44 Ω

3. Ce rezistență electrică are un aparat electric de încălzit dacă este făcut din nichelină cu diametrul de 0,4 mm și lungimea de 5 m?

R: 16,7 Ω

4. Care este lungimea unui rezistor confecționat din manganin cu diametrul de 0,5 mm, dacă curentul electric ce trece prin el trebuie să aibă intensitatea de 2 A sub o tensiune de 20V?

R: 4,56 m.

13. Reostate

Reostatele sînt dispozitive electrice confecționate din mai mulți rezistori etalonați sau neetalonați și care permit — cînd sînt introduși într-un circuit electric — să se varieze intensitatea curentului sau tensiunea într-o porțiune de circuit, variind rezistența electrică introdusă.

Rezistorii care alcătuiesc reostatele sînt legaţi de obicei în serie.

După modul cum se obţine variaţia rezistenţei introduse în circuit, reostatele sînt:

a. cu cursor,

b. cu manetă,

c. cu fişă.

a. **Reostatul cu cursor.** Este alcătuit dintr-un singur rezistor de nichelină sau cromnichel, înfăşurat pe un cilindru de porţelan sau alt izolator.

Paralel cu cilindrul este întinsă o bară de-a lungul căreia alunecă un cursor. Schema unui astfel de reostat este reprezentată în figura 16.

Reostatul cu cursor se introduce în circuit în modul reprezentat în figura 17.

Rezistenţa totală a reostatului este aceea a rezistorului *ac*. Porţiunea din rezistor pe care reostatul o introduce în circuit este numai *ad*. Această porţiune este variabilă cînd cursorul se mişcă. În acest caz, intensitatea curentului variază, ceea ce face ca şi tensiunea dintre *M* şi *N* să varieze.

b. **Reostatul cu manetă.** La acest reostat sînt legaţi în serie mai mulţi rezistori etalonaţi, de rezistenţă R_1, R_2, R_3... Ei sînt dispuşi în diferite moduri, pe un suport izolator (fig. 18).

Contactul dintre doi rezistori este pus în legătură cu un plot (cui). Ploturile sînt dispuse pe un arc de cerc în centrul căruia este axa unei manete.

Această manetă poate face contact cu ploturile, introducînd astfel în circuit unul sau mai mulţi rezistori.

c. **Reostatul cu fişă.** Pentru diverse *măsurători precise* se utilizează reostatul cu fişă sau cutia cu rezistori.

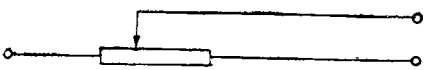


Fig. 16

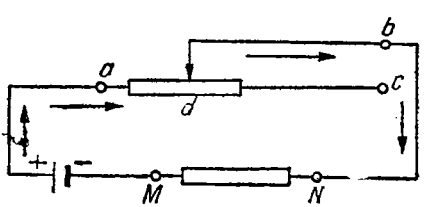


Fig. 17

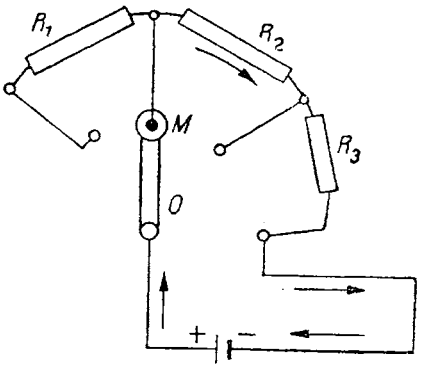


Fig. 18

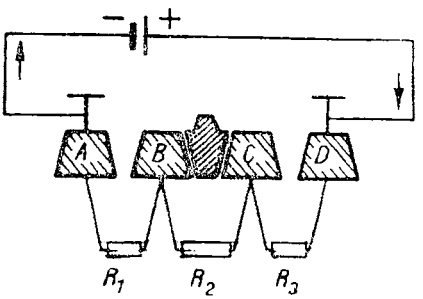


Fig. 19

Acesta este alcătuit din rezistori etalonați de 1 Ω, 2 Ω, 2 Ω, 5 Ω, 10 Ω, 20 Ω, 20 Ω, 50 Ω, 100 Ω, 200 Ω legați în serie.

Fiecare rezistor are capetele legate la două blocuri vecine și masive de alamă (fig. 19).

Dacă în orificiul dintre două blocuri vecine se introduce o fișă metalică, atunci rezistorul și rezistența lui sînt practic scoși din circuit.

Astfel fișa introdusă între blocurile B și C scoate din circuit rezistorul de rezistență R_2.

Reostatele au aplicații numeroase în tehnică și în laboratoarele de electrotehnică. Electromotoarele sînt prevăzute cu reostate de pornire, în laboratoarele de cercetări sînt folosite în diverse măsurători de tensiune, rezistențe etc.

14. Legea lui Ohm pentru circuitul întreg

Vom considera un circuit închis, avînd generatorul G a cărui tensiune la borne este U_0. În conformitate cu legea lui Ohm pentru o porțiune de circuit, în circuitul interior al generatorului se produce o cădere de tensiune $u=I\cdot r$, unde r este rezistența electrică a circuitului interior.

Dar așa cum s-a mai arătat $U_0+u=E$ reprezintă tensiunea electromotoare a generatorului.

Întrucît $U_0=I\cdot R$ şi $u=I\cdot r$, legea lui Ohm se mai poate exprima şi prin relaţia:

$$IR+Ir=E \text{ sau } I=\frac{E}{R+r}. \tag{5}$$

Ultima formulă ne permite să enunţăm legea lui Ohm pentru întregul circuit astfel:

Intensitatea curentului electric care străbate un circuit este direct proporţională cu tensiunea electromotoare şi invers proporţională cu rezistenţa totală a circuitului.

15. Măsurarea tensiunii electromotoare cu voltmetrul

O valoare a tensiunii electromotoare a unui generator foarte apropiată de valoarea reală se obţine dacă măsurăm tensiunea la bornele generatorului în circuit deschis cu un voltmetru a cărui rezistenţă electrică R este mult mai mare decît rezistenţa interioară a generatorului. Putem scrie următoarele relaţii:

$$I=\frac{E}{R+r} \text{ şi } \frac{U_0}{R}=I, \text{ de unde } \frac{U_0}{R}=\frac{E}{R+r}$$

şi

$$E=U_0\frac{R+r}{R} \text{ sau } E=U_0\left(1+\frac{r}{R}\right).$$

Rezistenţa interioară a generatorului fiind foarte mică faţă de rezistenţa R a voltmetrului, termenul din paranteză $\frac{r}{R}$ este neglijabil şi deci putem scrie:

$$E\approx U_0.$$

Tensiunea electromotoare a unui generator de curent este determinată de particularităţile fenomenului ce se petrece în el şi este o mărime caracteristică a lui.

Astfel, la unele generatoare, ca dinamul şi alternatorul, tensiunea electromotoare apare ca un efect al fenomenului de inducţie electromagnetică; la generatoarele chimice, cum sînt elementele galvanice tensiunea electromotoare este determinată de diferenţa de potenţial de contact dintre conductorii de cl. I şi cei de cl. a II-a, iar la fotoelemente de efectul fotoelectric în stratul de baraj etc.

Rezistența interioară este o altă mărime caracteristică a generatorului. Rezistența interioară a unui generator este determinată și de structura internă a generatorului, de felul conductorilor componenți (metale, soluții). La unele generatoare, rezistența interioară se schimbă ca urmare a modificărilor chimice ce se petrec în generator în timpul funcționării.

Astfel la elementele galvanice această rezistență crește cu timpul. Mult mai stabilă este această rezistență interioară la dinamuri și alternatoare.

D. Legile lui Kirchhoff și aplicațiile lor

16. Legarea rezistorilor în serie și paralel. Legea I a lui Kirchhoff

În general, orice circuit electric este alcătuit din mai mulți rezistori, care pot fi diferiți prin substanța din care sînt confecționați sau prin dimensiunile lor. Fiecare conductor are o rezistență electrică.

Pe lîngă diferențele introduse de particularitățile fiecărui rezistor, circuitele electrice se mai pot deosebi între ele și prin modul în care se leagă rezistorii între ei.

Rezistori conectați în serie. Rezistorii unui circuit pot fi legați unul în continuarea celuilalt. Aceasta este gruparea în serie (figura 20).

În general rezistența electrică a unui ansamblu de rezistori se numește rezistență echivalentă. O notăm cu R.

Dacă plasăm ansamblul acesta de conductori în circuitul unui generator de curent, prin toți conductorii va circula curent, cu aceeași intensitate I (fig. 21).

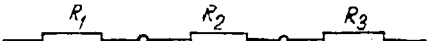


Fig. 20

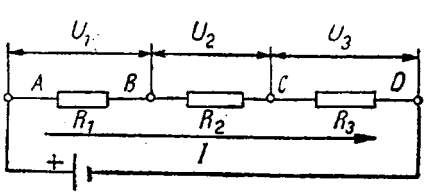


Fig. 21

18. Căderea de tensiune în lungul unui circuit

Se ştie din lecţiile precedente că prezenţa unui curent electric într-un circuit este condiţionată de existenţa unei tensiuni electrice între două puncte oarecare luate de-a lungul circuitului.

Să considerăm bornele A şi B ale unui generator electric (fig. 24) şi pe circuitul exterior un consumator de rezistenţă R care consumă, în mod normal, o putere P cînd este legat de bornele generatorului prin firele de legătură AC şi BD.

Prin consumator şi prin firele de legătură circulă un curent de intensitate I.

După legea lui Ohm, tensiunea electrică U_0 între A şi B este dată de relaţia:

$$U_0 = R_0 \cdot I \qquad (9)$$

unde R_0 reprezintă rezistenţa electrică a circuitului exterior.

Este evident că $R_0 = R_1 + R$, unde R_1 este rezistenţa electrică a firelor de legătură.

Înlocuind în (9) pe R_0 cu expresia

$$R_1 + R,$$

obţinem:

$$U_0 = IR_1 + IR.$$

IR este tensiunea luată de consumator, iar IR_1 este căderea de tensiune produsă de rezistenţa electrică a firelor AC şi BD.

Se vede că pentru un consumator dat, această cădere de tensiune este proporţională cu rezistenţa firelor de legătură.

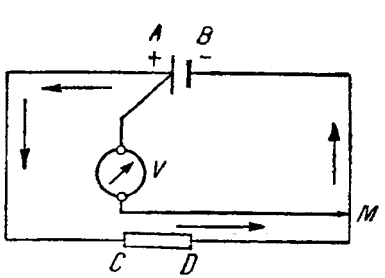


Fig. 24

În diferite aplicaţii ale curentului apar totdeauna pierderi de tensiune. Una din pierderile de tensiune inerentă producerii curentului electric este căderea de tensiune din interiorul unui generator, element galvanic, dinam etc.

Căderi importante de tensiune apar în transportul energiei electrice la distanţă.

unor fenomene se produc modificări în distribuţia lor.

Întrucît la nodurile N_1 şi N_2 nu se constată *îngrămădiri de sarcini*, pe baza legii conservării sarcinilor în circuit se poate scrie $I=I_1+I_2+I_3$, relaţie care exprimă legea I a lui Kirchhoff a curenţilor derivaţi şi care se enunţă astfel:

Intensitatea curentului principal I **este egală cu suma intensităţilor curenţilor derivaţi** $I_1, I_2 \ldots I_n$.

Generalizînd pentru n rezistori:

$$I = \sum_{i=1}^{n} I_i. \tag{7}$$

17. Calculul rezistenţei echivalente unei grupări de rezistori legaţi în derivaţie

Pornim de la legea I a lui Kirchhoff:

$I=I_1+I_2+I_3$ şi exprimăm fiecare intensitate prin legea lui Ohm:

$$\frac{U}{R}=\frac{U}{R_1}+\frac{U}{R_2}+\frac{U}{R_3},$$

împărţim cu U şi obţinem

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}.$$

Generalizînd pentru n rezistori legaţi în paralel, putem scrie

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\cdots+\frac{1}{R_n}$$

sau

$$\frac{1}{R}=\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{R_i}, \tag{8}$$

adică *inversul rezistenţei echivalente este egal cu suma inverselor rezistenţelor derivaţiilor.*

Deoarece $\frac{1}{R}$ este conductanţa, adevărul de mai sus se mai poate exprima astfel:

Conductanţa unei grupări de rezistori legaţi în derivaţie este egală cu suma conductanţelor derivaţiilor.

Aplicînd legea lui Ohm pentru fiecare rezistor R_1, R_2, R_3, precum şi pentru ansamblul lor de rezistenţă R, vom obţine:

$$\left.\begin{aligned} U_1 &= V_A - V_B = IR_1 \\ U_2 &= V_B - V_C = IR_2 \\ U_3 &= V_C - V_D = IR_3 \\ U &= V_A - V_D = IR \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

Adunînd relaţiile (6), se obţine:

$$U_1 + U_2 + U_3 = U = IR$$

sau înlocuind:

$$IR_1 + IR_2 + IR_3 = IR$$

sau

$$R_1 + R_2 + R_3 = R.$$

Deci rezistenţa echivalentă a unui sistem de rezistori legaţi în serie este egală cu suma rezistenţelor rezistorilor.

Rezistori legaţi în paralel. Fie trei rezistori *AB*, *CD*, *EF* cu rezistenţele R_1, R_2, R_3 (fig. 22, *a*). Legăm capetele *A*, *C* şi *E* împreună într-un nod şi capetele *B*, *D*, *F* împreună într-un alt nod. Se obţine o legătură în paralel (sau în derivaţie) a rezistorilor (fig. 22, *b*). Fiecare ramură a acestei grupări constituie o derivaţie.

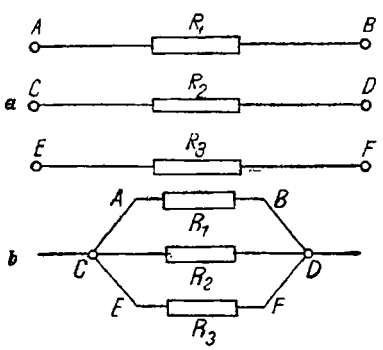


Fig. 22

Introducem gruparea în circuitul unui generator electric (fig. 23). Fie N_1 şi N_2 nodurile de legătură ale grupării.

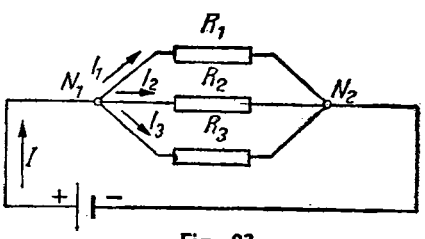


Fig. 23

Curentul de intensitate I ajungînd la nodul N_1, se ramifică în curenţii derivaţi de intensităţi I_1, I_2, I_3.

Potrivit *legii conservării sarcinilor electrice*, într-un conductor izolat sau într-un circuit electric închis suma sarcinilor electrice pozitive şi a celor negative rămîne constantă şi atunci cînd din cauza

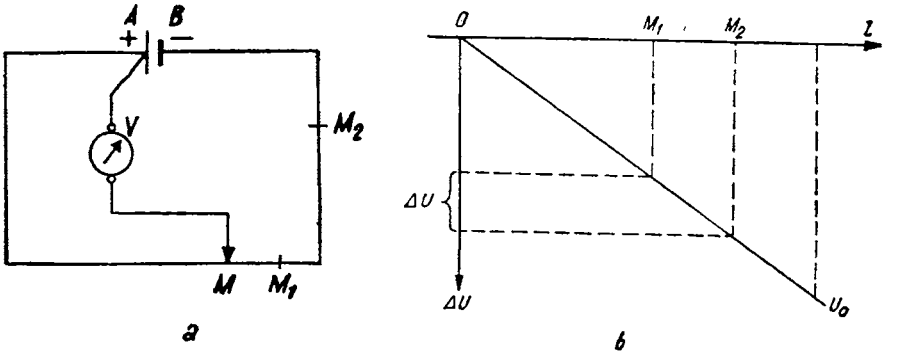


Fig. 25

Concluziile la care am ajuns ne permit să calculăm ce tensiune trebuie să furnizeze o rețea electrică pentru a se obține o anumită tensiune (dorită) la bornele receptorului.

De exemplu să facem acest calcul pentru o sobă electrică de putere $P=500$ W și $R=20$ Ω. Prin calcul se găsește $I=5$ A.

Să presupunem că rezistența firelor de legătură este $R_1=1$ Ω.

Pe baza legii lui Ohm se calculează tensiunea la bornele consumatorului (sobei electrice):

$$U=20\ \Omega \cdot 5\ \text{A}=100\ \text{V}.$$

Atunci tensiunea la rețea U_0 trebuie să fie:

$$U_0=U_1+U \text{ și } U_0=5\ \text{V}+100\ \text{V}=105\ \text{V}$$

unde $U_1=5$ V reprezintă căderea de tensiune în firele de legătură.

O cădere de potențial are loc în mod continuu de la polul pozitiv al generatorului, la polul negativ.

Diferența de potențial dintre polul pozitiv al generatorului și un punct oarecare M luat în lungul circuitului exterior (fig. 25, *a*) variază liniar cu lungimea circuitului exterior omogen și de secțiune uniformă (fig. 25, *b*):

$$V_A—V_M=K \cdot l,$$

unde $V_A—V_M$ este tensiunea dintre polul pozitiv al generatorului și punctul considerat.

19. Rezistența voltmetrului

Orice voltmetru prezintă o rezistență electrică. Cînd se măsoară o tensiune electrică, prin aparat trece un curent electric de intensitate I.

Întrucît un voltmetru nu poate suporta un curent mai intens decît o valoare limită I_0, înseamnă că un voltmetru dat nu poate măsura o tensiune mai mare ca $U_0 = I_0 R_v$, unde R_v este rezistența proprie a voltmetrului.

Această valoare maximă ce se poate măsura U_0 se numește *limită de măsurare.*

Există voltmetre cu care se pot măsura tensiuni cuprinse între 0 și 6 V, 0 și 12 V, 0 și 15 V, 0 și 250 V etc.

Totuși cu un voltmetru dat, avînd o limită de măsurare proprie U_0, se pot măsura și tensiuni mai mari, dacă se pune în serie cu aparatul de măsură un rezistor avînd o anumită rezistență.

Să luăm un exemplu: un circuit parcurs de un curent cu intensitatea I prezintă între punctele M și N (fig. 26) o tensiune U mai mare ca limita de măsurare U_0.

Pentru măsurarea tensiunii se leagă o bornă a voltmetrului direct la punctul M, iar cealaltă prin intermediul unui rezistor de rezistență R_1 la punctul N.

Ne propunem să determinăm această rezistență R_1 considerînd că tensiunea maximă pe care trebuie s-o măsoare voltmetrul este U.

Aplicînd legea lui Ohm, putem scrie:

$$I = \frac{U_0}{R_v} = \frac{U}{R_v + R_1} = \frac{U - U_0}{R_1},$$

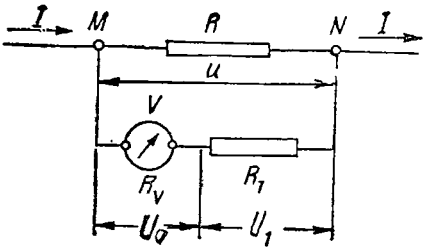


Fig. 26

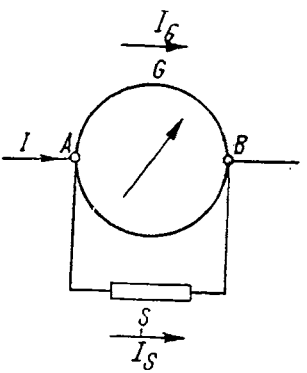


Fig. 27

de unde:

$$R_1 = R_v \frac{U - U_0}{U_0}.$$

Dacă $U - U_0 = nU_0$, se obține formula simplă

$$R_1 = nR_v \text{ unde } n = \frac{U}{U_0} - 1.$$

Șuntul. Galvanometrele și ampermetrele prezintă și ele o limită de măsurare a intensității curenților.

Această limită de măsurare poate fi extinsă la curenți mai intenși dacă se folosește șuntul. Acesta este un rezistor conectat în paralel cu galvanometrul (fig. 27).

Curentul principal I se ramifică în nodul A astfel încît o parte trece prin galvanometrul I_G, iar restul prin șunt, I_S.

După legea I a lui Kirchhoff pentru curenții derivați

$$I = I_G + I_S.$$

Dacă R_G este rezistența galvanometrului și R_S rezistența șuntului, atunci se poate scrie:

$$I_S R_S = I_G R_G$$

(legea lui Ohm).

Din această relație se obține rezistența șuntului:

$$R_S = R_G \frac{I_G}{I_S}.$$

Se pot construi șunturi pentru diferite intensități de curent. Pe fiecare șunt este scrisă limita de măsurare pentru care este construit. Astfel sînt șunturi pentru 100 mA, 0,5 A, 1 A, 2 A etc.

Șunturile sînt anexe ale unui ampermetru dat. În utilizarea șuntului întreaga scală a galvanometrului valorează cît arată șuntul. Astfel dacă scala ampermetrului are 10 diviziuni și se folosește cu un șunt de 100 mA, valoarea unei diviziuni este de 10 mA.

E. Energia și puterea curentului electric

20. Unități de măsură

Energia furnizată de generator este transportată de curentul electric în toate părțile circuitului închis.

Valoarea acestei energii poate fi calculată pentru o porțiune de circuit între extremitățile căreia este stabilită o tensiune electrică U.

$$W = Q \cdot U;\ Q = It \text{ și deci } W = UIt, \tag{10}$$

iar puterea electrică dezvoltată în aceeași porțiune de circuit este

$$P = \frac{W}{t} \text{ sau } P = UI.$$

Considerînd legea lui Ohm, pot fi obținute și alte formule echivalente pentru putere:

$$P = RI^2 \text{ sau } P = \frac{U^2}{R}.$$

Unitatea de putere în SI este wattul, simbol W:

$$1\ \text{W} = 1\ \Omega \cdot 1\ \text{A}^2.$$

Se utilizează și submultiplii (mW și μW) sau multiplii (kW și MW) wattului

$1\ \text{mW} = 10^{-3}$ W; $1\ \mu\text{W} = 10^{-6}$ W, utilizate mai ales în radiotehnică.

1 kW = 1 000 W (pentru măsurarea puterii electromotoarelor);

$1\ \text{MW} = 10^6$ W (pentru măsurarea puterii electrice a centralelor electrice).

Puterea electrică consumată într-un receptor se măsoară cu wattmetrul. Energia electrică consumată de un receptor se măsoară cu contorul.

21. Transformarea energiei electrice în cantitate de căldură. Legea lui Joule

Experiența arată că un curent electric încălzește conductorul prin care trece.

Această încălzire demonstrează transformarea energiei electrice în cantitate de căldură. Procesul acesta are loc conform legii transformării și conservării energiei.

Deci, dacă notăm cu Q cantitatea de căldură rezultată și cu W energia electrică transformată, relația de transformare va fi $Q = W$, deci:

$$Q = W = RI^2t. \tag{11}$$

Adică: *cantitatea de căldură dezvoltată într-un conductor de un curent electric este proporțională cu rezistența conductorului, cu pătratul intensității curentului și cu timpul* (legea lui Joule).

În Sistemul Internațional Q e dat în jouli, dacă R e exprimat în ohmi, I în amperi și t în secunde.

Legea poate fi verificată experimental prin montajul din figura 28. Același curent I trece prin doi rezistori R_1 și R_2 introduși în calorimetrele C_1 și C_2 în care se găsesc cantități egale din aceleași lichide (apă sau petrol).

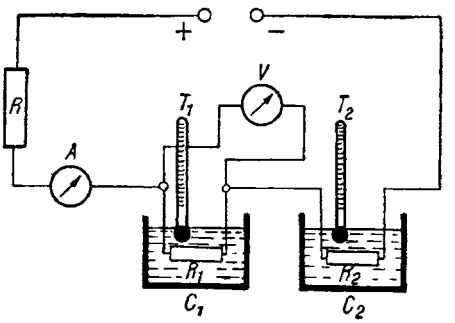


Fig. 28

Termometrele T_1 și T_2 arată după un timp θ creșterile de temperatură $\Delta_1 T$ și $\Delta_2 T$.

Se dezvoltă cantitățile de căldură:

$Q_1 = mc\Delta_1 T$;

$Q_2 = mc\Delta_2 T$; raportul lor este $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\Delta_1 T}{\Delta_2 T}$.

Se constată că $\frac{\Delta_1 T}{\Delta_2 T} = \frac{R_1}{R_2}$ și deci $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_1}{R_2}$. (12)

Pe de altă parte, dacă aplicăm legea lui Joule, obținem:

$Q_1 = R_1 I^2 t$;

$Q_2 = R_2 I^2 t$; raportul lor dă $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_1}{R_2}$,

deci relația (12) verifică legea lui Joule.

Într-o altă serie de experiențe se variază timpul. În acest caz e suficient un singur calorimetru; al doilea calorimetru se scoate din circuit.

Se obține: $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\Delta_1 t}{\Delta_2 t} = \frac{\theta_1}{\theta_2}$,

unde θ_1 și θ_2 sînt duratele trecerii curentului prin calorimetru.

Variind intensitatea curentului, găsim:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\Delta_1 T}{\Delta_2 T} = \frac{I_1^2}{I_2^2},$$

F. Aplicațiile efectului termic al curentului electric

a. **Cuptoarele electrice.** Sînt utilizate în industria metalurgică la topirea metalelor și călirea oțelurilor. În *cuptoarele cu rezistență* căldura se dezvoltă în rezistori de forme speciale spirale sau bare.

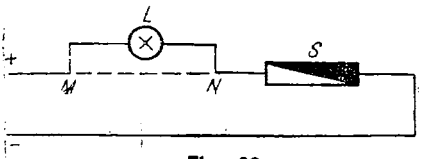


Fig. 29.

Cuptoarele electrice au numeroase avantaje față de alte tipuri de cuptoare, între altele ele pot fi automatizate.

În țara noastră se folosesc cuptoare electrice la Reșița, Hunedoara, la Fabrica de țevi Roman, la Uzinele de tractoare din Brașov etc.

b. **Siguranța fuzibilă.** Este un fir subțire de sîrmă, cu lungime și secțiune determinată, care se pune în serie în circuitul electric spre a proteja instalația electrică împotriva curenților intenși.

Cu *siguranța fuzibilă* se evită stricăciunile produse de un *scurtcircuit*. Dacă între *M* și *N* (fig. 29) se stabilește o legătură în paralel printr-un fir metalic de rezistență neglijabilă față de rezistența becului *L*, se produce un scurtcircuit.

În momentul producerii scurtcircuitului firul metalic care constituie siguranța *S* se topește prin efect termic și întrerupe circuitul, protejînd astfel instalația electrică.

Siguranțele se construiesc pentru diferite intensități de curent.

c. **Ampermetrele și voltmetrele termice** sînt și ele bazate pe efectul termic al curentului electric.

Aceste aparate sînt însă în general puțin precise și de aceea sînt mai rar utilizate.

Întrebări recapitulative

1. **Ce este tensiunea electromotoare?**
2. **Care este enunțul legii lui Ohm pentru o porțiune de circuit și pentru întregul circuit?**
3. **Ce este un reostat? Ce fel de reostate cunoașteți?**
4. **În cîte moduri distincte se pot lega între ei conductorii?**
5. **Ce este căderea de tensiune și cum variază ea în lungul unui circuit?**
6. **Ce condiție trebuie să îndeplinească un voltmetru pentru a nu se face erori prea mari în utilizarea lui? Dar un ampermetru?**
7. **Ce unități de măsură cunoașteți pentru puterea și energia curentului electric și cum se definesc?**

Exerciţii

1. Doi rezistori se leagă în serie şi au o rezistenţă echivalentă de 10 Ω. Aceiaşi rezistori legaţi în paralel prezintă o rezistenţă echivalentă de 2,4 Ω. Ce valoare are rezistenţa fiecărui rezistor?

R: $R_1=4\ \Omega$; $R_2=6\ \Omega$.

2. Ce rezistenţă trebuie să aibă un rezistor legat în serie cu un voltmetru a cărui limită de măsurare este de 12 V pentru a putea măsura cu el o tensiune de 120 V? Rezistenţa voltmetrului este $R_v=150\ \Omega$.

R: $R=1\,350\ \Omega$.

3. Un galvanometru cu limită de măsurare 10 mA şi $R_g=50\ \Omega$ urmează a fi utilizat la măsurarea unui curent a cărui valoare maximă este de 100 mA. Să se calculeze rezistenţa şuntului ce trebuie adăugat galvanometrului. Ce putere (exprimată în mW) absoarbe galvanometrul cînd este şuntat dacă întreaga sa scală are 100 diviziuni, iar acul deviază pînă la dreptul diviziunii 30?

R: 5,5 Ω ; 4,45 mW.

4. Ce curent trebuie să circule şi care va trebui să fie tensiunea la care să fie alimentat un fierbător electric pentru a produce în 10 min. fierberea unui litru de apă? Rezistenţa fierbătorului este de 30 Ω, randamentul 75%, iar temperatura iniţială a apei este 20°C.

R: $\approx$ 5 A; $\approx$ 150 V.

Curentul electric prin electroliţi

A. Electroliza şi legile ei

22. Electroliţi. Ioni. Conductibilitate ionică

Am văzut în lecţiile precedente că metalele prezintă o conductibilitate electronică ce se realizează prin electroni liberi.

Există însă şi alte substanţe care sînt conductoare, dar la care conductibilitatea electrică se datoreşte altor particule — ionii.

În această categorie de substanțe intră acizii, bazele, sărurile și unii oxizi metalici în stare topită sau în soluție în anumiți dizolvanți.

Experiență: Într-un cristalizator se introduc apă distilată și două sîrme de platină, care se pun în legătură cu o sursă de curent continuu (o baterie electrică).

Cu un galvanometru pus în circuit se constată lipsa curentului electric, ceea ce dovedește că apa distilată nu conduce curentul electric (fig. 30).

Dacă punem însă cîteva picături de acid sulfuric în apa din cristalizator, galvanometrul indică trecerea curentului electric prin soluție (fig. 31).

Se poate face experiența și cu o bază sau o sare. Cele două sîrme de platină se numesc electrozi.

Electrodul legat la polul pozitiv al sursei de curent se numește *anod (A)*, iar cel legat la polul negativ *catod (K)*.

Electrozii fiind legați la polii sursei de curent prezintă între ei o tensiune electrică *U*.

După cum se știe din chimie, soluțiile acizilor, bazelor, sărurile în stare topită sau în soluție, conțin ioni liberi — particule de substanță electrizate pozitiv sau negativ.

Substanțele cu legături ionice se numesc electroliți.

Experiența arată că electroliții care reprezintă a doua clasă de conductoare se descompun o dată cu trecerea curentului electric.

Deoarece trecerea curentului prin electroliți se produce prin mișcarea dirijată a ionilor pozitivi și negativi la electrozi, conductibilitatea electrică a electroliților a fost numită *conductibilitate ionică*.

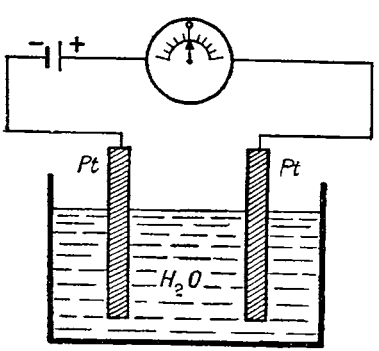


Fig. 30

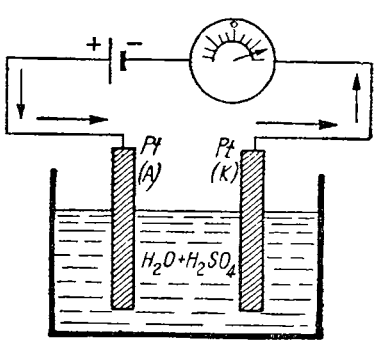


Fig. 31

23. Electroliza

Fenomenul complex care constă în dirijarea prin cîmp electric a ionilor unui electrolit spre electrozi şi neutralizarea lor la electrozi cu formare de noi substanţe se numeşte *electroliză.*

În timpul electrolizei, energia electrică a curentului se transformă parţial în energie chimică.

Procesul electrolizei a fost studiat şi lămurit de fizicianul englez Michael Faraday.

În laborator producerea electrolizei are loc într-un aparat special numit *voltametru.*

Aparatele industriale se numesc *cuve electrolitice* (vezi figura de la pag. 41).

Forma şi contrucţia voltametrului depind de destinaţia ce i se dă. El poate fi un simplu vas de sticlă în care se introduce lichidul de electroliză şi doi electrozi. Electrozii pot fi din cărbune de retortă sau metalici (Cu, Fe, Ni, Pt).

Desfăşurarea procesului electrolizei se poate arăta cu un voltametru de sticlă constituit dintr-un tub în formă de U cu doi electrozi de cărbune (fig. 32). În el se introduce clorură de plumb în stare topită: $PbCl_2$. Cu o baterie electrică E aplicăm voltametrului o tensiune U. Constatăm că după cîtva timp (1—2 min), catodul K se acoperă cu plumb, iar la anod se dezvoltă clor, care se recunoaşte după miros. În acest caz are loc o descompunere a clorurii de plumb ($PbCl_2$) în elementele ei componente: Pb şi Cl. Galvanometrul G indică trecerea unui curent electric I.

Explicaţia este următoarea: în clorura de plumb topită se găsesc ioni liberi de plumb şi de clor. Aflîndu-se în cîmpul electric creat de

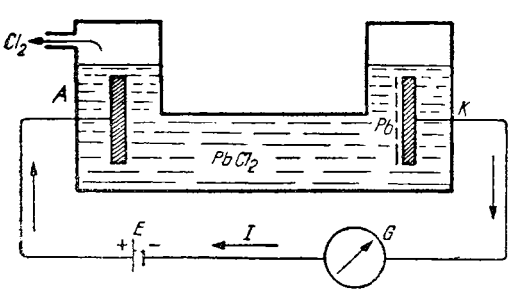


Fig. 32

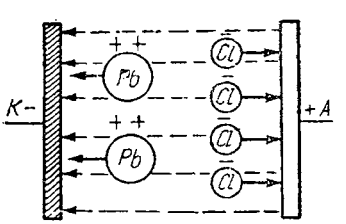


Fig. 33

tensiunea dintre electrozi, acești ioni încep să se miște dirijat spre electrozi, sub acțiunea forțelor electrice (fig. 33).

Ionii de plumb Pb^{2+} (cationi) se mișcă în sensul liniilor de forță ale cîmpului electric, adică spre catod, iar ionii de Cl^- în sens contrar, adică spre anod (anionii). Mișcarea ionilor este uniformă.

La contactul cu electrozii, ionii se neutralizează, primind sau cedînd sarcini electrice și se transformă în substanțe neutre:

$Pb^{2+} + 2e \rightarrow Pb$ (atom de Pb);

$2Cl^- - 2e \rightarrow 2Cl$ (doi atomi de clor).

Cei doi curenți de ioni produc o trecere de electroni de la catod la anod și astfel curentul electric prin electrolit apare ca un curent de transport prin intermediul ionilor.

Se observă următoarea regulă în electroliză: metalele și hidrogenul (fiindcă dau ioni pozitivi) se separă la catod, radicalii acizi și oxidrilul (fiindcă dau ioni negativi) se separă la anod.

Cele dintîi produse ce apar în electroliză la electrozi, ca urmare a neutralizării ionilor, se numesc *produse primare.*

În majoritatea proceselor de electroliză produsele primare dau naștere, prin reacții chimice, unor produse secundare (vedeți și manualul de chimie an. I liceu).

24. Legile electrolizei

Electroliza urmează două legi descoperite de Faraday.

Legea I. **Cantitatea de substanță m separată prin electroliză la un electrod este proporțională cu intensitatea curentului și cu timpul cît a trecut acesta.**

$$m = K \cdot I \cdot t, \tag{13}$$

unde K este un coeficient de proporționalitate, numit *echivalent electrochimic* al substanței depuse.

Fiindcă $I \cdot t = Q$, formula care exprimă legea I se mai poate scrie și astfel: $m = K \cdot Q$.

Din această formulă se obține:

$$K = \frac{m}{Q}, \tag{14}$$

Tabel cu echivalenții electrochimici pentru cîteva substanțe

Substanța	K, în mg/C
Hidrogen	0,0104
Argint	1,118
Oxigen	0,0829
Cupru	0,329
SO_4	0,498

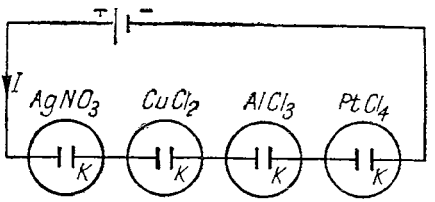


Fig. 34

adică

echivalentul electrochimic este cantitatea de substanță separată la un electrod de o cantitate de electricitate egală cu un coulomb.

Coeficientul K este foarte mic. El se poate măsura în g/C sau mg/C.

Legea a II-a stabilește dependența echivalentului electrochimic de natura substanței.

Experiență: Se pun în serie mai multe voltametre cu electroliți diferiți: $AgNO_3$, $CuCl_2$, $AlCl_3$, $PtCl_4$ în soluție și se introduc într-un circuit cu o sursă de curent continuu, conform schemei din figura 34.

După trecerea unui timp determinat se separă la catozii voltametrelor m_1 grame argint, m_2 grame cupru, m_3 grame aluminiu, m_4 grame platin.

Voltametrele fiind în serie, aceeași cantitate de electricitate a produs electroliza în fiecare voltametru.

Orice metal se caracterizează prin mărimea chimică numită *echivalent chimic*. Notăm echivalentul chimic cu litera M. Prin definiție $M = \frac{A}{n}$, unde A reprezintă masa atomică și n valența metalului.

Fie M_1, M_2, M_3, M_4 echivalenții chimici ai metalelor considerate, Ag, Cu, Al și Pt.

Prin numeroase experiențe efectuate cu un montaj ca cel din figura 34 se constată că:

$$\frac{m_1}{M_1} = \frac{m_2}{M_2} = \frac{m_3}{M_3} = \frac{m_4}{M_4} = \text{constant},$$

rezultat care exprimă:

Cantităţile de substanţe separate la catod de aceeaşi sarcină electrică, din electroliţi diferiţi, sînt proporţionale cu echivalenţii chimici ai acestor substanţe.

Considerînd şi legea I, relaţia de mai sus duce la o altă relaţie:

$$m_1 = K_1 \cdot Q \qquad \frac{K_1 Q}{M_1} = \frac{K_2 Q}{M_2} = \frac{K_3 Q}{M_3} = \frac{K_4 Q}{M_4} = \text{constant sau}$$

$$m_2 = K_2 \cdot Q$$

$$m_3 = K_3 \cdot Q$$

$$m_4 = K_4 \cdot Q \qquad \frac{K_1}{M_1} = \frac{K_2}{M_2} = \frac{K_3}{M_3} = \frac{K_4}{M_4} = \text{constant.}$$

Pe baza ultimei relaţii putem enunţa astfel *legea a II-a a electrolizei:*

Echivalenţii electrochimici ai substanţelor separate prin electroliză sînt proporţionali cu echivalenţii lor chimici.

Valoarea raportului constant dintre echivalentul electrochimic şi echivalentul chimic este 0,00001036 cînd K se măsoară în g/C.

Urmează deci că putem scrie în general:

$\frac{K}{M} = 0{,}00001036$ g/C pentru orice substanţă ce se separă la un electrod prin electroliză.

Cele două legi pot fi întrunite şi exprimate printr-o singură formulă:

$m = 0{,}00001036 \cdot M \cdot I \cdot t$ sau

$m = 0{,}00001036\ M \cdot Q.$

Ultima formulă ne conduce la un rezultat foarte important.

Să presupunem că efectuăm electroliza pînă ce se separă la un electrod o cantitate de substanţă $m_0 = M$ grame, adică egală cu un echivalent gram. În acest caz putem scrie că:

$M = 0{,}00001036 \cdot M \cdot Q_0.$

Simplificînd, se obţine

$$1\ \text{C} = 0{,}00001036\ Q_0$$

şi

$$Q_0 = \frac{1\ \text{C}}{0{,}00001036} \approx 96\,500\ \text{C}.$$

Acest rezultat se interpretează astfel:

Pentru separarea unui echivalent gram de substanţă la un electrod este necesară aceeaşi cantitate de electricitate, indiferent care

ar fi substanța ce se separă. Această cantitate de electricitate este deci o constantă =96 500 C și a fost numită numărul lui Faraday. Pentru acest număr se folosește simbolul F.

În funcție de acest număr, legile I și II ale electrolizei se pot exprima prin relația:

$$m = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n} \cdot Q \text{ sau } m = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n} \cdot I \cdot t. \tag{15}$$

25. Importanța teoretică a legilor electrolizei

Într-o conferință pe care a ținut-o la Londra în 1881 Helmholtz, apreciind importanța legii a II-a a lui Faraday, a arătat că cea mai bună explicație a legilor electrolizei se poate da dacă se admite existența unei sarcini elementare pe care o poartă ionul monovalent.

Sarcina aceasta purtată de ionul monovalent ar fi un fel de atom de electricitate reprezentînd cea mai mică cantitate de electricitate.

Cercetări numeroase au confirmat acest punct de vedere, astfel că astăzi considerăm că orice sarcină electrică este un număr întreg de sarcini elementare, ceea ce înseamnă că *sarcinile electrice au o structură discontinuă.*

O demonstrație simplă ne conduce la acest rezultat.

Să considerăm că în electroliza unei substanțe cationul are masa atomică A și valența n. El poartă o sarcină q.

$N = 6{,}023 \cdot 10^{23}$ fiind numărul lui Avogadro, într-un echivalent gram de substanță sînt $\frac{N}{n}$ atomi. Acești atomi au rezultat prin neutralizarea unui număr egal de ioni.

Sarcina electrică transportată a fost:

$$Q_0 = \frac{N}{n} \cdot q = 96\,500 \text{ C}.$$

Se obține $q = \frac{96\,500 \text{ C}}{N} \cdot n$.

Întrucît n nu poate fi decît un număr întreg din șirul 1, 2, 3 etc., urmează că ionul monovalent poartă sarcina.

$$q_1 = \frac{96\,500 \text{ C}}{N}.$$

Ionul bivalent, sarcina $q_2 = \frac{96\,500\ C}{N} \cdot 2$

Ionul trivalent, sarcina $q_3 = \frac{96\,500\ C}{N} \cdot 2$

și în general $q_n = n\frac{F}{N}$ pentru un ion cu o valență n.

Cea mai mică sarcină electrică este deci $q_1 = \frac{96\,500}{N}$ C.

Particula elementară care poartă această sarcină a fost numită în 1891 electron.

Sarcina electronului este deci $q_1 = e = \frac{F}{N} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C.

B. Aplicațiile electrolizei în tehnică

Numeroasele aplicații ale electrolizei au dus la constituirea unei ramuri importante a chimiei — *electrochimia.*

În cadrul electrochimiei intră:

a. electrometalurgia;

b. galvanotehnica;

c. obținerea de diverse substanțe pe cale electrolitică.

a. **Electrometalurgia** este obținerea unui metal pe cale electrolitică, din combinațiile lui naturale.

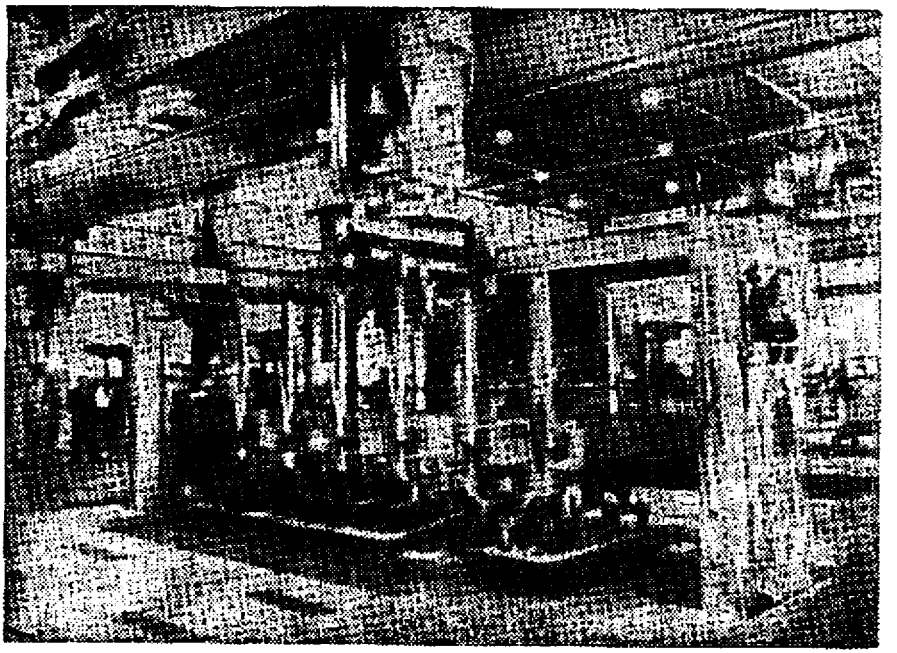
Prin metoda electrolitică se obțin metalele alcaline, unele metale alcalino-pământoase, aluminiul etc. sau se rafinează unele metale fabricate prin metode chimice, cum este cazul cuprului.

Cea mai importantă realizare în electrometalurgie rămîne însă *fabricarea aluminiului.*

În principiu, aluminiul se obține prin electroliza oxidului de aluminiu, dizolvat în criolit topit. Oxidul de aluminiu Al_2O_3 cît mai curat posibil este pregătit prin supunerea minereului de aluminiu la un tratament chimic.

Vasul electrolitic este căptușit cu praf de cărbune presat, care constituie catodul.

Se folosesc mai mulți anozi din cărbune de retortă care sînt introduși în soluția de oxid de aluminiu și criolit topit.



Cuve de electroliză la Combinatul de aluminiu Slatina

Curenții utilizați sînt de mare intensitate și căldura dezvoltată întreține aluminiul în stare topită.

b. **Galvanotehnica** prezintă două ramuri:

— galvanostegia;

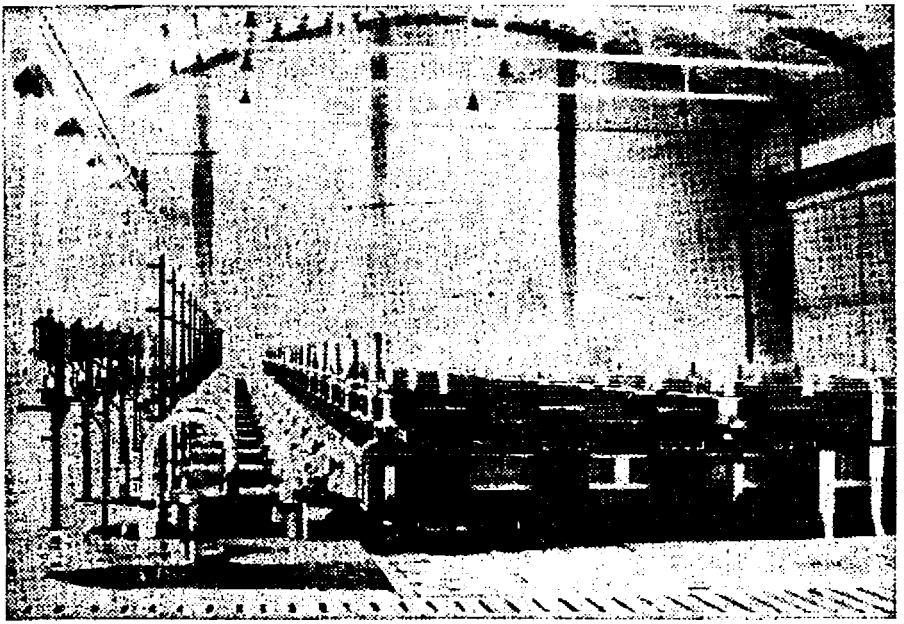
— galvanoplastia.

Galvanostegia este tehnica depunerilor metalice aderente pe suprafața unor corpuri.

După felul metalului care se depune, operația aceasta se numește argintare, aurire, nichelare, cromare etc.

În toate cazurile, obiectul ce urmează a fi acoperit cu metal constituie catodul. Anodul este din metalul ce se depune, iar electrolitul este o sare a metalului.

Pentru ca depunerea să fie cît mai durabilă și mai frumoasă, se folosesc diferite rețete.



Celulele de electroliză a sării de bucătărie la Combinatul chimic Borzești

Astfel, argintarea se face cu o soluție de cianură dublă de argint și potasiu, aurirea cu clorură de aur și cianură de potasiu, nichelarea cu sulfat dublu de nichel și amoniu etc.

Prin *galvanoplastie* se înțelege arta de a modela metalele, de a reproduce, după un tipar, prin electroliză, un obiect dat.

Tiparul se poate face din ceară, gutapercă etc. Suprafața tiparului se acoperă cu praf de grafit, spre a-l face bun conductor. Ca anod se folosește metalul din care se face reproducerea, iar electrolitul este o sare a aceluiași metal în soluție. Cînd depunerea a atins o grosime convenabilă se desprinde de tipar.

Galvanoplastia este utilizată în tipografie, la confecționarea tiparului pentru fabricarea discurilor de patefon etc.

c. **Obținerea de diverse substanțe.** Electroliza este una din metodele importante de fabricare a unor substanțe chimice de mare valoare industrială, ca soda caustică, soda, potasa caustică, hipocloriții, clorul, hidrogenul etc.

C. Polarizarea electrolizilor unui voltametru. Acumulatorii

Produsele primare ale electrolizei intră de cele mai multe ori în reacție cu electrozii sau cel puțin se depun pe electrozi, modificînd fizic sau chimic suprafața lor.

Să considerăm un voltametru cu electrozi de Pt și avînd ca electrolit o soluție de acid sulfuric.

Punînd voltametrul într-un circuit ca cel din figura 35 și închizînd circuitul prin întrerupătorul K_1 în timp ce întrerupătorul K_2 este deschis, se produce electroliza în voltametru.

La anodul A se degajă oxigen, iar la catodul K, hidrogen. O parte din gaze se dezvoltă în părțile superioare ale tuburilor de culegere, iar altă parte rămîne aderentă la electrozi, producînd o modificare fizică a suprafeței lor.

Observăm sensul deviației acului indicator al galvanometrului, care indică sensul curentului de electroliză I_e.

După circa 2 min se deschide întrerupătorul K_1, și astfel se elimină sursa de curent U din circuitul voltametrului.

Se închide apoi întrerupătorul K_2 și astfel rămîn în circuit închis voltametrul și galvanometrul. Galvanometrul indică de data aceasta un alt curent I_p, al cărui sens este contrar curentului de electroliză I_e. Acest curent se datorește fenomenului de polarizare a electrozilor și se numește *curent de polarizare.*

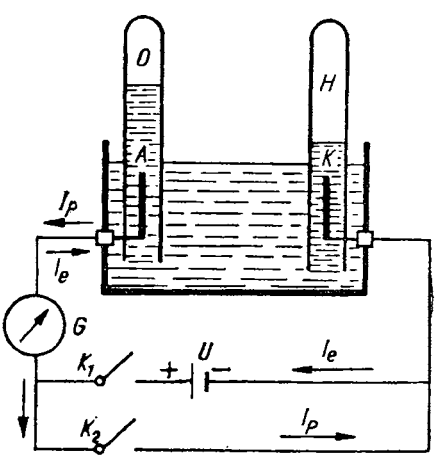


Fig. 35

Acestui curent de polarizare îi corespunde o tensiune electromotoare cu sediul în voltametru, numită tensiune *contraelectromotoare*.

Tensiunea contraelectromotoare este permanentă în timpul electrolizei și este totdeauna mai mică decît tensiunea de electroliză U.

Notînd cu E tensiunea contraelectromotoare, cu U tensiunea de electroliză, cu R rezistența electrică a voltametrului, intensitatea curentului prin voltametru este dată de relația:

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

Alteori polarizarea se datorește reacțiilor chimice secundare dintre produsele primare ale electrolizei și substanța electrozilor.

Astfel se petrece cazul cu un voltametru cu plăci de Pb și soluție de acid sulfuric.

Sînt însă și voltametre la care electrozii sînt făcuți din metalul sării care constituie electrolitul. Astfel este cazul unui voltametru cu plăci de Cu în soluție de $CuSO_4$. Deși apar și aici produse primare care se depun pe electrozi, totuși deoarece nu apare nici o asimetrie a electrozilor, fenomenul de polarizare nu se produce.

Fenomenul de polarizare se produce și la elementele galvanice și este datorit depunerii hidrogenului pe electrod. Efectul lui este scăderea intensității curentului. Eliminarea acestui hidrogen cu substanță oxidantă se numește *depolarizare*.

De exemplu elementul Leclanché are ca depolarizant MnO_2.

26. Acumulatorul electric

Fenomenul de polarizare prezintă însă și un aspect pozitiv. El stă la baza funcționării acumulatorului electric.

Un acumulator electric este de fapt un voltametru polarizat. El acumulează energia electrică sub forma de energie chimică prin reacțiile secundare care determină polarizarea.

Studiindu-se diferite feluri de voltametre, s-a stabilit că numai două dintre ele prezintă un randament bun și conservă în condiții superioare energia electrică.

Acești acumulatori electrici sînt: acumulatorul cu plăci de Pb sau acumulatorul acid și acumulatorul feronichel sau acumulatorul alcalin.

Cel mai răspîndit tip de acumulator este cel cu plăci de Pb, care s-a impus prin numeroase calităţi.

Lăsînd deoparte întreaga istorie a dezvoltării tehnicii acestui acumulator, trebuie să reţinem că astăzi un element de acumulator este confecţionat dintr-un vas de sticlă sau ebonit, în care sînt două tipuri de plăci fabricate cu oxizi de Pb după anumite reţete.

Una din plăci este placa pozitivă de culoare brun-roşcată şi care conţine PbO_3 ca substanţă activă şi cealaltă este placa negativă de culoare gri-cenuşie acoperită cu un strat de Pb spongios.

Pentru a încărca acumulatorul, se introduce în el o soluţie 20% H_2SO_4 şi apoi se pune la instalaţia de încărcat în curent continuu borna + la polul pozitiv, cealaltă la polul negativ al instalaţiei.

Încărcarea durează circa 10 h, după care tensiunea electromotoare atinge pentru un element valoarea de 2,6 V, care rămîne puţin timp şi apoi scade pînă la 2,1 V.

Mai multe elemente de acumulator legate între ele în paralel sau în serie formează o baterie.

Un acumulator se caracterizează prin:

a) *Capacitate,* care înseamnă cantitatea de electricitate pe care o poate da acumulatorul prin descărcare pînă la limita inferioară care pentru un singur element este de 1,85 V.

Capacitatea acumulatorului se măsoară în amperi-oră

$$1 \text{ Ah} = 3\,600 \text{ C}.$$

Există acumulatori (baterii) cu capacitate de 50 Ah, 100 Ah, 200 Ah etc.

Notînd cu N_1 şi N_2 numărul de amperi-ore la descărcare, respectiv încărcare şi cu W_1, W_2 energia eliberată, respectiv absorbită de acumulator, definim:

b) *Randamentul de sarcină:*

$$\eta_s = \frac{N_1}{N_2};$$

c) *Randamentul energetic:*

$$\eta_e = \frac{W_1}{W_2};$$

Acesta din urmă ajunge pînă la 80%.

Acumulatorii au variate întrebuinţări în tehnică.

Se pot folosi în instalaţiile de lumină sau de forţă, pot alimenta instalaţii de radio, instalaţii galvanotehnice etc.

Se întrebuinţează şi pentru alimentarea instalaţiei electrice a motorului de automobil.

Întrebări recapitulative

1. **Cum se explică trecerea curentului electric printr-un electrolit?**
2. **Cum se poate defini electroliza?**
3. **Ce dovedesc legile electrolizei?**
4. **De ce electroliza cu electrozi polarizabili nu poate fi făcută cu orice tensiune?**
5. **Cum se încarcă un acumulator?**
6. **Ce efect poate avea polarizarea electrozilor?**
7. **Cum s-ar putea măsura sarcina unui electron folosind electrozila?**

Exerciţii

1. Făcîndu-se electroliza unei soluţii de acid sulfuric în apă, într-un voltametru cu electrozi de Pt se constată că după 1 h masa soluţiei scade cu 2 g. Să se calculeze intensitatea curentului.

R: aprox. 6 A.

2. Ce cantitate de argint s-a depus la catod dintr-o soluţie de $AgNO_3$, dacă sarcina electrică care a străbătut electrolitul a fost de 100 000 C?

R: 111,8 g.

3. Cît Cu dintr-o soluţie de $CuSO_4$ depune într-o jumătate de oră un curent cu intensitatea de 5 A?

R: 2,961 g.

Electromagnetismul

I. Fenomene electromagnetice

A. Acţiuni electromagnetice

27. Magneţi permanenţi şi proprietăţile lor

Se întîlnesc în natură minereuri de fier, oxizi sau sulfuri, ca de exemplu, magnetitul (oxid feroferic Fe_3O_4), care au proprietatea de a atrage pilitura sau mici obiecte de fier, nichel, cobalt. Acestea constituie *magneţi naturali.*

Transmiterea magnetismului de la magneţii naturali unor bare de oţel călit a dus la confecţionarea magneţilor artificiali. Magnetizarea se realizează prin contact direct sau prin influenţă.

S-au făcut magneţi artificiali în formă de bară, potcoavă sau ace magnetice, care păstrează magnetizarea un timp foarte îndelungat şi se numesc *magneţi* permanenţi. Ei sînt folosiţi pentru producerea unui cîmp magnetic între polii lor sau în spaţiul înconjurător şi se fac din oţel călit sau aliaje de fier, cu Ni, Al sau Co. Se cunosc şi materiale ca cele din oţel moale, care se magnetizează foarte uşor, cînd sînt introduse într-o bobină parcursă de curent, dar care îşi pierd magnetizarea imediat ce încetează acţiunea de magnetizare. Aceste materiale se folosesc la construcţia maşinilor şi aparatelor electrice.

Pus în pilitură de fier, magnetul atrage pilitura mai mult la extremităţile lui, numite *poli magnetici,* şi mai puţin sau chiar deloc într-o zonă situată între aceşti poli numită *zonă neutră.*

Dacă suspendăm un ac magnetic în centrul lui de greutate, astfel încît să se poată roti în planul orizontal, el se orientează pe-o direcţie fixă care este aproximativ direcţia nord-sud geografică. Polul

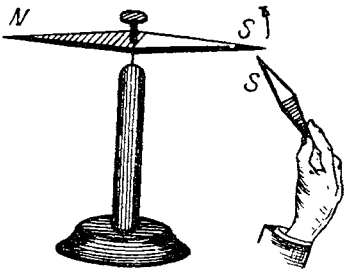


Fig. 36

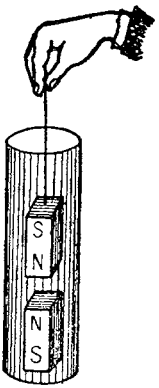


Fig. 37

îndreptat spre nord e numit *polul nord*, celălalt îndreptat către sud este *polul sud*. Orientarea acului se datorește magnetismului pămîntesc.

Polii de același nume se resping, cei de nume diferite se atrag (fig. 36). Doi magneți puși față în față se atrag sau se resping, după felul polilor apropiați.

O bucată de oțel adusă în vecinătatea unui magnet este atrasă de acesta. Se spune că magnetul creează într-o regiune din jurul său un cîmp magnetic. Ne putem convinge de existența cîmpului magnetic dacă într-un tub de sticlă așezăm doi magneți, ca în figura 37.

Magnetul de jos va respinge pe cel de deasupra, care va pluti la o distanță oarecare de magnetul de jos, în cazul cînd polii apropiați sînt de același semn și dacă magnetizarea este destul de puternică. Deci între cei *doi* magneți există un cîmp magnetic, iar spațiul din jurul și dintre cei doi magneți capătă însușiri speciale.

O altă experiență constă în așezarea unui carton, pe care s-a presărat pilitură de fier, pe o bară magnetică. Pilitura de fier se orientează după liniile de forță ale cîmpului magnetic și dă *spectrul magnetic* (fig. 38). Liniile sînt închise și ca sens, în exterior, ele ies din polul nord și intră în polul sud. După cum cîmpul magnetic este mai intens sau mai slab, liniile sînt mai dese sau mai rare.

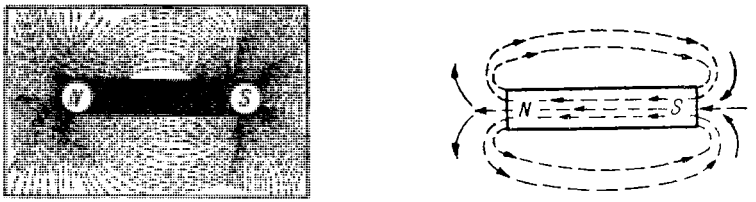


Fig. 38

Tangenta în fiecare punct la liniile de cîmp magnetic dă direcţia cîmpului magnetic în acel punct.

Mărimea, direcţia şi sensul cîmpului magnetic sînt precizate prin mărimea, direcţia şi sensul forţelor exercitate asupra diferitelor corpuri plasate în el.

28. Forţa electromagnetică: mărimea, direcţia şi sensul ei

Un curent electric creează în jurul său un cîmp magnetic. Un magnet mobil plasat în acest cîmp este supus unei forţe care-l poate devia. Conform principiului acţiunii şi reacţiunii, un conductor parcurs de curent va fi supus unor forţe, din partea cîmpului creat de un magnet. Experienţele de mai jos dovedesc aceasta.

O experienţă simplă (fig. 39) arată că un fir parcurs de curent este atras sau respins de cîmpul magnetic al magnetului. Atracţia sau respingerea depinde de sensul cîmpului creat de magnet şi de sensul şi direcţia curentului. În această interacţiune dintre cîmpul magnetic creat de curent şi cîmpul magnetului trebuie avut în vedere că forţele

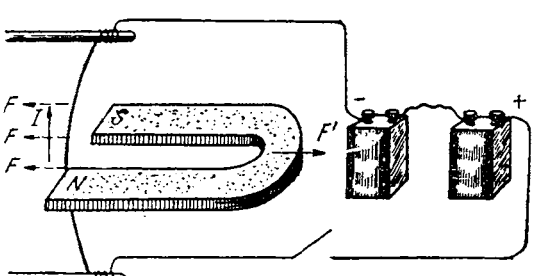


Fig. 39



Fig. 40

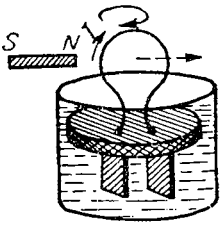


Fig. 41

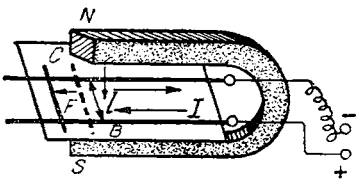


Fig. 42

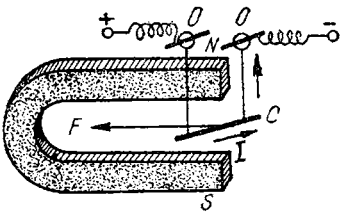


Fig. 43

de atracţie şi de respingere acţionează atît asupra conductorului (F) cît şi asupra magnetului (F').

Filamentul de wolfram al unei lămpi cu incandescenţă este deviat din poziţia sa normală cînd se apropie un magnet de balonul de sticlă al lămpii, aşa cum se arată în figura 40.

O pilă mobilă se poate realiza din două lame, una de zinc şi alta de cupru reunite printr-o spiră de cupru care traversează un dop de plută. Lamele sînt puse într-o soluţie de acid sulfuric. Se formează un element galvanic care dă un curent electric în spira de cupru ce are o rezistenţă electrică foarte mică. La apropierea unui magnet SN de spiră, aceasta este deplasată şi rotită, adică este supusă şi unei forţe ce-i dă o mişcare de translaţie dar şi unui cuplu (fig. 41).

Porţiunea mobilă C, dintr-un circuit electric închis, se mişcă între polii magnetului, fără să întrerupă circuitul format din două fire groase neizolate plasate pe o planşetă de lemn orizontală şi alimentat de la o sursă de curent (fig. 42).

De asemenea, un conductor suspendat, ca în figura 43, între polii unui magnet în formă de potcoavă, este deplasat de o forţă normală pe planul curent — cîmp magnetic. Această forţă se numeşte *forţă electromagnetică*.

Se constată experimental că intensitatea forţei F depinde de lungimea conductorului l şi intensitatea curentului electric I ce străbate conductorul. Pentru aceleaşi valori ale lungimii şi curentului, forţa electromagnetică variază atît pentru diferite valori ale cîmpului magnetic cît şi pentru diferite poziţii ale conductorului faţă de direcţia liniilor de cîmp în acelaşi cîmp magnetic.

Sensul forţei electromagnetice depinde de sensul curentului electric şi de sensul liniilor de cîmp.

Cîmpul magnetic creat de un curent ce circulă printr-un conductor sau de un magnet este caracterizat de o mărime vectorială, nu-

mită *inducție magnetică* și care se notează cu $\vec{B}$. Este un vector tangent în fiecare punct la liniile de cîmp magnetic (sau liniile de inducție magnetică).

În cazul cînd direcția vectorului inducției este perpendiculară pe direcția curentului, forța electromagnetică va avea valoarea maximă și va fi egală cu:

$$F=BIl. \tag{16}$$

Această relație exprimă *legea lui Laplace.*

Valoarea lui B găsită din această expresie va fi:

$$B=\frac{F}{Il} \tag{16'}$$

$$\langle B\rangle=\frac{\langle F\rangle}{\langle I\rangle\ \langle l\rangle}=\frac{N}{A\cdot m}=\frac{V\cdot s}{m^2}*$$

Se observă că dacă $I=1$ și $l=1$, *inducția magnetică* B *a unui cîmp magnetic uniform este numeric egală cu forța maximă cu care cîmpul acționează asupra unui conductor de lungime egală cu unitatea și parcurs de un curent de intensitate egală cu unitatea.*

Dacă direcția lui B face un unghi α cu direcția lui I

$$F=B\,I\,l\,\sin\alpha \tag{17}$$

Sensul forței electromagnetice se găsește folosind *regula mîinii stîngi* sau *regula lui Fleming:*

așezînd palma stîngă paralel cu conductorul, cu degetele în sensul curentului astfel încît inducția magnetică să intre prin palmă, sensul degetului mare al mîinii arată sensul forței electromagnetice.

Cîmpul de inducție magnetică acționează asupra curentului electric, deci asupra electronilor sau sarcinilor în mișcare. Se poate arăta aceasta dacă apropiem un magnet puternic de un arc electric ce funcționează între doi electrozi de cărbune. Arcul este deviat de cîmp ca și cum ar fi un conductor flexibil parcurs de curent.

---

* $\frac{N}{A\cdot m}=\frac{N}{\frac{C}{s}\cdot m}=\frac{N}{\frac{J}{Vs}\cdot m}=\frac{N}{\frac{N\cdot m^2}{V\cdot s}}=\frac{V\cdot s}{m^2}$;

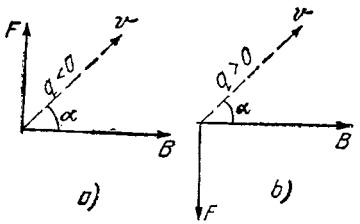


Fig. 44

Sensul în care este deviată sarcina electrică de către forța electromagnetică este dat tot de regula mîinii stîngi. În cazul unei sarcini negative $q<0$ (electroni sau ioni negativi), care se mișcă cu viteza v în cîmpul de inducție magnetică B (fig. 44, *a*) mîna stîngă se așază pe direcția lui v, cu degetele întinse în sensul curentului (deci invers lui v), în așa fel încît B să intre prin palmă și astfel degetul mare indică sensul forței electromagnetice.

Pentru o sarcină pozitivă $q>0$ (de exemplu pentru ioni pozitivi) mîna stîngă se așază cu degetele întinse pe direcția și în sensul lui v (deci în sensul curentului), B intră prin palmă și degetul mare indică sensul forței electromagnetice ca în figura 44, *b*.

Mărimea forței electromagnetice care acționează asupra unei sarcini electrice se poate găsi din legea lui Laplace, ținînd seama că: $I=\frac{q}{t}$;

$$F'=B\frac{q}{t}l=Bqv, \tag{18}$$

pentru cazul cînd sarcina se mișcă perpendicular pe direcția lui B și v reprezintă viteza de deplasare a sarcinii pe porțiunea l din conductor în timpul t.

În cazul cel mai general, cînd direcția de mișcare a sarcinii face un unghi α cu direcția lui B: *d*

$$F'=Bqv\sin\alpha. \tag{18'}$$

Această forță se numește *forța Lorentz.*

29. Fluxul de inducție magnetică

Inducția magnetică o putem defini prin densitatea fluxului de inducție magnetică.

Fluxul magnetic Φ *este constituit de totalitatea liniilor de inducție care intersectează o suprafață* S.

Cînd liniile de cîmp sînt paralele şi normale la S:

$$B=\frac{\Phi}{S} \text{ sau } BS=\Phi \qquad (19)$$

Dacă S nu este normală la liniile de cîmp şi este aşezată în S', poziţie ce o putem determina prin unghiul α dintre normala n' la suprafaţa şi direcţia liniilor de cîmp, atunci:

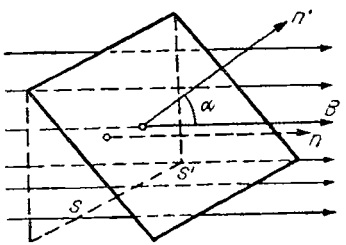


Fig. 45

$$\Phi=BS\cos\alpha \qquad (19')$$

În cazul cînd S este perpendiculară pe B, n şi B sînt pe aceeaşi direcţie, $\alpha=0$, $\cos\alpha=1$ şi fluxul are valoarea maximă (fig. 45).

$$\langle\Phi\rangle=\langle B\rangle\langle S\rangle=\frac{V\cdot s}{m^2}\cdot m^2=V\cdot s=Wb.$$

Deci în Sistemul Internaţional fluxul inducţiei magnetice se măsoară în weberi (Wb), unitate ce va fi definită din fenomenul de inducţie electromagnetică (v. § 39).

După cum am văzut, inducţia magnetică se măsoară în S.I. în: $\frac{V\cdot s}{m^2}=\frac{Vb}{m^2}$ sau tesla (T).

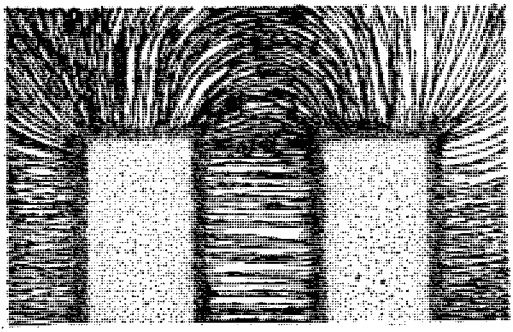
Tesla este inducţia magnetică ce produce un flux de 1 Wb *printr-o suprafaţă de* 1 m^2 *normală la cîmp.*

30. Permeabilitatea

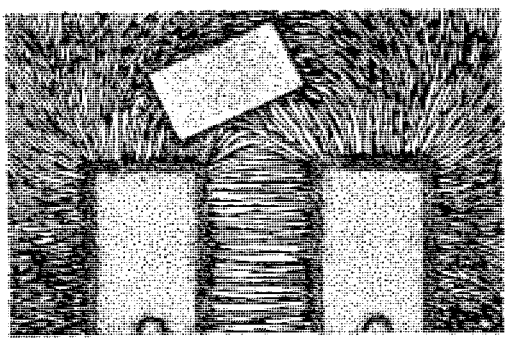
Dacă în calea liniilor de cîmp produse de un magnet (fig. 46, *a*, *b*) aşezat în aer punem o bucată de fier, observăm că distribuţia liniilor de cîmp se schimbă. Liniile de cîmp magnetic se îndesesc prin bucata de fier.

Printr-o secţiune transversală în bucata de fier va trece un număr mai mare de linii de cîmp decît prin aceeaşi suprafaţă în aer.

Raportul dintre numărul liniilor cîmpului magnetic pe unitatea de suprafaţă în mediul respectiv şi numărul liniilor pe unitatea de



a



b

Fig. 46

suprafață în prezența aceluiași cîmp în vid, măsoară influența mediului material asupra cîmpului magnetic. Această mărime se numește *permeabilitate relativă*, μ_r a mediului. După valoarea lui μ_r substanțele pot fi clasificate în:

— *Substanțe feromagnetice* cu $\mu_r \gg 1$, cum sînt fierul, nichelul, cobaltul sau aliaje cu Fe, Ni, Co, Mn. Permeabilitatea lor relativă este de ordinul sutelor, miilor sau zecilor de mii. De exemplu s-au realizat aliaje ca: *permalloy* (78,5% Ni+21,5% Fe), care are $\mu_r = 80\,000$—$100\,000$; *permendur*, care conține fier Armco (adică fier cu 0,05 impurități) +50% Co+1,8% vanadiu.

Aceste substanțe introduse într-un cîmp magnetic produc o modificare apreciabilă a liniilor de cîmp magnetic;

— *Substanțe paramagnetice*, cu $\mu_r > 1$. Aceste substanțe concentrează liniile de cîmp ca și substanțele feromagnetice, dar foarte puțin. În această categorie se încadrează Mn, Al, Cr, Sn, O_2, aerul care are, de exemplu, $\mu_r = 1{,}0000003$;

— *Substanțe diamagnetice*, cu $\mu_r < 1$. Dintre aceste substanțe fac parte Bi cu $\mu_r = 0{,}9998$, Ag, sticla, apa. Ele răresc liniile de cîmp ce trec prin ele, le împrăștie.

În calculul cîmpului magnetic produs de diferiți curenți sau magneți se folosește o mărime care este auxiliară, numită *intensitatea cîmpului magnetic* și notată cu $\vec{H}$.

Această mărime nu depinde de însuşirile mediului, dar exprimă influenţa intensităţii curentului şi formei conductorilor parcurşi de curent asupra cîmpului magnetic în punctul dat.

Inducţia magnetică $\vec{B}$ se exprimă în funcţie de intensitatea cîmpului magnetic $\vec{H}$ prin relaţia:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \tag{20}$$

unde μ este *permeabilitatea absolută a mediului.* Ea se exprimă în funcţie de permeabilitatea relativă prin:

$$\mu = \mu_r \mu_0,$$

μ_0 fiind *permeabilitatea vidului* şi are valoarea, rezultată din experienţe:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}.$$

H/m (henry pe metru) este unitatea în SI pentru permeabilitate şi va fi definită mai tîrziu.

B. Cîmpul magnetic al curentului electric. Legea lui Biot şi Savart

În anul 1820 Örsted, fizician danez, arată că trecerea curentului printr-un conductor dă naştere în jurul conductorului unui cîmp magnetic care acţionează asupra unui ac magnetic la fel ca şi cîmpul unui magnet. Într-adevăr dacă un fir vertical foarte lung străbătut de curent traversează un carton aşezat orizontal pe care e presărată pilitură fină de fier, în planul cartonului apar *linii închise* de cîmp magnetic ce au în vecinătatea firului forma unor circumferinţe concentrice la fir. Liniile de cîmp sînt aşezate în planul perpendicular pe curent (conductor) şi au sensul dat de *regula burghiului* sau *regula lui Maxwell.* Această regulă spune că: *dacă rotim burghiul astfel încît el să înainteze în sensul curentului, sensul de rotire este sensul liniilor de cîmp* (fig. 47).

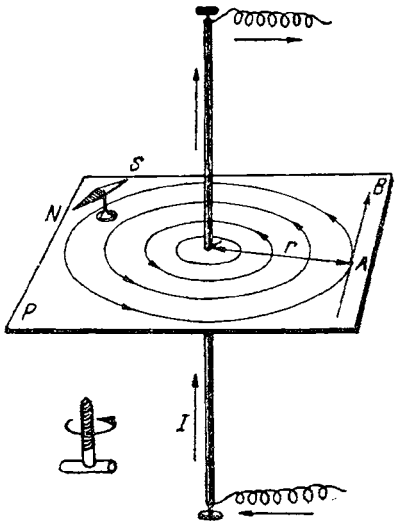


Fig. 47

31. Cîmpul magnetic creat de un curent rectiliniu

Valoarea inducției cîmpului magnetic B o putem determina măsurînd interacțiunea dintre cîmpul curentului cu curenții ce trec prin alți conductori. Biot și Savart, servindu-se de elementele din experiențele făcute de Örsted, au studiat într-o primă serie de experiențe cîmpul magnetic produs de un curent ce trece printr-un fir rectiliniu foarte lung. Firul trebuie luat foarte lung, pentru ca porțiunile de la capetele conductorului să nu influențeze valoarea cîmpului în punctul în care se fac determinările, așezat într-o regiune învecinată cu mijlocul firului.

Măsurătorile au arătat că inducția cîmpului magnetic (B) este proporțională cu intensitatea curentului (I).

Această proprietate servește astăzi la măsurarea intensității curentului cu ajutorul galvanometrelor, ampermetrelor etc. Factorul de proporționalitate depinde de forma circuitului traversat de curent. În cazul firului rectiliniu considerat infinit de lung s-a găsit că intensitatea cîmpului magnetic într-un punct situat la distanța r de fir, distanță măsurată pe perpendiculara dusă din punct la fir, este invers proporțională cu distanța r, deci:

$$B = \frac{\mu \cdot I}{2\pi r} \quad \text{și} \quad H = \frac{I}{2\pi r}, \tag{21}$$

H este exprimată în amperi pe metru (A/m), dacă I se măsoară în amperi și r în metri.

32. Cîmpul unei spire circulare

Pentru o spiră circulară de rază r parcursă de curent valoarea inducției cîmpului magnetic în centrul spirei se găsește

$$B = \frac{\mu I}{2r} \quad \text{și} \quad H = \frac{I}{2r}, \tag{22}$$

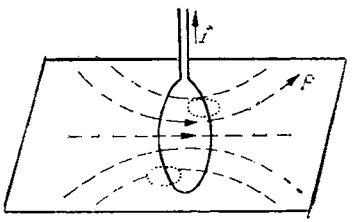


Fig. 48

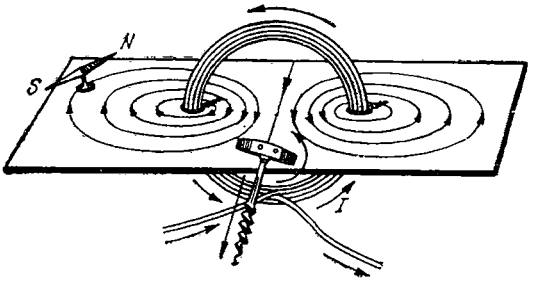


Fig. 49

dacă se calculează cîmpul produs de fiecare element de conductor al spirei parcurs de curentul I în centrul spirei și apoi se face suma lor, ținînd seama de mărime, direcție și sens, așa cum se află rezultanta forțelor. În cazul cînd sînt N spire ce alcătuiesc o bobină plată circulară, B devine:

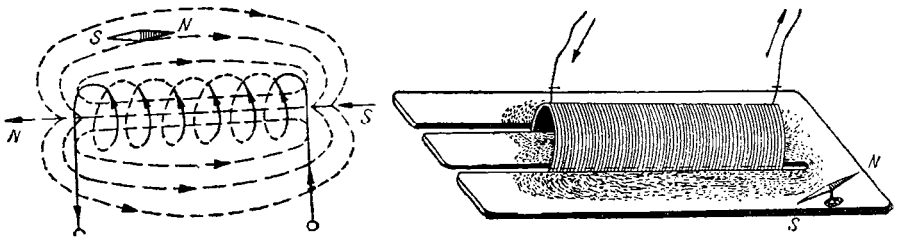
$$B = \frac{\mu NI}{2r} \text{ și } H = \frac{NI}{2r}, \qquad (22')$$

produsul NI arată numărul de amperi-spire. Intensitatea cîmpului magnetic H se măsoară în amperi pe metru (A/m). Figura 48 arată spectrul magnetic al unei spire circulare parcurse de curentul I. Determinarea sensului cîmpului se face aplicînd regula burghiului: rotind burghiul așezat perpendicular pe planul spirei în sensul curentului, înaintarea lui se face în sensul cîmpului B. O spiră circulară poate fi asimilată cu un magnet plat, numit *foiță magnetică*, avînd o față prin care ies liniile de cîmp magnetic și care este fața nord, și alta prin care intră liniile — fața sud.

Deoarece acțiunea magnetică în cazul unui cadru cu mai multe spire se multiplică cu numărul spirelor, acesta se numește *multiplicator* (fig. 49).

33. Cîmpul magnetic al solenoidului

Un fir conductor înfășurat elicoidal pe o carcasă cilindrică, avînd sau nu în interiorul ei un miez de material magnetic sau o tolă de transformator, constituie o bobină sau un *solenoid*. Teoretic, dacă firele solenoidului sînt așezate aproape unele de altele, ele constituie un sistem de curenți circulari avînd același ax și aceeași rază. Spectrul magnetic al unui solenoid arată ca în figura 50, *a* sau 50, *b*.



a Fig. 50 b

Acest spectru al liniilor de cîmp este asemănător cu cel al unei bare magnetice. Liniile cîmpului magnetic din interiorul solenoidului sînt paralele şi echidistante, deci cîmpul magnetic din interiorul solenoidului este uniform. În afară, la capetele solenoidului, liniile cîmpului magnetic se împrăştie. Sensul liniilor de cîmp este dat de regula burghiului, ca şi în cazul spirei circulare, sau dacă se aşază degetele mîinii drepte pe spire în sensul curentului, degetul mare desfăcut indică polul nord al solenoidului. Liniile de cîmp ies prin polul nord şi intră prin polul sud, ca şi la o bară magnetizată. Deci în exterior ele merg de la polul nord la sud, iar în interior de la polul sud la nord.

Solenoidul se comportă ca o bară magnetizată.

Experimental şi prin calcul se găseşte că pe ax în centrul unui solenoid foarte lung inducţia cîmpului magnetic B este dată de relaţia:

$$B = \frac{\mu N I}{l} \text{ şi } H = \frac{NI}{l}. \tag{23}$$

unde N este numărul total de spire, I este intensitatea curentului ce trece prin solenoid, iar l este lungimea solenoidului. Expresia lui B se poate pune şi în funcţie de $\frac{N}{l}$, adică numărul de spire pe unitatea de lungime, care se notează cu n, deci:

$$B = \mu n I. \tag{24}$$

Pornind de la oricare din relaţiile care dau pe H (pentru conductor liniar foarte lung, spiră, solenoid), putem defini unitatea de cîmp magnetic (A/m). În cazul cînd conductorul este o spiră, *unitatea de intensitate de cîmp* (A/m) *se defineşte ca fiind intensitatea în centrul unei spire cu diametrul un metru cînd este parcursă de un curent de 1 A.*

34. Fluxul unui solenoid

Ca un exemplu de calcul al fluxului putem lua cazul solenoidului.

Fluxul magnetic ce trece printr-o spiră a solenoidului este $\Phi_s = B \cdot S$, unde S este suprafața unei spire. Pentru toate cele N spire fluxul Φ în solenoid este

$$\Phi = N\Phi_s = N B \cdot S.$$

Inducția în centrul solenoidului de lungime l este dată de relația:

$$B = \mu \frac{N}{l} I = \mu n I,$$

deci

$$\Phi = \mu \frac{N^2}{l} I \cdot S = \mu n N \cdot I \cdot S.$$

Mărimile ce rămîn constante pentru un anumit solenoid pot fi exprimate printr-un coeficient, care se numește *inductanța* solenoidului și se notează cu L. Atunci:

$$\Phi = LI \text{ sau } L = \frac{\Phi}{I},$$

adică inductanța este un flux raportat la intensitatea de curent sau este numeric egală cu fluxul solenoidului cînd el este parcurs de un amper.

Inductanța $L = \frac{\Phi}{I}$ se măsoară în weberi pe amper (Wb/A). Această unitate poartă numele de *henry* (*H*).

Un henry este inductanța unei spire circulare în care ia naștere un flux magnetic de un weber cînd spira este străbătută de un curent de un amper.

C. Acțiunea reciprocă a curenților electrici. Forța electrodinamică

Între doi conductori parcurși de curent ce se găsesc în vecinătate se exercită forțe de atracție sau de respingere, numite *forțe electrodinamice.*

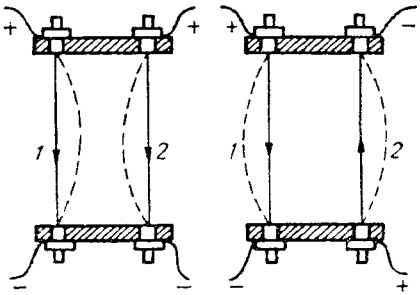
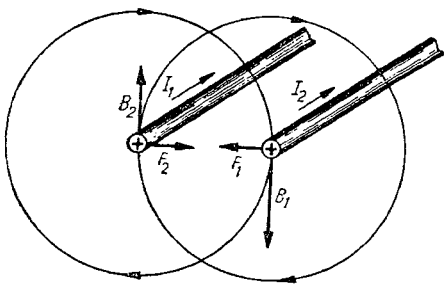


Fig. 51



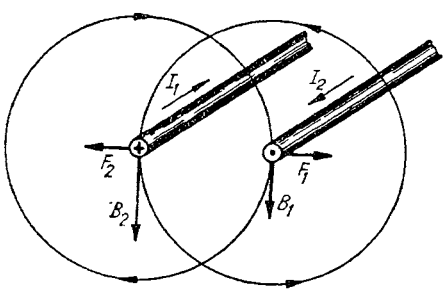


Fig. 52

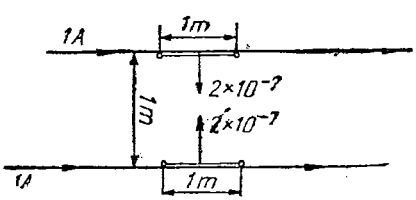


Fig. 53

Prin două plăci izolante (ca să nu se scurtcircuiteze) sînt întinse două fire flexibile paralele, străbătute de doi curenți, cînd în același sens cînd în sens invers (fig. 51).

Fiecare curent ce trece prin fire dă naștere unui cîmp magnetic de mărime, sens și direcție așa cum s-a arătat pentru un fir rectiliniu. Se poate considera deci curentul din firul 2, de exemplu, ca fiind plasat în cîmpul magnetic creat de curentul 1 și atunci conductorul 2 va fi supus unei forțe electromagnetice:

$$F_1 = B_1 I_2 l,$$

unde B_1 este inducția creată de curentul I_1, I_2 este curentul ce circulă prin conductorul 2, iar l lungimea conductorului 2 plasat în cîmpul de inducție B_1. Dar:

$$B_1 = \frac{\mu I_1}{2\pi d},$$

unde d este distanța dintre conductori. Deci forța ce se exercită între conductori este:

$$F_1 = \frac{\mu I_1}{2\pi d} I_2 l.$$

Aceasta este forța electrodinamică ce acționează asupra conductorului 2 de lungime l. Asupra conductorului 1 de aceeași

lungime va acționa o forță asemănătoare:

$$F_2 = \frac{\mu I_2}{2\pi d} I_1 l.$$

Aceste forțe sînt proporționale cu intensitățile curenților I_1 și I_2, cu lungimea conductorilor și invers proporționale cu distanța dintre conductori. Direcția forțelor electrodinamice este perpendiculară pe inducție și curent, iar sensul dat de regula mîinii stîngi. Într-adevăr, luînd doi conductori paraleli, ca în figura 52, depărtați la distanța d, prin care trec curenții I_1 și I_2 și avînd lungimea l, putem afla direcția și sensul forțelor ce se exercită pe conductori aplicînd regula folosită pentru forțele electromagnetice, regula mîinii stîngi.

Se vede că doi conductori străbătuți de curenți de același sens se atrag iar cei străbătuți de curenți de sens contrar se resping, așa cum confirmă și experiența indicată în figura 51.

Pentru calcule practice este mai ușor să se determine forța ce acționează pe unitate de lungime a conductorului:

$$F_0 = \frac{F_1}{l} = \mu \frac{I_1 I_2}{2\pi d}.$$

Punînd în această relație valoarea permeabilității magnetice în vid (aer) dacă conductorii sînt așezați în aer și dacă $I_1 = I_2$, atunci:

$$F_0 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \frac{I^2}{d} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I^2}{d}.$$

F_0 este exprimat în newtoni dacă μ_0 este exprimat în H/m, I în amperi și d în metri. Din relația de mai sus avem:

$$I^2 = \frac{F_0 2\pi d}{\mu_0}.$$

Această expresie este folosită pentru a defini în S.I. unitatea de intensitate de curent.

Amperul este intensitatea curentului electric constant, care parcurgînd doi conductori rectilinii paraleli foarte lungi și de secțiune neglijabilă, așezați în vid la distanța de 1 m unul de altul, produce între acești conductori o forță de $2 \cdot 10^{-7}$ newtoni pe metru liniar (fig. 53).

D. Aplicaţii ale fenomenelor electromagnetice

35. Electromagneţii. Aplicaţiile electromagneţilor

Se numesc electromagneţi magneţii puternici şi temporari formaţi dintr-o bară de fier moale sau aliaje asemănătoare, aşezată în interiorul unui solenoid. Bara de fier moale se magnetizează cînd înfăşurarea solenoidului este parcursă de curent. La întreruperea curentului bara se demagnetizează aproape complet. Pe baza faptului că electromagneţii au proprietăţi magnetice numai în timpul trecerii curentului, ei au numeroase utilizări practice.

Electromagneţii se fac în formă de bară (fig. 54, *a*), potcoavă (fig. 54, *b*), clopot (fig. 54, *c*). Forma lor este astfel aleasă încît liniile cîmpului magnetic date de înfăşurarea electromagnetului să treacă mai mult prin fier şi foarte puţin prin aer, care are permeabilitate mică.

La un electromagnet deosebim: *miezul,* care poartă înfăşurarea şi *armătura* (adică bara de fier ce se aplică pe ambii poli ai electromagnetului şi care închide circuitul magnetic).

În figura 55, *a* se reprezintă un electromagnet obişnuit cu: *1* miezul de fier moale; *2* bobinele cu înfăşurările prin care trece curentul; *3* armătura electromagnetului. Figura 55, *b* arată care este sensul curentului prin înfăşurări pentru ca polii electromagnetului să fie cei indicaţi.

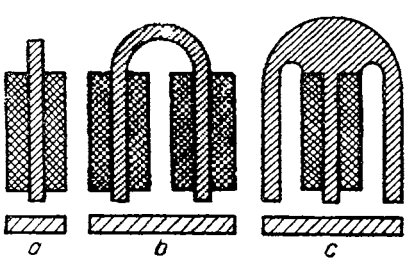


Fig. 54

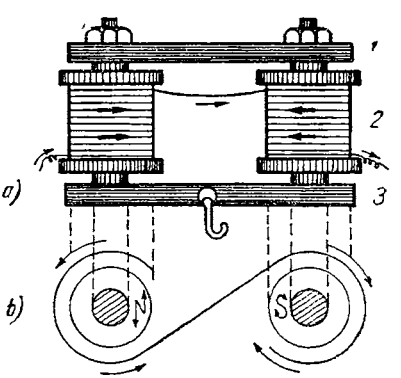


Fig. 55

Electromagneții sînt folosiți penrtu deplasarea greutăților, pentru producerea de cîmpuri magnetice intense, în automatică, telemecanică, semnalizare etc. Cînd sînt folosiți pentru a transporta materiale magnetice, ca în cazul macaralelor electromagnetice, un element ce trebuie cunoscut la electromagnet este *forța portantă*, adică forța cu care miezul atrage armătura sau greutatea pe care o poate ține atrasă un electromagnet. Această forță portantă este proporțională cu valoarea inducției ridicată la pătrat. Electromagneții pentru macarale se fac sub formă de clopot.

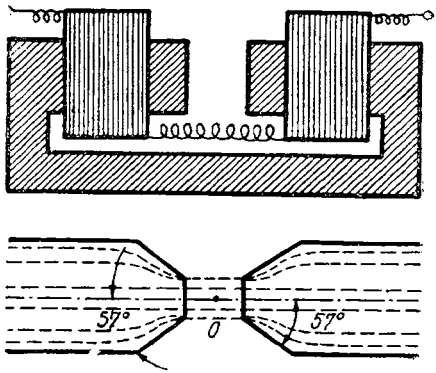


Fig. 56

La electromagneții destinați a da cîmpuri puternice piesele polare se fac tronconice, pentru a obține cîmpuri uniforme (fig. 56). Cîmpul maxim în *O* se obține pentru un semiunghi plan în vîrful conului de circa 57°. Savantul sovietic Kapitza a reușit să producă într-o bobină fără miez de fier de 1 cm diametru interior o inducție de 30 Wb/m² pe timp de 0,01 s. În acest timp, puterea atingea 160 milioane de kilowați, iar curentul 72 000 amperi.

Electromagneți de diferite tipuri ce dau inducții foarte intense se utilizează curent pentru cercetări științifice, pentru acceleratori de particule etc.

36. Aplicații ale electromagneților la relee, siguranțe automate

Prin electromagneți putem comanda pornirea unui motor, acționarea unui dispozitiv de la distanță dacă folosin un *releu electromagnetic*. Electromagnetul releului închide un circuit, ce poate fi traversat de un curent puternic de la o sursă locală, folosind un curent foarte slab care vine pe o linie electrică de la distanță.

Figura 57 arată schema unui releu electromagnetic ce închide un circuit *B* de acționare a unei instalații oarecare *D* ce folosește un cu-

rent intens. Curentul slab de pe linie face ca electromagnetul E să atragă armătura R prevăzută cu un contact C şi astfel să închidă circuitul B de acţionare alimentat de la o sursă locală S.

În felul acesta s-a realizat închiderea circuitului, prin care circulă un curent intens, cu un contact acţionat de un curent slab; evitîndu-se pierderile mari de energie electrică din conductorii de legătură, dacă pe toată distanţa ar fi circulat un curent intens.

Asemenea relee servesc la pornirea maşinilor de la distanţa în automatizare, în telefonie.

În loc de siguranţe fuzibile, puse ca să protejeze instalaţiile electrice, — siguranţe care lucrau pe baza topirii unui fir cînd intensitatea curentului devenea prea mare, întrerupînd astfel circuitul, — se folosesc astăzi din ce în ce mai mult *siguranţele automate*, întrerupătoare sau disjunctoare automate. Aceste siguranţe automate sînt prevăzute cu un electromagnet care atrage o armătură numai cînd curentul a atins o intensitate mai mare decît o anumită valoare, întrerupînd astfel circuitul traversat de curent.

Schema unei siguranţe automate este dată în figura 58. În figura 58, *a* circuitul este închis şi curentul normal de lucru trece prin înfăşurarea electromagnetului E. Dacă curentul întrece valoarea normală, atunci electromagnetul capătă o astfel de magnetizare încît poate atrage armătura A ţinută în contact cu B de resortul R_1, bara B eliberată este atrasă de resortul R_2 şi circuitul se întrerupe, aşa cum se vede în figura 58, *b*. Firele ce vin de la reţea ca să alimenteze circuitul trec prin orificiile din placa metalică B, fiind izolate de aceasta.

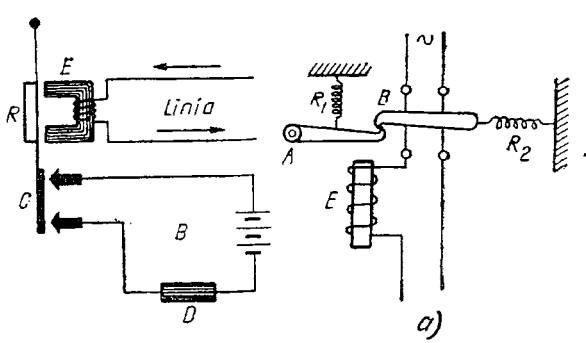


Fig. 57

Fig. 58

Receptorul telefonic, difuzorul electromagnetic etc. folosite în telefonie și radiocomunicații se servesc de electromagneți.

Receptorul telefonic ca și difuzorul electromagnetic sînt aparate care transformă curentul electric variabil de frecvență joasă în oscilații sonore.

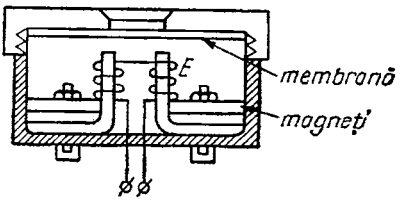


Fig. 59

Pentru buna funcționare a receptorului telefonic se folosește un electromagnet polarizat, adică un electromagnet care are miezul făcut dintr-un magnet permanent sau în contact cu un magnet permanent.

Receptorul telefonic este alcătuit dintr-un electromagnet cu cele două bobine așezate pe un miez de material magnetic. Dar acest miez este la rîndul său așezat pe un magnet permanent. Deci miezul electromagnetului este tot timpul magnetizat. În fața polilor electromagnetului se așază o membrană circulară metalică, elastică, încastrată pe marginea carcasei receptorului, așa cum se arată în figura 59.

Curentul variabil de joasă frecvență (telefonic) trece prin bobinele electromagnetului și face ca armătura, care era atrasă de miezul electromagnetului chiar cînd nu trecea nici un curent prin bobinele lui (căci miezul este magnetizat permanent), să fie atrasă mai mult sau mai puțin după valoarea curentului din bobine, respectiv după valoarea variației cîmpului de inducție magnetică, care este proporțională cu curentul din bobine. Din această cauză membrana execută o serie de vibrații de aceeași frecvență cu a curentului ce traversează bobinele electromagneților.

Membrana reproduce astfel variațiile curentului microfonic care au rezultat din variațiile date de sunetele ce au fost produse în fața microfonului.

37. Aplicațiile tehnice ale forței electromagnetice. Aparate electrice de măsurat

a) Galvanometrele sînt instrumente care servesc la măsurarea curenților mici și foarte mici (10^{-6}—10^{-12} dintr-un amper) sau a tensiunilor date de curenții măsurați. Cantități mici de electricitate ce

traversează circuitele pentru un timp scurt se măsoară cu galvanometrele balistice. Galvanometrele folosesc proprietatea circuitelor străbătute de un curent de a fi deviate cînd sînt puse în cîmp magnetic. Ele sînt de două feluri: cu magnet mobil şi cu cadru mobil. Cînd curentul trece printr-un multiplicator ca cel din figura 49 prevăzut în centrul lui cu un ac magnetic ce se poate mişca într-un plan orizontal, acul deviază, indicînd prezenţa curentului. Un asemenea instrument a constituit primul galvanometru cu magnet mobil. Galvanometrele cu magnet mobil se utilizează foarte rar. O utilizare mai largă o au *galvanometrele cu cadru mobil* (fig. 60). Ele sînt formate dintr-un magnet în formă de potcoavă 3—3′, prevăzut cu două piese polare 4—4′ şi cu un cilindru de fier moale 6, care concentrează liniile de cîmp magnetic. Un cadru mobil cu foarte multe spire din fir foarte subţire 5 este suspendat de un fir fără torsiune 1, prin care trece curentul şi care este prevăzut cu o oglinjoară 2. Cînd cadrul ce se găseşte în cîmpul de inducţie B este parcurs de curent, asupra celor două laturi ale cadrului AE şi CD, de lungime l, acţionează forţe electromagnetice egale şi de sens contrar, de mărime $F=BIl$. Aceste forţe dau un cuplu care roteşte cadrul, căutînd să aducă planul cadrului perpendicular pe B. Cadrul se opreşte cînd cuplul său de rotaţie este echilibrat de cuplul invers de torsiune al firului de suspensie. Curentul ce trece prin galvanometru, dacă deviaţiile cadrului sînt mici, este proporţional cu unghiul de rotire α.

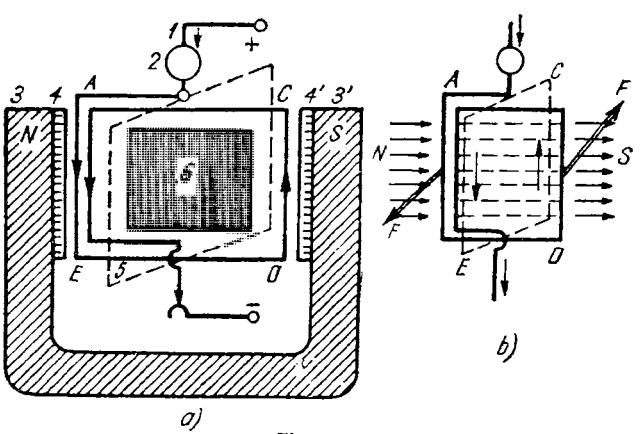


Fig. 60

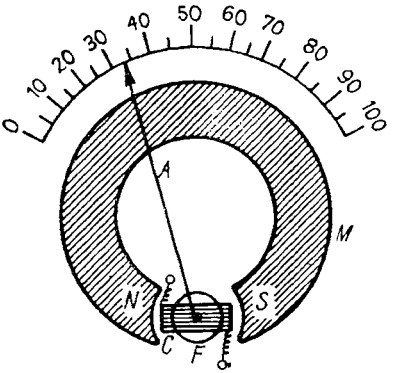
Galvanometrul cu cadru mobil măsoară numai curent continuu sau redresat (ondulat), nu măsoară curenți alternativi deoarece sistemul mobil nu poate urmări variațiile curentului din cauza inerției.

Cunoscînd legile curenților, galvanometrele se pot transforma în ampermetre dacă le punem un șunt, adică legăm în paralel o rezistență de valoare mult mai mică decît rezistența internă a galvanometrului, sau în voltmetre, dacă le punem în serie o rezistență adițională.

Se pot măsura curenți intenși și tensiuni mari cu galvanometre transformate fără a deteriora aparatele. Ampermetrele și voltmetrele cu cadru mobil se numesc *instrumente magnetoelectrice* și nu măsoară decît curenți și tensiune continuă.

În figura 61 este arătată schema unui ampermetru sau voltmetru cu cadru mobil. Un cadru mobil C în care este introdus un cilindru de fier F este plasat între polii magnetului permanent M. Cînd curentul trece prin spirele cadrului, acesta se rotește în jurul axului O perpendicular pe planul figurii. El se oprește cînd cuplul electromagnetic ce îl acționează este echilibrat de cuplul antagonist a două resorturi spirale B, montate la extremitățile cadrului. Un ac A prins de cadrul mobil servește ca indicator în fața unui cadran gradat în amperi sau volți. Unghiul de rotație al cadrului este proporțional cu intensitatea curentului.

Aparatele cu echipajul mobil din fier moale se numesc *electromagnetice*.



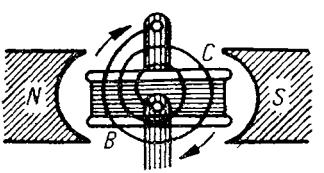


Fig. 61

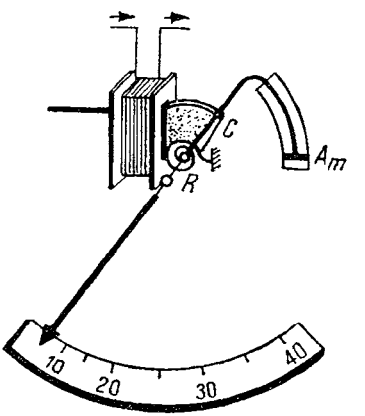


Fig. 62

La ampermetrele şi voltmetrele cu fier moale un sector circular mobil de fier moale C este atras de către o bobină prin care trece curentul de măsurat (fig. 62). Un resort R de care este suspendat sectorul mobil egalează forţa de atracţie a bobinei. Piesa de fier are şi un indicator ce se mişcă în faţa unui cadran gradat. Pentru ca acul să nu oscileze periodic se foloseşte un amortizor cu aer A_m

Aceste instrumente pot măsura atît curent continuu cît şi alternativ, pentru că forţa electromagnetică de atracţie a sectorului circular este proporţională cu pătratul intensităţii curentului, deci este indiferent dacă prin bobina instrumentului trece alternanţa pozitivă sau negativă a curentului alternativ.

Instrumentele electromagnetice sînt simplu de construit, au cost scăzut, se pot face pentru curenţi mari, sînt rezistente la scurtcircuit. Dezavantajul este că au scala neuniformă, precizie scăzută, indicaţiile sînt influenţate de cîmpurile magnetice exterioare.

Instrumentele magnetoelectrice sînt instrumente de precizie, sensibilitate mare, scală uniformă (gradaţia proporţională pe toată întinderea scalei). Ele însă se folosesc numai pentru curent continuu şi curent alternativ redresat. Costul lor este ridicat. Ele sînt aparate de laborator şi de control.

Pe cadranul instrumentelor se indică simbolul şi clasa aparatului.

Instrumentele magnetoelectrice au simbolul: $=$  1,5 cifra 1,5 arată clasa de precizie.

Instrumentele electromagnetice au simbolul: $\sim$ $\simeq$2, cifra indică clasa de precizie.

Pe lîngă instrumentele magnetoelectrice, electromagnetice se construiesc şi instrumentele electrodinamice, termice, cu inducţie, cu vibraţie etc. De asemenea, se folosesc din ce în ce mai multe aparate electronice, electrostatice etc.

Indiferent de construcţia lor, ampermetrele au rezistenţă internă mică şi se montează în serie în circuit. Voltmetrele au rezistenţă mare şi se montează în paralel.

b) **Motorul electric de curent continuu şi principiul lui de funcţionare.** Motoarele electrice se bazează pe interacţiunea dintre un

conductor parcurs de curent electric și un cîmp de inducție magnetică. În ele se nasc forțe electromagnetice ce pot roti o piesă de fier pe care s-au dispus într-un anumit fel un număr mare de conductori parcurși de curent.

Electromotorul va trebui să aibă deci următoarele părți componente: un *rotor* din tole de fier cu siliciu pe care se așază conductorii sub formă de spire sau bobine; unul sau mai mulți electromagneți care să creeze inducție magnetică și sistemul de alimentare de la rețeaua de curent electric, adică borne, periuțe așezate pentru motoarele de curent continuu, pe niște lamele de cupru izolate între ele, legate cîte una la fiecare din capetele spirelor (bobinelor). Ansamblul lamelelor de cupru alcătuiește *colectorul* electromotorului. Spirele sînt așezate pe rotor în niște crestături. Ele sînt legate electric în serie, formînd ceea ce se numește înfășurarea rotorului (fig. 63, *a*).

Curentul adus prin periuțele de pe colector trece prin spirele rotorului așezat între polii electromagneților motorului montați fix pe carcasa mașinii. Forțele electromagnetice egale și de sens contrar acționează pe laturile spirelor și dau naștere unui cuplu de rotire care mișcă rotorul. Această mișcare se utilizează la acționarea mașinilor-unelte etc.

În figura 63, *b* se arată o spiră prinsă cu capetele ei la două lamele de colector și alimentate de la sursa de curent continuu.

Spira fiind în cîmpul de inducție B al electromagneților, se va roti datorită forțelor F și va roti și rotorul care poate antrena o curea, ca în figură. Sensul de rotație este determinat de sensul curentului I și al inducției B. Puterea dezvoltată este funcție de curen-

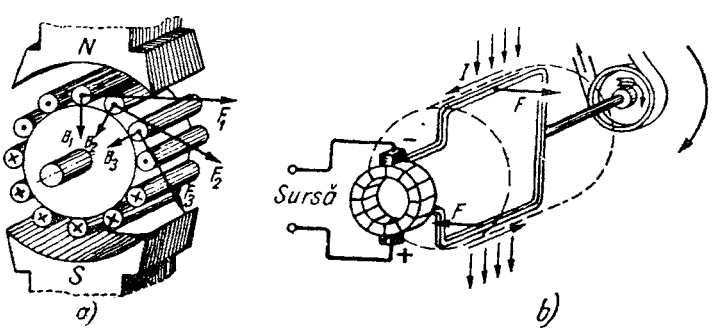


Fig. 63

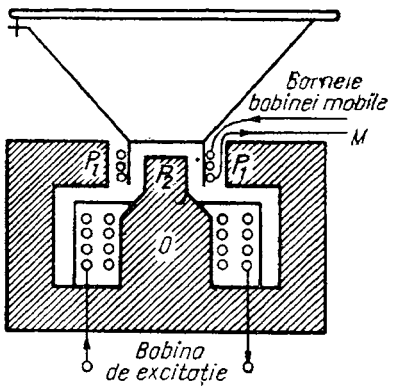


Fig. 64

tul pe care motorul îl absoarbe de la rețea. Acest curent este cu atît mai mare cu cît motorul întîmpină din partea mașinii-unelte un cuplu rezistent mai mare. Rolul colectorului în motorul și generatorul de curent continuu se va arăta la capitolul *Mașini electrice.*

c) **Difuzorul electrodinamic** folosește pentru crearea inducției magnetice un solenoid avînd un miez de fier moale masiv O fixat în jugul *J* făcut tot din fier moale (fig. 64). Jugul are pe capac o deschidere circulară prin care intră capătul miezului solenoidului de diametru mai mic decît restul corpului. Pe acest capăt al miezului solenoidului se centrează o bobină mică mobilă *M*, legată mecanic de membrana difuzorului. Dacă prin solenoid trece un curent, de excitare sau de magnetizare, se obține un cîmp magnetic intens, avînd polaritatea ce o dă sensul curentului. Bobina *M* este străbătută de curentul de frecvență sonoră de la receptor. Curentul din bobină interacționează cu cîmpul solenoidului din spațiul dintre miez și deschiderea circulară a jugului, numit întrefer. Forțele electromagnetice de atracție sau respingere ce se nasc mișcă bobina mobilă într-un sens sau altul, după cum variază curentul de frecvență sonoră, făcînd-o să execute vibrații pe care le transmite membranei difuzorului. Difuzorul redă astfel sunetele din fața microfonului, sunete trimise în bobina mobilă sub formă de curenți. Succesele obținute în fabricarea magneților permanenți din aliaje speciale a făcut posibilă înlocuirea în difuzoarele dinamice a electromagneților voluminoși prin magneți permanenți, care asigură în întrefer o inducție de 0,8—1 Wb/m^2 (tesla).

d) *Instrumente electrodinamice de măsurat.* Wattmetrul este instrumentul ce măsoară puterea absorbită de un circuit oarecare. El este un instrument electrodinamic, deoarece funcționează pe baza interacțiunii dintre doi curenți ce străbat două bobine: una fixă și alta mobilă (fig. 65). Bobina fixă se montează în serie în circuit și se numește bobina de curent *1—1'*. Bobina mobilă este conectată în paralel și se numește bobină de tensiune *2*. Bobina

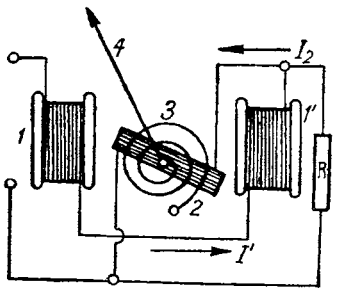


Fig. 65

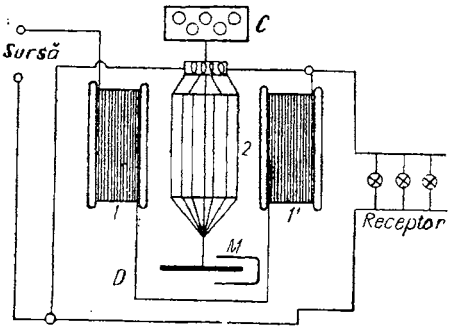


Fig. 66

de curent este făcută cu un număr mic de spire, din sîrmă groasă, cea de tensiune cu spire multe din sîrmă subțire. Bobina de tensiune este mobilă și are legată uneori în serie o rezistență care micșorează consumul de putere în circuit.

Dacă prin bobina serie se trece curentul receptorului R sau al circuitului ce absoarbe energie, iar prin bobina de tensiune un curent care este proporțional cu tensiunea de la bornele lui R, atunci unghiul de deviere a acului indicator al instrumentului este proporțional cu puterea consumată de circuitul receptor ($\alpha = K \cdot U \cdot I = K \cdot P$, K fiind o constantă ce depinde de construcția aparatului). Instrumentele electrodinamice pot fi folosite atît în curent continuu cît și în curent alternativ.

Contorul electric este și el tot un instrument electrodinamic care măsoară energia electrică în circuitul electric. El înregistrează puterea consumată în timp, măsoară deci energia electrică $W = UI \cdot t$ de obicei în kWh (kilowattore). Contorul electric pentru măsurarea energiei curentului continuu (fig. 66) este format dintr-o bobină mobilă *2*, plasată ca un rotor de motor electric în cîmpul de inducție, dat de bobina fixă (de curent), legată în serie cu receptorul R și alcătuită din două părți *1—1'*. Bobinele serie dau un cîmp magnetic proporțional cu I, iar bobina paralel (rotorul) un cîmp proporțional cu U. Bobina-rotor este supusă la un cuplu de rotație proporțional cu UI. Cu ajutorul unui disc metalic D, fixat pe axul bobinei-rotor, ce se rotește între polii unui magnet permanent M și în care se dezvoltă un cuplu rezistent, bobina-rotor va avea o viteză de rotație constantă.

În acest caz numărul de rotații N ale bobinei-rotor într-un anumit interval de timp este proporțional cu energia consumată: $N = kW = kUIt$.

Contoarele au un dispozitiv de înregistrare cu roți dințate C antrenat de rotor, care numără rotațiile făcute de bobina-rotor într-un interval de timp. Pe cadranul contorului se indică constanta k a aparatului, care arată numărul de rotații ale rotorului pentru unitatea de energie, de exemplu, 1 kWh.

În figura 67 este arătat exteriorul unui contor și schema legăturilor.

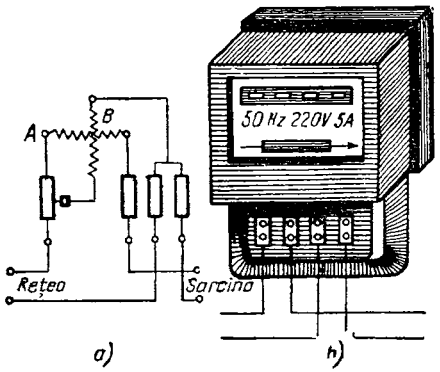


Fig. 67

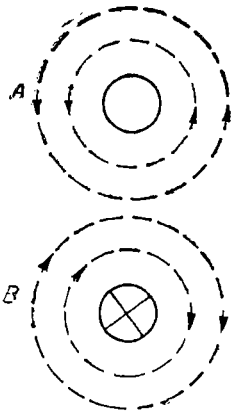


Fig. 68

Probleme rezolvate

1. Dacă într-un cîmp de inducție $B=1$ Wb/m² un electron de sarcină $e=1{,}6\cdot10^{-19}$ C se mișcă cu o viteză $v=250\,000$ km/s perpendicular pe direcția inducției, să se afle forța ce acționează asupra lui.

Răspuns:

$$1{,}6\cdot10^{-19}\ \text{C}\cdot2{,}5\cdot10^{8}\ \frac{\text{m}}{\text{s}}=4\cdot10^{-11}\ \text{N}.$$

$$F'=Bev=1\ \text{Wb/m}^2.$$

Forța este foarte mică, dar deviația este mare, pentru că masa electronului este foarte mică.

2. Să se afle forța electromagnetică ce acționează asupra curentului ce trece printr-un element de circuit electric de lungime l, așezat normal la un cîmp de inducție B, dacă prin secțiunea transversală a conductorului din care face parte elementul l trec pe secundă n particule încărcate cu sarcina q și cu viteza v.

Răspuns: $F'=\frac{nl}{v}\,q\cdot v\cdot B$, căci $I=nq$ și elementul l de conductor conține $\frac{nl}{v}$ particule sau $F=BI\cdot l$.

3. Ce valoare au intensitățile curenților ce străbat doi conductori paraleli, așezați la 20 cm distanță dacă asupra fiecărui metru de conductor acționează o forță de 100 N. Prin cei doi conductori trec curenți cu intensități egale.

Răspuns: $I_1=I_2=I$ deci $F_0=2\cdot10^{-7}\frac{I^2}{d}$

$$I=\sqrt{\frac{F_0d}{2\cdot10^{-7}}}=\sqrt{\frac{100\text{N}\cdot0{,}2\text{m}}{2\cdot10^{-7}\text{H/m}}}=10\,000\ \text{A}.$$

4. Pe un contor este indicată constanta **k** a contorului. 1 kWh=2 000 rotații.

Să se determine puterea consumată de la rețea de becurile din încăperile unei locuințe dacă discul contorului a făcut 10 rotații în 30 s.

Răspuns:

Energia înregistrată $W_e=\frac{1}{2000}10=0{,}005$ kWh adică $0{,}005\times1\,000\times3\,600=$ $=18\,000$ Ws.

Puterea consumată $P=\frac{W_e}{t}=\frac{18\,000\ Ws}{30}=600$ waţi.

5. Să se indice sensul curentului în conductorul rectiliniu A şi în conductorul B şi valoarea lui dacă liniile de cîmp magnetic create de curent au sensul indicat în figura 68, iar valoarea intensităţii cîmpului la distanţa de 10 cm de A este 80 A/m iar la 20 cm de B este de 40 A/m. Conductorii sînt la distanţă mare unul faţă de altul aşa ca să putem considera cîmpurile lor izolate unul faţă de altul.

Răspuns: Se dă sensul liniilor de cîmp şi valorile:

$$H_A=80 \text{ A/m şi } r_A=10 \text{ cm}$$

$$H_B=40 \text{ A/m şi } r_B=20 \text{ cm}$$

Se cere: valoarea şi sensul lui I.

Pentru aflarea sensului curentului aplicăm regula burghiului. Rotind burghiul în sensul liniilor de cîmp, sensul lui de înaintare ne arată sensul curentului. Deci în A curentul vine spre noi, în B intră în planul foii.

Pentru aflarea valorii lui I, folosim relaţia

$$H=\frac{I}{2\pi r} \quad \text{unde } H_A=80\ \frac{A}{m};\ r_A=10 \text{ cm}=0{,}1 \text{ m}$$

$$H_B=40\ \frac{A}{m};\ r_B=20 \text{ cm}=0{,}2 \text{ m}$$

$$I_A=H_A 2\pi r_A=80\times2\times3{,}14\times0{,}1=50{,}24 \text{ A}$$

$$I_B=H_B 2\pi r_B=40\times2\times3{,}14\times0{,}2=50{,}24 \text{ A}$$

Se poate observa fără a face calculele că intensităţile celor doi curenţi sînt egale întrucît H este invers proporţional cu distanţa r. Ori, în primul caz H este de două ori mai mare decît în al doilea caz; în schimb distanţa este de două ori mai mică.

Întrebări recapitulative

1. **Cum putem privi forţa electromagnetică dacă ţinem seama de faptul că un curent electric dă naştere la un cîmp magnetic? De asemenea, cum se interpretează acţiunea dintre doi curenţi pe baza cîmpurilor create de curenţi?**

2. Ce legătură se poate stabili între curentul ce trece printr-un plan, inducția magnetică care acționează asupra cadrului paralel cu planul lui, secțiunea cadrului și cuplul ce se exercită asupra lui?
3. Este vreo deosebire între acțiunile electromagnetice și electrodinamice?
4. Din legile cunoscute în electromagnetism, cum putem ajunge la o metodă pentru a măsura pe μ_0?
5. Asupra unui conductor încărcat cu sarcini electrice statice acționează forța electromagnetică? Dar asupra sarcinilor în mișcare?
6. Să se arate cum s-a ajuns la electromagneți foarte puternici?
7. Care este deosebirea dintre instrumentele de măsură electromagnetice și magnetoelectrice?
8. Explicați funcționarea electromotorului.
9. De ce și polul nord și cel sud al unei bare magnetizate atrag pilitura sau mici obiecte de fier, iar, suspendată în centrul său de greutate printr-un fir fără torsiune, se rotește?
10. Cum se recunoaște care din două bare identice de oțel, una magnetizată și alta nemagnetizată, este cea magnetizată dacă nu avem la dispoziție nici un alt obiect?
11. Care sînt fenomenele pe care le studiază magnetismul?
12. Ce sînt liniile de cîmp magnetic? Cum se alege sensul lor? Ce deosebire este între liniile de cîmp electric și magnetic?
13. Arătați că un cadru cu mai multe spire multiplică acțiunea magnetică a unei spire.
14. Ce legătură este între flux, inducție și permeabilitate magnetică?
15. Cum puteți construi un aparat de măsură a curentului folosind un magnet mobil?

Exerciții

1. Care este forța electromagnetică care se exercită asupra unui conductor așezat perpendicular pe un cîmp magnetic uniform de inducție $B=0{,}5$ tesla, dacă lungimea conductorului este 30 cm, iar curentul în conductor este de 100 A.

R=15 N.

2. Să se determine polaritatea magneților (în ambele cazuri) dacă conductorii se deplasează sub acțiunea cîmpului magnetic în sensurile indicate în figura 69.
3. Un cadru de formă pătratică are latura 20 cm și este parcurs de 0,8 amperi. Planul său este vertical și paralel cu cîmpul terestru, care este orizontal și are valoare $0{,}2 \cdot 10^{-4}$ tesla. Să se calculeze: 1) forța electromagnetică care se exercită pe fiecare latură; 2) cuplul care rotește cadrul.

R: 1) Pe laturile verticale $F=3{,}2 \cdot 10^{-6}$ N; 2) $6{,}4 \cdot 10^{-7}$ Nm.

4. Doi conductori de cupru lungi de 2 m și așezați la 8 cm unul de altul alimentează o instalație electrică. Printr-un accident conductorii sînt scurt-

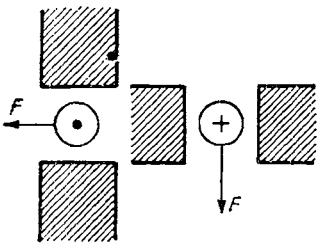


Fig. 69

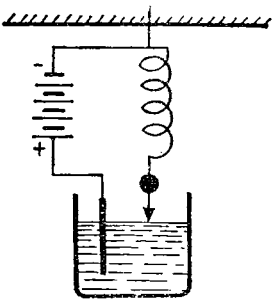


Fig. 70

circuitaţi şi curentul ce îi străbate devine 8 000 amperi. Să se calculeze forţa electromagnetică care curbează conductorii.

R=320 N.

5. Un arc elicoidal (fig. 70) din material bun conducător suspendat vertical atinge cu capătul de jos, unde are o mică greutate şi un vîrf, mercurul din pahar. În mercur se pune polul pozitiv al unei baterii de acumulatori. Celălalt pol este legat cu arcul la capătul de sus. Arcul execută o serie de oscilaţii verticale cînd este străbătut de curentul bateriei. Să se arate din ce cauză.
6. O spiră circulară are raza 8 cm şi este parcursă de un curent ce are intensitatea 1,6 A. Care este intensitatea cîmpului magnetic produs de curent în centrul spirei? Ce se întîmplă cu intensitatea cîmpului magnetic produs în centrul cadrului, dacă mai bobinăm nouă spire identice una lîngă alta, formînd astfel un cadru plat cu 10 spire, dacă spirele sînt parcurse tot de 1,6 A?

R: 10 A/m; 100 A/m.

7. O bobină are lungimea mult mai mare decît diametrul. Ea este făcută din mai multe straturi de fire astfel bobinate, încît pe centimetru se găsesc 20 de spire. Care este intensitatea cîmpului pe ax în mijlocul acestei bobine dacă spirele sînt parcurse de un curent de 10 A?

R: 20 000 A/m.

8. Doi conductori paraleli aşezaţi la 10 cm unul de altul sînt străbătuţi de curenţi de acelaşi sens, unul de 100 A, iar altul de 25 A. Care este intensitatea cîmpului magnetic dat de aceşti curenţi la jumătatea distanţei dintre ei? Dar la 5 cm de conductorul parcurs de 100 A? În ce punct se anulează intensitatea cîmpului?

R: 240 A/m; 345 A/m; 8 cm de I_1.

9. Înfăşurările celor doi electromagneţi indicaţi pe figură trebuie legate în serie şi conectate apoi la o sursă de curent, dar în aşa fel, încît polaritatea lor să fie aceea indicată pe figura 71.
10. Un solenoid are 100 spire bobinate pe o carcasă cilindrică de carton avînd lungimea l=20 cm şi diametrul D=5 cm. Să se afle valoarea intensităţii

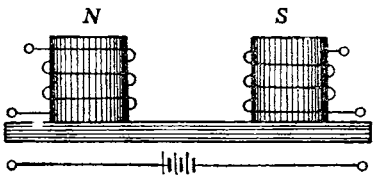


Fig. 71

cîmpului pe ax în centrul solenoidului cînd spirele sînt parcurse de un curent cu intensitatea $I=2$ A. Ce valoare va avea intensitatea cîmpului în cazul cînd cu același fir bobinăm solenoidul spiră lîngă spiră pe o carcasă cu diametrul de 2,5 cm.

R: 1 000 A/m; aceiași.

11. Un solenoid are 240 spire înfășurate pe o carcasă de 36 cm lungime. Prin solenoid trece un curent de 15 A. Care este valoarea fluxului ce străbate un cerc cu suprafața de 4 cm^2 pus în interiorul solenoidului, perpendicular pe liniile de cîmp. Cîmpul în interiorul solenoidului se presupune uniform.

R: $\Phi=500\cdot10^{-8}$Wb.

12. Un magnet în formă de inel este prevăzut cu o tăietură transversală îngustă (întrefer). Valoarea inducției magnetice în tăietură este $B_0=0{,}04$ T. Să se găsească intensitatea cîmpului magnetic H în metalul magnetului dacă permeabilitatea relativă a materialului din care este făcut magnetul este $\mu_r=500$.

R: 64 A/m.

II. Inducția electromagnetică

A. Fenomenele de inducție electromagnetică. Tensiuni electromotoare induse

În electromagnetism s-a văzut că un curent electric ce trece printr-un conductor dă naștere în jurul conductorului unui cîmp magnetic.

Acest cîmp magnetic acționează asupra unui ac magnetic sau asupra altui conductor parcurs și el de un curent electric. Ce se întîmplă însă dacă facem operația inversă, adică mișcăm un conductor electric prin care nu trece curentul, în cîmpul magnetic dat de

un magnet sau de un alt conductor străbătut de curent? Răspunsul l-a dat Faraday.

Transformarea unui lucru mecanic, cheltuit prin deplasarea într-un anumit fel a unui conductor liniar, a unei spire sau bobine într-un cîmp magnetic, în energie electrică, stă la baza fenomenului de *inducţie electromagnetică*, descoperit de Faraday în 1831 şi demonstrat prin experienţele sale.

Faraday şi cercetătorii contemporani lui au muncit 10 ani pentru a descoperi inducţia electromagnetică, după ce Oersted arătase acţiunea magnetică a curentului electric, cu toate că erau convinşi de reciprocitatea dintre fenomenele electromagnetice şi cele de inducţie. Întîrzierea se explică prin faptul că ei plecau însă de la ideea că simpla aşezare a unui circuit într-un cîmp magnetic este suficientă pentru a da naştere la curent şi nu au aplicat principiul conservării energiei, care nu fusese încă descoperit. Cîmpul magnetic dat de un curent continuu ce traversa permanent conductorul putea exista în jurul conductorului fără ca el să dea naştere într-un circuit vecin unei tensiuni electromotoare (curent) induse.

Cum se va vedea din experienţele de mai jos, trebuie să se producă o variaţie a fluxului magnetic care traversează un circuit sau ca un conductor să „taie" fluxul magnetic ca să se producă o tensiune electromotoare de inducţie în circuit sau conductor.

38. Modul şi condiţiile necesare pentru a produce tensiuni electromotoare induse

Experienţele lui Faraday. Prin apropierea sau depărtarea unei bobine din fir conductor, parcursă de un curent electric luat de la un acumulator, de o bobină asemănătoare sau cu mai multe spire decît prima şi legată la un galvanometru s-a obţinut în această bobină un curent. Acul galvanometrului devia numai pe timpul deplasării bobinei într-un sens la apropiere şi în sens invers la depărtare (fig. 72). Bobina alimentată de la sursa de curent se numeşte *bobină primară sau inductoare.* Bobina în care a luat naştere curentul indus se numeşte *secundară* sau *indus.*

Cînd s-a repetat experienţa cu un magnet în loc de bobină primară (fig. 73), fenomenul s-a reprodus, şi anume la apropierea mag-

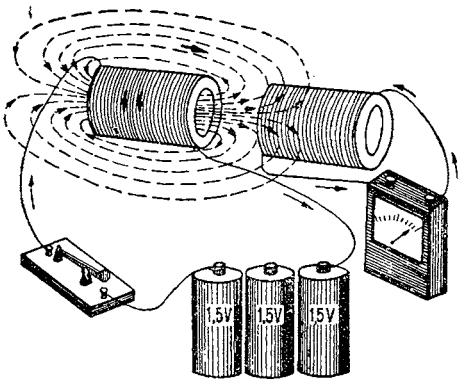


Fig. 72

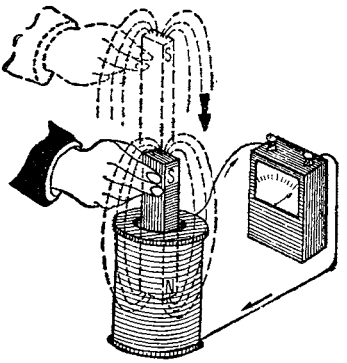


Fig. 73

netului galvanometrul devia într-un sens, iar la depărtare în sens invers. Cînd magnetul nu se mişcă, acul galvanometrului rămîne la zero.

Dacă mişcările bobinei primare sau ale magnetului sînt mai rapide, deviaţiile acului galvanometrului sînt mai mari.

Dacă bobina primară, sau magnetul rămîn fixe şi se apropie sau se depărtează bobina secundară, apar curenţi induşi în aceasta. Rezultă de aici că este indiferent cum realizăm mişcarea celor două elemente. Este necesar însă să avem o deplasare relativă între ele (bobina primară faţă de cea secundară sau invers).

În cazul cînd cele două elemente primar şi secundar se mişcă cu aceeaşi viteză şi în acelaşi sens, se constată că nu se produc curenţi induşi.

Faraday a obţinut curenţi induşi şi rotind o bobină (înfăşurare) cu multe spire aşezate pe un cadru circular în cîmpul magnetic pămîntesc (fig. 74). Bobina se rotea în jurul unui ax vertical sau orizontal. Rotirea unei bobine sau a uneia sau mai multe înfăşurări într-un cîmp magnetic puternic dat de electromagneţi stă la baza construcţiei maşinilor electrice.

Faraday experimentează cu două bobine aşezate fix una lîngă alta pe un cilindru de lemn. Prima bobină cu fir de circa 60 m lungime era alimentată de la o baterie de circa 100 elemente cu un curent intens. A doua bobină cu fire mai multe era legată la un galvanometru. Circuitul primei bobine fiind închis şi deci bobina

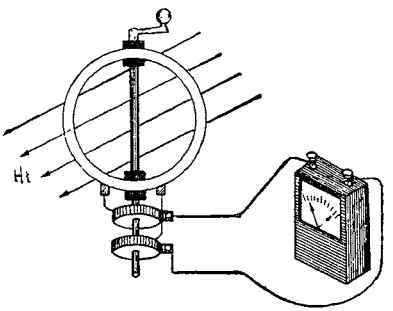


Fig. 74

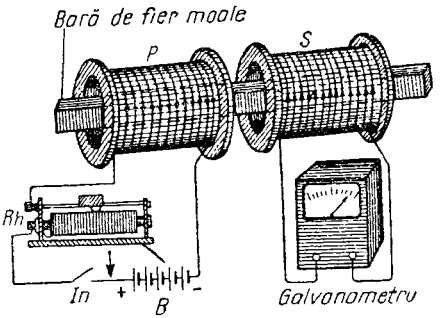


Fig. 75

parcursă de un curent continuu de la baterie, în bobina a doua nu ia naștere nici un curent. Acul galvanometrului rămîne la zero.

Faraday a observat că la închiderea circuitului primar sau la deschiderea lui, galvanometrul arăta trecerea unui curent în bobina secundară. Acest curent era destul de slab și avea, la închiderea circuitului un sens, iar la deschidere sens invers.

După ce a perfecționat experința, punînd bobinele pe un inel de fier cu diametrul de 20 cm, a obținut curenți mult mai intensi la închiderea și deschiderea circuitului primar și numai pe acest timp. După stabilirea curentului în circuitul primar acul galvanometrului revenea la zero.

Din experința făcută rezultă că pe timpul închiderii sau deschiderii circuitului bobinei primare, ceea ce este tot una cu apariția sau dispariția cîmpului magnetic al bobinei, în bobina secundară apar impulsuri de tensiune electromotoare (curent) indusă.

În figura 75 se arată experiența lui Faraday, dar inelul de fier este înlocuit cu o bară de fier moale. Așa cum se vede în figură, cu reostatul *Rh* se poate varia curentul din bobina primară. Se obțin la închidere și deschidere curenții induși mai intensi dacă curentul prin bobina primară este mai mare. Bobinele din figura 75 sînt făcute prima cu fir mai gros (diametrul firului 1 mm) ca să poată suporta un curent de 4—5 A și are 50—60 spire, iar a doua cu 100—120 spire din fir subțire și se leagă la un galvanometru sau miliampermetru sensibil.

Grupul de experiențe de mai sus arată că s-au putut produce t.e.m induse prin variația fluxului magnetic care traversează aria

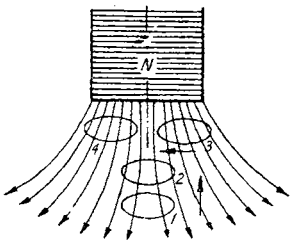


Fig. 76

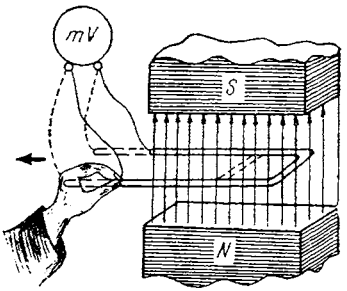


Fig. 77

limitată de circuitul indus. În unele experienţe variaţia fluxului a provenit din deplasarea relativă a circuitului primar şi secundar. Aceste deplasări nu ar fi produs totuşi t.e.m. dacă cîmpul magnetic al bobinei primare sau al magnetului ar fi fost uniform. În figura 76 se arată liniile de cîmp magnetic ale unui magnet (tot aşa de uniform este cîmpul şi în cazul unui solenoid) ce traversează o spiră în mişcarea ei din poziţia *1* în *2* sau din *3* în *4*. Fluxul ce trece prin spiră a variat deoarece cîmpul fiind neuniform, numărul liniilor de cîmp ce trec prin spiră în cele două poziţii este diferit. În cazul unui cîmp uniform, deşi am fi mişcat spira la fel ca mai sus, nu ar fi apărut t.e.m.

Modurile de producere a t.e.m induse sînt foarte diferite, toate sînt bazate însă pe variaţia fluxului inducţiei magnetice ce traversează aria limitată de o spiră sau de mai multe (în cazul bobinei). Aşa, de exemplu, se pot obţine tensiuni electromotoare prin variaţia suprafeţei circuitului indus aşezat într-un cîmp uniform sau deplasînd o spiră în cîmpul magnetic dat de un magnet, ca în figura 77, sau dacă tăiem liniile cîmpului magnetic printr-un conductor, ca în figura 78. Variaţia fluxului în cazul figurilor 77 şi 78 s-a obţinut variind secţiunea circuitului format din fire şi galvanometru, secţiune traversată de liniile de cîmp magnetic.

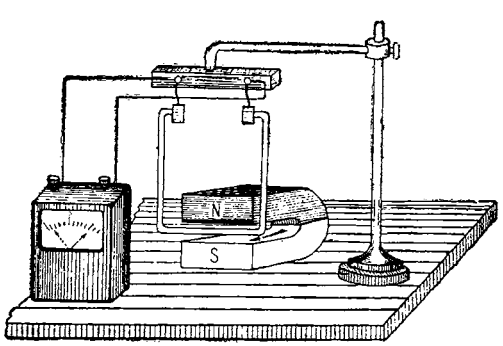


Fig. 78

39. Legile inducției electromagnetice. Legea lui Faraday. Regula lui Lenz

Experiențele descrise au arătat modul și condițiile necesare producerii de t.e.m. induse. Orice variație a fluxului magnetic care traversează un circuit dă naștere în circuit la o t.e.m. de inducție. *Se numește inducție electromagnetică fenomenul prin care se produce o t.e.m. într-un circuit electric care se deplasează într-un cîmp de inducție magnetică sau care este menținut într-un cîmp de inducție magnetică variabilă în timp.*

Din aceleași experiențe putem trage însă unele concluzii privind mărimea t.e.m. produse. De exemplu cînd în experiența arătată în figura 75 am mărit curentul din bobina primară, cu ajutorul reostatului, s-a văzut că la închiderea și deschiderea întrerupătorului t.e.m. indusă, respectiv curentul indus pe care această t.e.m. îl produce în bobina secundară, era mai mare. Această mărime este cauzată de mărirea fluxului inductor și deci și a fluxului ce traversează bobina secundară.

Rezultă că t.e.m. indusă este proporțională cu variația fluxului $\Delta\Phi$:

$$e \sim \Delta\Phi.$$

Din relația ce dă valoarea lui Φ printr-o bobină știm că cu cît numărul de spire este mai mare, fluxul este mai mare pentru același cîmp ce traversează bobina. Putem deci spune că variația fluxului ce traversează bobina secundară este cu atît mai mare cu cît numărul ei de spire este mai mare, adică:

$$e \sim N$$

Dacă se mărește valoarea curentului ce alimentează bobina primară cu ajutorul cursorului reostatului (fig. 75), de la o valoare I_1 la I_2 fluxul prin bobina S variază în timp și el de la valoarea Φ_1 la Φ_2, adică cu $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$. Variația curentului în timpul $\Delta t = t_2 - t_1$ dă naștere la o t.e.m. indusă.

Făcînd această variație a curentului între cele două valori I_1 și I_2 mai repede, t.e.m. indusă în S este mai mare și cu atît mai mare cu cît $\Delta t = t_2 - t_1$ este mai mic.

Rezultă din această experiență că tensiunea electromotoare este

invers proporțională cu intervalul de timp în care se produce variația intensității.

$$e \sim \frac{1}{\Delta t};$$

Rezultatul observațiilor de mai sus se poate strînge într-o singură relație:

$$e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \tag{25}$$

unde $\Delta\Phi$ reprezintă variația totală a fluxului produsă prin numărul N de spire al bobinei S.

Relația (25) reprezintă *legea lui Faraday* și dă valoarea instantanee a t.e.m. induse. Pentru a reprezenta exact fenomenul inducției electromagnetice, cum se va vedea mai jos, relația ce dă pe e are în față semnul minus. Ea se poate scrie în cazul variației uniforme $e = -\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t_2 - t_1}$. În cazul unei variații finite oarecare se aplică relația (25).

Raportul $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ reprezintă variația fluxului în unitatea de timp, așa încît putem spune că t.e.m. indusă este proporțională cu viteza de variație în timp a fluxului magnetic.

Exprimînd variația fluxului în weberi (Wb) și variația timpului în secunde, t.e.m. se exprimă în volți (V), deci:

$$e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ se măsoară în } \frac{\text{Wb}}{\text{s}},$$

deci Wb=V·s. *Weberul este fluxul magnetic care străbătînd aria închisă de o spiră produce în ea o t.e.m. de 1 volt cînd descrește uniform la zero într-o secundă.* În electromagnetism se arată că fluxul inducției magnetice printr-o suprafață este dat de relația:

$$\Phi = B \cdot S \cos \alpha = \mu H S \cos \alpha,$$

unde α este unghiul dintre normala la suprafața închisă de circuit și direcția liniilor de forță magnetice.

Relația (25) în cazul unei bobine cu N spire se scrie:

$$e = -\frac{\Delta(N\Phi)}{\Delta t} = -\frac{\Delta(BNS\cos\alpha)}{\Delta t} \tag{26}$$

Această relație arată că t.e.m. induse se pot obține variind în timp fluxul prin schimbarea permeabilității circuitului, variația lui B (variația lui I), variația secțiunii spirei sau a orientării ei față de liniile de forță ale cîmpului (variația lui α). În relația (26) sînt cuprinse deci toate modurile de generare a t.e.m. induse, așa cum s-a văzut din experiențele descrise sau care se pot imagina ținînd seama de variația elementelor ce intră în relație.

Legea lui Faraday arată mărimea t.e.m. sau a curentului indus căruia îi dă naștere în circuitul închis această tensiune. Curentul indus trebuie precizat însă și ca sens. Profesorul E. H. Lenz de la Universitatea din Petersburg (1834), după ce a generalizat rezultatul experiențelor privind inducția electromagnetică, a dat regula de determinare a sensului curentului indus. Astăzi se poate recunoaște ușor că această regulă este bazată pe legea conservării energiei.

Regula poartă numele de *regula lui Lenz* și se exprimă astfel:

sensul curentului indus ce traversează un circuit închis este astfel încît fluxul său propriu tinde să compenseze variația fluxului ce i-a dat naștere.

Fie o bobină A făcută din mai multe spire. Dacă apropiem de ea sudul unui magnet M (fig. 79, *a*) sau al unui solenoid, curentul indus în bobina A privită din direcția liniilor de forță are sensul mișcării acelor de ceasornic. Acest curent conform regulii stabilite în electromagnetism face ca la capătul bobinei A apropiat de magnet să apară polul sud. Bobina respinge astfel magnetul sau solenoidul care se apropie. În cazul apropierii polului nord, curentul indus are semn schimbat. El creează un pol nord în fața nordului magnetului și caută să-l respingă.

Restabilirea unui curent în bobina primară este totuna cu apropierea (mărirea fluxului) magnetului. Întreruperea curentului este echivalentă cu depărtarea inductorului.

Dacă se ține seama de polaritatea solenoidului primar cînd este

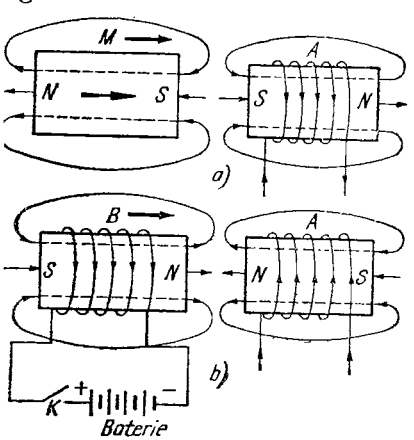


Fig. 79

traversat de un curent continuu permanent, putem stabili sensul curentului indus în A la închiderea și deschiderea curentului din solenoidul B (fig. 79, *b*).

Din cele arătate rezultă că acțiunea curentului indus se opune cauzei ce l-a produs. Semnul minus din legea lui Faraday precizează tocmai această acțiune contrară față de variația fluxului inductor.

Demonstrarea regulii lui Lenz se poate face prin diferite experiențe. Una din cele mai simple este aceea în care o bobină înfășurată pe un miez de fier are, la capătul miezului suspendat, un inel de aluminiu ce se poate mișca în lungul axei miezului. Cînd se stabilește curentul prin bobină, inelul este respins. La întreruperea curentului, inelul este atras. Este dovada că în inel t.e.m. indusă a creat un curent indus care are sensul dat de regula lui Lenz.

Problemă rezolvată

Printr-o bobină A cu rezistența $R_A=0{,}9\ \Omega$ fluxul total variază de la $\Phi_1=3$ Wb la $\Phi_2=0{,}6$ Wb în 0,1 secunde.

Să se calculeze valoarea medie a curentului și cantitatea de electricitate q ce traversează bobina, dacă ea este legată la un miliampermetru cu rezistența proprie $R_G=0{,}3\ \Omega$.

$$e_{med}=-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}=\frac{3-0{,}6}{0{,}1}=\frac{2{,}4}{0{,}1}=24\ \text{V}.$$

Dacă $R=R_A+R_G$

$$i_{med}=\frac{e}{R_A+R_G}=\frac{24}{1{,}2}=20 \text{ și } q=i\Delta t=20\cdot 0{,}1=2\ \text{C},$$

sau altfel: $q=i\Delta t=\frac{\Delta\Phi}{R}$ deci $q=\frac{\Phi_1-\Phi_2}{R}=\frac{2{,}4}{1{,}2}=2$ C.

Întrebări recapitulative

1. **Ce legătură există între electromagnetism și inducția electromagnetică?**
2. **De ce este necesară o variație de flux pentru a se produce fenomenul de inducție electromagnetică?**
3. **Care este relația dintre tensiunea electromotoare indusă și curentul indus?**
4. **De ce este necesar ca în legea lui Faraday să apară semnul minus și care este semnificația fizică a lui?**

Exerciţii

1. Să se determine sensul curentului indus în bobina A din figura 79, b cînd se închide şi cînd se deschide întrerupătorul K. Înfăşurarea bobinei fiind aceea arătată pe figură se inversează polaritatea bateriei. Să se arate şi în acest caz sensul curentului indus.
2. O bobină cu secţiunea de 10 cm^2 avînd 100 spire se aşază normal pe un cîmp de inducţie de 1 Wb/m^2 (1 tesla). Care este timpul în care trebuie să anulăm cîmpul ce traversează bobina dacă vrem să obţinem în ea o t.e.m. indusă de 1 volt.

R: 0,1 s.

40. Tensiunea electromotoare într-un conductor liniar

Să luăm un circuit format din două fire neizolate paralele F şi F' orizontale şi la distanţa l unul faţă de altul, legate în serie cu un galvanometru (fig. 80). Pe fire lunecă un element de conductor MM' perpendicular pe ele. Firele şi conductorul sînt plasate într-o regiune unde există un cîmp de inducţie uniform B, vertical produs de un magnet sau electromagnet.

Experienţa se aranjează ca în figura 42 pentru verificarea legii lui Laplace, dar aici firele nu sînt alimentate de la sursă. Ele sînt închise pe un galvanometru. Galvanometrul va fi parcurs de un curent atunci cînd mişcăm cu o viteză v conductorul MM' pe firele F şi F' care rămîn fixe.

Pentru aflarea sensului t.e.m. de inducţie electromagnetică în circuitul liniar se foloseşte regula mîinii drepte:

> **dacă se ţine mîna dreaptă în aşa fel încît liniile de inducţie pătrund prin palmă, iar degetul mare arată sensul mişcării conductorului** (v), **degetele întinse arată sensul t.e.m. indusă în conductor** (fig. 81).

Mărimea t.e.m. se găseşte experimental şi prin calcul că are valoarea:

$$e = -Blv.$$

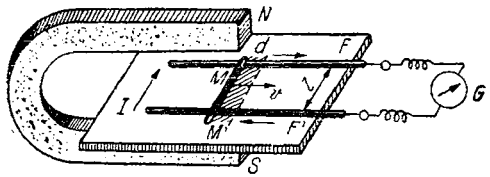


Fig. 80

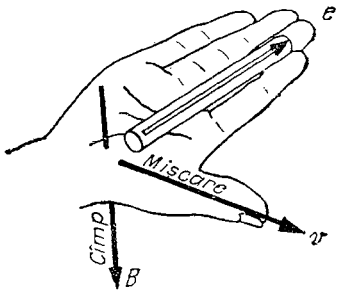


Fig. 81

Presupunem că t.e.m. a luat naștere ca urmare a variației fluxului lui B prin suprafața pe care a descris-o conductorul în timpul t cînd s-a deplasat pe conductorii FF', cu distanța d. Deoarece conductorii F, F' sînt așezați la distanța l, atunci suprafața descrisă este $S=l\times d$ (suprafața haşurată pe figură). Fluxul inducției B prin această suprafață este $\Phi=B\cdot S$, căci B este perpendicular pe S.

T.e.m. după legea lui Faraday este $e=-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ sau în cazul variației uniforme a fluxului $\frac{\Phi_2-\Phi_1}{t_2-t_1}$ unde $t_2-t_1=t$.

După timpul t fluxul a variat cu:

$$\Phi_2-\Phi_1=B\cdot S.\ \text{Deci}\ e=-\frac{B\cdot S}{t}=-\frac{B\cdot l}{t}\,d=-B\cdot lv\ \text{căci}\ \frac{d}{t}=v,$$

viteza cu care mișcăm pe MM'. Dacă conductorul se mișcă paralel cu liniile cîmpului de inducție magnetică, t.e.m. este nulă căci fluxul este nul.

41. Explicarea electronică a inducției electromagnetice

Experiența și raționamentul făcut au arătat că în elementul de conductor mobil MM' apare o t.e.m. cînd el este mișcat într-un cîmp B. Apariția acestei t.e.m. induse, deci a fenomenului de inducție electromagnetică, se poate explica ținînd seama de mișcarea electronilor în conductorul ce se deplasează în cîmpul de inducție magnetică.

În cîmpul de inducție B electronii liberi din conductorul metalic în agitația lor termică se mișcă dezordonat, așa încît forța Lorentz (v. § 28) ce lucrează asupra lor are o rezultantă nulă și deci nu are un efect de orientare asupra electronilor.

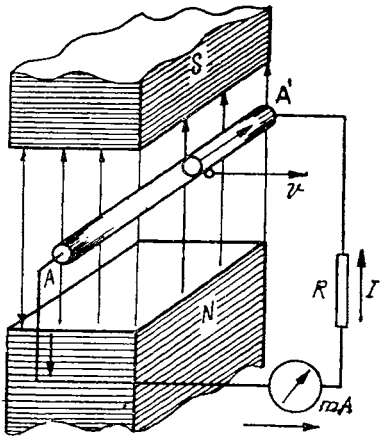


Fig. 82

Dacă conductorul se mișcă cu o viteză v într-o anumită direcție, atunci electronii liberi din metal capătă toți o componentă suplimentară a vitezei lor egală cu v și îndreptată în direcția acestei viteze. Forța lorentziană produce atunci o deplasare a electronilor în direcția ei și în sensul dat de regula mîinii stîngi pentru electroni. La un capăt al conductorului se vor aduna electroni mai mulți și acest capăt se va încărca negativ, capătul celălalt va avea lipsă de electroni și va fi încărcat pozitiv. Între cele două capete apare o t.e.m. La deplasarea conductorului în sens invers și în același cîmp B, forța lorentziană se inversează și deci și t.e.m.

În momentul încetării mișcării, t.e.m. încetează, forțele Lorentz fiind exercitate asupra fiecărui electron avînd o rezultantă nulă.

În figura 82 se arată sensul forței Lorentz care acționează electronii conductorului ce se deplasează cu viteza v perpendicular pe B și sensul curentului dat de t.e.m. indusă.

B. Autoinducția

42. Inductanța, unitatea de inductanță

Ori de cîte ori producem o variație a fluxului de inducție prin suprafața limitată de conductor se observă fenomenul de inducție electromagnetică indiferent de modul cum am produs variația de flux.

Dacă trecem un curent printr-un circuit care limitează o suprafață oarecare, un flux magnetic proporțional cu intensitatea curentului va

trece prin acea suprafață. Fluxul, așa cum s-a arătat în cazul unei spire sau al unui solenoid cu un număr N de spire, este $\Phi = L \cdot I$. Mărimea L este o caracteristică a circuitului și se numește inductanța circuitului. În cazul cînd curentul este variabil în timp fluxul va fi și el variabil. Variația fluxului produsă de însuși curentul circuitului va face să apară o t.e.m. indusă, numită tensiune *autoindusă*. Fenomenul de inducție electromagnetică ce apare într-un circuit ca urmare a variației curentului ce străbate circuitul poartă numele de *fenomen de autoinducție*. T.e.m. autoindusă produce un curent în circuit, care se suprapune peste cel care i-a dat naștere. După regula lui Lentz dacă t.e.m. autoindusă a luat naștere prin creșterea fluxului inductor curentul produs de această tensiune autoindusă are sensul în așa fel încît se opune creșterii fluxului. Dacă de exemplu creșterea fluxului inductor al unei bobine s-a făcut prin creșterea curentului bobinei, atunci curentul autoindus va căuta să scadă curentul din circuit, adică va avea sens opus. Tensiunea electromotoare autoindusă ca mărime este dată de legea lui Faraday:

$$e_a = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{L\Delta I}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Experiența de mai jos verifică cele spuse. Se pun în paralel în circuitul unui acumulator două becuri identice ce funcționează la tensiune mică, unul A în serie cu o bobină cu miez de fier, celălalt B în serie cu un reostat cu cursor R (fig. 83). Închizînd circuitul acumulatorului, reglăm cu reostatul curentul ca cele două becuri să lumineze la fel în funcționare continuă. Deschidem apoi circuitul și după un timp îl închidem: se observă că becul A se aprinde ceva mai tîrziu. Curentul în bobina L atinge valoarea maximă mai tîrziu decît cel din ramura cu reostat. Repetăm experiența, dar numai cu cele două becuri scurtcircuitînd prin K_2 bobina cu miez de fier. Cele două becuri reglate se aprind la restabilirea curentului în același timp. Deoarece autoinducția nu mai apare ca în cazul bobinei cu miez de

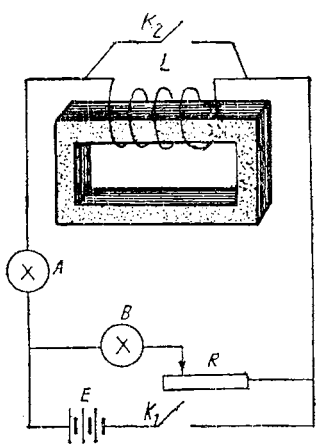


Fig. 83

fier, nu mai apare nici întîrzierea în aprinderea becului. În cazul primei experienţe, cînd închidem circuitul, curentul creşte prin bobină de la zero la valoarea sa maximă într-un timp scurt; fluxul bobinei creşte şi el de la zero la valoarea maximă a sa, care este $\Phi = LI$. În timpul variaţiei fluxului ia naştere în bobină o t.e.m. autoindusă, care dă un curent indus ce se suprapune peste curentul dat de pilele din circuit. Acest curent dat de o creştere a fluxului se opune cauzei ce l-a produs, este deci de sens contrar curentului principal. Becul în serie cu bobina se aprinde mai tîrziu, fiind parcurs de diferenţa dintre curentul sursei şi cel de autoinducţie. Sensul t.e.m. de autoinducţie la închiderea şi la întreruperea curentului ce traversează o bobină cu miez de fier e arătat în figura 84.

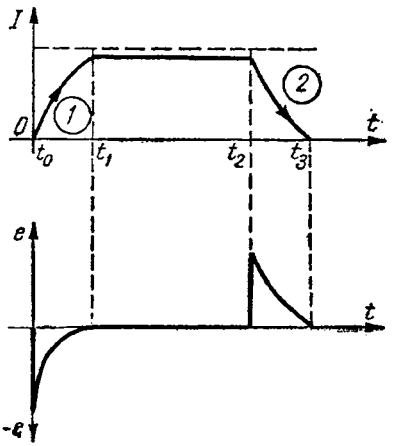


Fig. 84

Autoinducţia este un fenomen general în cazul curentului variabil, ca, de exemplu curentul alternativ. Ea devine importantă cînd circuitul are inductanţă mare.

Deoarece cum rezultă din experienţa dată, autoinducţia se opune oricărei variaţii a intensităţii curentului electric ea se manifestă ca o inerţie electromagnetică.

43. Aplicaţii ale autoinducţiei

S-a arătat mai sus că fenomenul de autoinducţie nu este totdeauna de dorit, ca, de exemplu, în cazurile cînd poate produce supratensiuni periculoase. Tehnica a găsit mijloace care să înlăture efectele dăunătoare ale inductanţelor. Aşa, de exemplu, întreruperea circuitelor parcurse de intensităţi mari şi care au inductanţe mari se face prin întrerupătoare speciale, disjunctoare cu ulei sau cu aer comprimat. Pentru micşorarea inductanţei unei bobine se pot face bobine cu înfăşurare cu dublu fir, ca în fig. 85. Firele bobinei sînt parcurse de curenţi de sens invers ce fac să se anuleze reciproc cîmpurile magnetice.

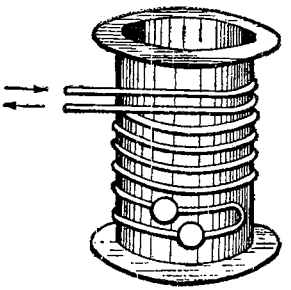


Fig. 85

Autoinducția și inductanțele (bobine de inducție) sînt însă elemente ce își găsesc utilizare în tehnică. Așa, de exemplu, în aplicațiile curenților alternativi industriali sau în tehnica curenților telefonici sau de înaltă frecvență, inductanțele împreună cu condensatorii constituie circuite oscilante, care sînt elemente fundamentale pentru telefonie și radioelectricitate. În cercetarea științifică inductanțele și supratensiunile produse prin autoinducție și-au găsit, de asemenea, utilizări ca în cazul stabilirii existenței fenomenului de supraconductibilitate.

Întrebări recapitulative

1. **Să se explice inducția electromagnetică plecînd de la principiul conservării energiei.**
2. **Cum se definește autoinducția în cazul circuitelor parcurse de curent continuu sau în cazul curenților variabili. Care sînt efectele autoinducției?**
3. **De ce între două înfășurări, una exterioară și alta interioară primei, dacă în bobina interioară se închide și se deschide curentul în bobina exterioară apar t.e.m.?**
4. **Rotind un cadru cu mai multe spire cu viteză unghiulară constantă într-un cîmp de inducție B, ce fel de t.e.m. se obține în spirele cadrului?**

Exerciții

1. Un conductor de lungime l=30 cm se află în întregime între polii unui electromagnet unde există o inducție magnetică B=0,4 tesla. Dacă conductorul se mișcă perpendicular pe liniile de inducție cu v=20 m/s, să se găsească t.e.m. indusă în conductor.

   R: 2,4 V.
2. Care este inductanța unei bobine de lungime l=40 cm care are diametrul mediu de 2 cm și un număr de 2 745 spire?

   R: L=0,00745 H.
3. O bobină are l=50 cm și diametrul D=10 cm. Cîte spire trebuie să aibă pentru ca inductanța sa L să fie 1 H?

   R: 7 110 spire.
4. Într-o bobină cu miez de fier se induce o t.e.m. de autoinducție de 60 V, la o variație a curentului de la 30 A la zero, în timp de 0,2 s. Ce inductanță are bobina?

   R: 0,4 H.

Generatoare, motoare, transformatoare

I. Curentul alternativ

44. Tensiunea electromotoare indusă într-o spiră plană care se rotește într-un cîmp de inducție magnetică

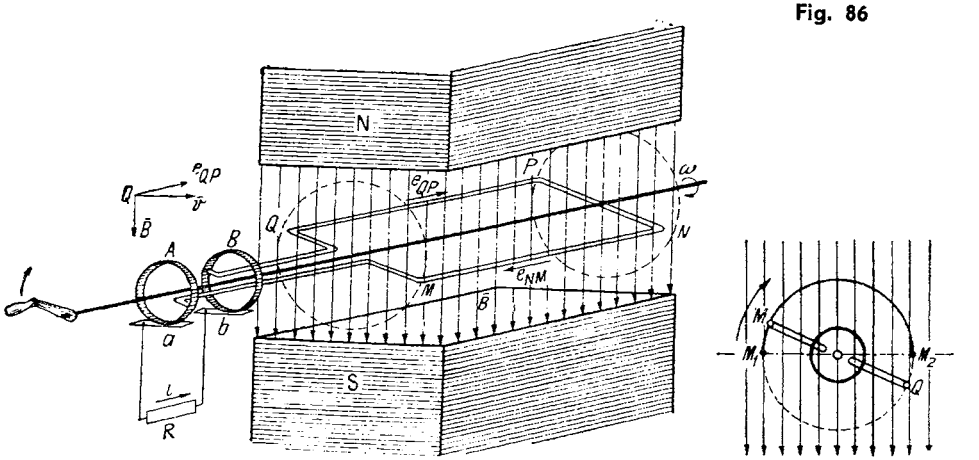
Una dintre cele mai importante aplicații ale fenomenului de inducție electromagnetică o constituie producerea curentului electric de către generatoarele de curent alternativ și generatoarele de curent continuu.

S-ar părea că este simplu de realizat un generator de curent continuu, întrucît pentru aceasta ar trebui doar ca să se deplaseze cu viteză constantă un conductor rectilinu, într-un plan perpendicular pe liniile unui cîmp de inducție magnetică $\vec{B}$, uniform. În acest caz s-ar obține în conductor o t.e.m. constantă $e = Blv$, deoarece fiecare dintre cele trei mărimi care o determină sînt și ele constante. Practic însă acest dispozitiv este aproape imposibil de realizat din cauză că este foarte greu să se creeze un cîmp magnetic uniform într-o regiune foarte întinsă.

Este mult mai ușor de obținut o t.e.m. de inducție corespunzătoare scopurilor practice, rotind o spiră într-un cîmp $\vec{B}$ uniform care ocupă *un spațiu restrîns*. Dar, așa cum se va arăta mai jos, un astfel de dispozitiv nu permite obținerea unei t.e.m. constante, ci a unei t.e.m. variabilă în timp, și anume alternativă.

Pentru aceasta (fig. 86, *a*) se folosește un conductor îndoit în forma unei spire dreptunghiulare *MNPQ*, al cărei început este legat

Fig. 86



a *b*

la un inel metalic *A*, iar sfîrşitul la un alt inel metalic *B*. Pe aceste inele apasă două perii *a*, *b* metalice (sau din cărbune). Spira se roteşte cu o viteză constantă în cîmpul uniform *B* creat, de exemplu de un magnet permanent. În timpul primei jumătăţi de rotaţie a spirei, cînd *M* ajunge din M_1 în M_2 (fig. 86, *b*), în conductorul *MN* ia naştere o t.e.m. $e_{MN}=Blv$, unde *v* este acea componentă a vitezei periferice *v'* care produce t.e.m., adică componenta perpendiculară pe direcţia lui $\vec{B}$*. Aplicînd regula mîinii drepte (fig. 86, *a*) se observă că această t.e.m. este îndreptată dinspre *M* spre *N*. Totodată se vede că în conductorul *PQ* ia naştere o altă t.e.m. e_{PQ} egală cu e_{MN} şi cu un astfel de sens încît se însumează cu aceasta. Sensul opus al lui e_{PQ} se explică prin sensul opus al vitezei conductorului *PQ* faţă de viteza conductorului *MN*. Deşi se rotesc, în conductoarele *NP* şi *MQ* nu iau naştere t.e.m. de inducţie, pentru că ele nu taie liniile cîmpului $\vec{B}$, ci se deplasează paralel cu ele.

Aşadar în spiră ia naştere o t.e.m. totală $e_1=2\,Blv$; cum $v=v'\sin\alpha$ (fig. 87) rezultă că $e_1=2\,Blv'\sin\alpha$ (27). S-a notat cu α unghiul format de *v'* (perpendiculară pe planul spirei) cu direcţia liniilor lui $\vec{B}$. Conectînd un rezistor *R* între periile *a* şi *b*, prin spiră,

* Cealaltă componentă a vitezei *v''*, nu taie liniile lui *B*, fiind paralelă cu ele şi deci nu produce t.e.m. (fig. 87).

inele, perii și rezistor va circula un curent electric îndreptat (prin R) de la b spre a.

Din fig. 88, a se observă că în timpul celei de-a doua jumătăți de rotație (cînd M trece din M_2 în M_1 fig. 88, b) t.e.m. totală din spiră este de asemenea, e_1, dar ea este orientată în *sens contrar* și face deci să treacă prin R un curent de sens contrar celui din cazul precedent. Așadar, t.e.m. variază în timp, schimbîndu-și periodic valorile (sinusoidal, v. relația 27) și sensul; de aceea ea este denumită *t.e.m. alternativă sinusoidală*. Cînd $\alpha = 90°$, adică planul spirei este paralel cu liniile lui B, $\sin 90° = 1$ (relația 27) și e_1 are cea mai mare valoare: $E_{m1} = 2\,Blv'$ (28). De aceea t.e.m. indusă în spiră la un moment oarecare t este: $e_1 = E_{m1} \sin \alpha$.

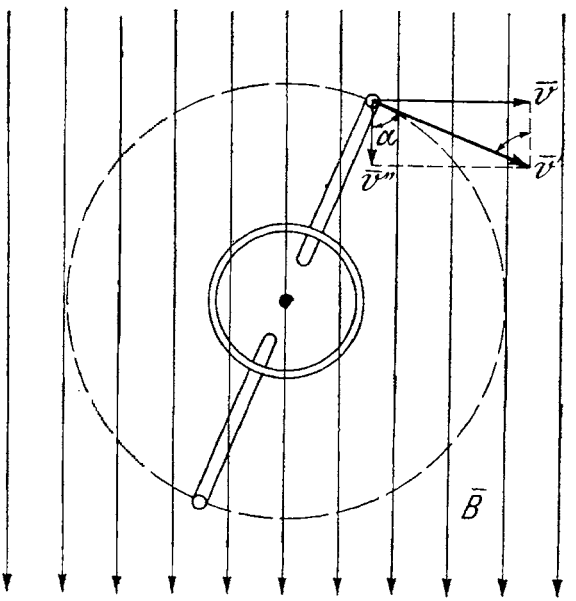


Fig. 87

Dacă în scopul obținerii unei t.e.m. mai mari se folosește un cadru care conține n spire, atunci se obține o t.e.m.: $e = ne_1 = nE_{m1} \sin \alpha = E_m \sin \alpha$ (29).

Cînd se leagă la perii un rezistor cu o rezistență R mult mai mare decît rezistența spirei, atunci prin el va circula un curent $i = \frac{e}{R} = \frac{E_m}{R} \cdot \sin \alpha = I_m \sin \alpha$ (30), care își schimbă și el periodic valorile și sensul, adică este un *curent alternativ sinusoidal*.

Variația t.e.m. $e = E_m \sin \alpha$ pentru diferite poziții ale spirei (cadrului) se poate urmări în figura 89 (curba trasată plin). Tot aici se poate aprecia și care este fluxul magnetic Φ îmbrățișat de spiră (cadru) în diferite poziții (regiunea umbrită) și deci felul în care variază Φ (curba trasată întrerupt). Din această figură se observă că în cursul primei jumătăți de rotație (0°—180°), curentul i străbate

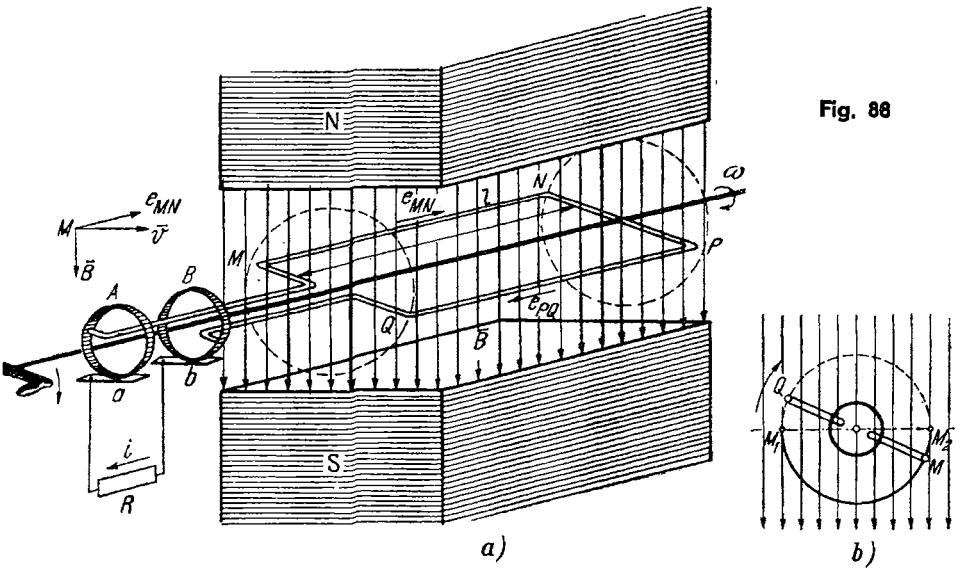


Fig. 88

rezistorul într-un sens care este determinat de sensul pe care îl are t.e.m. e; în acest interval, e are valori pozitive (alese convenţional). În cea de-a doua jumătate de rotaţie (180°—360°), sensul t.e.m. şi al curentului se inversează, iar pe grafic aceasta corespunde valorilor negative ale t.e.m. e. Trebuie reţinut că în cazul arătat, cînd între periile a şi b se află un rezistor, graficul reprezintă în acelaşi timp variaţia t.e.m. cît şi variaţia curentului, întrucît ele sînt determinate prin expresii de acelaşi fel (v. relaţiile 29 şi 30). Din grafic se mai observă că t.e.m. este maximă atunci cînd conductoarele MN şi PQ intersectează cu viteză maximă liniile cîmpului $\vec{B}$, adică atunci cînd fluxul care străbate aria îmbrăţişată de spiră trece prin zero.

Acest rezultat, precum şi felul în care variază în timp t.e.m. poate fi regăsit raţionînd în felul următor. Se consideră de exemplu, patru poziţii succesive ale cadrului, care fac între ele unghiuri egale, deci care se succed la intervale de timp Δt egale (fig. 90). La rotirea din poziţia *1* în poziţia *2* are loc cea mai mare variaţie de flux $\Delta\Phi_{1,2}$, adică cea mai mare variaţie a numărului de linii ale lui $\vec{B}$ ce trec prin aria îmbrăţişată de cadru. La trecerea din poziţia *2* în poziţia *3* se obţine o variaţie de flux $\Delta\Phi_{2,3}$ mai mică decît variaţia precedentă şi în sfîrşit cea mai mică variaţie de flux are loc la tre-

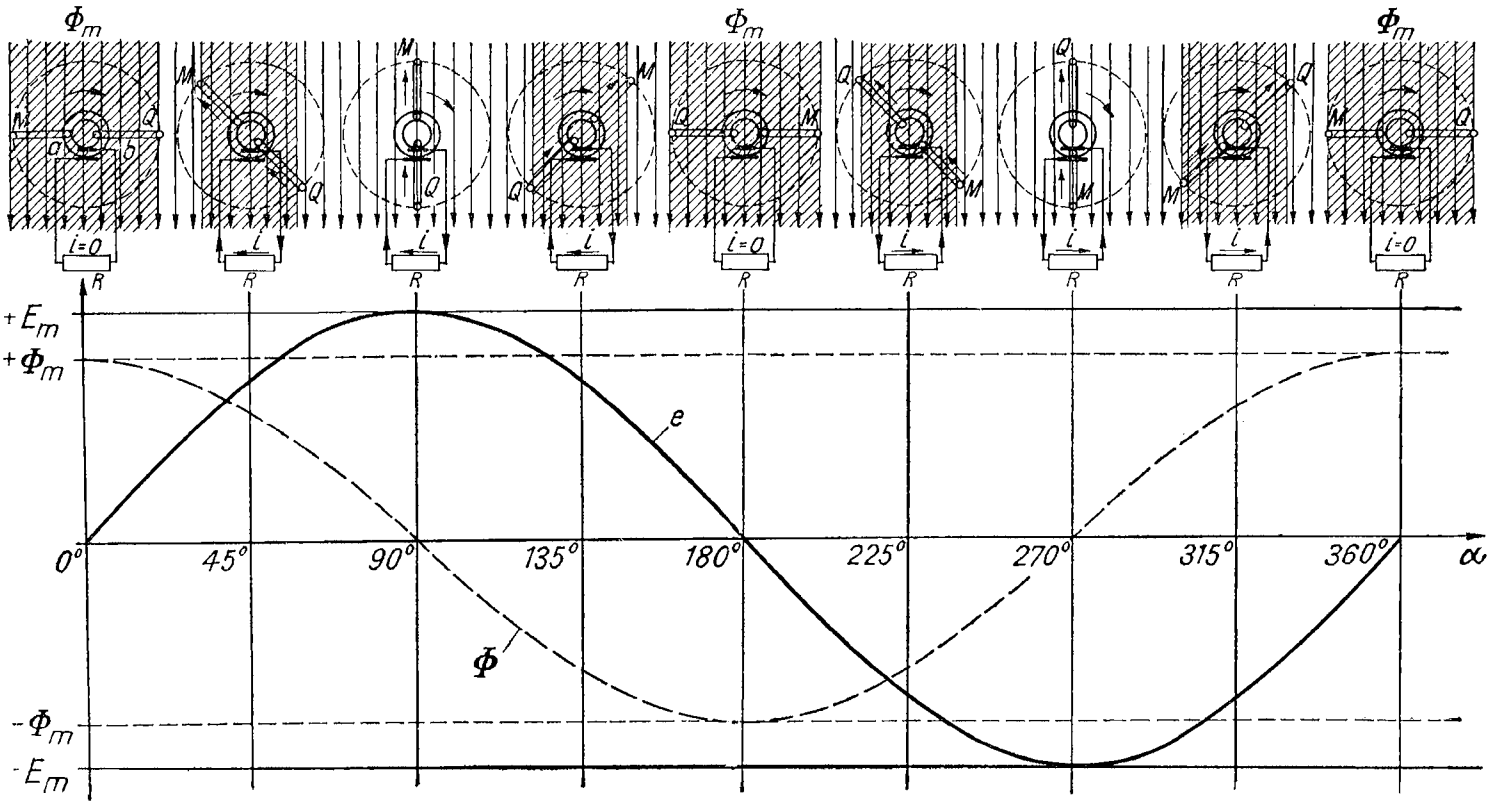

Φ_m
Φ_m
Φ_m
M
Q
a
b
i=0
R
i
$+E_m$
$+\Phi_m$
e
0°
45°
90°
135°
180°
225°
270°
315°
360°
α
Φ
$-\Phi_m$
$-E_m$

Fig. 89

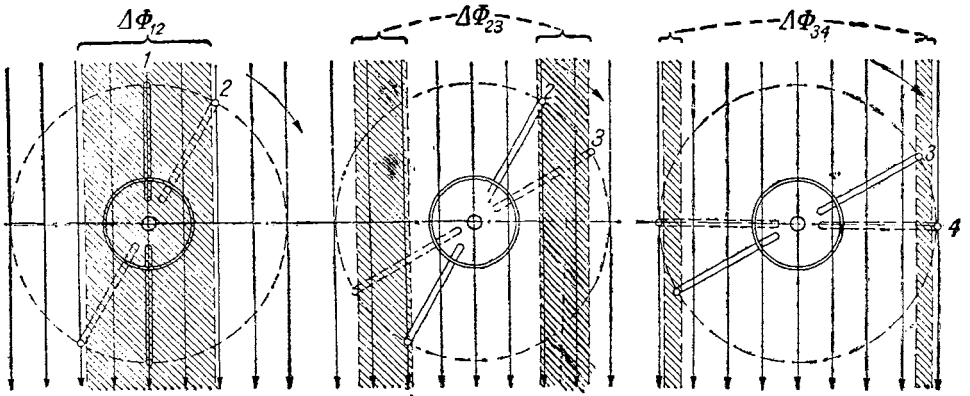


Fig. 90

cerea cadrului din poziția *3* în poziția *4*($\Delta\Phi_{4,3}$). T.e.m. induse fiind date de viteza de variație a fluxului $e=-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ și Δt rămînînd același, reiese că, așa cum arată și graficul din figura 89, e este maximă pentru poziția *1* ($\alpha=90°$) și este nulă pentru poziția *4* ($\alpha=180°$).

Întrucît mișcarea de rotație este uniformă $\alpha=\omega t$, așa încît t.e.m. alternativă și curentul alternativ date de ecuațiile (29) și (30) se exprimă prin formulele: $e=E_m \sin \omega t$ (31) și $i=I_m \sin \omega t$ (32) care sînt folosite adesea. De aici rezultă că, în graficul din figura 89 se poate considera că pe abscisă s-a reprezentat nu unghiul α, ci timpul t cu care acesta este proporțional. Bineînțeles că în acest caz în loc de 90° se va considera pe abscisă $\frac{T}{4}$, în loc de 180°, $\frac{T}{2}$, etc. Astfel graficul din figura 89 arată variația t.e.m. cu timpul conform ecuației (31).

Experiență. Se poate dovedi faptul că t.e.m. și deci și curentul alternativ circulă cînd într-un sens cînd în altul, conectînd un galvanometru suficient de sensibil la bornele unei spire sau mai bine ale unei bobine cu miez de fier, pusă în mișcare de rotație uniformă și aflată într-un cîmp magnetic produs de un electromagnet alimentat cu curent continuu (experiența se poate face cu dispozitivul realizat de către I.M.D., figura 91). În acest caz se va observa

că la fiecare jumătate de rotație a cadrului, sensul în care deviază acul galvanometrului se schimbă. Rotind cadrul uniform și destul de lent, se va putea urmări și modul în care variază curentul produs, și anume acesta are intensitatea maximă (acul galvanometrului deviază cel mai mult) cînd trece prin poziția în care planul său este paralel cu liniile lui $\vec{B}$. Dimpotrivă cînd planul cadrului este perpendicular pe $\vec{B}$, atunci acul galvanometrului trece prin poziția de zero.

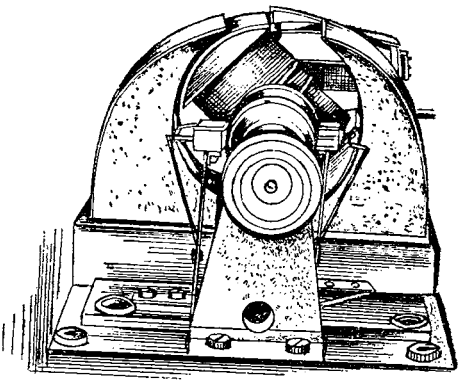


Fig. 91

Curba care arată cum variază în timp curentul alternativ (curba din figura 89) se poate obține folosind fie un *oscilograf cu buclă* și o oglindă rotitoare, fie un *oscilograf catodic*.

Dispozitivul descris pînă aici constituie cel mai simplu generator de curent alternativ care utilizează mișcarea de rotație Funcționarea sa este ușor de înțeles. În practică însă, acest dispozitiv nu poate produce t.e.m. cu valori suficient de mari, pentru că nici fluxul maxim Φ_m nu poate avea valori ridicate.

Aceasta se datorește faptului că aerul are o permeabilitate magnetică foarte mică. În scopul măririi lui Φ, cadrul se așază pe un cilindru din fier moale, a cărui permeabilitate magnetică este cu mult mai mare, de exemplu de ordinul sutelor de ori mai mare; de tot atîtea ori mai mare va fi și B, deci și fluxul: $\Phi = BS$ (S=aria cadrului).

Fenomenele descrise în acest paragraf sînt deosebit de importante, întrucît pe baza lor are loc funcționarea atît a generatoarelor de curent alternativ cît și a celor de curent continuu.

45. Perioada și frecvența curentului alternativ. Generalități asupra curentului alternativ

Dacă după terminarea unei rotații cadrul continuă să se rotească uniform, atunci în intervalele de timp egale în care are loc fiecare dintre rotațiile următoare, t.e.m. și curentul alternativ recapătă ace-

leaşi valori şi sensuri ca în cursul primei rotaţii (fig. 89). Curentul alternativ fiind un fenomen periodic, este caracterizat prin mărimile: *perioadă, frecvenţă, amplitudine, valoare instantanee.*

Intervalul de timp după trecerea căruia t.e.m. sau curentul alternativ trec succesiv prin aceleaşi valori şi au acelaşi sens se numeşte *perioadă* a t.e.m. sau a curentului alternativ. Perioada se notează cu T şi se măsoară în secunde: $\langle T \rangle = s$.

Frecvenţa t.e.m. sau a curentului alternativ arată de cîte ori se produce acest fenomen periodic în unitatea de timp (secunda). Valoarea frecvenţei este dată de numărul de perioade dintr-o unitate de timp. Între frecvenţă şi perioadă există relaţia:

$$\nu = \frac{1}{T}. \tag{33}$$

Prin urmare, frecvenţa se măsoară în 1/s: $\langle \nu \rangle = s^{-1}$. Unitatea de măsură a frecvenţei este *hertzul** (Hz) care reprezintă frecvenţa unui fenomen periodic cu perioada de o secundă. Multiplii ai hertzului utilizaţi adesea sînt: kilohertzul (1 kHz $= 10^3$ Hz) şi megahertzul (1 MHz $= 10^6$ Hz).

Mărimea $\omega = 2\pi\nu$ se numeşte pulsaţia curentului alternativ. Ea este numeric egală cu viteza unghiulară cu care se roteşte cadrul unui generator care are o singură pereche de poli şi produce curent alternativ cu frecvenţa ν.

După valoarea frecvenţei şi după utilizările pe care le au, *curenţii alternativi se pot clasifica în trei categorii principale:*

— *Curenţi de joasă frecvenţă* (denumiţi adesea *curenţi industriali*) cu frecvenţa de ordinul zecilor de Hz. Din această categorie face parte curentul alternativ cu frecvenţa de 50 Hz, care este folosit cel mai des în reţelele de curent alternativ din Europa. Curenţii alternativi cu frecvenţele de 16 şi 25 Hz sînt folosiţi în tracţiunea electrică.

— *Curenţii cu frecvenţă intermediară,* avînd frecvenţele cuprinse între 100 Hz şi 20 000 Hz. Aici se încadrează: *curenţii telefonici* (folosiţi în transmisiile telefonice pe fir ν=300—3 000 Hz) şi *curenţii*

---

* Denumirea unităţii de măsură a frecvenţei a fost dată după numele marelui fizician Heinrich Hertz (1857—1894) renumit pentru lucrările sale asupra undelor electromagnetice a căror existenţă a dovedit-o.

de audiofrecvenţă din diferite dispozitive şi instalaţii electroacustice (deci curenţii din circuitele amplificatoarelor de audiofrecvenţă din aparatele de radio şi televiziune, magnetofoane, pickupuri, microfoane, reţele de radioficare $\nu = 100—15\,000$ Hz). Curenţi cu frecvenţe de acelaşi ordin de mărime, dar cu intensităţi mult mai mari sînt folosiţi la unele tipuri de cuptoare electrice.

— *Curenţi de înaltă frecvenţă,* cu frecvenţe care depăşesc 100 kHz. Din această categorie fac parte curenţii folosiţi în tehnica transmisiilor de radio, televiziune, radiolocaţie (frecvenţe între 100 kHz şi 10 000 MHz), pentru călire prin curenţi de înaltă frecvenţă, pentru topirea şi purificarea semiconductorilor (Ge, Si), pentru sudarea maselor plastice etc.

În multe din cazurile arătate sînt necesari *curenţi alternativi sinusoidali. Curenţii nesinusoidali* prezintă şi ei importanţă în diferite ramuri ale tehnicii, de exemplu în radiotehnică.

Curentul alternativ produce toate cele *trei tipuri de efecte* cunoscute de la curentul continuu, dar acestea sînt modificate de faptul că intensitatea şi sensul curentului alternativ variază în timp.

Astfel, *efectul chimic* nu poate fi folosit deoarece curentul alternativ circulă succesiv în ambele sensuri, fiecare electrod al băii de electroliză devine de ν ori pe secundă anod şi de tot atîtea ori catod, iar produsele electrolizei nu se pot separa.

Efectul magnetic se produce însă, de exemplu, la trecerea unui curent alternativ printr-un electromagnet armătura acestuia vibrează, întrucît intensitatea curentului nu este constantă şi prin urmare nu rămîne constantă nici forţa cu care ea este atrasă.

Producerea *efectului termic* diferă faţă de cazul cînd se foloseşte curent continuu, prin faptul că are loc o degajare de căldură care variază în timp o dată cu schimbarea intensităţii curentului alternativ.

46. Valorile instantanee, maxime, efective ale curentului şi tensiunii alternative

Valoarea pe care o are la un moment oarecare o tensiune sau un curent alternativ se numeşte *valoare instantanee* a acelei mărimi alternative şi se notează cu litere mici: e (sau u), i. În mod asemănător se poate defini şi valoarea *puterii instantanee,* notată cu p şi dată de relaţia $p = ui$ (34).

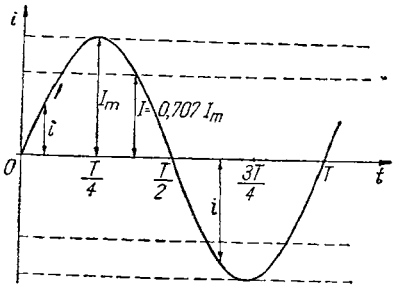


Fig. 92

Valoarea cea mai mare pe care o ia în timpul unei perioade o tensiune sau un curent alternativ se numeşte *valoare maximă* sau *amplitudine* a acelei mărimi alternative (fig. 92).

Tensiunea sau curentul alternativ sinusoidal iau de două ori valoarea maximă în timpul unei perioade, din jumătate în jumătate de perioadă. Amplitudinile tensiunii şi curentului se notează: U_m, I_m.

La trecerea unui curent alternativ printr-un rezistor se degajă o cantitate de căldură care depinde de amplitudinea curentului. Dar şi un curent continuu care străbate acelaşi rezistor poate degaja aceeaşi cantitate de căldură, dacă are o anumită intensitate. Se pune problema, ce legătură există între valorile celor doi curenţi dacă ei străbat rezistori de rezistenţe egale R şi produc aceeaşi cantitate de căldură, în acelaşi interval de timp (de exemplu, o perioadă T). Curentul continuu, trecînd prin rezistorul de rezistenţă R dezvoltă o energie $W_{c.c}=RI^2T$. Curentul alternativ a cărui intensitate se ştie că nu este constantă, trece printr-un rezistor de rezistenţă R egală cu a primului şi dezvoltă într-un timp foarte scurt Δt o energie foarte mică

$$\Delta W=Ri^2\,\Delta t=RI_m^2\sin^2\omega t\cdot\Delta t,\ \text{sau*}\ \Delta W=RI_m^2\Delta t\,\frac{1-\cos 2\,\omega t}{2}=$$

$$=\frac{RI_m^2}{2}\,\Delta t-\frac{RI_m^2}{2}\,\Delta t\cdot\cos 2\omega\, t.$$

În timp de o perioadă, suma tuturor acestor cantităţi de energie foarte mici va fi $W_{c.a}=\frac{RI_m^2}{2}T$, deoarece termenul al doilea din însumare este nul (în timp de o perioadă funcţia cosinus ia tot atîtea — şi aceleaşi — valori pozitive, cîte negative).

Deoarece s-a presupus de la început că $W_{c.c}=W_{c.a}$, urmează că

$$RI^2T=\frac{RI_m^2}{2}\,T,\ \text{adică}\ I=\frac{I_m}{\sqrt{2}}=0{,}707\ I_m\ (35).$$

Se numeşte *valoare efectivă* a unui curent alternativ sinusoidal valoarea pe care trebuie să o aibă un curent continuu pentru ca străbătînd un rezistor cu o rezistenţă egală cu a rezistorului prin

* S-a aplicat relaţia: $\sin^2\alpha=\frac{1-\cos 2\alpha}{2}$.

care trece curentul alternativ să dezvolte, într-un același timp aceeași energie, respectiv aceeași cantitate de căldură.

De exemplu, un curent continuu cu intensitatea de 2 A trece printr-un rezistor avînd rezistența $R=5\ \Omega$ timp de 1 min și dezvoltă o cantitate de căldură $Q=RI^2t=5\cdot 2^2\cdot 60=1\,200$ jouli. Curentul alternativ care trece printr-un rezistor avînd rezistența $R=5\ \Omega$ timp de 1 minut va dezvolta tot 1 200 jouli, cu condiția ca amplitudinea sa să fie $I_m=\sqrt{2}\cdot I=\sqrt{2}\cdot 2=1{,}41\cdot 2=2{,}82$ A. Cu alte cuvinte, pentru ca un curent alternativ să producă în același timp același efect termic ca un curent continuu de intensitate I, trebuie să aibă amplitudinea de $\sqrt{2}=1{,}41$ ori mai mare decît intensitatea acelui curent continuu. Un curent continuu are același efect termic ca un curent alternativ dacă are o intensitate de 70,7% din amplitudinea I_m a acelui curent alternativ (fig. 92).

Tensiunea efectivă se notează cu U și este dată de o relație asemănătoare:

$$U=\frac{U_m}{\sqrt{2}}=0{,}707\ U_m \qquad (36)$$

Măsurarea tensiunii și curentului alternativ se face cu ajutorul *voltmetrelor* și *ampermetrelor de curent alternativ*, care în foarte multe cazuri sînt gradate în așa fel încît cu ele se măsoară *valorile efective* ale tensiunii și curentului alternativ *sinusoidal*. De aceea, cînd se citește, de exemplu, la un ampermetru de curent alternativ intensitatea de 1 A, de fapt acel curent alternativ are amplitudinea de 1,41 A.

47. Tensiunea, curentul, puterea și defazajul, în circuitele de curent alternativ

a) **Circuit de curent alternativ cu rezistor.** Dacă la bornele unui rezistor cu rezistența R (de exemplu un bec electric, un reșou electric, un fier electric de călcat) se aplică o tensiune alternativă U, atunci prin acesta va trece un curent alternativ cu intensitatea $I=\frac{U}{R}$ (37). Așa cum s-a mai arătat, în acest caz curentul și tensiunea alternative sinusoidale trec prin valorile lor maxime în același moment; ele trec, de asemenea, simultan prin valoarea zero (fig. 93). Se spune că tensiunea și curentul alternativ sînt în fază sau că între ele nu există nici un *defazaj*.

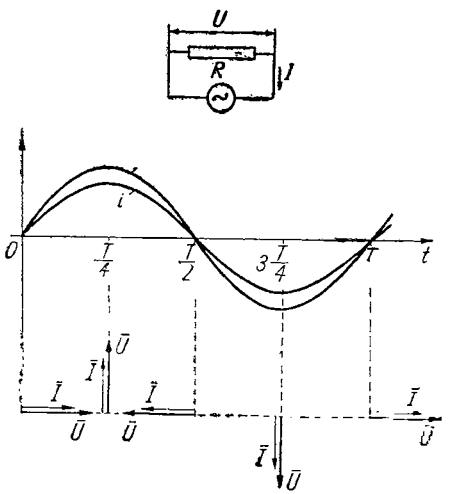


Fig. 93

Reprezentarea grafică a tensiunii şi curentului din figura 93 poate fi înlocuită printr-o reprezentare mult mai simplă folosind doi vectori $\vec{U}$ şi $\vec{I}$ care se rotesc în sensul acelor de ceasornic cu o frecvenţă egală cu frecvenţa curentului alternativ. Deoarece tensiunea şi curentul sînt în fază, unghiul dintre U şi I este zero. Proiecţiile acestor vectori pe axa ordonatelor dau valorile instantanee ale tensiunii şi curentului. Aceasta se vede comparînd diferitele valori pe care le iau tensiunea şi curentul în diferite momente (din grafic), cu mărimile proiecţiilor vectorilor rotitori $\vec{U}$ şi $\vec{I}$ pe verticală (fig. 93). Pentru simplificare, în cele ce urmează se dau diagramele cu poziţiile vectorilor tensiune şi curent *numai pentru momentul* $t=0$.

La trecerea curentului prin rezistor, energia provenită de la sursa de curent alternativ provoacă încălzirea rezistorului.

b) **Circuit de curent alternativ cu inductanţă.** Dacă se leagă la bornele unei surse de curent alternativ care dă o tensiune U o bobină cu inductanţă L mare şi rezistenţă R mică (o bobină cu miez de fier realizată cu un conductor de grosime suficient de mare), atunci se constată că prin ea trece un curent cu mult mai slab decît dacă aceleaşi bobine i s-ar aplica o tensiune egală cu U, dar nu alternativă, ci continuă. Explicaţia acestui fapt se dă ţinînd seama că bobina este străbătută de curent alternativ a cărui intensitate este variabilă în timp şi că deci în ea apare un cîmp magnetic variabil, adică un flux magnetic variabil care produce o t.e.m. de autoinducţie. După cum se ştie, regula lui Lenz arată că această t.e.m. e_L se opune în permanenţă variaţiilor curentului. Pentru ca prin bobină să poată trece curent alternativ trebuie ca sursa să aplice bobinei o tensiune alternativă u_L egală şi direct opusă:

$u_L = -e_L$.

Datorită întîrzierii produse de fenomenul de autoinducție, curentul alternativ ia valoarea maximă mai tîrziu cu $\frac{T}{4}$ decît tensiunea u_L; se spune că pentru o astfel de bobină *tensiunea* u_L *este decalată (defazată) cu 90° înaintea curentului* i (fig. 94). Așadar, unghiul de defazaj dintre u_L și i este $\varphi = 90°$.

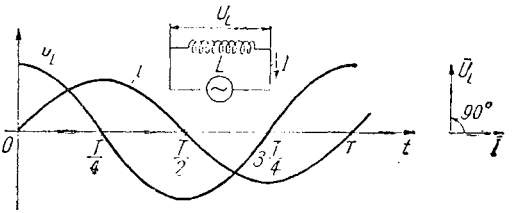


Fig. 94

În acest caz, tensiunea U_L se reprezintă prin vectorul $\vec{U}_L$ decalat cu 90° *înaintea curentului*, vectorul $\vec{I}$ (fig. 94).

O astfel de bobină opune curentului alternativ o rezistență de un tip special, denumită *reactanță inductivă*, care se notează cu X_L, este dată de relația $X_L = \omega L = 2\pi\nu L$ (38) și se măsoară în unități de rezistență, adică în Ω.

Într-un circuit cu o astfel de bobină intensitatea curentului este egală cu raportul dintre tensiunea U_L de la bornele bobinei și reactanța sa inductivă: $I = \frac{U_L}{X_L}$ (39).

Între sursa de curent alternativ și bobină are loc un schimb periodic de energie, în așa fel încît în timp de un sfert de perioadă bobina primește energie în cîmpul său magnetic, iar în următorul sfert de perioadă bobina cedează această energie sursei. Prin urmare, în total, *o astfel de bobină nu absoarbe energie de la sursa de curent alternativ*, ceea ce o face să se deosebească net de un rezistor, care absoarbe energie.

O comportare întrucîtva apropiată de cea a unei bobine ideale (cu $R \simeq 0$) au bobinele cu spire multe și din sîrmă groasă care nu au miez de fier, bobinele cu miez de fier și spire mai puține, transformatoarele (cînd lucrează „în gol", v. cap. *Transformatoare*) și unele motoare electrice cînd funcționează fără a antrena vreun dispozitiv (mers în gol).

c) **Circuit de curent alternativ cu capacitate.** Un condensator reprezintă o întrerupere pentru un circuit de curent continuu pentru că izolatorul dintre plăcile sale nu permite trecerea sarcinilor electrice. Dacă se aplică unui condensator o tensiune alternativă, atunci acesta se încarcă pînă cînd tensiunea u_C de la bornele sale devine egală cu amplitudinea tensiunii alterna-

tive U_m dată de sursă; după aceea, condensatorul se descarcă și deci în circuit apare un curent de sens contrar, iar ulterior condensatorul se reîncarcă, însă invers decît în primul caz (plăcile care prima dată se încărcaseră cu sarcini pozitive, se încarcă acum cu sarcini negative). Deoarece condensatorul nu se mai încarcă în momentul cînd u_C ajunge maximă (adică egală cu U_m), în acel moment curentul din circuit este nul. Dimpotrivă, după un sfert de perioadă $u_C=0$, iar condensatorul începînd să se încarce, prin circuit trece în acel moment un curent cu valoarea maximă. Astfel *tensiunea* u_C *de la bornele unui condensator este decalată cu 90° în urma curentului alternativ i din circuit* (fig. 95). Unghiul de defazaj dintre u_C și i este $\varphi=-90°$.

În acest caz, vectorul $\vec{U}_c$ este decalat cu 90° *în urma curentului* $\vec{I}$ (fig. 95).

Prin încărcările și descărcările succesive, condensatorul permite o mișcare de pendulare a electronilor din circuitul de curent alternativ. De aceea, în mod obișnuit, se spune că, spre deosebire de comportarea sa față de curentul continuu, *un condensator permite trecerea curentului alternativ;* prin aceasta nu trebuie însă să se înțeleagă că prin izolatorul dintre plăcile condensatorului ar trece sarcini electrice.

Prin comportarea descrisă mai sus, un condensator aflat într-un circuit de curent alternativ joacă rolul unei rezistențe de tip special, denumită *reactanță capacitivă,* care se notează X_C, este dată relația $X_C=\frac{1}{\omega C}=\frac{1}{2\pi\nu C}$ (40) și se măsoară în Ω. Intensitatea curentului dintr-un circuit de curent alternativ ce conține un condensator este dată de raportul dintre tensiunea de la bornele condensatorului și reactanța sa capacitivă:

$$I=\frac{U_C}{X_C}. \qquad (41)$$

În timpul încărcării (care durează un sfert de perioadă), condensatorul primește, de la sursa de curent alternativ, energie care se înmagazinează în cîmpul electric al condensatorului. În următorul sfert de perioadă condensatorul se descarcă și restituie această energie sursei. Așadar *condensatorul nu absoarbe energie de la sursa de curent alternativ;* prin aceasta el se asemănă cu modul în care se comportă o bobină într-un circuit de curent alternativ, dar se deosebește net de un rezistor.

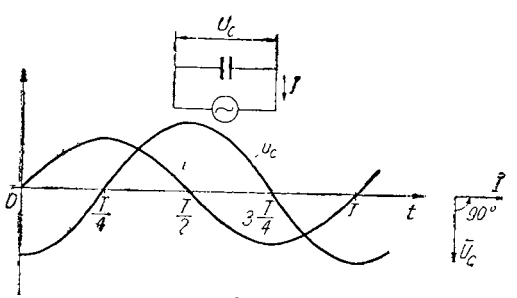


Fig. 95

d) **Circuit de curent alternativ cu rezistor, inductanță și capacitate legate în serie.** Un circuit care conține un rezistor cu rezistența R, o bobină cu inductanța L și un condensator de capacitate C opune curentului alternativ o rezistență totală de un tip special, diferită de rezistența din curent continuu, denumită *impedanță,*

notată Z. Impedanța nu se poate calcula adunînd algebric rezistența R și reactanțele X_L și X_C întrucît acestor mărimi le corespund tensiunile U_R, U_L, U_C, care, așa cum am văzut, *nu sînt toate în fază cu curentul I.*

Deoarece în acest caz, tensiunea U a sursei de curent alternativ trebuie să acopere toate celelalte tensiuni: U_R (care este în fază cu I), U_L (care e defazată cu 90° înaintea lui I) și U_C (care e defazată cu 90° în urma lui I), diagrama vectorială va reprezenta însumarea $\vec{U}=\vec{U}_R+\vec{U}_L+\vec{U}_C$ (în care se ține seama de orientarea fiecărui vector, fig. 96).

Mărimea impedanței unui astfel de circuit este funcție atît de valorile R, L și C cît și de pulsația ω a curentului alternativ. Impedanța este dată de expresia:

$$Z=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2} \tag{42}$$

$$Z=\sqrt{R^2+\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)^2} \tag{42'}$$

care rezultă din figura 96.

Între intensitatea I a curentului care trece prin acest circuit și tensiunea alternativă U dată de sursă există o relație foarte simplă care reprezintă *legea lui Ohm pentru o porțiune din circuitul de curent alternativ:*

$$I=\frac{U}{Z}. \tag{43}$$

Într-un astfel de circuit, decalajul φ dintre tensiune și curent este totdeauna mai mic decît 90°, tensiunea putînd fi decalată fie înaintea curentului, fie în urma lui, după cum reactanța inductivă este mai mare sau mai mică decît reactanța capacitivă. Decalajul se poate calcula cu ajutorul relației $\cos\varphi=\frac{R}{Z}$ (42″) (v. fig. 96).

Puterea activă P dintr-un circuit de curent alternativ reprezintă raportul dintre energia absorbită de circuit de la sursa de curent alternativ în timp de o perioadă și durata perioadei. Așadar, aceasta este o *putere medie*; ea

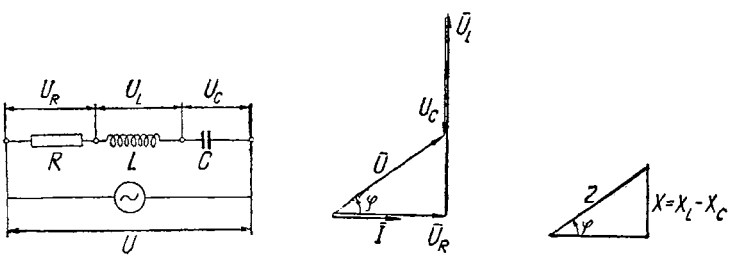


Fig. 96

are ca efect încălzirea rezistoarelor din circuitul de curent alternativ. P nu depinde numai de valorile tensiunii alternative U și curentului alternativ I, ci și de decalajul dintre intensitate și tensiune, conform relației: $P=UI\cos\varphi$ (44), unde $\cos\varphi$ se numește *factor de putere*. Folosind această relație, se pot regăsi rezultatele din cazurile particulare cînd în circuite se află numai inductanță sau numai capacitate; atunci $\varphi=\pm 90°$, $\cos\varphi=0$ și $P=0$ (bobina și condensatorul nu absorb energie de la sursa de curent alternativ). Nu trebuie să se confunde valoarea instantanee p a puterii dintr-un circuit de curent alternativ, dată de relația (34), cu puterea activă P dată de relația (44).

În cazul în care reactanța inductivă a unui circuit ajunge egală cu reactanța sa capacitivă, adică $X_L=X_C$, impedanța circuitului scade, rămînînd egală doar cu rezistența acestuia, conform relației (42): $Z_0=R$; prin urmare curentul din circuit are valoarea maximă $I_0=\frac{U}{R}$. Se spune că circuitul se află la *rezonanță*. În acest caz, cele două defazări produse de inductanță și capacitate, ca și tensiunile U_L și U_C, sînt egale și opuse, așa încît drept rezultat defazajul dintre tensiunea U a sursei și curentul alternativ din circuit la rezonanță I_0 se anulează $\varphi=0$. De aceea, puterea din circuit este maximă: $\cos\varphi=1$ și $P=UI$ (conform relației 44).

Rezonanța are loc la o anumită frecvență ν_0 la care $X_L=X_C$, adică folosind relațiile (38) și (40), $\omega_0 L=\frac{1}{\omega_0 C}$, de unde $\omega_0^2=\frac{1}{LC}$ sau $\nu_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ (45). Această ultimă relație se numește *formula lui Thomson*.

Întrebări recapitulative

1. **De cîte ori își schimbă sensul t.e.m. și curentul din spira aflată în cîmp magnetic, în timpul efectuării unei rotații complete? Susțineți valabilitatea răspunsului prin raționament și comparați cu expresiile matematice și reprezentarea grafică.**
2. **În ce momente ale rotirii spirei t.e.m. este maximă?**
3. **Ce reprezintă intensitatea efectivă a curentului alternativ?**
4. **În ce caz consumă o putere mai mare un reșou: cînd este conectat la o rețea de curent continuu sau la o rețea de curent alternativ dacă tensiunile rețelelor au aceeași valoare? (se neglijează variația rezistenței cu temperatura).**
5. **Prin ce se caracterizează comportarea unei bobine într-un circuit de curent alternativ? Dar a unui condensator?**
6. **Cum și cu cît (între ce limite) va fi decalată față de curent tensiunea de la bornele unei bobine a cărei rezistență nu poate fi neglijată?**
7. **Ce este factorul de putere? De ce se numește astfel?**
8. **Explicați folosind expresia puterii active dacă un condensator căruia i se aplică o tensiune alternativă absoarbe sau nu energie de la sursa de curent alternativ.**

Exerciţiu

O bobină conectată la bornele unui acumulator cu tensiunea de 4 V este străbătută de un curent cu intensitatea de 4/3 A. Aceeaşi bobină conectată la o sursă de curent alternativ cu frecvenţa de 50 Hz şi cu tensiunea efectivă de 4 V lasă să treacă prin ea un curent cu intensitatea de 0,8 A. Ce rezistenţă şi ce coeficient de autoinducţie are bobina?

$R=3\,\Omega$; $L=0{,}01273$ H.

II. Maşini electrice

În principiu, sub denumirea de *maşini electrice* se înţeleg maşinile care permit fie transformarea energiei mecanice în energie electrică (*generatoare*), fie transformarea inversă, a energiei electrice în energie mecanică (*motoare electrice*), ori fac posibile modificări ale unor mărimi care determină energia electrică fără însă a o transforma pe aceasta în altă formă de energie (de exemplu, modificarea tensiunii sau a curentului alternativ în *transformatoare* etc.).

Totuşi *în mod obişnuit* şi în cele ce urmează se foloseşte denumirea de *maşini electrice numai* pentru *maşinile care au părţi ce se pot pune în mişcare.*

La baza funcţionării oricăreia dintre *maşinile electrice* stau două fenomene: *fenomenul de inducţie electromagnetică* şi *acţiunea mecanică reciprocă dintre curenţi* (respectiv dintre curenţi şi cîmpuri magnetice).

Astfel transformarea energiei mecanice în energie electrică petrecută într-un *generator* necesită existenţa unor *înfăşurări* sau *bobinaje conductoare* care trebuie deplasate într-un cîmp magnetic pentru ca în ele să ia naştere o t.e.m. de inducţie, respectiv un curent electric.

Transformarea inversă care are loc în *motoarele electrice* cere ca prin aceste înfăşurări să se trimită curenţi electrici pentru ca între înfăşurări şi cîmpul magnetic să poată lua naştere o *forţă* care să pună în mişcare una dintre părţile maşinii electrice (rotorul).

Din *punct de vedere constructiv, mecanic,* maşinile electrice au două părţi principale: una fixă, numită *stator* şi alta mobilă (care se poate pune în mişcare de rotaţie), denumită *rotor.*

Din punctul de vedere al *elementelor electromagnetice,* mașinile electrice posedă, de asemenea, două părți: *circuite electrice* (înfășurările, făcute din cupru) și *circuite magnetice* (miezul din oțel masiv sau din tole de oțel). Înfășurările se așază pe miezul de oțel pentru a mări cîmpul de inducție magnetică B, o dată cu aceasta fluxul și deci t.e.m. indusă $e=Blv$ (la *generatoare*), respectiv *forța de interacțiune* $F=BIl$ (la motoare).

Față de alte tipuri de mașini de forță, mașinile electrice au numeroase *avantaje*: lucrează cu randamente mari, funcționează sigur și au o inerție redusă la comenzi (pornire, variația vitezei, oprire), ocupă un spațiu restrîns pentru o putere dată, și se pot construi într-o mare gamă de puteri (de la fracțiuni de watt, la sute de MW).

A. Mașini electrice de curent alternativ

48. Generatoare sincrone

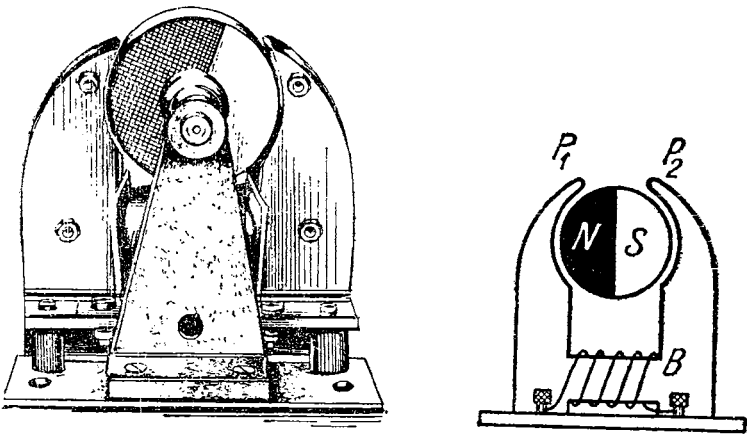
Generatoarele sincrone (alternatoarele) sînt generatoare dintre cele mai larg folosite, în special în centralele electrice.

S-a arătat că se poate produce curent alternativ prin rotirea unei spire în cîmp magnetic fix. Se poate produce curent alternativ și menținînd fix conductorul într-un cîmp magnetic care se rotește. Acesta poate fi dat fie de un magnet permanent, fie de un electromagnet alimentat cu curent continuu.

Experiență. Un generator de curent alternativ este unul dintre modelele construite de I.M.D. (fig. 97, *a*). El se compune dintr-un magnet disc (cu polii vopsiți cel nord în albastru, iar cel sud în roșu), care se poate roti între piesele polare P_1 și P_2 din oțel ale statorului. Pe miezul de oțel al acestuia se află înfășurarea B în care se induce curentul alternativ (fig. 97, *b*).

Făcînd legătura între cele două borne ale generatorului și un galvanometru cu zero la mijloc și învîrtind foarte lent și uniform rotorul-magnet *în același sens,* se pot urmări deviațiile acului, care au loc *cînd într-un sens cînd în altul.*

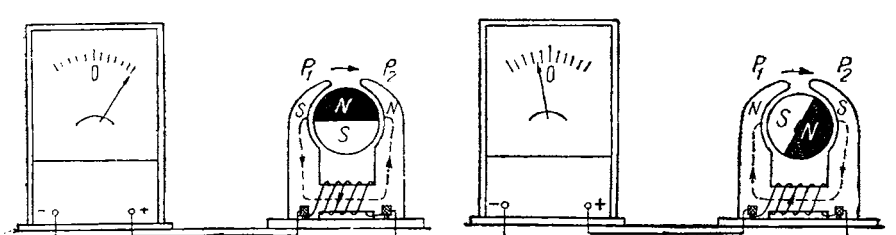
Cînd polul N se apropie de piesa polară P_2 a statorului, crește fluxul magnetic care o străbate pe aceasta; prin inducție electromagnetică în înfășurarea statorului ia naștere un curent cu un astfel de sens (fig. 98, *a*) încît P_2 să devină un pol N. Totodată polul S se



a) Fig. 97 b)

apropie de piesa polară P_1 și aceasta devine un pol S. Urmărind sensul curentului produs se observă că acesta intră în galvanometru prin borna + a sa și de aceea acul deviază spre dreapta. Pentru că, așa cum s-a arătat mai înainte la spira rotitoare, la trecerea prin această poziție fluxul care străbate piesele polare este minim, t.e.m. indusă și deci și curentul sînt maxime, iar acul deviază mult.

Dimpotrivă, cînd după ce se descrie ceva mai mult decît un sfert de rotație polul N se depărtează de P_2, iar polul S se apropie de P_1 atunci P_2 devine pol S, iar P_1 devine pol N (fig. 98, *b*). Curentul circulă prin înfășurare în sens contrar cazului precedent. Fluxul care străbate piesele polare trecînd prin valoarea maximă, variația sa este minimă, iar intensitatea curentului are o valoare mai mică decît înainte.



a) b)

Fig. 98

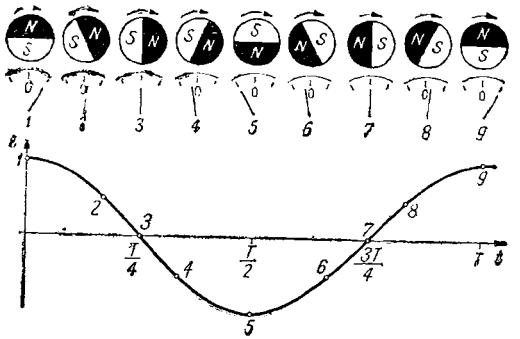
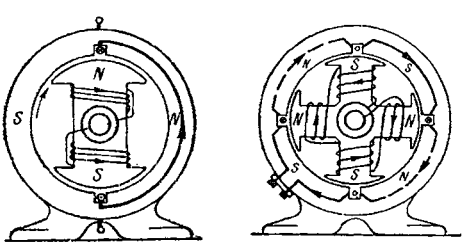


Fig. 99

Rotind în continuare magnetul-disc, se ajunge la o poziție în care polul N se află jos, iar polul S sus (invers decît în cazul figurii 98, *a*). Acum intensitatea curentului este mare și acul deviază în sens contrar celui din figura 98, *a*, ș.a.m.d. În figura 99 s-au arătat în mod simplificat cîteva poziții ale magnetului disc și ale acului galvanometrului conectat la înfășurare.

Experiența dă aceleași rezultate dacă în locul magnetului se folosește un rotor de oțel pe care se află o înfășurare străbătută de curent continuu de la un acumulator sau redresor. Generatoarele de curent alternativ folosite în practică au tocmai această structură: *rotorul* este *inductor* (el produce cîmpul magnetic), iar *statorul este indus* (în înfășurările sale se induce t.e.m.). Nu se folosește înfășurarea rotorului cu rol de *indus* pentru că ea ar fi greu de izolat în cazul producerii tensiunilor înalte, iar inelele colectoare și periile ar trebui să fie foarte mari pentru a culege curenți cu intensități mari și ele s-ar uza repede.

Rotorul are un număr pereche de *poli* pe care se află *bobinele* legate în serie și înfășurate în așa fel încît cînd sînt străbătute de curentul continuu numele polilor succesivi să alterneze (fig. 100, *b*).



a Fig. 100 *b*

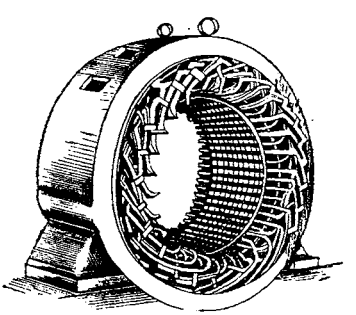


Fig. 101, *a*

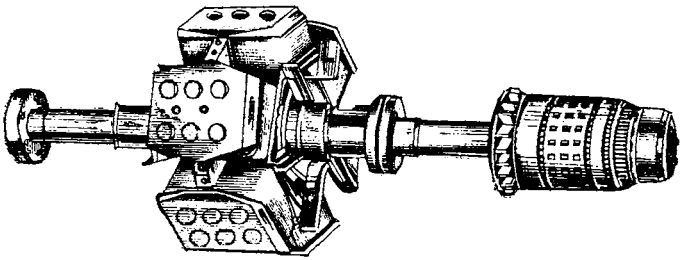


Fig. 101, b

Capetele înfășurărilor sînt legate la două inele aflate pe ax, dar izolate de acesta și între ele.

Înfășurările statorului sînt făcute în același mod, dar sînt situate în niște crestături aflate pe periferia interioară a miezului cilindric de oțel (fig. 101, *a*). În figura 100 s-au indicat acești conductori prin cercuțe în care punctul și semnul x indică sensul curentului; liniile punctate arată conductorii din partea posterioară, iar cele pline conductorii din partea anterioară. Curentul indus străbate întreaga înfășurare a statorului și poate fi culeș la *două borne* situate pe *placa* sau în *cutia de borne* a generatorului. Un astfel de generator sincron care are pe stator *un singur grup de înfășurări* (o singură *fază*) terminate cu două borne se numește *generator sincron monofazat*. Avînd însă aceeași construcție ca și *generatorul trifazat* (care va fi tratat în paragraful următor), descrierea care urmează rămîne valabilă pentru ambele tipuri de generatoare sincrone.

Pentru că înfășurările *rotorului* sînt străbătute de curent continuu, acesta se construiește din oțel masiv. *Statorul* însă, prin ale cărui înfășurări trece curent alternativ, are miezul din tole de oțel cu siliciu, izolate cu lac pentru a evita pierderile prin curenți turbionari și prin histerezis.

Rotoarele generatoarelor din figura 100 și 101, *b* numite rotoare cu *poli aparenți* lucrează doar la viteze de rotație relativ mici (sub 1 000—1 500 rot/min). Alte tipuri de rotoare denumite cu *poli înecați* au înfășurările în niște crestături axiale ca la stator și lucrează la viteze mari (3 000 rot/min), pericolul datorit efectului forțelor centrifuge ca și pierderile prin frecări fiind mai reduse. Curentul care străbate înfășurările rotorului este dat de un mic generator de curent continuu, numit *excitatoare*, care este fixată chiar pe axul

alternatorului și a cărei putere nu depășește 1% din puterea acestuia (fig. 101, *b* dreapta).

În ultimul timp se tinde să se obțină acest curent continuu prin redresarea (transformarea în curent continuu) a unei mici părți a curentului alternativ produs de alternator; în acest fel, funcționarea sa este mai sigură, iar greutatea și costul generatorului scad.

S-a văzut că dacă generatorul are o singură pereche de poli ($p=1$), ca în cazul dispozitivului arătat în figura 100 *a*, atunci rotorul descrie *o rotație* în timp de *o perioadă* a curentului alternativ; cu alte cuvinte la viteza de o rotație/s, curentul alternativ produs, are o frecvență de 1 Hz. Așadar frecvența ν a curentului alternativ (exprimată în Hz) este egală cu frecvența de rotație: $\nu = \frac{n}{60}$, unde n=turația rotorului în rot/min.

Dacă generatorul are două perechi de poli, atunci este suficient ca rotorul să efectueze o jumătate de rotație pentru ca curentul alternativ să descrie un ciclu întreg. Dacă rotorul are aceeași turație ca înainte, atunci se constată că frecvența curentului s-a dublat.

Un generator cu p perechi de poli va produce așadar un curent alternativ cu o frecvență de p ori mai mare decît cea dată de generatorul cu o singură pereche de poli. De aceea se poate scrie că frecvența ν (exprimată în Hz) a curentului alternativ produs de un *generator sincron* care are p perechi de poli este dată de relația generală $\nu = \frac{pn}{60}$

Din aceasta rezultă o concluzie importantă, folosită în practică: un alternator poate da un curent cu o frecvență ridicată fiind acționat de un motor primar care are o viteză de rotație mică, dacă generatorul are un număr de poli destul de mare.

Generatoarele descrise aici se numesc *sincrone* pentru că în timpul funcționării lor în înfășurările statorului se induc curenți al căror cîmp magnetic se învîrtește cu aceași viteză ca și rotorul. Întrucît cîmpul magnetic al rotorului se învîrtește odată cu acesta, rezultă că vitezele cîmpurilor magnetice învîrtitoare ale statorului și rotorului sînt egale, adică se află la *sincronism*.

Frecvența curentului alternativ dat de mașinile sincrone a fost stabilită la 50 Hz în Europa și 60 Hz în America; ea este menținută constantă, folosind dispozitive de reglaj automat ale vitezei motoarelor care acționează generatoarele sincrone.

Ținînd seama de *tipul motorului* care antrenează *generatoarele sincrone*, acestea se împart în:

— *turbogeneratoare* care sînt acționate de turbine termice (cu abur sau gaz), lucrează cu viteze mari și se realizează deci cu poli înecați; au axul orizontal;

— *generatoare ale grupurilor Diesel-electrice* acționate de motoare Diesel; au viteze mijlocii și mici, se construiesc cu poli aparenți și au axul orizontal;

— *hidrogeneratoare* acționate cu turbine hidraulice. Au viteze reduse, poli aparenți și axul vertical; se construiesc și pentru puteri foarte mari (sute de mii de kW).

Atît timp cît un generator *nu produce curent* în rețea, el absoarbe de la motorul primar o putere redusă care acoperă pierderile mecanice (frecări), pierderile în fier și cele corespunzătoare pentru învîrtirea excitatoarei de pe axul său.

Cînd generatorul produce curent, datorită interacțiunii dintre cîmpul statorului și curentul din înfășurarea rotorului acesta este frînat. *Cuplul de frînare* crește cînd curentul dat de generator se mărește. În acest caz apar și pierderi în cupru (în înfășurări) care se încălzește. Pentru a îmbunătăți condițiile de funcționare, pentru a micșora pierderile, deci pentru a mări randamentul generatoarelor sincrone, se iau măsuri speciale, printre care răcirea cu aer sau uneori cu hidrogen (așa cum se face de exemplu la unele generatoare de mare putere de la Combinatul siderurgic „Gheorghe Gheorghiu-Dej" din Galați).

49. Generatoare sincrone trifazate

În practică sînt folosite pe larg generatoarele sincrone care au *trei grupuri de înfășurări (faze)* pe stator, decalate cu 120° între ele (fig. 102, *a*). Ele se numesc *generatoare sincrone trifazate* și produc *curent trifazat.*

Fiecare din cele trei bobine de pe statorul generatorului din figura 102, *a* se numește *bobină de fază* sau *fază* a generatorului. Începuturile bobinelor se notează cu literele *A, B, C,* iar sfîrșiturile lor cu literele *X, Y, Z.* Cînd rotorul a cărui înfășurare este străbătută de curent continuu se învîrtește în sensul arătat în figură, polul *S* se apropie de bobina *1* (*A*—*X*), și de aceea polul ei devine tot un pol *S.* Tot poli *S* vor deveni și polii bobinelor *2*(*B*—*Y*) și *3*(*C*—*Z*),

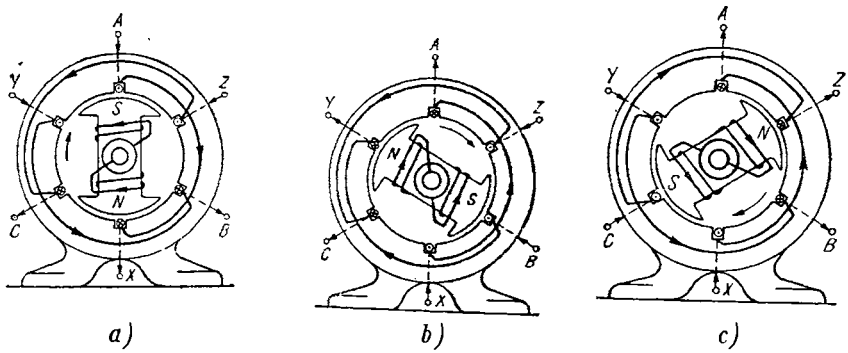


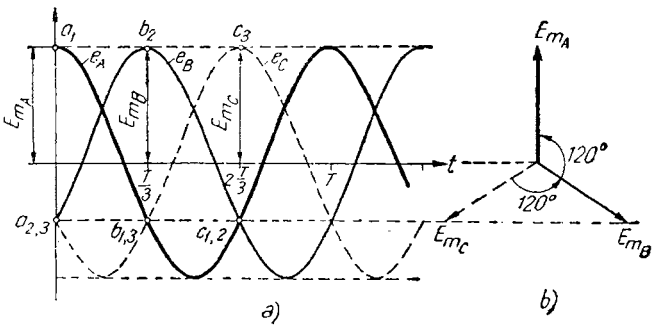
Fig. 102

însă după 1/3 respectiv 2/3 de rotație, cînd polul *S* al rotorului se va apropia de ele (fig. 102, *b* și 102, *c*). De aici se deduc sensurile curenților în fiecare din bobine; de exemplu, în primul caz (fig. 102, *a*) borna *A* a bobinei *1* este negativă, iar borna *X* este pozitivă (curentul trece de la *A* spre *X* prin înfășurare). În același caz se observă că polul *N* al rotorului se apropie de centrul bobinei *2*, deci aici ia naștere un pol *N*, adică sensul curentului va fi de la *Y* spre *B*. Polul *S* al rotorului se depărtează de bobina *3* și de aceea aici se formează un pol *N*, iar curentul are sensul de la *Z* la *C*.

Deoarece în cazul din fig. 102, *a*, fluxul magnetic care străbate bobina *1* este minim (axa polilor rotorului este perpendiculară pe axa bobinei *1*), t.e.m. e_A indusă în această bobină este maximă (v. punctul a_1 în fig. 103). În schimb t.e.m. e_B și e_C din celelalte două bobine vor avea valori mai mici decît e_A pentru că bobinele *2* și *3* sînt străbătute de un flux mai mare decît bobina *1* (e_A și e_B sînt egale, v. punctul $a_{2,3}$ în fig. 10,3 *a*). Cînd după o treime de perioadă (o rotire cu 120°) rotorul ajunge în poziția din figura 102, *b*, t.e.m. e_B este maximă (punctul b_2 în fig. 103), iar e_A și e_C sînt mai mici (și egale, punctul $b_{1,3}$). Maximul t.e.m. e_B (punctul c_3 în fig. 103) are loc după trecerea a încă *T/3* (fig. 102, *c*). Prin învîrtirea rotorului, în continuare, cu viteză constantă, în fiecare din cele trei bobine iau naștere t.e.m. alternative sinusoidale, dar decalate între ele, în timp, cu *T/3* (fig. 103, *a*).

Experiență. Se poate arăta modul în care variază cele trei t.e.m. (și curenții produși de acestea) în cazul unui generator trifazat folosind modelul de generator I.M.D. (fig. 104, *a*) și trei galvano-

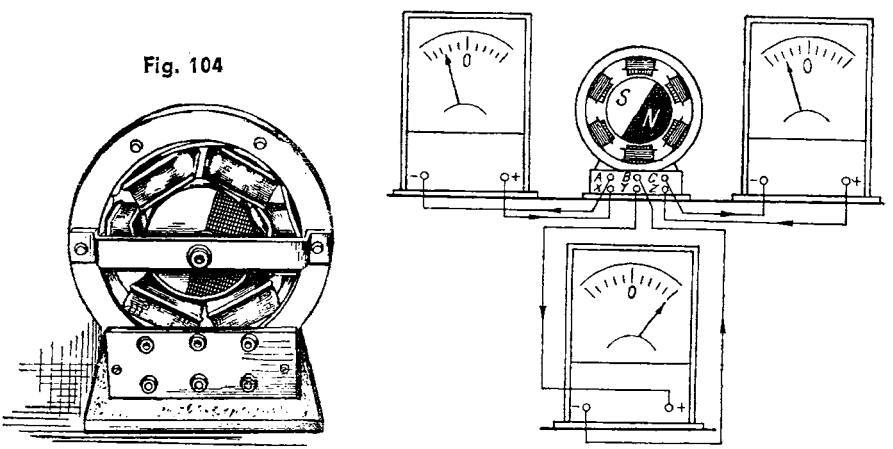
Fig. 103



metre cu zero la mijloc, conectate fiecare la cîte o fază (fig. 104, *b*). Modelul se deosebește de generatoarele trifazate din practică numai prin rotor, care este un magnet-disc și nu un electromagnet.

Se rotește lent și uniform rotorul-magnet și se urmăresc indicațiile celor trei galvanometre, verificîndu-se astfel că variațiile celor trei tensiuni au loc după cum se arată în figura 103, *a*. Astfel în figura 104, *b*, s-a arătat cazul corespunzător momentului $t=\frac{T}{3}$. Cele trei t.e.m. au aceeași frecvență și valori maxime (amplitudini) egale: $E_{mA}=E_{mB}=E_{mC}=E_m$. Ele formează împreună un *sistem trifazat simetric*. Celor trei t.e.m. decalate cu $T/3$ a căror variație în timp este reprezentată în figura 103, *a* le corespund trei vectori de mărimi egale $\vec{E}_{mA}$, $\vec{E}_{mB}$, E_{mC} decalați între ei cu cîte 120° (fig. 103, *b*). Diagrama vectorială permite să se obțină valorile instantanee ale

Fig. 104



tensiunilor la momentul $t=0$. În acest moment, valoarea instantanee a t.e.m. din bobina *1* este $\overrightarrow{E_{mA}}$, iar t.e.m. din bobinele *2* și *3* se obțin luînd proiecțiile vectorilor $\overrightarrow{E_{mB}}$ și $\overrightarrow{E_{mC}}$ pe verticală; se găsesc valorile $\frac{E_{mB}}{2}=\frac{E_{mC}}{2}$. Toate valorile găsite astfel din diagrama vectorială se verifică pe graficul din figura 103, *a*.

Din figura 104, *b* reiese că pe placa de borne a generatorului trifazat se vor găsi *șase borne* la care sînt legate capetele *A*—*X*, *B*—*Y* și *C*—*Z* ale celor trei bobine.

Dacă rotorul va avea două perechi de poli (așa cum avea generatorul monofazat din figura 100, *b*), atunci și pe stator numărul de bobine va fi dublu, dar ele vor fi legate în serie cîte două pe fiecare fază, așa încît generatorul trifazat va avea tot *șase borne*. Indiferent de numărul de perechi de poli pe care îi are, *generatorul sincron trifazat* posedă totdeauna *șase borne*.

Generatoarele sincrone trifazate nu diferă de *generatoarele sincrone monofazate* descrise anterior decît prin faptul că statorul lor are *trei faze* în loc de *una*.

50. Motoare asincrone

Motorul asincron este un motor de curent alternativ a cărui funcționare se bazează pe existența forței de interacțiune dintre *cîmpul magnetic învîrtitor* produs de înfășurarea (fixă) a statorului și *curenții induși* de acest cîmp în conductoarele rotorului (mobil).

Acțiunea pe care o are un cîmp magnetic care se învîrtește asupra unui conductor se poate urmări într-o experiență foarte simplă. De un stativ se atîrnă printr-un fir de ață rezistent, dublu, un magnet în formă de *U* (fig. 105). Firul de ață se trece printr-un mic orificiu făcut într-o placă de lemn fixată și ea pe stativ, pentru a împiedica pendularea sistemului. Sub magnet se așază un mic suport neferomagnetic *s*, prevăzut cu un ac pe care se sprijină într-o mică adîncitură *d*, un tub de aluminiu *T*. Capacul inferior *t* al tubului este străpuns de ac încît tubul se poate roti liber și bine centrat în jurul acului vertical. Pentru a evita antrenarea tubului de către curenții de aer, între magnet și tub se așază un carton subțire ori

o foaie de celuloid. Se răsucește în prealabil într-un sens oarecare de un mare număr de ori magnetul și o dată cu el firul, apoi se lasă să se rotească liber în sens contrar firul și magnetul, avînd grijă ca nici tubul, nici magnetul să nu lovească foaia de celuloid sau cartonul. Se observă că tubul conductor începe să se rotească și *el în același sens cu magnetul,* dar cu *o viteză mai mică* decît acesta.

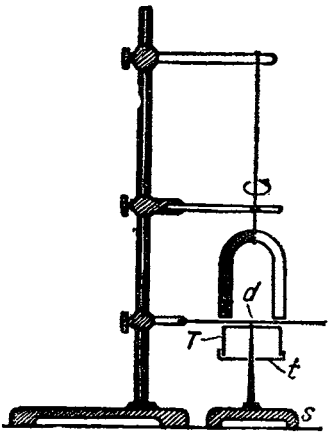


Fig. 105

Prin rotirea magnetului, liniile cîmpului său magnetic intersectează conductorul tubular și induc o t.e.m. Conductorul fiind închis, în el apar curenți de inducție. Forțele electromagnetice dintre acești curenți și cîmpul magnetic învîrtitor rotesc conductorul tubular în același sens cu cîmpul. Totuși, rotorul nu poate atinge viteza de rotație a cîmpului magnetic, pentru că atunci nu se mai induce în conductor nici o t.e.m. și forța de antrenare se anulează. Viteza rotorului scade și astfel el rămîne în urma cîmpului magnetic învîrtitor. Se spune că există o *alunecare* între cîmp și rotor.

În practică nu se produce pe această cale cîmpul magnetic învîrtitor, ci trecînd curent alternativ trifazat prin trei înfășurări care fac între ele unghiuri de cîte 120° și sînt fixate pe statorul motorului asincron. Aceste înfășurări sînt deci realizate la fel ca înfășurările din statorul generatorului sincron trifazat (fig. 101, *a* și 102). În figura 106 se arată graficul variației în timp a intensităților curenților i_A, i_B, i_C, a cîmpurilor magnetice $\vec{b}_A$, $\vec{b}_B$, $\vec{b}_C$ produse de ei și a cîmpului rezultant $\vec{b}$.

Din grafic rezultă că la momentul $t=T/12$, $i_A=-i_C$ iar $i_B=0$. Ținînd seama de sensurile și mărimile curenților i_A și i_C prin bobinele A și C și aplicînd regula burghiului drept, se reprezintă vectorii $\vec{b}_A$ și $\vec{b}_C$ ai cîmpurilor corespunzătoare (în partea de jos a figurii 106). Cîmpul rezultant, aflat cu ajutorul regulii paralelogramului, este $\vec{b}$.

Din grafic se observă că la momentul $t=5\ T/12$ (adică după $T/3$), curentul (și deci și cîmpul) prin bobina C este nul. Totodată, se

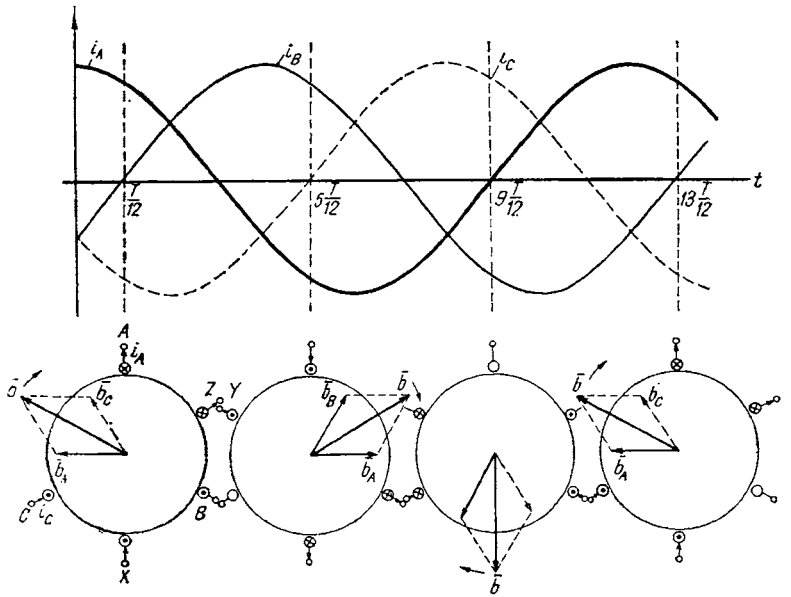


Fig. 106

vede că $i_B = -i_A$. Pentru că sensul lui i_A este opus celui anterior, de aceea și b_A are sens opus. Cîmpul rezultant $\vec{b}$ are aceeași mărime ca înainte, pentru că și mărimile componentelor au rămas aceleași; el s-a rotit însă în sensul acelor de ceasornic cu 120°.

În mod asemănător se poate explica și rotirea cu încă 120° a cîmpului $\vec{b}$ și păstrarea mărimii sale la momentul 9 $T/12$, apoi cu încă 120° la 13 $T/12$ etc. Cîmpul magnetic rezultant $\vec{b}$ efectuează o rotație în timpul unei perioade a curentului alternativ (de la $T/12$ la 13 $T/12$); așadar, frecvența cu care se rotește cîmpul magnetic este egală cu frecvența curentului alternativ care l-a produs.

Motoarele asincrone pot fi de două tipuri: *motoare cu rotorul bobinat* și *motoare cu rotorul în scurtcircuit* (nebobinate). O largă folosire au motoarele de primul tip.

Statorul tuturor motoarelor asincrone trifazate este identic cu cel al generatoarelor sincrone trifazate.

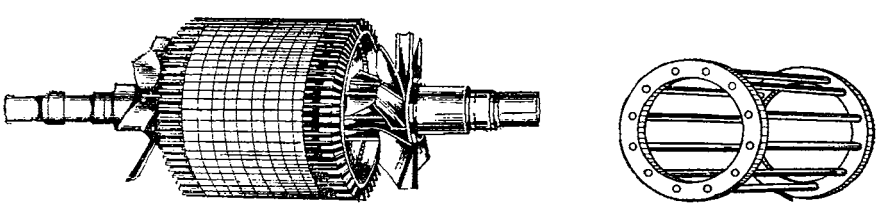
Motoarele asincrone cu rotorul în scurtcircuit au rotorul (fig. 107, *a*) format tot dintr-un cilindru de tole, însă străbătut de canale

prin care trec bare de cupru sau aluminiu scurtcircuitate la extremități cu cîte un inel metalic (fig. 107, *b*). Aspectul unui astfel de rotor face să fie denumit și rotor în *colivie*.

Motoarele asincrone cu rotorul în scurtcircuit sînt motoare cu o largă utilizare în aproape toate ramurile industriei. La pornire, rotorul se află în repaus (n_2=turația rotorului=0), viteza de rotație a cîmpului magnetic față de rotor are cea mai mare valoare ($n_1/60$= =ν=frecvența curentului alternativ) și deci t.e.m., ca și curenții induși, sînt mari, ceea ce atrage după sine o creștere a puterii absorbite, provenită din stator și aceasta, la rîndul ei, din rețeaua de alimentare. De aceea în momentul pornirii, motoarele asincrone cu rotorul în scurtcircuit absorb un curent mare de la rețea (de trei pînă la șapte ori curentul la funcționare normală).

În timpul funcționării, rotorul are o turație n_2 (rot/min) mai mică decît a cîmpului magnetic n_1 (rot/min). Așadar, rotorul nu se rotește sincron cu cîmpul magnetic; de aici și denumirea de *motor asincron*.

Pe măsură ce crește sarcina pe care trebuie să o învingă motorul, n_2 scade; o dată cu aceasta crește însă viteza relativă a cîmpului magnetic față de rotor și de aceea crește și curentul indus în rotor. Se mărește forța electromagnetică dintre cîmpul magnetic și curentul rotorului și deci cuplul pe care îl dezvoltă, iar motorul poate învinge sarcina care i se aplică; astfel viteza rotorului crește ajungînd aproape de viteza pe care o avusese mai înainte. Așa se explică pentru ce *motorul asincron își păstrează aproape neschimbată viteza, deși sarcina variază* în limite destul de largi (scăderea vitezei rămîne sub 5% din viteza normală). Pe lîngă aceasta, motoarele asincrone cu rotorul în scurtcircuit au avantajul unei construcții simple, fără contacte alunecătoare. Totuși ele au dezavantajele de a absorbi



a *b*

Fig. 107

un *curent mare la pornire* şi de a *nu li se putea varia viteza decît în trepte* folosind dispozitive şi scheme speciale.

Întrebări recapitulative

1. Care sînt fenomenele care stau la baza funcţionării maşinilor electrice?
2. Pentru ce la toate maşinile electrice statorul şi rotorul au miez de oţel?
3. Cum se justifică denumirea de maşină sincronă (generator sau motor)?
4. Care este utilizarea cea mai largă dată maşinii sincrone: generator sau motor?
5. Dar utilizarea dată maşinii asincrone?
6. De ce generatoarele sicrone au inductorul rotor şi indusul stator?
7. De ce rotoarele generatoarelor sincrone nu sînt făcute din magneţi permanenţi? Nu ar fi mai simplu?
8. De ce rotorul generatorului sincron este făcut din oţel masiv, în timp ce statorul este alcătuit din tole (table) subţiri de oţel izolate între ele?
9. De ce se preferă să se construiască generatoare sincrone cu mai mult de o singură pereche de poli?
10. Explicaţi în ce fel se produce cîmpul magnetic învîrtitor compunînd cîmpurile celor trei bobine şi pentru alte momente decît cele descrise în manual (de exemplu, la momentele $t=T/6$, $T/3$, $T/2$ etc.).
11. De ce rotorul motorului asincron nu poate atinge singur viteza de sincronism?
12. Pentru ce este atît de larg utilizat motorul asincron cu rotorul în scurtcircuit?

Exerciţii

1. Cîte rotaţii pe secundă trebuie să facă motorul primar care antrenează un generator cu 6 perechi de poli pentru ca frecvenţa curentului alternativ produs să fie de 50 Hz?

   R: 8,33 rot/s.

2. Un motor sincron este alimentat cu curent alternativ produs de un generator care are 8 perechi de poli şi o turaţie de 375 rot/min. Cîte perechi de poli are rotorul motorului dacă turaţia sa este de 250 rot/min?

   R: $p=12$.

3. Cu ce turaţie s-ar roti un ac magnetic dacă ar fi aşezat pe un vîrf ascuţit vertical în locul rotorului unui motor alimentat cu curent alternativ avînd $\nu=50$ Hz, dacă i s-ar da, pentru început, o mişcare de rotaţie suficient de rapidă?

   R: $n=3\,000$ rot/min.

B. Maşini de curent continuu

51. Principiul de funcţionare a generatorului de curent continuu

Cel mai simplu generator de curent continuu se obţine folosind o spiră care se roteşte într-un cîmp $\vec{B}$ (v. fig. 86) dar avînd în locul celor două inele un sistem de două plăci metalice C şi D (semicilindri) izolate între ele şi de ax, legate cu capetele spirei (fig. 108). Lamele C şi D alcătuiesc un *colector;* pe ele apasă două *perii* s şi t, care se conectează la rezistorul exterior R.

Curentul circulă *în spiră* într-un sens într-o jumătate de rotaţie şi în sens contrar în a doua jumătate. Schimbarea sensului de rotaţie are loc, aşa cum se ştie, cînd spira trece prin poziţiile în care este străbătută de fluxul magnetic maxim (v. fig. 109 poziţiile *1, 5, 9* etc.). Cînd are loc trecerea prin aceste poziţii se schimbă nu numai sensul curentului în spiră, ci şi lamele colectorului în raport cu periile.

Dacă în cursul primei jumătăţi de rotaţie lama C a primit curent prin peria s, iar lama D a trimis curent prin peria t, în a doua jumătate de rotaţie, lama C vine în contact cu peria t prin care trimite curent, iar lama D vine în contact cu peria s şi primeşte curent

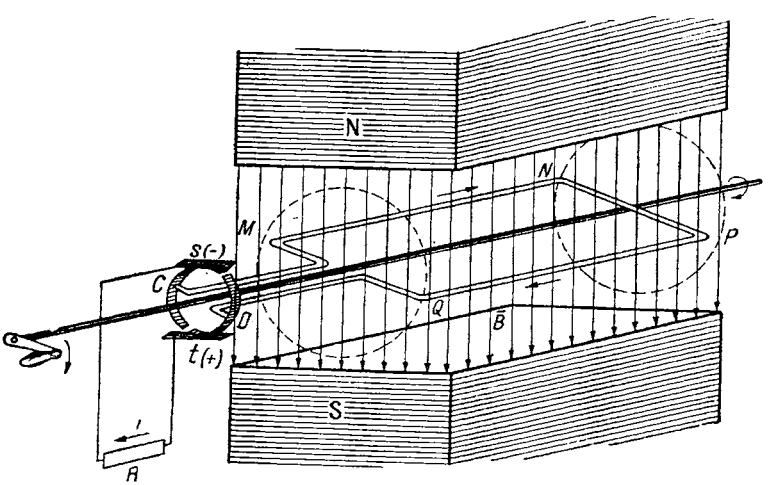


Fig. 108

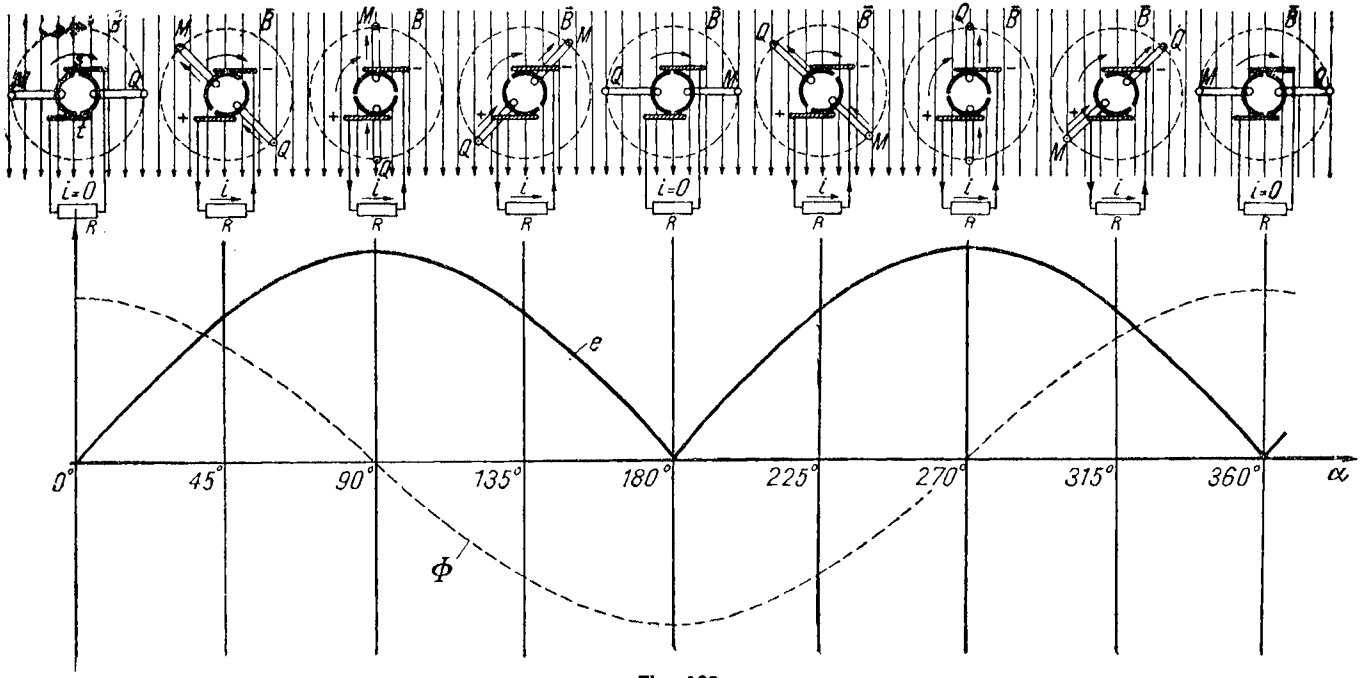


Fig. 109

prin aceasta. De aceea, tot timpul peria *t* constituie borna+a generatorului, în timp ce *s* este borna negativă; cînd spira se roteşte, t.e.m. *e* de la bornele generatorului şi curentul *i* din rezistenţa exterioară nu-şi schimbă sensul (fig. 109). Totuşi, valoarea t.e.m. şi a curentului continuu produs nu este constantă, ci variază foarte mult *(curent pulsatoriu)*. Pentru a se obţine un curent continuu cu variaţii mai reduse, în locul unei singure spire se pot folosi două spire plane separate, care fac între ele unghiuri de 90°, la colector punîndu-se patru lame metalice (fig. 110, *a*). Fiecare dintre t.e.m. induse în cele două spire vor varia în timp, în modul descris în figura 109; t.e.m. indusă în spira *2* va trece prin aceleaşi valori ca t.e.m. indusă în spira *1*, numai după ce va executa încă 1/4 de rotaţie faţă de prima. De aceea, cele două t.e.m. vor fi decalate între ele cu 90° sau, în timp, cu $T/4$ (fig. 110, *b*). Din aceeaşi figură se observă că t.e.m. rezultantă *e* (obţinută prin însumarea făcută pentru fiecare moment a ordonatelor t.e.m. e_1 şi e_2) variază mai puţin decît fiecare dintre componente.

Experienţă. Se poate arăta modul în care variază în timp t.e.m. şi curentul produs de un generator electric de curent continuu, simplu, prevăzut cu o bobină aşezată pe un miez de fier în formă de dublu *T*, conectînd un galvanometru la bornele unui model de generator I.M.D. (fie modelul mic cu stator din ferită, fie modelul mare cu stator din oţel, fig. 111, *a*) pus în mişcare de rotaţie uniformă, lentă. Acul galvanometrului indică o variaţie a curentului deplasîndu-se numai într-un sens şi atingînd de două ori în cursul unei rotaţii valoarea maximă sau zero (fig. 109).

Cînd se înlocuieşte acest rotor care are o bobină, cu rotorul cu două bobine perpendiculare între ele (fig. 111, *b*), t.e.m. şi curentul

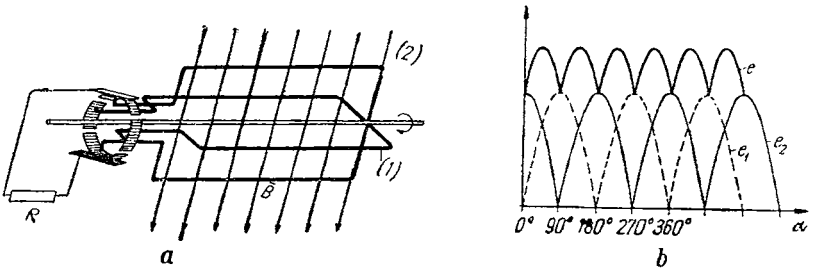
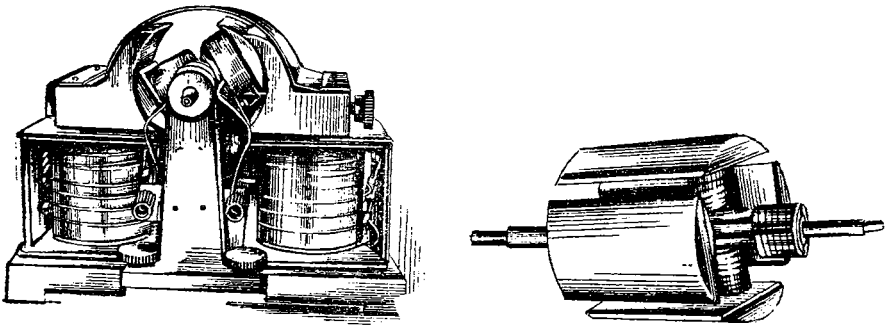


Fig. 110



a) *b*)

Fig. 111

dat de generator ating de patru ori valoarea maximă în cursul unei rotaţii; acum valoarea minimă nu mai este zero şi de aceea variaţiile curentului sînt mai reduse (fig. 110, *b* curba *e*).

Pentru a da t.e.m. mai mari şi cu variaţii cît mai reduse, generatoarele de curent continuu folosite în practică au, în locul a două spire decalate cu 90°, mai multe bobine făcînd între ele unghiuri egale şi un colector cu un număr de lame corespunzător. Astfel, folosind 16 bobine, variaţiile tensiunii scad sub 1%, iar cu 30 de bobine, sub 0,1%, adică practic se obţin o tensiune şi un curent continuu constante.

Dacă amplitudinea t.e.m. E_m dată de un cadru cu n spire este $E_m=nBlv'$ (rel. 28 şi 29), atunci ţinînd seamă de relaţiile $v'=\omega r=2\nu\pi r$ şi $\Phi_m=BS=Bl2r$ se poate scrie că E_m este proporţională cu numărul de spire al cadrului, fluxul magnetic maxim Φ_m şi frecvenţa ν de rotaţie: $E_m \sim n\Phi_m\nu$. Şi în cazul producerii *t.e.m. continue* E de către un generator cu mai multe bobine pe rotor şi mai multe perechi de poli pe stator este valabilă o relaţie asemănătoare, $E \sim n\Phi_m\nu$.

52. Construcţia maşinilor de curent continuu

Spre deosebire de maşinile de curent alternativ, la maşinile de curent continuu *rotorul* este *indus*, iar *statorul* este *inductor* (fig. 112). La generatoare acesta se explică prin faptul că pentru obţinerea curentului continuu (în circuitul exterior) din curentul alternativ care străbate înfăşurarea rotorului, este necesar ca înfăşu-

rarea indusului să aibă capetele în permanență legate la lamele *colectorului,* care își îndeplinește rolul rotindu-se în raport cu periile.

În practică, fluxul magnetic inductor nu este dat de un magnet permanent ci statorul posedă unul sau mai mulți electromagneți (poli) ale căror înfășurări se numesc *înfășurări de excitație. Polii* sînt făcuți din oțel masiv sau din tole de oțel și se fixează pe suprafața interioară a carcasei mașinii, cu buloane. Partea principală a carcasei *2, jugul,* este un cilindru din oțel turnat sau fontă, care are nu numai rolul de a susține polii dar și de a conduce fluxul magnetic dat de poli. De o parte și de alta a carcasei se află fixate *scuturile 1* și *3* (capacele), avînd în centru *lagărele.* De lagăre ori de carcasă sînt fixate *portperiile 5* așezate pe o piesă de susținere comună. Portperiile susțin și apasă *periile* (făcute de obicei din cărbune) pe colector.

Miezul rotorului 4 are formă cilindrică (indus în formă de tobă) și se face din tole de oțel (discuri cu crestături radiale izolate cu lac sau foiță). Astfel, pachetul cilindric de tole prezintă crestături longitudinale în care se așază înfășurările făcute din sîrmă sau bare de cupru izolate.

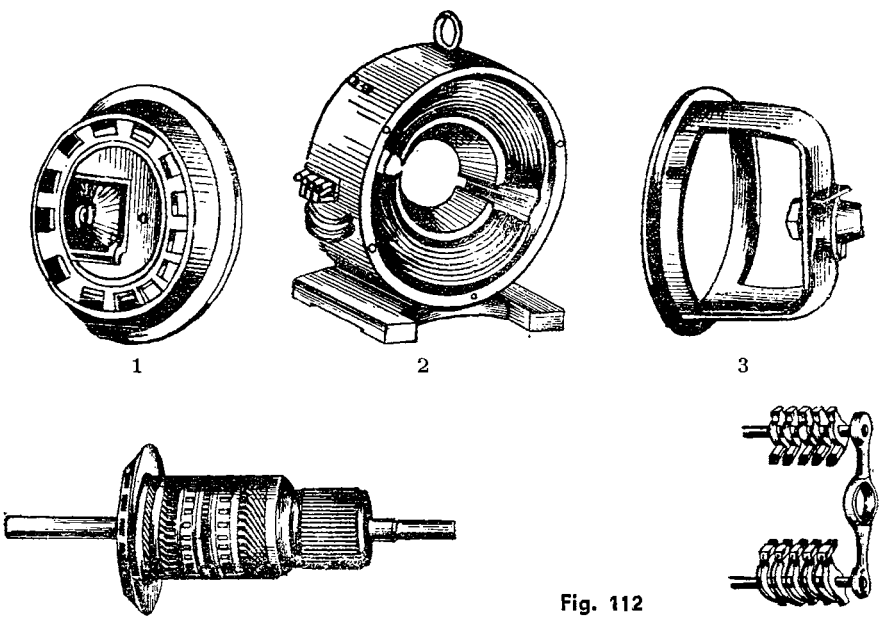


Fig. 112

Pe axul rotorului mai sînt fixate *colectorul,* cu formă cilindrică (alcătuit din lamele de cupru izolate cu mică între ele şi de ax) şi *ventilatorul.*

53. Clasificarea maşinilor de curent continuu

Maşinile de curent continuu pot fi *maşini cu excitaţie independentă,* la care înfăşurările de excitaţie sînt alimentate cu curent continuu de la o sursă din exterior (de exemplu acumulatori), şi *maşini cu autoexcitaţie* la care curentul de excitaţie provine chiar din rotor.

După felul în care sînt grupate *înfăşurarea de excitaţie (inductorul) şi înfăşurarea rotorului (indusul)* se deosebesc următoarele tipuri de *maşini cu autoexcitaţie:*

— *maşini cu autoexcitaţie-serie,* la care înfăşurarea de excitaţie avînd un număr redus de spire din sîrmă groasă este străbătută de *tot* curentul produs în indus;

— *maşini cu excitaţie-derivaţie (şunt),* la care înfăşurarea de excitaţie are un număr mare de spire din sîrmă subţire şi este străbătută de o *mică parte* din curentul produs în rotor;

— *maşini cu excitaţie mixtă (compound),* avînd ambele tipuri de înfăşurări de excitaţie arătate.

54. Generatoare de curent continuu (dinamuri)

Aceste generatore sînt acţionate de *motoare primare: motoare termice* sau chiar *motoare electrice* (în care caz grupul format este numit *convertizor motor-generator).*

Atît timp cît *generatorul nu produce curent* (la *funcţionarea în gol*) motorul primar roteşte foarte uşor rotorul generatorului trebuind să acopere doar pierderile datorate în special frecărilor.

Dacă însă *generatorul produce curent* (la *funcţionarea în sarcină*) între curenţi şi cîmpul $\vec{B}$ apar *forţe electromagnetice* $\vec{F}$, care creează un *cuplu de frînare* (aplicaţi regula mîinii stîngi în fig. 113). Pentru a învinge acest cuplu de frînare şi frecările, deci pentru a putea

antrena rotorul generatorului, motorul primar trebuie să dea o putere mecanică P_1 egală cu suma dintre puterea electromagnetică $P=EI_a$ și puterea corespunzătoare frecărilor. Dar în generator, pe de o parte, are loc o cădere de tensiune și de aceea tensiunea U la bornele sale este mai mică decît t.e.m. E, iar pe de altă parte, curentul dat rețelei este $I \leqslant I_a$ (curentul prin rotor), o parte (după tipul generatorului) fiind necesar înfășurii de excitație. Din această cauză, puterea utilă $P_2=UI$ cedată rețelei este mai mică decît puterea electromagnetică P (diferența se pierde prin încălzirea înfășurărilor de excitație și a rotorului).

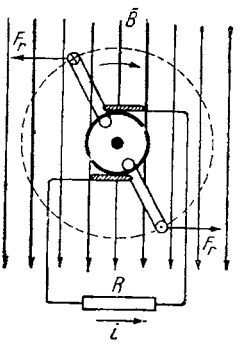


Fig. 113

Astfel, generatorul lucrează cu un *randament industrial* definit prin raportul dintre puterea utilă P_2 (dată rețelei) și puterea mecanică P_1 dată generatorului de motorul primar: $\eta=\frac{P}{P_1}$.

Randamentul electric al generatorului este dat de raportul dintre puterea utilă P_2 și puterea electromagnetică P; $\eta'=\frac{P_2}{P}=\frac{UI}{EI_a}$. La dinamul serie $I=I_a$ și $\eta'=\frac{U}{E}$. Deoarece $P<P_1$, randamentul electric este mai mare decît randamentul industrial.

Funcționarea generatoarelor cu autoexcitație se bazează pe existența *magnetismului remanent* al oțelului din care este făcut inductorul lor. La pornire, fluxul magnetic inductor se datorește numai magnetismului remanent și este slab, de aceea și curentul indus este slab. Dar fluxul magnetic crește îndată după pornire, întrucît fie tot curentul indus, fie doar o parte a sa (după tipul generatorului), străbate înfășurarea de excitație și produce un cîmp magnetic care, dacă are același sens cu cîmpul datorit magnetismului remanent, va da un cîmp rezultant mărit. În acest caz t.e.m. a generatorului crește și ea și de aceea are posibilitatea să crească și curentul de excitație, deci totodată și fluxul magnetic ș.a.m.d. Se ajunge astfel ca în scurt timp generatorul să funcționeze în *condiții normale* (nominale), dînd *tensiunea și curentul nominal*.

Generatorul cu excitație-derivație (fig. 114) dă o tensiune la borne egală cu diferența dintre t.e.m. E din indus și căderea de tensiune

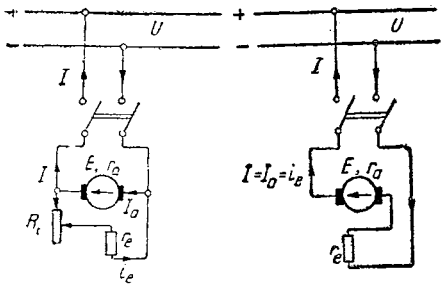


Fig. 114

Fig. 115

r_aI_a din acesta: $U=E-r_aI_a$. Aici însă curentul I_a prin indus se împarte în două: o parte o constituie curentul I prin sarcina exterioară pe care o alimentează, iar altă parte este curentul prin înfășurarea de excitație i_e; așadar $I_a=I+i_e$ (aplicați legea I a lui Kirchhoff la oricare din periile generatorului).

Tensiunea U se poate păstra constantă dacă se variază rezistența reostatului R_e în mod convenabil.

Generatorul cu excitație-serie (fig. 115) produce un curent cu o intensitate egală cu a curentului prin indus și prin excitație $I=I_a=i_e$. Aici tensiunea la borne este mai mică decît t.e.m. E dată de indus, cu suma căderilor de tensiune pe înfășurările indusului și cea de excitație: $U=E-I_a(r_a+r_e)$. De aceea, cînd I cerut de la generator crește, tensiunea U scade în mare măsură, ceea ce constituie un dezavantaj.

Generatoarele de curent continuu se folosesc în *instalațiile de electroliză*, ca *excitatoare* ale generatoarelor de curent alternativ, pentru obținerea curentului necesar *sudurii prin arc, la autovehicule* etc.

55. Reversibilitatea mașinilor de curent continuu

Un generator de curent continuu alimentat de la o rețea de curent continuu se rotește, absoarbe energie electrică și produce lucru mecanic, devenind astfel *motor de curent continuu*. Se spune că *mașina de curent continuu este reversibilă*.

Dacă generatorul de curent continuu din fig. 116, *a* care este pus să funcționeze ca motor, este alimentat în așa fel încît prin borna sa *pozitivă să intre curent* de la rețeaua de curent continuu, atunci motorul se învîrtește în același sens ca atunci cînd funcționa ca generator (aplicați regula mîinii stîngi în fig. 116, *b*).

Reversibilitatea mașinii de curent continuu se demonstrează ex-

perimental, făcînd să funcționeze ca motor modelul de generator

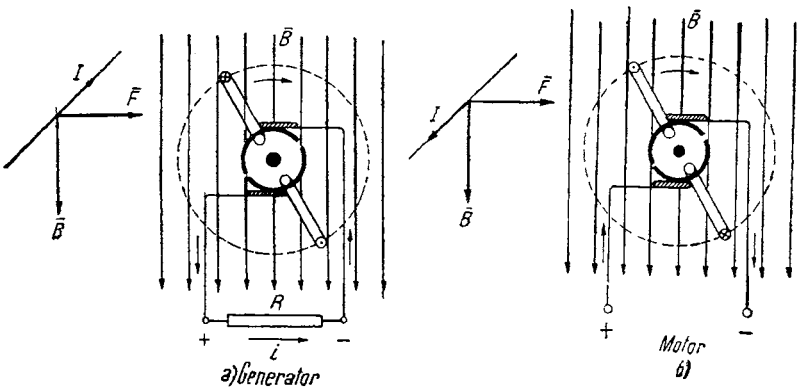


Fig. 116

I.M.D. folosit pentru prezentarea variației curentului pulsatoriu; se folosește autoexcitația-serie, alimentînd mașina cu o tensiune de circa 20 V.

56. Motoare de curent continuu

Motoarele de curent continuu se alimentează fie cu curent continuu obținut prin redresarea curentului alternativ al rețelei, fie de la acumulatori.

Cînd se pune în funcțiune motorul, în spirele rotorului se induce *o tensiune contraelectromotoare* (t.c.e.m.), E, denumită astfel pentru că are sens contrar tensiunii U de alimentare (aplicați regula mîinii drepte în fig. 116, *b*). Dacă deocamdată se face abstracție de înfășurarea de excitație, atunci se poate spune că tensiunea U echilibrează t.c.e.m. E și acoperă căderea de tensiune pe rezistența înfășurării induse: $U=E+r_aI_a$. Așa cum se știe, această t.c.e.m. este proporțională cu fluxul magnetic și cu frecvența de rotație a indusului: $E\sim n\Phi_m\nu$. De aceea, cînd motorul *funcționează în gol* (nu antrenează nici o mașină, dispozitiv etc.) și indusul are o viteză de rotație sporită E este mare și, conform relației arătate, motorul absoarbe de la rețea un curent redus $I=\frac{U-E}{r_a}$.

Dimpotrivă, cînd motorul *funcționează în sarcină*, indusul are o viteză mai mică, iar curentul de alimentare crește.

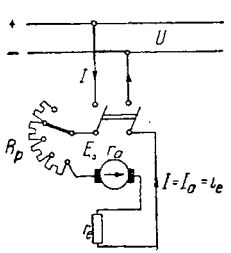


Fig. 117

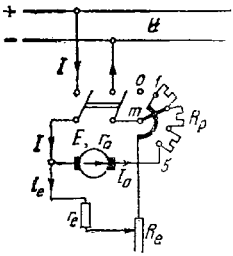


Fig. 118

La *pornirea motorului*, rotorul aflîndu-se în repaus, $E=0$, iar motorul absoarbe un curent foarte mare (r_a are o valoare deosebit de mică, zecimi sau sutimi de ohm). Pentru a înlătura acest inconvenient pornirea motorului se face cu ajutorul unui *reostat* special, care ulterior se scoate din circuit.

Cînd *funcţionează în sarcină*, motorul absoarbe o putere $P_1=UI$, care serveşte la producerea puterii electromagnetice $P=EI_a$ şi la acoperirea pierderilor din înfăşurarea indusului şi din înfăşurarea de excitaţie. O mică parte din puterea P acoperă pierderile mecanice (prin frecări) şi în fier, în timp ce majoritatea constituie *puterea mecanică utilă* P_2 disponibilă la arborele motorului.

Randamentul industrial al motorului este dat de raportul dintre puterea utilă (mecanică) P_2 şi puterea absorbită (electrică) P_1 de la reţea: $\eta=\frac{P_2}{P_1}$.

Randamentul electric al motorului reprezintă raportul dintre puterea electromagnetică P şi puterea absorbită P_1: $\eta'=\frac{P}{P_1}=\frac{EI_a}{UI}$.

Dacă $I_m=I$ (*la motorul serie*), atunci $\eta'=\frac{E}{U}$. Deoarece $P>P_2$, *randamentul electric* este mai mare decît *randamentul industrial*. Deoarece puterea electromagnetică P este dată de produsul dintre cuplul M şi viteza unghiulară ω a rotorului, se poate scrie că $P=EI_a=M\omega$. Cum $E\sim n\Phi_m\nu$ rezultă că cuplul $M=\frac{EI_a}{\omega}$ sau $M\sim\frac{n\Phi_m\nu}{2\pi\nu}I_a$, adică $M\sim\Phi_m I_a$.

De aceea motorul dezvoltă un cuplu mare cînd înfăşurarea rotorului este străbătută de un curent intens şi cînd fluxul magnetic al inductorului este mare.

Motorul cu excitaţie-serie (fig. 117). În acest caz, curentul I_a din indus este egal cu curentul I absorbit de la reţea. Tensiunea de alimentare U echilibrează t.c.e.m. E şi acoperă atît căderea de tensiune pe indus r_aI_a, cît şi cea de pe înfăşurarea de excitaţie r_eI_a: $U=E+(r_a+r_e)I$ (nu s-a ţinut seama de rezistenţa reostatului de pornire R_p). La pornire, curentul este mare şi străbătînd înfăşurarea de excitaţie produce un flux intens ($\Phi_m\sim I_a$). De aceea cuplul motor creşte foarte mult cu curentul: $M\sim\Phi_m I_a$, adică $M\sim I_a^2$. Aşa se explică de ce motoarele cu excitaţie-serie sînt preferate pentru *tracţiune*.

unde trebuie să dezvolte un cuplu de pornire foarte mare pentru a putea pune în mișcare vehiculul cu masă mare. Motorul-serie nu trebuie lăsat niciodată să lucreze fără sarcină (în gol), întrucît atunci viteza sa de rotație crește nepermis de mult (motorul *se ambalează*) și forțele centrifuge pot smulge înfășurarea de pe rotor.

Viteza de rotație se poate regla prin *modificarea tensiunii de alimentare*, conectînd rezistențe în serie cu motorul sau conectînd două motoare în serie (revine fiecăruia o tensiune $U/2$), ori în paralel (revine fiecăruia toată tensiunea U a rețelei). În acest din urmă fel se procedează la locomotivele și tramvaiele electrice.

Motorul cu excitație-derivație (fig. 118). Curentul de alimentare I se împarte în curentul I_a prin indus și curentul i_e prin înfășurarea de excitație: $I=I_a+i_e$.

Pentru a micșora curentul de pornire se folosește un *reostat de pornire* R_p, special, alcătuit din mai multe rezistențe fixate de ploturile (contactele) 1—5, maneta m și bara metalică semicirculară legată la plotul 1. Pornirea se face cu reostatul așezat în poziția de rezistență maximă (poziția 1), așa încît intensitatea $I=\frac{U-E}{r_a+R_p}$ este mică.

Motoarele-derivație prezintă *avantajul* de a-și păstra *viteza aproape constantă* cînd variază sarcina, dacă sînt alimentate cu tensiune constantă.

Motoarele electrice de curent continuu au *utilizări* dintre cele mai variate.

Astfel, *motoarele cu excitație-derivație* sînt folosite pentru punerea în mișcare a mașinilor care trebuie să funcționeze cu viteză constantă (mașini-unelte, pompe, laminoare etc.).

Motoarele cu excitație-serie sînt utilizate acolo unde este necesar un cuplu de pornire mare, de exemplu pentru *tracțiunea electrică* (tramvaie, troleibuze, locomotive electrice și Diesel-electrice) sau pentru *macarale*. *Locomotivele Diesel-electrice* sînt locomotive puse în mișcare de motoare electrice alimentate de un generator de curent continuu acționat de un motor Diesel. Ele lucrează cu randament mare, se conduc ușor, sînt suple și sigure în funcționare. În țara noastră uzinele „Electroputere" Craiova construiesc locomotive Diesel-electrice de 2 100 kW și locomotive electrice cu o putere de 6 950 kW.

Pentru pornirea motoarelor cu combustie internă ale autovehiculelor se folosesc de obicei motoare-serie denumite *demaroare* (a demara = a porni), care se alimentează din acumulatori.

Inversarea sensului de rotație al oricărui tip de motor de curent continuu cu autoexcitație se face fie schimbînd sensul curentului

din rotor, fie pe cel al curentului din stator. Dacă se inversează sensul curentului din ambele înfășurări, atunci motorul nu își schimbă sensul de rotație (aplicați regula mîinii stîngi).

Un motor de curent continuu funcționează și dacă este alimentat cu curent alternativ pentru că el își păstrează sensul de rotație în decursul oricăreia dintre alternanțe. Totuși nu este avantajos și nu se utilizează astfel de motoare cu colector alimentate în curent alternativ decît pentru puteri mici (la mașini de găurit manuale, aspiratoare de praf, mici ventilatoare etc.).

Întrebări recapitulative

1. **Care sînt tipurile de mașini de curent continuu?**
2. **Explicați rolul pe care îl are colectorul unui generator de curent continuu.**
3. **Pentru ce miezul rotorului unui generator de curent continuu se face din tole și nu din fier masiv?**
4. **Se exercită vreo forță din partea cîmpului de inducție magnetică al statorului unui generator de curent continuu asupra înfășurării rotorului său dacă la bornele generatorului nu este conectat nici un consumator? Dar dacă se conectează?**
5. **Pe ce se bazează posibilitatea funcționării unui generator cu autoexcitație? Explicați în ce fel începe să funcționeze generatorul.**
6. **De ce nu produce curent (sau produce un curent foarte slab) un dinam cu autoexcitație cînd este rotit în sens contrar sensului în care el funcționează de obicei?**
7. **De ce înfășurarea de excitație-serie a unui generator sau motor de curent continuu se face cu spire puține din conductor cu diametru mare?**
8. **Pentru ce înfășurarea de excitație în derivație a generatoarelor sau motoarelor de curent continuu conține un număr mare de spire din conductori cu diametru mic?**
9. **Se inversează sensul de rotație al unui motor de curent continuu cu inductorul alcătuit dintr-un magnet permanent dacă se schimbă între ele firele de legătură față de bornele mașinii? Dar dacă motorul este cu autoexcitație?**
10. **Cum se poate inversa sensul de rotație al unui motor de curent continuu cu excitație în serie? Desenați schema.**
11. **Răspundeți la aceeași întrebare pentru motorul cu excitație în derivație.**
12. **De ce este necesar să se folosească un reostat de pornire la motoarele de curent continuu?**
13. **Dați exemple de utilizări largi ale unui tip de generator de curent continuu și ale unui tip de motor de curent continuu.**

Exerciţii

1. Un generator de curent continuu cu excitaţie serie dă consumatorilor un curent cu intensitatea de 20 A sub o tensiune de 200 V. Ce fracţiune din puterea utilizată în exterior reprezintă puterea pierdută în înfăşurarea de excitaţie? Ce t.e.m. dă generatorul? Rezistenţa înfăşurării indusului este de 1,5 Ω , iar cea a inductorului de 0,5 Ω .

R: $P_e=0{,}05\ P_2$; $E=240$ V.

2. Un generator cu excitaţie în derivaţie alimentează 70 de becuri de cîte 500 W sub o tensiune de 200 V. Ce tensiune electromotoare şi ce intensitate are curentul dat de generator dacă rezistenţa înfăşurării sale de excitaţie este de 40 Ω , iar a rotorului de 0,2 Ω ?

R: $E=236$ V; $I_a=180$ A.

3. Un motor cu excitaţie serie alimentat sub o tensiune de 120 V, absoarbe la pornire un curent de 12 A; el are în circuit un reostat de pornire de 8 Ω . După ce ajunge la viteza normală, intensitatea curentului prin indus scade la 2 A (cu reostatul adus la zero). Ce rezistenţă totală au înfăşurările indusului şi inductorului? Care este valoarea t.e.m. a motorului la funcţionare normală?

R: $r_a+r_e=2\ \Omega$; $E=116$ V.

4. Care este intensitatea curentului care străbate inductorul unui motor cu excitaţie-derivaţie avînd o putere utilă de 12 kW, dacă el funcţionează sub o tensiune de 120 V cu un randament industrial de 80%, iar rezistenţa înfăşurării de excitaţie este de 40 Ω ? Care este intensitatea curentului primit de motor de la reţea? Care este valoarea tuturor pierderilor de putere din motor?

R: $i_e=3$ A; $I=125$ A; $p_t=3$ kW.

III. Transportul energiei electrice la distanţă

O problemă fundamentală a energeticii, şi anume *producerea* energiei într-un loc (unde există resurse primare de energie: combustibili, căderi de apă etc.) şi *consumarea* ei în altă parte, îşi găseşte o rezolvare raţională folosind *energia electrică*, care poate fi transportată relativ uşor şi cu pierderi reduse. Pierderile au loc pen-

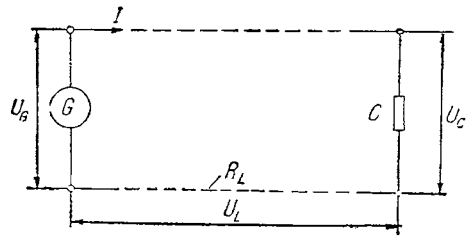


Fig. 119

tru că la trecerea curentului prin conductorii *liniei de transport* a energiei electrice se degajă căldură.

Este rațional să se realizeze linia de transport în așa fel ca o cît mai mare parte din puterea P_G dată de generator să ajungă la consumator (P_C), adică puterea pierdută pe linie P_L să fie cît mai mică ($P_G = P_C + P_L$). Însă $P_L = R_L I^2 = U_L I$.

Dacă puterea necesară este transmisă sub o *tensiune mică*, atunci va trebui ca prin conductori să treacă un curent cu o intensitate mare ($P = U \cdot I$) și secțiunea lor trebuie să fie mare pentru ca R_L să aibă o valoare redusă $\left(R_L = \rho \frac{l}{S}\right)$. Aceasta cere însă să se folosească conductori foarte groși, grei, ceea ce ridică costul liniei de transport.

Dacă însă puterea este transmisă sub o *tensiune mare*, atunci I are o valoare redusă și se pot folosi conductori cu secțiune mică, ceea ce este desigur avantajos. În acest caz, căderea de tensiune pe linie U_L este mică și de aceea tensiunea de la bornele consumatorului are o valoare apropiată de valoarea tensiunii dată de generator ($U_G = U_C + U_L$ fig. 119). De aceea, transportul energiei electrice la distanțe mari se face în mod economic doar prin *linii la înaltă tensiune*.

Totuși *producerea* și *consumul* energiei electrice trebuie să se facă sub *tensiuni scăzute* pentru a evita atît dificultățile legate de realizarea unei izolații îndeajuns de sigură, cît și pericolul în mînuirea mașinilor și aparatelor consumatoare. Apare deci necesitatea

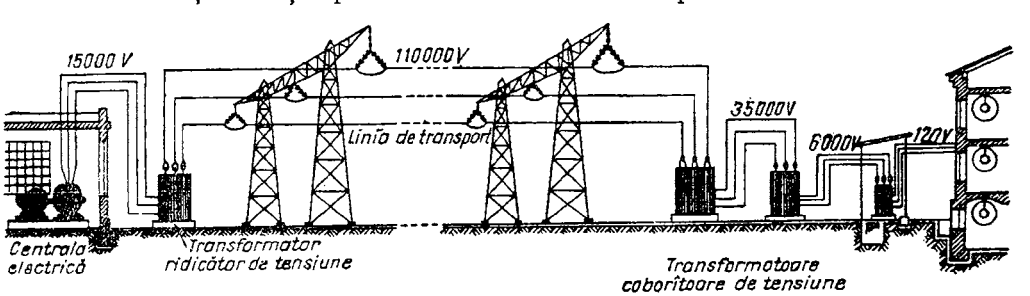


Fig. 120

trecerii de la *tensiuni scăzute* la *tensiuni ridicate* (de la generator la linia de transport) și a trecerii inverse (de la linia de transport la consumator); aceste treceri se fac cu ajutorul *transformatoarelor*. Este justificată astfel complexitatea unei *scheme de transport a energiei electrice* (fig. 120).

Trebuie reținut faptul că, larga folosire a *curentului alternativ* se datorează, printre altele, și faptului că există posibilitatea *de a ridica sau de a coborî tensiunea dată de o sursă de curent alternativ fără a se produce pierderi mari de energie*, lucru greu de realizat în cazul curentului continuu.

A. Transformatoare

Transformatorul este un aparat care folosind fenomenul de inducție electromagnetică mijlocește, pe cale statică, transformarea energiei date de o sursă de curent alternativ cu o anumită tensiune, în energie de curent alternativ cu aceeași frecvență însă cu altă tensiune.

Cel mai simplu transformator este alcătuit din două înfășurări (bobinaje din conductori de cupru) situate una lîngă alta dar izolate între ele; una dintre înfășurări se conectează la sursa de curent alternativ și se numește *înfășurare primară*, iar cealaltă la care se leagă consumatorul se numește *înfășurare secundară*. Cele mai cunoscute transformatoare sînt cele care lucrează cu *curent alternativ de joasă frecvență monofazat sau trifazat* (fig. 121). Înfășurările sînt așezate pe un miez din oțel special (cu siliciu) pentru micșorarea pierderilor de energie. Miezul este format din foi (table sau tole) subțiri, care se izolează una de alta cu lac, hîrtie subțire sau un strat de oxid. Miezul de oțel se introduce cu scopul de a strînge liniile cîmpului magnetic (fierul are $\mu_r \gg 1$), de *a nu le lăsa să se risipească*, astfel încît ambele înfășurări să fie străbătute de același flux magnetic.

Înfășurările se așază de obicei una peste alta și ocupă fie partea centrală a miezului, care în acest fel le „îmbracă" (*transformator în*

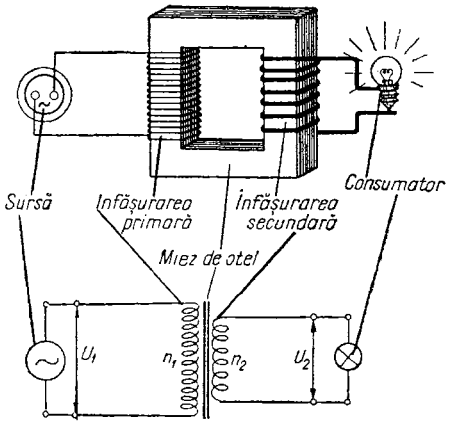


Fig. 121

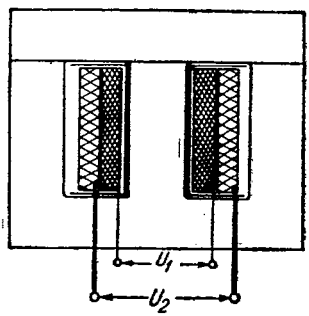


Fig. 122

manta fig. 122), fie stau pe coloanele sale (*transformator cu coloane* fig. 121), care aparțin însă aceluiași miez de oțel. Înfășurarea de lîngă miez este așezată pe *o carcasă* din material izolant (carton electrotehnic, bachelită etc.). De obicei, această înfășurare este cea de joasă tensiune pentru că ea este mai ușor de izolat. Între înfășurările suprapuse se așază de asemenea un strat izolant.

Dacă se alimentează înfășurarea primară a transformatorului de la rețeaua de curent alternativ, iar bornele circuitului său secundar nu sînt legate la vreun consumator, se spune că transformatorul lucrează *în gol*. Prin bobinajul primar trece un curent alternativ de mică intensitate, întrucît înfășurarea avînd un mare număr de spire și miez de fier, are o inductanță ridicată. Acest curent alternativ produce un cîmp magnetic alternativ și un flux magnetic alternativ care străbate întreg miezul de oțel. Fluxul variabil în timp este îmbrățișat atît de înfășurarea primară, cît și de cea secundară și, conform legii inducției electromagnetice, el induce tensiuni electromotoare atît în circuitul secundar (E_2), cît și în circuitul primar (E_1). Tensiunile electromotoare vor fi cu atît mai mari, cu cît vor fi mai mari: *viteza de variație în timp a fluxului* (deci frecvența curentului), *numerele de spire* n_1 și n_2 ale fiecărei înfășurări (aceasta pentru că se însumează t.e.m. din toate spirele fiecărui bobinaj, ele fiind legate în serie) și *valoarea maximă* Φ_m a *fluxului magnetic:*

$$E_1 \sim n_1 \Phi_m \nu \quad \text{și} \quad E_2 \sim n_2 \Phi_m \nu.$$

Tensiunea electromotoare E_1 se opune tensiunii U_1 dată de rețea și fiind aproape egală cu ea tinde să o echilibreze: $U_1 \simeq E_1$. Raportul dintre tensiunea U_1 a sursei de curent alternativ și tensiunea electromotoare E_2 (egală la mersul în gol cu tensiunea U_2 de la bornele înfășurării secundare) este:

$$\frac{U_1}{U_2} \simeq \frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2} = n.$$

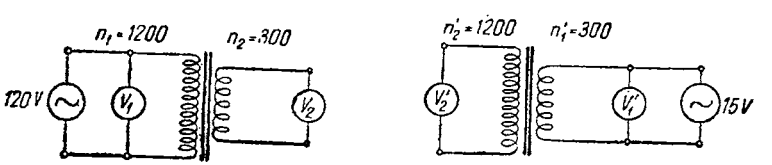
Raportul dintre numărul de spire al înfășurării primare și numărul de spire al înfășurării secundare se numește *raport de transformare* al transformatorului.

Transformatoarele la care $n>1$ au mai multe spire în primar decît în secundar și de aceea ele dau în secundar o tensiune mai scăzută, numindu-se *transformatoare coborîtoare de tensiune*. Un exemplu îl constituie transformatorul de sonerie.

Dimpotrivă, transformatorele cu $n<1$ dau în secundar o tensiune mai ridicată decît tensiunea de alimentare și se numesc *transformatoare ridicătoare de tensiune*.

Experiențe. 1. Se alimentează de la rețeaua de 120 V curent alternativ, primarul de 1 200 de spire al unui *transformator coborîtor de tensiune* realizat cu ajutorul trusei de bobine I.M.D. pe un miez de fier cu coloane. Bobina secundară se ia de 300 (sau 600) de spire. Se măsoară cu un voltmetru de curent alternativ tensiunile U_1 și $U_2 \simeq E_2$ și se observă că raportul lor este egal cu raportul numerelor de spire $\frac{n_1}{n_2} = n$ (fig. 123, *a*).

2. Se alimentează înfășurarea de 300 (sau 600) de spire a aceluiași transformator (fig. 123, *b*) de la un alimentator I.M.D. cu o tensiune U_1 de ordinul a 10—15 V. Se măsoară tensiunea $U_2 \simeq E_2$ din secundarul de 1 200 de spire și se verifică relația $\frac{U_1}{U_2} \simeq \frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1'}{n_2'}$. Acum însă, transformatorul a servit la ridicarea tensiunii.



a) b)

Fig. 123

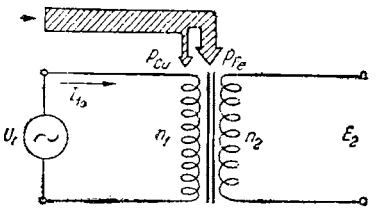


Fig. 124

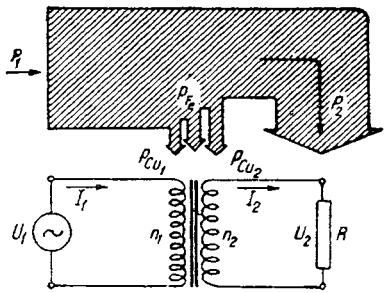


Fig. 125

Cînd transformatorul lucrează în gol, curentul din înfășurarea primară este mult defazat față de tensiune, astfel că aparatul absoarbe o putere foarte mică (v. relația 44). Această putere acoperă pierderile de energie din miezul de oțel (prin curenți turbionari și histerezis, care produc încălzirea miezului) și pierderile din înfășurarea primară (încălzirea acesteia), figura 124.

Cînd transformatorul lucrează în sarcină, de exemplu, la conectarea unui rezistor cu rezistența R (de pildă, un bec electric) în circuitul secundar t.e.m. E_2 provoacă în această înfășurare un curent I_2 cu o intensitate cu atît mai mare, cu cît rezistența este mai mică. Acum apar pierderi și prin încălzirea înfășurării secundare. Puterea P_2 dezvoltată de curentul I_2 în rezistor provine din puterea P_1 absorbită de transformator de la rețeaua de curent alternativ (fig. 125). Transformatorul lucrează cu un randament $\eta = \frac{P_2}{P_1}$.

Deoarece transformatoarele nu au piese în mișcare, ele nu au pierderi de energie prin frecări și lucrează cu randamente mai mari decît ale mașinilor electrice rotative, atingînd chiar 99% la transformatoarele de puteri foarte mari.

Dacă se face abstracție de pierderile care au loc în transformator, întrucît randamentul este apropiat de 1, se poate scrie că $P_1 = P_2$, deci $U_1 I_1 = U_2 I_2$, *adică* $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{n_1}{n_2} = n$.

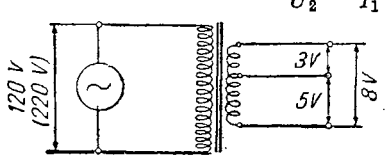


Fig. 126

Așadar, prin coborîrea tensiunii de un număr de ori egal cu valoarea raportului de transformare, se obține o creștere de același număr de ori a intensității curentului care

poate fi dat de înfășurarea secundară a transformatorului. Acest fapt a permis să se construiască transformatoare cu ajutorul cărora să se obțină curenți foarte intenși (care pot atinge zeci de mii de amperi): *transformatoare de sudură* și *transformatoare pentru cuptoare de inducție* (al căror secundar este alcătuit dintr-o singură spiră).

Transformatoarele pot avea mai multe înfășurări primare care se leagă în serie pentru a fi alimentate cu diferite tensiuni (de exemplu transformatorul unui aparat de radio), sau mai multe înfășurări secundare pentru a alimenta în același timp sau succesiv, cu tensiuni diferite, cîte unul sau mai mulți consumatori (de exemplu, un transformator de radio sau un transformator de sonerie, fig. 126).

Transformatoarele de putere mică sînt alimentate fie cu curent alternativ monofazat, fie cu curent trifazat și se răcesc de la sine, cedînd căldura aerului înconjurător. *Transformatoarele de putere mare* (folosite în stațiile de transformare, în centralele electrice, în diferite instalații industriale) lucrează cu curent trifazat și sînt răcite cu ulei.

B. Transformatoare speciale

57. Autotransformatorul și alte transformatoare speciale

Autotransformatorul este un transformator special, economic, care are o singură înfășurare făcută din conductori cu diametre diferite, la care se conectează atît sursa de curent alternativ, cît și consumatorul (fig. 127). Autotransformatorul se folosește pentru rapoarte de transformare $\frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2}$ de valori

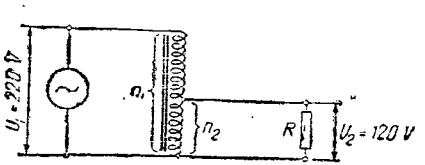


Fig. 127

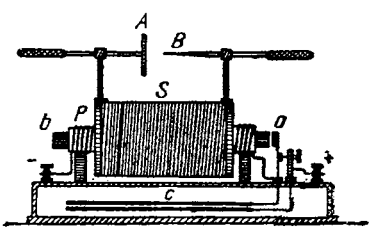


Fig. 128

mici şi are avantajul de a necesita sîrmă puţină şi mai subţire decît la transformator.

Mai există şi alte tipuri de transformatoare speciale, cum ar fi unele transformatoare din aparatura de radio şi electronică; unele dintre acestea folosesc curenţi alternativi de înaltă frecvenţă şi nu au miez din oţel.

58. Bobina de inducţie

Un alt tip de transformator special este *bobina de inducţie* sau *bobina Ruhmkorff.*

Bobina de inducţie (fig. 128) este alcătuită dintr-o bobină primară *P* din sîrmă groasă şi cu spire puţine, peste care este aşezată (foarte bine izolată de primar) bobina secundară *S*. Aceasta este făcută din sîrmă extrem de subţire, cu un foarte mare număr de spire (uneori peste un milion, iar lungimea sîrmei ajunge la zeci de kilometri), foarte bine izolate între ele. Înfăşurarea primară este făcută pe un pachet de sîrme de fier moale *b*, izolate între ele şi faţă de primar. Alimentarea se face de la o sursă de curent continuu (de obicei un acumulator), prin intermediul unui întrerupător vibrant (ca la soneria electrică), prevăzut cu o lamă elastică pe care se află un contact care atinge un şurub fixat pe suportul izolat pe care stă bobina.

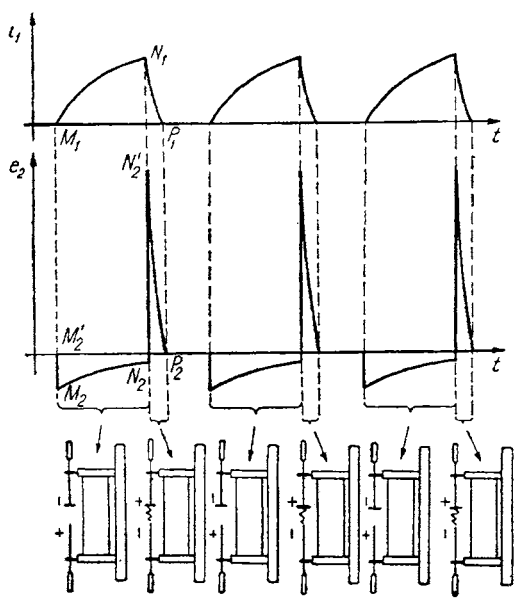


Fig. 129

Cînd se conectează înfăşurarea primară a bobinei de inducţie la sursă, lama se reazemă pe şurub şi circuitul fiind închis, în acesta apare un curent. Din cauza curentului de autoinducţie important care ia naştere pentru că înfăşurarea are miez de fier, creşterea curentului i_1 nu se face instantaneu, ci relativ lent, în intervalul de

timp corespunzător punctelor M_1N_1 (fig. 129). În acest timp, în înfășurarea secundară ia naștere o t.e.m. e_2 care variază în timp după curba $M_2'M_2N_2$. Saltul din $M_2'M_2$ se datorește variației rapide a curentului i_1 la trecerea de la valoarea zero la o valoare diferită de zero. Semnul t.e.m. e_2 este opus lui i_1 pentru că acesta crește. Deoarece așa cum rezultă din fig. 129 pe porțiunea M_1N_1 curentul i_1 crește la început mai repede, apoi mai încet, t.e.m. e_2 descrește mai întîi repede, apoi lent, pe porțiunea corespunzătoare M_2N_2 (vezi legea inducției electromagnetice).

Cînd i_1 devine destul de mare pentru ca prin magnetizare miezul de fier moale să poată atrage armătura a a lamei elastice, aceasta se depărtează de șurub și circuitul primar se întrerupe brusc. În circuit apar curenți de autoinducție care tind să mențină curentul i_1 și de aceea el nu se anulează chiar în momentul întreruperii (N_1), ci mai dăinuie un scurt timp și după aceasta, slăbind în intensitate (curba N_1P_1).

T.e.m. de autoinducție care apare cu acest prilej produce o scînteie la contactul care tocmai se desface. Pentru că variația curentului i_1 are loc mult mai rapid la întreruperea sa decît la stabilire, t.e.m. e_2 care se induce în secundar în acest scurt interval de timp, are o valoare deosebit de mare (punctul N_2').

Semnul t.e.m. e_2 este acum același cu al curentului i_1.

Dacă se așază electrozii A și B la o distanță suficient de mare pentru ca să poată trece o scînteie doar în primele momente ale alternanței a doua (începînd cu N_2'), cînd t.e.m. are o valoare mult mai mare decît în prima alternanță (în M_2), atunci descărcarea se va putea face numai într-un singur sens.

De aceea bobina de inducție produce un curent continuu (circulă numai într-un singur sens) dar a cărui intensitate variază în timp.

Între lama elastică și șurub se conectează un condensator C (montat în cutia suport a bobinei), care are rolul de a prelua (încărcîndu-se) energia cîmpului magnetic al înfășurării primare, în momentul întreruperii contactului. În acest fel se evită arderea contactelor prin scînteile mari care s-ar produce dacă ar lipsi condensatorul. În momentul în care contactul se restabilește, armăturile fiind puse în legătură, condensatorul se descarcă.

Așadar, bobina de inducție este un transformator special care se alimentează în primar cu curent continuu întrerupt periodic și produce în secundar o tensiune alternativă foarte înaltă, avînd o formă specială, amplitudinea t.e.m. din cursul unei alternanțe fiind mult mai mare decît în cealaltă alternanță; pentru o anumită distanță între electrozi ea poate da un curent continuu întrerupt, însă cu mărime variabilă în timp.

Bobina Ruhmkorff a fost folosită pe larg ca sursă de tensiune continuă înaltă pentru producerea razelor X. Astăzi locul ei a fost luat, în acest domeniu, de către redresoare speciale cu tuburi electronice sau semiconductoare.

Totuși actualmente se folosesc bobine de inducție în alte scopuri: *în laboratoare* pentru studiul descărcărilor în gaze, studiul oscilațiilor electrice etc., *pentru aprinderea amestecului combustibil în motoarele de automobile și avioane* (aici locul întrerupătorului vibrant cu lamă este luat de un dispozitiv rotativ prevăzut cu contacte și acționat de la arborele motorului), iar *tipuri speciale de bobine de inducție* se folosesc *în medicină* (în electroterapeutică).

IV. Alte aplicații ale inducției electromagnetice și curentului alternativ

A. Telefonul

Transmiterea la distanță a sunetelor folosind trecerea curenților electrici variabili prin fire conductoare a fost realizată cu ajutorul telefonului, în 1876 de către Graham Bell, medic și fizician american.

Dispozitivele care permit să se transforme variațiile presiunii sonore (care au loc cînd se produc sunetele) în variații corespunzătoare ale curentului electric, se numesc *microfoane*. Cel mai sensibil tip de microfon este *microfonul cu cărbune*.

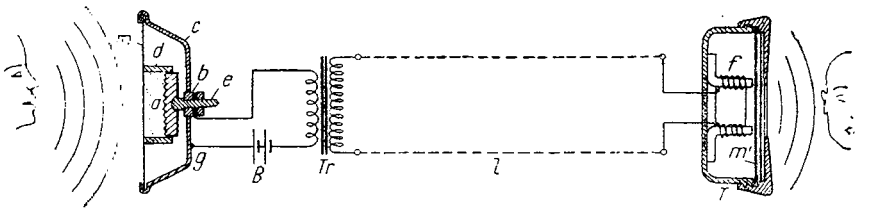


Fig. 130

El constă dintr-o capsulă metalică *c* (fig. 130) în care se află un mic cilindru din postav *d*, care cuprinde praf de cărbune uşor presat între o membrană metalică subţire *m* şi o placă de contact *a* metalică. Din exterior contactul cu această placă se face printr-un şurub *e* care iese din capsulă printr-un inel izolator *b*. Legătura electrică cu membrana se face în *g*, prin intermediul capsulei metalice.

Microfonul cu cărbune se conectează în circuitul primar al unui transformator ridicător de tensiune, în serie cu o baterie B.

Cînd se produc sunete în faţa microfonului, membrana acestuia exercită apăsări a căror mărime şi frecvenţă variază în timp corespunzător modulului în care variază intensitatea (tăria) şi înălţimea sunetelor (faptul că ele sînt mai ascuţite ori mai grave). În momentul în care membrana apasă mai tare micile particule de cărbune, între acestea se stabilesc mai multe puncte de contact, iar contactele existente devin mai bune. Pentru că suprafaţa totală de contact dintre particule creşte, rezistenţa toală pe care o opune microfonul în circuit scade, iar intensitatea curentului creşte.

Dimpotrivă, cînd membrana este slab apăsată (sau de loc), curentul este slab. În circuitul secundar al transformatorului se induce o tensiune variabilă mărită ($n<1$), care se transmite prin firele conductoare pînă la receptorul telefonic (casca) *T*. Aici variaţiile de curent care iau naştere în bobinele *f* fac ca membrana *m'* să sufere o forţă de atracţie variabilă şi, deplasîndu-se, să producă sunete la fel cu cele care au pus în mişcare membrana microfonului. În acest fel, se realizează o comunicaţie telefonică într-un sens.

Pentru ca să se poată efectua o *convorbire* este necesar să existe două sisteme asemănătoare celui descris. Totuşi, pentru a nu folosi patru fire de legătură şi pentru a beneficia de avantajele unei mici pierderi de tensiune pe linie, pe care le oferă folosirea unor trans-

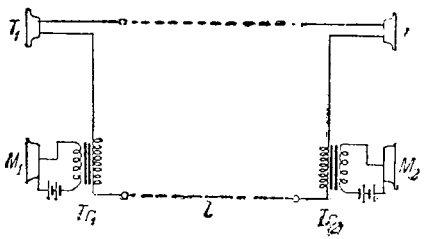


Fig. 131

formatoare ridicătoare de tensiune, este mai indicată schema din figura 131.

În practică se folosesc scheme mult mai complicate, întrucît: se poate stabili nu numai o legătură bilaterală, ci cu un mare număr de abonați se folosește o singură sursă de curent continuu centrală, se transmit impulsuri de curent de la abonatul care telefonează spre centrală, aici dispozitive automate caută și stabilesc legătura cu celălalt abonat, trimit impulsuri care acționează soneria de apel etc.

Astăzi comunicațiile telefonice s-au dezvoltat și perfecționat într-atît încît putem relativ ușor stabili o legătură telefonică prin fire la distanțe oricît de mari.

B. Magnetofonul

Magnetofonul este un aparat cu ajutorul căruia se înregistrează și se redau sunetele folosind un purtător magnetic de sunet (bandă de magnetofon).

Se cunosc încercări de înregistrare și redare a sunetelor pe cale magnetică făcute încă în ultimii ani ai secolului trecut. Totuși, abia din 1940, datorită cercetărilor și perfecționărilor aduse, s-a ajuns la forma cunoscută astăzi a magnetofonului.

Înregistrarea magnetică a sunetelor se face prin deplasarea cu viteză constantă a unei benzi magnetice în fața unui electromagnet *(cap de înregistrare)*, prin a cărui bobină se trec curenți variabili produși de un microfon. Înregistrarea se bazează pe producerea magnetizării variabile a diferitelor porțiuni ale benzii.

Redarea are loc prin deplasarea benzii (cu aceeași viteză ca la înregistrare), prin fața unui electromagnet *(cap de redare)*. Cînd porțiunile benzii magnetice trec prin fața acestei bobine, fluxul mag-

netic variază şi în bobină se induc curenţi care variază în timp, în acelaşi fel cu curenţii produşi la înregistrare.

Aceşti curenţi sînt amplificaţi şi redau sunetele într-un difuzor. Pentru ca banda care conţine înregistrări care nu mai interesează să poată fi folosită din nou, ea este supusă unui proces de *ştergere* care se poate face fie *magnetizînd foarte puternic* banda cu ajutorul curentului continuu, fie *demagnetizînd* banda cu ajutorul unui curent alternativ de înaltă frecvenţă produs de un oscilator.

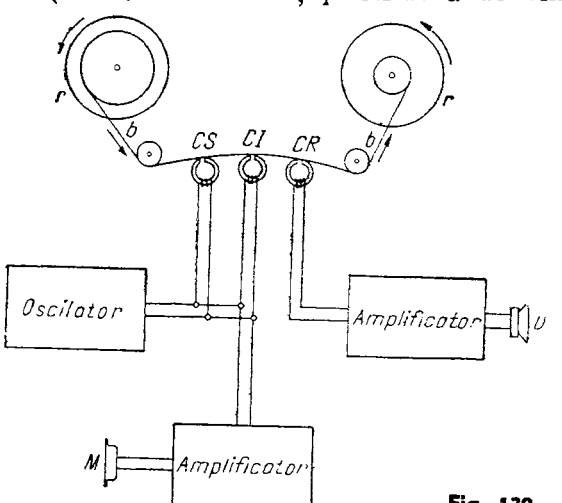
S-a constatat că înregistrarea sunetelor se face cu deformări (distorsiuni) reduse, dacă în timpul înregistrării se trimite în bobina capului de înregistrare un curent alternativ de înaltă frecvenţă.

Un magnetofon cuprinde (fig. 132, *a*):

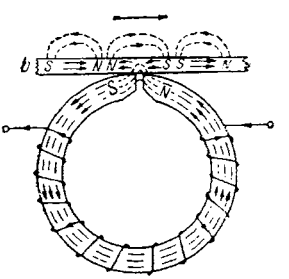
— *o parte mecanică* alcătuită dintr-un motor electric ce antrenează cu viteză constantă banda *b*, care se desfăşoară de pe o rolă-suport *r* pe alta;

— *o parte electrică* alcătuită din cele trei capete (fig. 132, *b*): *de ştergere (CS), de înregistrare (CI)* şi *de redare (CR),* dintr-un *oscilator (generator) de înaltă frecvenţă* şi două *amplificatoare. Oscilatorul şi amplificatoarele* lucrează cu *tuburi electronice* sau *dispozitive semiconductoare* (tranzistoare).

Banda de magnetofon este alcătuită dintr-un suport de masă plastică (acetat de celuloză, policlorură de vinil) cu o grosime foarte



a)



b)

Fig. 132

mică (20—50 μm) peste care s-a depus un strat extrem de fin (10μm) de pulbere de oxid de fier (1 μm$=10^{-6}$ m).

Din schemă reiese că în timpul înregistrării curenții variabili produși de microfon sînt întîi amplificați și apoi străbat bobina capului de înregistrare; totodată, în această bobină circulă și un curent alternativ de înaltă frecvență provenit de la oscilator. După sensul în care se deplasează banda se observă că înainte de înregistrare ea trece prin fața capului de ștergere și este demagnetizată. La *redare*, curenții induși prin deplasarea benzii în bobina capului de redare intră întîi în amplificator și după aceea străbat bobina mobilă a difuzorului, punînd-o în mișcare și producînd sunete.

Astăzi, înregistrarea și redarea magnetică a sunetelor cunoaște o largă răspîndire datorită *avantajelor deosebite* pe care le prezintă:

— înregistrarea și redarea se fac și se controlează cu ușurință și imediat;

— aparatura necesară pentru aceasta este relativ ieftină și are o greutate redusă (este transportabilă);

— înregistrările au o calitate superioară; se pot reproduce atît sunetele grave, cît și cele foarte ascuțite, producîndu-se doar deformări extrem de mici; totodată, calitatea înregistrării se păstrează chiar după o utilizare îndelungată;

— purtătorul magnetic al sunetului (banda) poate fi utilizat de mai multe ori (după ștergere) și poate fi tăiat și lipit fără să dăuneze calității reproducerii;

— se pot face înregistrări de lungă durată.

Printre puținele *dezavantaje* se află:

— dificultatea de a multiplica înregistrările făcute pe bandă magnetică, în comparație cu posibilitatea multiplicării discurilor (în număr mare și într-un timp scurt);

— deformarea sunetului datorită modificărilor dimensiunilor benzii sub acțiunea variațiilor de temperatură și umiditate;

— posibilitate de a pierde parțial sau integral înregistrarea, dacă este adusă din greșeală în apropierea unor conductori străbătuți de curenți puternici sau a unor transformatoare, motoare, electromagneți sau magneți permanenți.

Înregistrarea și redarea sunetelor pe bandă magnetică este de *neînlocuit* în multe *domenii:* în tehnica realizării emisiunilor de radiodifuziune (programele fiind în prealabil înregistrate pe bandă și apoi transmise), la înregistrările pentru cinematografie (care se fac mai întîi pe bandă și apoi pe film), la înregistrările preliminare imprimării discurilor, în comanda automată (cu program) a mașinilor unelte, în studiul pronunțării corecte a limbilor străine, pentru înregistrarea conferințelor, dezbaterilor (magnetofoanele destinate acestui scop se numesc *dictafoane*; ele permit ca ulterior să se redea și să se poată scrie comod textul conferințelor), pentru înregistrarea produc-

țiilor folclorice, pentru producerea artificială a diferitelor efecte și montaje sonore etc.

Nu trebuie uitată nici posibilitatea deosebit de interesantă de a înregistra imaginile programelor de televiziune pe bandă magnetică.

Întrebări recapitulative

1. **Pentru ce este necesar ca la transportul energiei electrice la distanță printr-o linie, să se ridice în prealabil tensiunea dată de generator? Cum se realizează ridicarea tensiunii?**
2. **De ce este necesară coborîrea tensiunii cînd energia transportată trebuie utilizată la consumator?**
3. **Ce avantaje prezintă folosirea curentului alternativ față de curentul continuu?**
4. **Care este fenomenul care stă la baza funcționării unui transformator?**
5. **Ce rol joacă miezul de oțel în funcționarea unui transformator?**
6. **Ce este raportul de transformare al unui transformator?**
7. **De ce înfășurarea secundară a unui transformator de sudură are un număr foarte mic de spire?**
8. **De ce randamentul transformatoarelor este mai mare decît al generatoarelor sau motoarelor electrice?**
9. **Se încălzește transformatorul de sonerie în timpul cît el nu dă curent în circuitul secundar (nu se sună la sonerie)? De ce?**
10. **De ce trebuie ca miezul bobinei de inducție să fie făcut din sîrme de fier moale?**
11. **Explicați ce se întîmplă dacă se alimentează înfășurarea primară a unei bobine de inducție cu curent alternativ și se menține închis (apăsat și nemișcat) întrerupătorul sau prevăzut cu lamă elastică. Ce fel de tensiune se obține la bornele înfășurării secundare?**
12. **Cel mai simplu telefon cu care se poate realiza o comunicație bilaterală, pe distanțe mici, fără a avea nevoie de o sursă de alimentare, se realizează legînd prin două fire conductoare două receptoare telefonice (căști) prevăzute cu magneți permanenți pe care sînt înfășurate bobine. Explicați cum funcționează acest telefon?**
13. **Ce proprietate stă la baza posibilității înregistrării magnetice a sunetului?**
14. **În ce fel se poate șterge o înregistrare magnetică?**
15. **De ce, atît la înregistrare, cît și la redare, banda magnetică trebuie să se deplaseze cu aceeași viteză?**

Exerciții

1. Un generator de curent alternativ dă o putere de 10 000 kW sub o tensiune de 5 000 V. Dacă se ridică de 20 de ori această tensiune cu ajutorul unui transformator cu randament aproximativ egal cu unitatea și apoi se

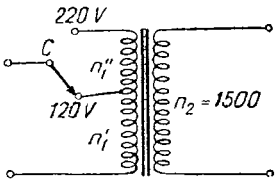


Fig. 133

transportă printr-o linie, consumatorul primește o putere de 9 980 kW. Ce putere se primește dacă se leagă generatorul direct la linie (fără a mai folosi transformatorul)? De cîte ori ar trebui mărit diametrul conductorilor liniei pentru a primi totuși putere ca în cazul folosirii transformatorului?

R: P'_C=2 000 kW; de 20 de ori.

2. Ce număr de spire are înfășurarea primară a unui transformator dacă la funcționarea în gol, fiind alimentat cu o tensiune de 120 V, dă în secundar (care are 250 de spire) o tensiune de 10 V?

R: n_1=3 000 de spire.

3. Transformatorul de rețea al unui aparat de radio are două înfășurări primare legate în serie una cu alta (fig. 133). Ce numere de spire n_1' și n_1'' trebuie să aibă aceste două înfășurări pentru ca alimentînd transformatorul, fie cu o tensiune de 220 V, fie cu o tensiune de 120 V și punînd comutatorul C pe poziția corespunzătoare, în secundar să se obțină aceeași tensiune de 250 V?

R: n_1' =720 de spire; n_1'' =600 de spire.

4. Un transformator care lucrează cu un randament de 90% coboară tensiunea de 220 V la 120 V, alimentează rezistența de încălzire a unui frigider care absoarbe o putere de 20 W. Ce valori au curenții care străbat înfășurările transformatorului? Ce putere se pierde în transformator?

R: $I_1 \approx 1{,}01$ A; $\approx I_2$ 1,67 A; p=22,2 W.

Electrificare

A. Planurile de electrificare

Energia electromagnetică (căreia i se spune, în mod obișnuit, dar impropriu, energie electrică) este caracterizată prin anumite însușiri care o fac să fie larg utilizată în numeroase domenii:

1) Ea poate fi *obținută* relativ ușor, în *cantități reduse sau mari* (după cum este necesar), din alte forme de energie (mecanică, chimică, termică, nucleară etc.).

2) *Se poate transporta și distribui cu pierderi reduse pînă la distanțe foarte mari.* Trebuie remarcat faptul că energia electrică este *ușor divizibilă.* Pe de altă parte, transmiterea energiei pe cale mecanică se poate face doar pe distanțe mici (care de obicei nu depășesc ordinul zecilor de metri) și în condiții mai puțin avantajoase decît energia electrică.

3) *Energia electrică se poate transforma, la rîndul său, în alte forme de energie.* Aceste transformări au loc cu *randamente ridicate* și permit executarea unor *operații și procese tehnologice* care nu se pot executa pe alte căi sau se pot realiza în condiții insuficient de avantajoase (iluminarea, aplicațiile în electrochimie, punerea în mișcare a mașinilor unelte, troleibuze, tramvaie, topirea, călirea și sudura metalelor, numeroasele aplicații din domeniul radiotehnicii, electronicii, automatizării, medicinei etc.).

Grație numeroaselor sale avantaje, energia electrică își găsește astăzi numeroase și extrem de importante utilizări în cele mai variate domenii de activitate.

Electrificarea constă în introducerea și extinderea folosirii energiei electrice atît în diferite ramuri ale economiei naționale (in-

dustrie, agricultură, transport etc.), cît și în scopurile satisfacerii consumului casnic sau ale unor necesități ale vieții culturale ale populației (radio, televiziune, cinematograf etc.).

În țara noastră, P.C.R. a pus (încă de la Conferința Națională din 1945) și pune în centrul politicii sale de construire a socialismului, industrializarea socialistă a țării.

Industrializarea, introducerea pe scară largă a progresului tehnic prin mecanizare și automatizare, cer dezvoltarea producției de energie electrică.

De aceea *electrificarea* reprezintă un factor esențial pentru industrializarea țării, pentru creșterea productivității muncii și ridicarea nivelului de trai al întregului popor.

În anul 1938, în România puterea centralelor electrice era foarte redusă, atingînd 500 000 kW; în 1944, puterea de 720 000 kW (din care numai o parte era utilizată) era produsă în 600 de centrale mici.

Resursele hidroenergetice erau slab folosite. Exista o singură uzină hidroelectrică de putere mai mare (16 000 kW), la Dobrești. În 1944 exista o linie de înaltă tensiune (de 110 kW) pentru transportul energiei electrice avînd o lungime doar de 127 km. Fiecărui locuitor îi revenea un consum de energie electrică redus: 72,4 kWh în 1938 și 80 kWh în 1944.

Primul plan de electrificare al țării noastre a fost *planul decenal* adoptat pentru perioada 1951—1960 de către plenara C.C. al P.C.R. din 26 octombrie 1950.

Principalele linii directoare ale acestui plan de electrificare au fost:

— concentrarea producției de energie electrică în centrale de mare putere;

— utilizarea rațională a resurselor electrice prin folosirea combustibililor inferiori și prin amenajări complexe ale resurselor hidroenergetice;

— introducerea *termoficării* (producerea combinată și utilizarea rațională a energiei electrice și termice);

— dezvoltarea rețelelor electrice și interconectarea centralelor electrice pentru a se crea un sistem energetic național unic;

— creșterea producției anuale de energie electrică pînă la 7 miliarde kWh;

— dezvoltarea electrificării rurale.

Planul decenal a fost înfăptuit și depășit în așa fel, încît în 1960 producția de energie electrică a ajuns la 7,65 miliarde kWh, ceea ce reprezintă o producție de 7 ori mai mare decît producția din 1938.

Au fost construite centrale noi: așa sînt centralele termoelectrice de la Fîntînele, Borzești, Doicești, centralele hidroelectrice de la Moroieni pe Ialomița, Sadu V, centralele sistemului hidroenergetic de pe Bistrița, termocentralele de la Luduș, Paroșeni, Brazi, Craiova, București-Sud.

Congresele IX și X ale P.C.R. au trasat noi sarcini în domeniul electrificării țării noastre. S-a terminat construcția termocentralei Craiova și sînt în construcție alte două termocentrale valorificîndu-se cărbunii extrași din această parte a țării.

S-a intensificat acțiunea de valorificare a potențialului hidroenergetic economic amenajabil (cursurile rîurilor Argeș, Lotru). Din decembrie 1966 a intrat în funcțiune hidrocentrala „Gh. Gheorghiu-Dej", pe Argeș.

În 1971 a intrat în folosință cu întreaga capacitate hidrocentrala de la Porțile de Fier (realizată împreună cu R. S. F. Iugoslavia), cu o putere instalată pe partea românească de peste 1 milion kW.

În 1969 puterea instalată în centralele hidroelectrice a atins 850 MW (de 16 ori mai mare ca în 1944), iar în centralele termoelectrice 5582 MW (de 9,5 ori mai mare ca în 1944). Ca urmare a puternicei dezvoltări în electrificarea din țara noastră, producția de energie electrică pe cap de locuitor a crescut de la 94,4kWh în 1948 la 1574,7 kWh în 1969.

În țara noastră se dezvoltă necontenit *industria electrotehnică.*

B. Bazele fizice ale electrificării. Producerea energiei electrice

La baza producerii *energiei electrice* stau posibilitățile de transformare ale celorlalte tipuri de energie: *solară, chimică, termică și nucleară* în *energie electrică.*

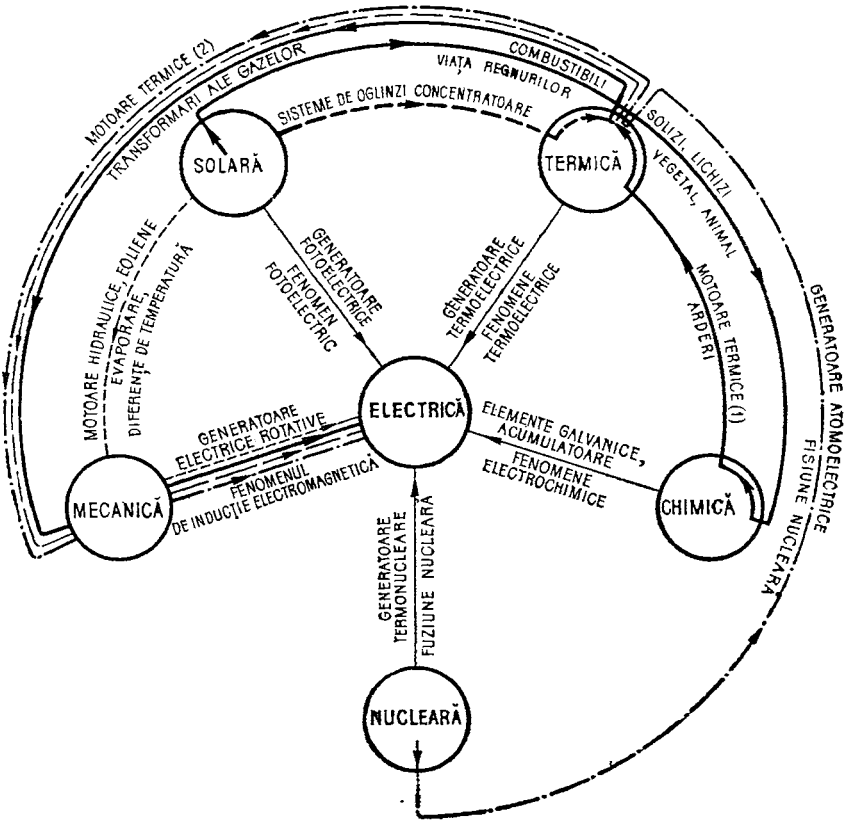


Fig. 134

Din figura 134 reiese că sursele primare de energie sînt cele corespunzătoare energiei solare și energiei nucleare, celelalte tipuri de energie sînt tipuri intermediare, iar diferitele transformări de pe perimetrul schemei reprezintă doar porțiuni ale celor două lanțuri întregi de transformări: *energie solară — energie electrică sau energie nucleară — energie electrică.* Transformarea directă a energiei nucleare în energie electrică prin fuziune nucleară va fi, probabil, realizată în deceniile următoare, prin eforturile depuse în această direcție.

Grație *energiei solare* se înmagazinează *energie chimică* în combustibili (cărbuni, petrol etc.), ca un rezultat al proceselor petrecute în organismele plantelor și animalelor din care provin combusti-

bilii. Tot energiei solare i se datorează atît *energia mecanică* de care dispun *căderile de apă* (energia hidraulică), ca urmare a evaporării — condensării și circulației apei în natură, cît și *energia vîntului* (eoliană), produs din cauza diferenței de presiuni și respectiv de temperaturi ale maselor de aer.

Energia chimică a combustibililor poate trece în *energie termică* prin ardere în focarele sau cilindrii mașinilor termice; în aceste mașini are loc, cum se știe, și obținerea energiei mecanice prin anumite transformări ale gazelor sau vaporilor.

Cu ajutorul generatoarelor electrice rotative (de curent alternativ sau curent continuu) se obține, prin inducție electromagnetică, *energie electrică*. Aceasta este una dintre seriile de transformări de energie larg folosită în practică pentru obținerea energiei electrice (cazul *centralelor termoelectrice*).

O cale de asemenea frecvent utilizată în practică este obținerea energiei electrice din *energia mecanică a căderilor de apă (centrale hidroelectrice)*.

Energia electrică se poate obține și din *energia nucleară* rezultată prin *fisiunea nucleară* (despicarea nucleelor atomice ale elementelor grele ca U, Pu, în nuclee ale elementelor cu masa atomică mai mică). În acest caz se degajă în *reactoare nucleare* o mare cantitate de energie termică. Aceasta urmează apoi transformările cunoscute: energie termică—energie mecanică—energie electrică, care au loc în turbine cu abur și generatoare electrice. Pe această cale se obțin mari cantități de energie în *centralele atomoelectrice*.

Se fac cercetări pentru a se putea folosi în practică enorma cantitate de energie degajată în timpul *fuziunii nucleare* (contopirea nucleelor atomice ale elementelor ușoare, cum ar fi, de exemplu deuteriul și litiul, în nuclee cu masa atomică mai mare). Realizarea controlată a acestei *reacții termonucleare* va însemna nu numai găsirea unui rezervor de energie imens (întrucît combustibilul necesar este hidrogenul greu, adică deuteriul abundent în apa mărilor și oceanelor), dar și posibilitatea obținerii directe a energiei electrice.

Se poate concentra energia radiantă a Soarelui asupra unor cazane de abur folosind oglinzi foarte mari susținute de dispozitive speciale care le rotesc automat, urmărind poziția Soarelui.

Aburul produs pune în mișcare turbine, iar acestea generatoarele electrice (*centrale solare* sau *heliocentrale*). Utilizarea lor însă este restrînsă la regiunile în care există vreme însorită un număr mare de zile pe an.

Se construiesc centrale electrice care folosesc *energia mecanică a mareelor (fluxul și refluxul*, adică ridicarea și coborîrea periodică a nivelului apelor oceanelor din cauza forțelor de atracție ale Lunii și Soarelui). Apa pune în mișcare niște turbine, iar acestea mișcă rotoarele unor generatoare electrice. Și în acest caz este vorba de obținerea unor puteri reduse. O astfel de centrală a fost pusă în funcțiune în 1960, în Franța, și are o putere de circa 350 000 kW.

Există cazuri în care se folosește căldura adusă din interiorul Pămîntului de către aburii fierbinți. Astfel, în Italia s-au construit *centrale geotermoelectrice* care lucrează cu abur la temperatura de circa 250° și au o putere de 300 000 kW.

Pe de altă parte, există realizări de turbine cu aburi asociate cu generatoare electrice, care sînt acționate datorită *diferenței de temperatură a apei de la suprafață și a celei de la o oarecare adîncime* în apropierea coastei unor mări sau oceane (de exemplu, pe Coasta de Fildeș).

Obținerea energiei electrice în *elemente galvanice și acumulatoare* din *energie chimică* prezintă o deosebită însemnătate fie pentru funcționarea aparatelor și instalațiilor de mică putere și de obicei *mobile* (lanterne de buzunar, radioreceptoare și radioemițătoare portative, autovehicule, electrocare, instalații de iluminat în trenuri etc.), fie pentru înmagazinarea energiei electrice în unele *instalații fixe* care pot avea și puteri mai mari (unele instalații în telefonie, instalații pentru laboratoare, lămpi de semnalizare și control, relee de automatizare în centrale electrice, unele motoare electrice care trebuie să funcționeze în cazul întreruperii curentului de la rețea etc.).

Trebuie subliniat faptul că, deși există unele realizări în privința obținerii energiei electrice *direct* dintr-o altă formă de energie (de exemplu, din *energia termică* folosind cupluri *termoelectrice* sau din *energie luminoasă* de la Soare, folosind *elemente fotoelectrice cu siliciu* ș.a.) totuși ele nu permit decît producerea unor cantități relativ mici de energie.

Dintre toate aceste *serii de transformări de energie* prezintă interes în special cele referitoare la producerea energiei electrice în *centrale termoelectrice și hidroelectrice.*

C. Centrale electrice

59. Centrale termoelectrice

O centrală electrică este constituită dintr-un ansamblu de clădiri, instalații, mașini și aparate necesare pentru transformarea energiei de un tip oarecare în energie electrică.

Centralele termoelectrice sînt instalații complexe care consumă *combustibil* și produc, fie numai *energie electrică,* fie *energie electrică și căldură.*

De aceea *după utilizarea energiei rezultate* prin arderea combustibilului, centralele termoelectrice pot fi împărțite în:

— *centrale termoelectrice de condensație,* la care o parte relativ mică a energiei termice se transformă în energie electrică (utilizată), iar restul energiei termice se pierde în apa de răcire;

— *centrale termoelectrice de termoficare,* care produc nu numai energie electrică, dar de la care se utilizează și *căldura* (prin aburii care au acționat turbinele) în scopuri industriale și pentru încălzirea locuințelor. Folosirea acestui tip de centrale termoelectrice este deci mai avantajoasă decît a celor de condensație.

Centralele termoelectrice pot funcționa cu *turbine cu aburi,* cu *turbine cu gaz* sau cu *motoare Diesel.* Prima categorie este cea mai răspîndită, fiind cea mai economică și realizînd puterile cele mai mari.

Centralele termoelectrice cu abur sînt însă complexe, intră în funcțiune relativ greu și lucrează economic doar funcționînd neîntrerupt și cu sarcină constantă. Randamentul lor crește dacă folosesc abur cu temperaturi și presiuni mari.

În figura 135 se arată schema unei centrale termoelectrice cu aburi (fără a da toate detaliile). Se pot urmări două circuite princi-

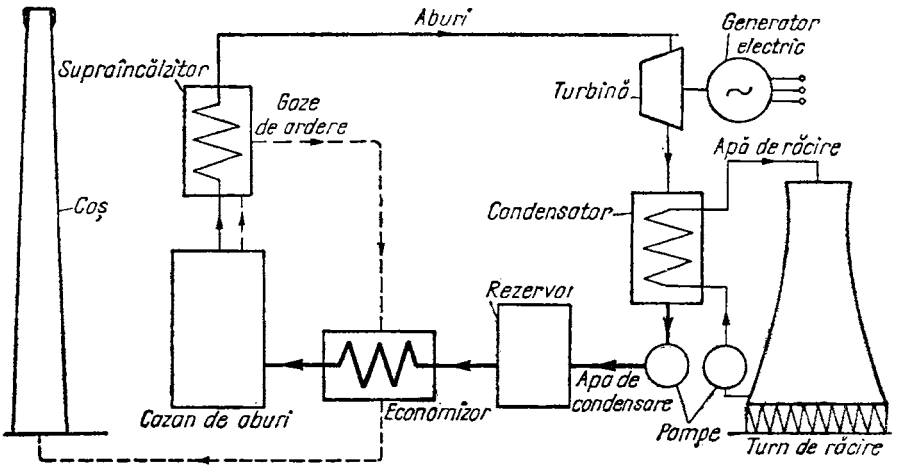


Fig. 135

pale: 1) *cel al aburilor și al apei provenită din condensarea lor* și 2) *cel al gazelor de ardere.*

Iată, pe scurt, descrierea *proceselor* care au loc într-o astfel de centrală și a instalațiilor sale.

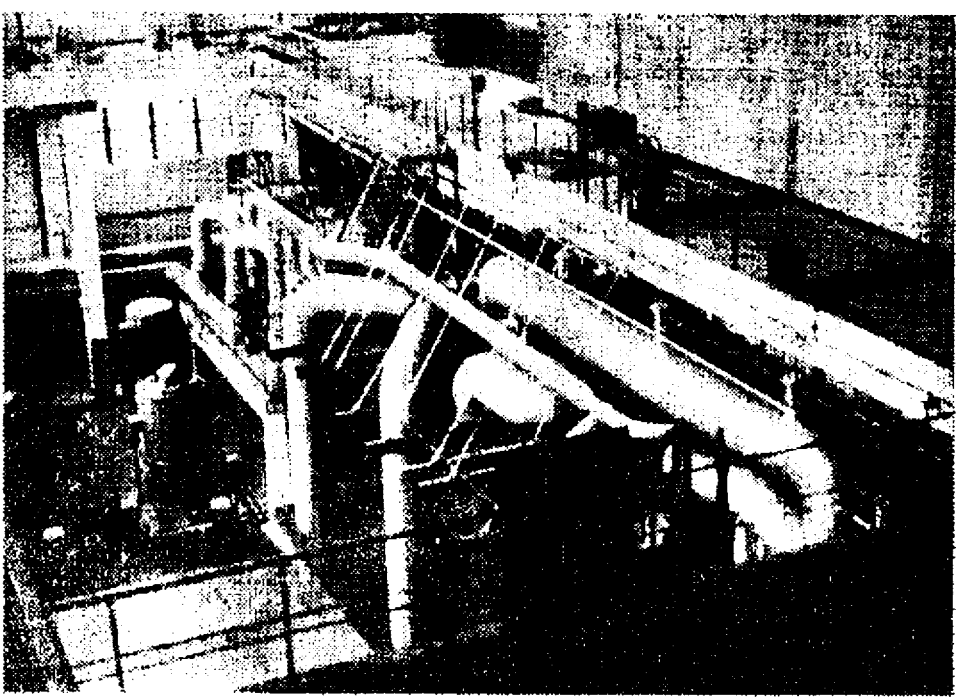
Combustibilul (cărbune) este adus din *magazie* pe *benzi transportoare* la un *concasor* care îl fărîmițează, apoi este trecut într-o *moară cu bile* unde este măcinat fin și totodată este uscat de către gazele fierbinți care vin aici din *focar.*

Pulberea de cărbune este suflată cu aer fierbinte (adus din vecinătatea cazanului de către un ventilator) în arzătoare. Gazele de ardere încălzesc *apa din tuburile cazanului,* trec mai departe printr-un *supraîncălzitor al vaporilor* proveniți din cazan și apoi străbat un *economizor* unde preîncălzesc apa care urmează să alimenteze cazanul. După aceasta, gazele (care s-au răcit destul de mult) sînt separate de pulberi în niște dispozitive speciale (*cicloane și separatoare electrostatice*) și eliminate pe *coș.*

Aburii din cazan sînt supraîncălziți, apoi intră în *turbină,* care este cuplată cu *generatorul electric.* După ce au pus în funcțiune turbina, aburii o părăsesc și, intrînd într-un *condensator* unde circulă *apă de răcire,* se condensează. În continuare, apa de condensare este pompată într-un *rezervor* de unde, după ce trece prin *economizorul* amintit mai sus, intră în cazan. Apa de răcire care s-a încălzit în condensator, trece în *turnul de răcire* în interiorul căruia curge sub formă de picături fine și se răcește venind în contact cu aerul înconjurător; apa de răcire este reintrodusă în circuitul său de către o pompă.

O mică parte din energia electrică produsă de generator este folosită chiar pentru funcționarea diferitelor *electromotoare* și *instalații electrice* ale centralei. Cea mai mare parte este trecută prin intermediul unor *transformatoare* ridicătoare de tensiune, *liniei de înaltă tensiune* pe care va fi transportată către consumatori.

O centrală termoelectrică mai cuprinde și alte instalații, cum ar fi: *instalația de epurare și degazare a apei* (în care se elimină prin tratamente chimice sărurile din apă care ar putea forma piatră pe cazan), *instalația de control și comandă* a centralei, având panouri cu schema electrică a centralei și *pupitrul de comandă* (cu aparate de măsură, butoanele releelor de comandă etc.) și *instalații de distribuție a energiei electrice* (*stația de conexiuni* cu ajutorul căreia se realizează legătura dintre generatoare, transformatoarele ridicătoare de tensiune și liniile de transport al energiei electrice, *dispozitivele de întrerupere, dispozitivele de protecție* în caz de suprasarcini sau scurtcircuite, *transformatoarele*) și altele.



Sala cazanelor de la termocentrala Luduș

Trebuie subliniat că odată cu dezvoltarea și modernizarea lor, centralele termoelectrice capătă următoarele *caracteristici:* reprezintă o *concentrare a producției de energie electrică în centrale mari* (așa este centrala Luduș 800 MW), lucrează cu *parametri înalți ai aburului* (presiuni mari și temperaturi înalte 570°C), necesită *un mic consum specific de combustibil* și au *instalații automatizate* care pot fi conduse de un număr redus de oameni.

60. Centrale hidroelectrice

Centralele hidroelectrice sînt centrale care folosesc energia căderilor de apă. Construirea unei centrale hidroelectrice cere investiții mari, muncă și timp mult, dar o dată realizată, ea produce energia electrică mai ieftin decît o centrală termoelectrică. O centrală hidroelectrică poate funcționa sigur și cu randament ridicat chiar dacă sarcina ei variază în mare măsură și brusc, ori dacă este pornită și oprită de mai multe ori la rînd; acestea constituie avantaje însemnate față de centralele termoelectrice. În plus, o dată cu folosirea energiei hidraulice în centralele hidroelectrice, apar și posibilități de realizare a irigațiilor, de redare a unor terenuri agriculturii, de îmbunătățire a condițiilor de navigație (prin ridicarea nivelului apelor), de reducere a pericolului inundațiilor, de valorificări piscicole, industriale etc.

Centralele hidroelectrice pot fi *centrale de cădere înaltă* (cu o cădere de peste 50—70 m) și se situează în regiunile muntoase, *centrale de cădere mijlocie* (de ordinul a 10 m) și *centrale de cădere mică,* pe cursuri de apă care au debit mare și regulat (rîuri, fluvii).

Centralele hidroelectrice care lucrează cu căderi însemnate sînt *centrale cu derivație,* iar cele cu căderi mai mici sînt *centrale cu baraj;* de fapt și centralele cu derivație au un baraj, dar nu pentru a produce cădere de apă, ci pentru a dirija apa în *canalele de derivație* sau *aducție.*

Amenajarea unei *centrale hidroelectrice cu derivație* cuprinde în primul rînd (v. fig. 136) un *lac de acumulare* creat prin oprirea cursului unei ape cu ajutorul unui *baraj.*

Lacul de acumulare este necesar pentru obținerea unui debit de apă constant și deci a unei puteri constante, indiferent de debitul natural variabil al apei curgătoare, adică indiferent de anotimp.

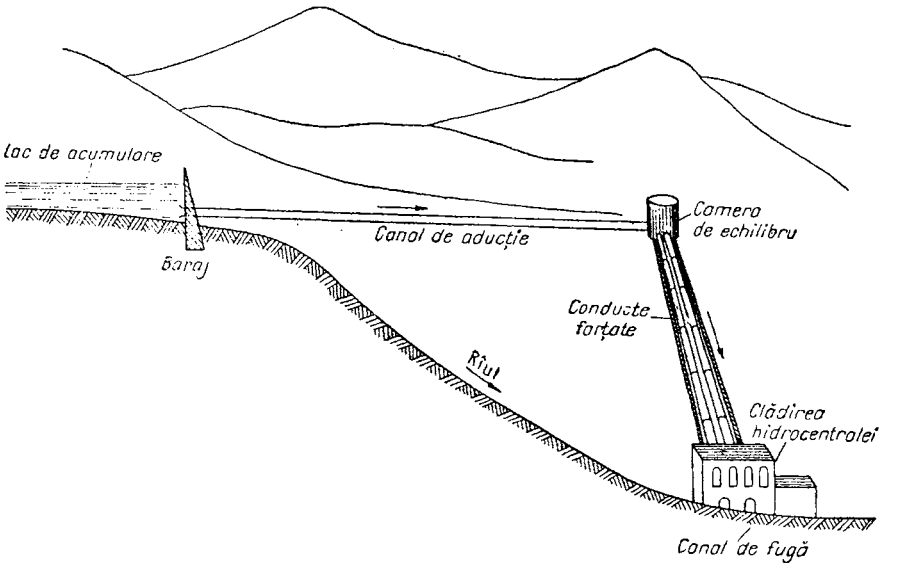


Fig. 136

Din lac, apa trece printr-un *canal de aducție* care are o înclinare mică și poate fi situat fie la suprafață, fie în pămînt *(tunel),* ajunge într-un *castel de apă* (sau *cameră de echilibru*) și de aici curge prin *conducte forțate* (care au o mare înclinare), intrînd în *turbinele hidraulice.* După ce pune în mișcare rotoarele turbinelor și totodată ale *generatoarelor electrice* cu care acestea sînt cuplate, apa părăsește centrala printr-un *canal de fugă* și reintră în albia rîului.

Rolul *camerei de echilibru* este de a prelua șocul care se produce atunci cînd este necesar să se oprească rapid, cu ajutorul unor *vane,* trecerea apei spre turbine.

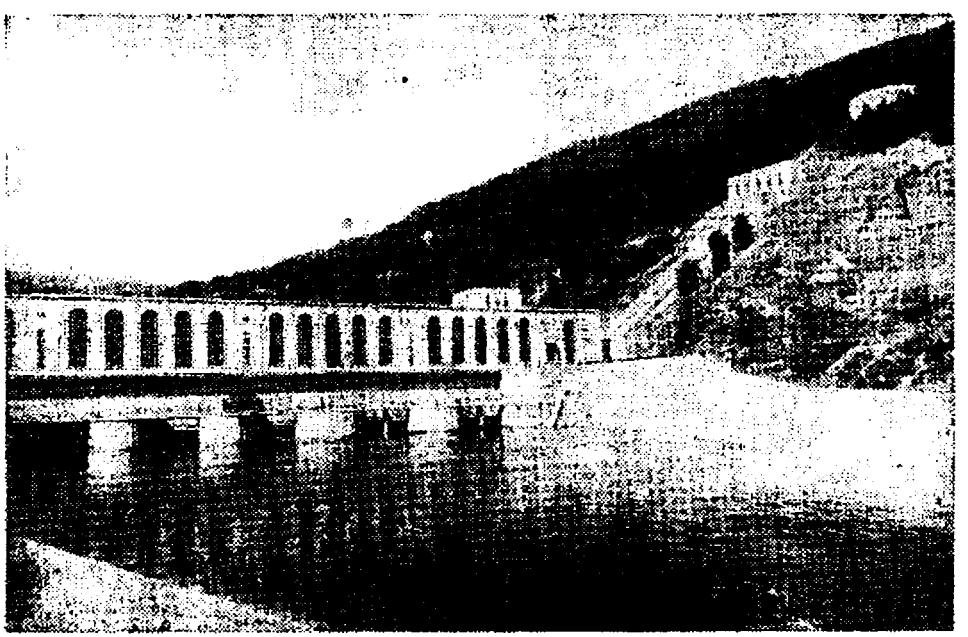
La *centralele hidroelectrice cu baraj* care se construiesc pe ape curgătoare cu debit mare și constant, clădirea centralei se află în apropierea barajului sau chiar pe el. Energia electrică produsă de hidrogeneratoare este trimisă consumatorilor după ce a trecut prin transformatoarele ridicătoare de tensiune ale centralei hidroelectrice. Controlul și dirijarea energiei electrice produse se face din *camera de comandă.*

Exemple de centrale hidroelectrice cu derivaţie sînt centralele „V. I. Lenin" — Bicaz şi „Gh. Gheorghiu-Dej" — Argeş. Centrală hidroelectrică cu baraj este centrala de la Porţile de Fier etc.

D. Sistemul electroenergetic naţional

Caracteristic marii producţii de energie electrică este faptul că aceasta trebuie consumată imediat, ea neputînd fi acumulată. Din această cauză, centrala electrică trebuie să poată satisface imediat cererile existente de energie.

Cum consumul de energie variază în decursul a 24 de ore, fiind de obicei mai ridicat în timpul dimineţii şi serii şi mai scăzut în timpul nopţii, surplusul de energie necesar este acoperit temporar de către *centralele de vîrf*.



Hidrocentrala „V. I. Lenin"

Majoritatea cantității de energie electrică este dată în mod continuu de către *centralele de bază.*

Centralele hidroelectrice se pot pune mai ușor și mai repede în funcțiune decît cele termoelectrice; de aceea centralele hidroelectrice sînt adesea centrale de vîrf, iar centralele termoelectrice sînt centrale de bază. Astfel, în țara noastră, centralele hidroelectrice „V. I. Lenin" — Bicaz și „Gh. Gheorghiu-Dej" — Argeș sînt centrale de vîrf.

Dacă se conectează între ele centralele electrice, atunci se realizează un sistem *electroenergetic.* Interconectarea prezintă o serie de avantaje, printre care acela că variațiile consumului de energie sînt preluate din rețeaua comună, se repartizează tuturor centralelor și nu numai uneia singure, deci pot fi acoperite (sau suportate) mai ușor de către fiecare.

O dată cu dezvoltarea rețelelor de transport ale energiei electrice, în țara noastră a fost creat și se extinde sistemul *electroenergetic național* prin interconectarea tuturor centralelor electrice mari și a consumatorilor din toate regiunile. În acest mod se pot folosi mai economic, mai rațional resursele energetice, micșorîndu-se puterea de rezervă necesară și mărindu-se gradul de siguranță în funcționare.

La sfîrșitul anului 1965, centralele interconectate la sistemul electroenergetic național însumau o putere instalată de 3 300 MW din totalul de 3 500 MW, adică aproximativ 95%. În 1969 puterea instalată a sistemului electroenergetic național unitar a atins 6 615 MW.

Sistemul electroenergetic național este condus de către un *dispecer energetic național.*

Acesta este un serviciu special care supraveghează și dirijează dintr-un punct de comandă, funcționarea tuturor centralelor electrice și a liniilor de transport al energiei electrice, în scopul asigurării unei exploatări cît mai economice, al unei repartizări optime a sarcinii între centrale, al observării și eliminării rapide a avariilor, al menținerii tensiunii și frecvenței curentului electric etc.

Se prevede realizarea, în țara noastră, a unui *nou dispecer național,* modernizat la nivelul tehnic mondial, avînd instalații de telemăsură, telecomandă și mașini electronice de calcul pentru soluționarea problemelor complexe care se pun în cadrul sistemului electroenergetic.

E. Transportul şi distribuţia energiei electrice

În marea majoritate a cazurilor, energia electrică este trimisă prin *linii de transport* de la *centralele electrice* în centre de distribuire, folosind curent trifazat. De la aceste centre, energia ajunge la consumator prin *reţelele de distribuţie.*

În centrale se produc *tensiuni* alternative *înalte* de 6—20 kV (fig. 120). De aici, după ridicarea tensiunii cu ajutorul transformatorului, energia electrică se transportă la distanţe mari, cu pierderi reduse, prin linii de transport sub *tensiuni foarte înalte* între 35 kV şi 500 kV (valorile intermediare cele mai folosite fiind cele de 110 kV, 220 kV şi 400 kV).

În apropierea locului de utilizare a energiei se coboară tensiunea (de exemplu la 35 kV) tot cu ajutorul transformatoarelor în *staţia principală de transformare.*

Ulterior se coboară din nou tensiunea *în staţii de transformare secundare,* de unde se obţin tensiuni de 3—10 kV şi apoi *tensiuni joase* de ordinul sutelor de volţi. De aici, folosind de obicei *reţelele de distribuţie trifazate cu fir neutru,* energia electrică este dată consumatorilor sub tensiuni cu valori cunoscute ca U_l/U_f=380/220 sau 208/120 V. Dintre acestea, în *uzine şi fabrici* se folosesc tensiunile cu valori mai ridicate, în timp ce pentru *locuinţe* se folosesc tensiuni mai coborîte.

Liniile de transport se întind pe distanţe mari şi de cele mai multe ori sînt *linii aeriene.* În oraşe, *reţelele de distribuţie* ale energiei electrice sînt *reţele subterane.* Cînd energia electrică trebuie transportată pe distanţe foarte mari şi sub tensiuni foarte ridicate (peste 400 kV), apar pierderi de energie deosebit de mari prin ionizarea aerului şi descărcări electrice în spaţiul din jurul conductorilor *(efect corona).* În acest caz, se preconizează folosirea curentului continuu; apar însă o serie de probleme dificile, printre care aceea a transformării curentului alternativ (care trebuie transformat) în curent continuu, iar după ajungerea la destinaţie, aceea a transformării inverse.

Curentul electric în gaze

A. Ionizarea gazelor

61. **Conductibilitatea gazelor.** În condiţii normale de presiune şi temperatură, gazele, deci şi aerul, sînt izolatoare. Un electroscop încărcat şi aflat în aer uscat se descarcă după un timp îndelungat, dovedind că aerul uscat este un destul de bun izolant, dar nu perfect. El are rezistivitatea de ordinul a $4 \cdot 10^{13} \Omega \cdot m$, deci nu conţine suficienţi *purtători de sarcini* electrice, pe care să-i poată pune în evidenţă aparatele electrice obişnuite. Purtători de sarcină sînt toate particulele încărcate cu electricitate ca: electroni, ioni, molecule sau particule de dimensiuni mai mari care poartă sarcini electrice. Apropiind o flacără de electroscopul încărcat, acesta se descarcă repede, ceea ce înseamnă că prin ridicarea temperaturii s-a mărit conductibilitatea aerului, deoarece unii atomi neutri au dat naştere la electroni şi ioni pozitivi. Flacăra a jucat rol de agent ionizant. *Obţinerea de ioni pozitivi şi de electroni din atomii neutri sub acţiunea agenţilor ionizanţi se numeşte* **ionizare.**

Pentru desprinderea unui electron dintr-un atom, adică pentru ionizare, este necesară energie, pe care agentul ionizant o transmite atomului. *Energia minimă necesară ionizării unui atom se numeşte energie de ionizare.* Ea se măsoară în electronvolţi (eV). Un electronvolt este energia pe care o capătă un electron accelerat într-un cîmp creat de o diferenţă de potenţial de 1 V; $1 \text{ eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ joule. Energia de ionizare variază cu specia atomică. Astfel He are energia de ionizare egală cu 24,5 eV, H are 13,6 eV etc.

Sînt şi alţi agenţi ionizanţi în afara temperaturii. În straturile superioare ale atmosferei, la peste 100 km, se găsesc mulţi ioni pozitivi, încît Pămîntul este înconjurat de un nor de ioni pozitivi numit *ionosferă*. Ionizarea straturilor superioare ale atmosferei este produsă de radiaţiile solare.

În condiţii naturale, aerul şi gazele în general conţin un număr foarte mic de ioni şi electroni, produşi sub acţiunea radiaţiilor cosmice ori a radioactivităţii scoarţei pămîntului. Această ionizare naturală se numeşte *ionizare remanentă*.

62. **Metode de ionizare a gazelor.** Ionizarea gazelor se poate produce pe mai multe căi.

a. *Încălzirea gazelor la temperaturi ridicate.* Odată cu creşterea temperaturii creşte şi numărul atomilor şi moleculelor cu viteze mari, deci cu energii cinetice suficient de mari pentru a ioniza un atom pe care-l ciocnesc. De aceea gradul de ionizare a gazului creşte odată cu temperatura. La temperaturi de cîteva zeci de mii de grade practic toţi atomii unui gaz sînt ionizaţi.

b. *Iradierea gazului cu particule încărcate şi rapide ca:* electroni accelerați, particule α sau β emise de substanţele radioactive, raze cosmice etc. Asemenea particule posedă energie cinetică suficientă pentru ca, ciocnind un atom din gaz, să-l ionizeze. O particulă încărcată cu sarcina e şi avînd masa m, prin accelerarea produsă de tensiunea U primeşte energia eU ajungînd la energia cinetică $\frac{mv^2}{2} = eU$. Prin ciocnire transmite atomului neutru această energie şi-l ionizează dacă $eU \geqslant W_i$, unde W_i este energia de ionizare.

c. *Iluminarea gazului cu radiaţii ultraviolete, Röntgen sau* γ. Fizica modernă a demonstrat că radiaţiile cu energie foarte mare, ca cele ultraviolete, Röntgen sau γ, se comportă uneori ca fiind formate din particule numite *fotoni*. Un foton care ciocneşte un atom din gaz îi transmite energie, iar dacă energia lui e mai mare decît energia de ionizare, din atom este expulzat un electron, adică atomul este ionizat.

Dacă fotonul a avut o energie mult mai mare decît energia de ionizare, electronul obţinut prin ionizare poate avea şi el o energie suficientă pentru a ioniza un alt atom pe care-l ciocneşte; se produce astfel o ionizare secundară.

63. **Descărcări în gaze.** Să considerăm un gaz aflat între doi electrozi A şi C (fig. 137), conectaţi la tensiunea U. Cu ajutorul unui agent ionizant, de exemplu radiaţii ultraviolete, se produc ionizări continui între electrozi. Electronii vor fi dirijaţi către anodul A, iar ionii pozitivi către catodul C. Prin circuit va trece curent electric. *Trecerea curentului electric printr-un gaz ionizat se numeşte* **descărcare în gaze.** Curentul prin gaz se menţine în acest caz datorită faptului că agentul ionizant produce continuu ionizări. Suprimînd agentul ionizant, încetează descărcarea. Descărcarea făcută sub acţiunea agentului ionizant se numeşte *descărcare întreţinută.* Dacă tensiunea U dintre electrozi depăşeşte o anumită valoare, numită tensiune de străpungere curentul de descărcare creşte brusc, iar trecerea lui nu mai este condiţionată de acţiunea unui agent ionizant. Producerea ionizării, deci descărcarea, este rezultatul unor procese care se petrec în interiorul gazului, determinate de trecerea însuşi a curentului. O astfel de descărcare se numeşte *descărcarea independentă.*

64. **Avalanşe electronice.** Descărcarea independentă constă dintr-un complex de fenomene, între care cîteva sînt mai importante. Dacă tensiunea aplicată la electrozi depăşeşte valoarea de străpungere, cîmpul electric $\vec{E}$ dintre electrozi este suficient de mare pentru ca electronii din gaz să obţină de-a lungul drumului liber mijlociu $\bar{\Lambda}$ (drumul parcurs între două ciocniri consecutive) suficientă energie cinetică pentru a provoca o ionizare prin ciocnirea cu un atom neutru:

$$W_i = eE\bar{\Lambda}.$$

Electronii noi formaţi sînt şi ei accelerati şi produc la rîndul lor noi ionizări etc. Se produce o *creştere în avalanşă* a numărului de purtători de sarcină. Aceste procese de ionizare prin ciocniri elec-

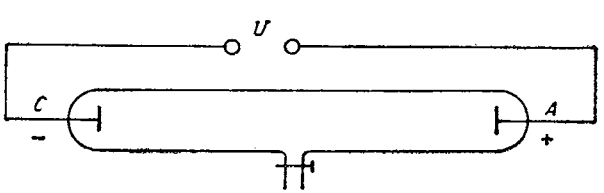


Fig. 137

tronice, în urma cărora apar purtători de sarcină, se numesc procese de *ionizare principală*. Avalanşele electronice s-ar epuiza şi descărcarea ar înceta dacă s-ar produce numai procesele de ionizare principală: în cele din urmă electronii ar ajunge toţi la anod, iar ionii pozitivi la catod. Există însă şi procese de ionizare secundară, prin care apar la catod electroni ce iniţiază noi avalanşe. Astfel ionii pozitivi ce se îndreaptă către catod, fiind accelerați de cîmpul din faţa catodului, lovesc catodul cu mare energie, smulgînd din acesta electroni, care iniţiază noi avalanşe electronice. Dar electronii care iniţiază avalanşe electronice apar şi prin alte procese, ca: acţiunea fotonilor care vin de la lumina descărcării sau prin încălzirea catodului datorită trecerii curentului şi altele. Toate aceste fenomene produse la catod se numesc procese de *ionizare secundară*. Aşadar, în *descărcarea independentă purtătorii de sarcină electrică apar prin procese de ionizare principală şi de ionizare secundară*. Aceste procese nu sînt provocate de agenţi ionizanţi exteriori, ci sînt o consecinţă a trecerii curentului. Pornirea descărcării independente necesită însă existenţa iniţială a unui număr de electroni, chiar foarte mic, ceea ce se întîmplă totdeauna, datorită ionizării remanente. La explicarea acestor procese a contribuit cu lucrări importante şi fizicianul român E. Bădărău (n. 1887).

65. **Fenomene luminoase care însoţesc descărcările în gaze.** Pe lîngă formarea avalanşelor electronice, un alt fenomen fundamental în descărcările în gaze este luminescenţa gazului, adică producerea de lumină. Prin ionizare apar perechi electron-ion pozitiv; se poate produce şi procesul invers: recombinarea unei perechi electron-ion pozitiv într-un atom neutru. Procesul de recombinare, invers celui de ionizare, se produce cu *degajare de energie sub formă de radiaţii luminoase*. În anumite cazuri electronul acccelerat nu are suficientă energie să ionizeze atomul neutru, ci doar să-i mărească energia internă. Procesul se numeşte *excitare*, iar atomul care şi-a mărit energia internă se numeşte *atom excitat*. Prin revenirea la starea sa energetică iniţială, prin dezexcitare, atomul cedează surplusul de energie tot sub formă de lumină. Prin urmare *descărcările în gaze sînt însoţite de fenomene luminoase, datorită fenomenelor de recombinare şi dezexcitare*.

B. Descărcarea în gaze la presiune normală

66. **Arcul electric.** Doi electrozi de cărbune sînt aşezaţi faţă în faţă, aşa fel ca distanţa dintre capetele lor să poată fi variată. Li se aplică o tensiune de 50—100 V. La început se aduc electrozii, pentru scurt timp, în contact. Rezistenţa electrică la contact fiind mare, capetele electrozilor se încălzesc şi devin incandescente. Îndepărtînd electrozii cu cîţiva milimetri unul de altul, între capetele lor apare *o descărcare în gaz, cu intensitate mare de curent,* care se numeşte *arc electric* (fig. 138).

Intensitatea curentului poate ajunge la cîteva zeci, uneori sute de amperi. Temperatura capetelor electrozilor se ridică la 4 000°C—5 000°C. Din catodul încălzit prin bombardament ionic iese un număr foarte mare de electroni, printr-o *emisie termoelectronică.*

Metalele încălzite emit electroni; fenomenul se numeşte emisie termoelectronică şi a fost descoperit de T. A. Edison (1847—1931) în 1884. În metale se găsesc electroni liberi, care nu-l pot părăsi, deoarece metalul devine pozitiv la ieşirea unui electron şi îl atrage în interior. Suprafaţa metalului se comportă ca o barieră de potenţial, care împiedică ieşirea electronilor liberi. Dacă însă electronii liberi primesc energie, cei care ajung la viteză mai mare pot învinge forţele electrice de la suprafaţa metalului şi ies din metal: se produce o *emisie electronică.* Dacă energia se transmite metalului prin încălzire, emisia se numeşte **termoelectronică.**

Anodul are temperatura mai ridicată decît catodul, de aceea se volatilizează treptat.

Prin răcirea catodului, arcul electric dispare, deoarece încetează emisia termoelectronică, cauză a producerii fluxului intens de electroni.

a) Arcul electric cu electrozi de cărbune se foloseşte ca sursă intensă de lumină la reflectoare şi la unele aparate de proiecţie.

b) Se foloseşte şi la sudarea metalelor. Metalul care trebuie sudat constituie catodul arcului. Anodul este un electrod mobil care se topeşte treptat şi realizează sudura.

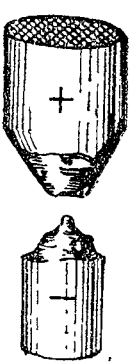


Fig. 138

c) Se folosește de asemenea la topirea metalelor în cuptoarele cu arc electric.

d) Cu ajutorul arcului electric, fizicianul A. Ionescu (1902—1954) a realizat o metodă pentru transformarea metanului în acetilenă.

C. Descărcări în gaze rarefiate

68. **Producerea descărcării luminescente.** Descărcarea în gaze rarefiate este însoțită de fenomene luminoase, al căror aspect variază cu gradul de rarefiere.

Experiență. Se aplică o tensiune continuă la electrozii unui tub de descărcare (fig. 139), prevăzut cu o conductă laterală, care este în legătură printr-un robinet cu o pompă de vid*. La presiunea atmosferică nu trece curent electric prin gaz. Punînd pompa în funcțiune, aerul din tub începe să se rarefieze progresiv. La un moment dat, cînd presiunea este între 40—10 torr, în tub apare o panglică luminoasă subțire, șerpuitoare între electrozi (fig. 139, *a*). Pe măsură ce rarefierea continuă și presiunea coboară către 0,1 torr, aspectul luminos al aerului din tub variază și capătă înfățișarea reprezentată schematic în figura 139, *b*, cînd presiunea este de cca. 0,2 torr. Catodul este înconjurat de o lumină violacee, numită *lumină catodică (l. c.)* după care urmează un strat întunecat îngust, *spațiul întunecat catodic (s. c.)* urmat de lumina negativă *(l. n.)*, de culoare violacee intensă. După *spațiul întunecat Faraday (F)* începe *coloana pozitivă (c. p.)* care se întinde pînă la anod. Culoarea ei depinde de natura gazului din tub: roză în aer, roșu-cărămiziu în neon, albăstrie în vapori de mercur etc. Menți-

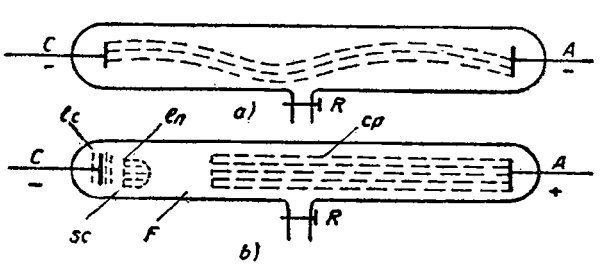


Fig. 139

* Se pot folosi tuburile din trusa I.M.D.

nînd presiunea constantă şi deplasînd anodul către catod, se scurtează coloana pozitivă, dar nu se modifică părţile catodice ale descărcării. Deci părţile catodice au rolul esenţial în descărcarea luminescentă. Electronii se deplasează mult mai repede spre anod decît ionii pozitivi, care se aglomerează la catod, formînd în faţa lui o sarcină spaţială pozitivă. Din această cauză tensiunea nu se mai distribuie liniar, între catod şi anod, ci se formează o cădere mare de potenţial, căderea catodică, corespunzătoare spaţiului întunecat catodic. În spaţiul întunecat catodic se produc cele mai multe procese de ionizare în avalanşe. Lumina negativă rezultă din procese de recombinare şi dezexcitare, în urma cărora electronii îşi pierd energia. Este nevoie de o distanţă mai lungă — spaţiul întunecat Faraday — pentru ca electronii să fie accelerati de tensiunea mai slabă de aici, pînă la energia necesară excitării sau chiar ionizării atomilor neutri prin ciocniri. În coloana pozitivă sînt mai numeroase procesele de excitare decît cele de ionizare, deoarece necesită energii mai mici. Lumina rezultă mai ales din procesele de dezexcitare. În coloana pozitivă concentraţia de electroni este egală cu concentraţia de ioni pozitivi. Coloana pozitivă este un amestec de electroni, ioni pozitivi şi molecule neutre şi poartă numele de **plasmă.** Astfel se numeşte astăzi orice gaz puternic ionizat. Plasma se consideră *a patra stare de agregare a materiei,* care cuprinde peste 99% din materia Universului. Are proprietăţi deosebite ca: bună conductivitate electrică, interacţionează cu undele electromagnetice etc. Fizicianul Th. V. Ionescu (n. 1899) a construit primul oscilator cu plasmă pentru undele ultrascurte.

69. **Aplicaţii ale descărcărilor luminescente.** a) *Lampa cu neon.* Se bazează pe folosirea luminii catodice, în tuburi cu neon şi heliu la 10 torr. Electrozii se fac din fier activaţi cu bariu, ajungîndu-se la lumină intensă şi tensiune de aprindere în jurul a 80—100 V. În circuitul ei trebuie pusă o rezistenţă mare, de protecţie. Se folosesc ca indicatoare de tensiune şi, datorită inerţiei lor foarte mici, se folosesc în oscilografe pentru curent alternativ.

b. *Tuburi pentru reclame luminoase.* Folosesc lumina coloanei pozitive din tuburile cu presiune în jurul a 1 torr, numite tuburi Geissler. Această lumină urmăreşte toate cotiturile tubului, pe distanţe de cîţiva metri. Din tuburile de descărcare se confecţionează literele şi contururile colorate ale reclamelor luminoase. Culoarea lu-

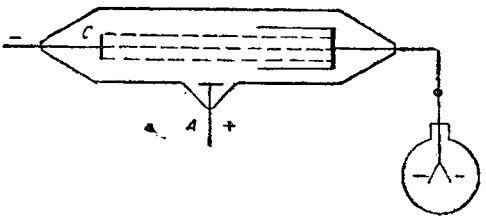


Fig. 140

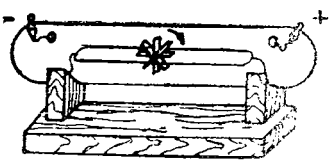


Fig. 141

minii depinde de gazul din tub: neonul dă roşu, heliul şi azotul dau galben, CO_2 dă alb, amestecul de Ne, Ar şi Hg dă lumina albastră etc.

c. *Lămpi fluorescente.* Acestea transformă energia electrică în energie luminoasă cu un randament de 3—4 ori mai mare decît lămpile cu incandescenţă şi pot da o lumină cu compoziţia spectrală apropiată de cea a luminii albe. Sînt tuburi de descărcare luminescentă de construcţie specială, care permite utilizarea lor la reţeaua de 220 V. Pereţii interiori ai tubului de sticlă sînt acoperiţi cu un strat subţire de substanţă fluorescentă. Substanţele fluorescente au proprietatea de a emite radiaţii sub acţiunea altor radiaţii cu frecvenţă mai mare sau sub acţiunea unor particule încărcate şi rapide. În interiorul tubului se află un amestec de Ar, Ne, He şi vapori de Hg, în anumite proporţii. Coloana pozitivă ocupă aproape toată lungimea tubului şi emite radiaţii ultraviolete. Sub acţiunea acestora, substanţa fluorescentă emite lumină vizibilă. Datorită avantajelor pe care le prezintă, iluminatul fluorescent s-a extins pe scară largă.

70. **Radiaţii catodice.** Am studiat fenomenele de descărcare în gaze rarefiate pînă la presiuni de circa 0,1 torr. Ele se caracterizează prin fenomenele de luminescenţă care le însoţesc. Sub această presiune, pînă pe la 10^{-3} torr, în tuburi numite Crookes, aspectul descărcării se schimbă. Dispar fenomenele de luminescenţă a gazului, iar pereţii opuşi capătă o fluorescenţă galben-verzuie. Aceasta dovedeşte că *de la catod pornesc nişte radiaţii* numite **radiaţii catodice.** I. Perrin a demonstrat experimental că *radiaţiile catodice sînt un fascicul de electroni* (fig. 140). Radiaţiile catodice sînt culese de un cilindru în legătură cu un electroscop. Foiţele electroscopului diverg şi se constată că sînt încărcate cu electricitate negativă. Radiaţiile catodice se propagă rectiliniu, perpendicular pe suprafaţa catodului.

Electronii care constituie radiațiile catodice au viteze mari și de aceea transportă energie cinetică apreciabilă: cînd cad pe paletele de mică ale unei moriști foarte ușoare (fig. 141) o pun în rotație. Energia lor poate încălzi corpurile pe care cad.

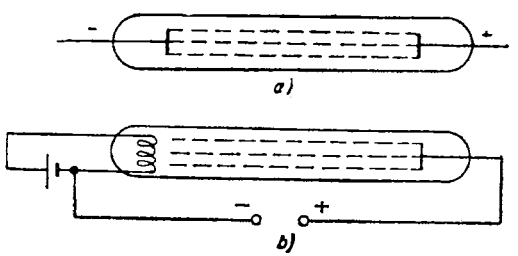


Fig. 142

Radiațiile catodice impresionează placa fotografică și produc fluorescența unor substanțe. Dacă în calea fasciculului de electroni rapizi care constituie radiațiile catodice se găsește o placă metalică din elemente cu masă atomică mare și greu fuzibile, radiațiile catodice sînt frînate brusc, iar din placă sînt emise radiații röntgen.

Fiind încărcate cu electricitate negativă, radiațiile catodice sînt deviate de cîmpul electric, precum și de cîmpul magnetic. Cu ajutorul deviațiilor produse de cîmpul electric și de cel magnetic asupra fasciculelor de radiații catodice s-a determinat *sarcina specifică*, adică sarcina unității de masă $\frac{e}{m_0}$ a electronilor care constituie radiațiile catodice. S-a constatat că *acest raport are aceeași valoare, oricare ar fi natura catodului sau gazului rarefiat din tub.* Acest rezultat dovedește că *electronul intră în alcătuirea oricărui fel de atomi; el este un constituent universal al materiei.* Întrucît sarcina electronului s-a determinat prin alte experiențe și s-a găsit că este $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, din valoarea sarcinii specifice $\frac{e}{m_0} = 1{,}76 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$ s-a dedus că masa m_0 a electronului are valoarea $m_0 = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg.

Întrebări

1. În ce constă procesul fizic de ionizare în fiecare din cele trei moduri de ionizare?
2. Din ce cauză aceeași tensiune electrică imprimă accelerații mai mari electronilor decît ionilor?

3. Din ce cauză o lampă cu neon luminează la tensiuni sub valoarea normală dacă se freacă tubul de sticlă?
4. De ce radiațiile catodice nu sînt deviate prin schimbarea poziției anodului?
5. Să se compare descărcarea luminescentă cu arcul electric.
6. De ce nu e necesară o tensiune înaltă pentru producerea arcului electric?
7. Ce rol joacă rarefierea gazelor în descărcare?
8. Din ce cauză în tubul *a* (fig. 142) descărcarea încetează dacă vidul este înalt, iar în tubul *b*, nu?

Oscilații și unde electromagnetice. Tuburi electronice

A. Oscilaţii electromagnetice

71. **Descărcarea condensatorului.** Descărcarea unui condensator se poate face aperiodic sau periodic. Pentru studiul descărcării unui condensator se realizează montajul din figura 143, *a;* condensatorul *C* (de 8—10 μF) poate fi conectat în circuitul de încărcare *UCKU*, cînd cumulatorul *K* este pus în poziția *1—2*, sau în circuitul de descărcare, cînd comutatorul este pus în poziția *2—3*. Alimentarea se face de la o sursă continuă de tensiune (de 200 V). Descărcarea condensatorului se face printr-un rezistor de rezistență *R* foarte mare (de cca. 500 kΩ).

Se aduce comutatorul în poziția *1—2:* condensatorul se încarcă la tensiunea *U*. Se aduce apoi comutatorul în poziția *2—3:* se închide deci circuitul de descărcare a condensatorului prin rezistorul *R*. Se observă la miliampermetrul *mA* (fig. 143, *a*) apariția unui curent intens, care scade repede la început, apoi foarte lent, pînă la valoarea zero (fig. 143, *b*). Descărcarea condensatorului s-a făcut *aperiodic*.

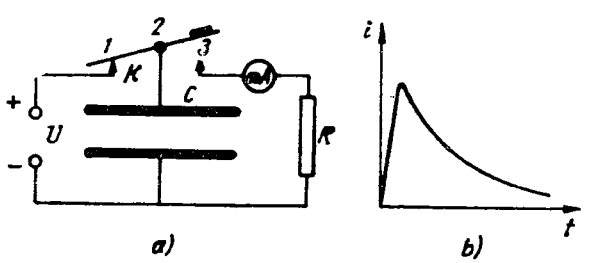


Fig. 143

Se înlocuiește rezistorul cu o bo-

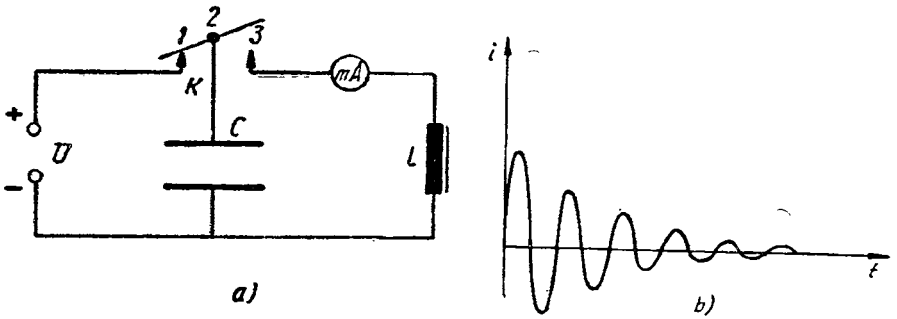


Fig. 144

bină L care are foarte multe spire (circa 12 000) şi miez din fier (fig. 144, *a*); se repetă experienţa anterioară. Se aduce mai întîi comutatorul în poziţia *1—2* pentru a încărca condensatorul; apoi el este adus în poziţia *2—3*, pentru a se produce descărcarea condensatorului C prin bobina L. Acul miliampermetrului mA deviază mult deoparte a poziţiei zero, apoi deviază mai puţin în partea opusă, deviază şi mai puţin în sensul iniţial etc. Cu alte cuvinte curentul de descărcare prin bobină are o variaţie oscilatorie amortizată (fig. 144, *b*). Printr-o bobină, *condensatorul se descarcă periodic, oscilatoriu.*

Aceste oscilaţii de curent dovedesc că şi tensiunea la bornele condensatorului variază periodic. Cu alte cuvinte descărcarea oscilatorie a condensatorului este un fenomen complex, în care valorile tensiunii şi curentului electric variază periodic (oscilatoriu) în timp. Se spune că în circuitul format dintr-un condensator şi o bobină se produc **oscilaţii electromagnetice.**

Circuitul format dintr-un condensator şi o bobină se numeşte circuit oscilant. El poate fi un generator de oscilaţii electromagnetice.

72. **Explicarea producerii oscilaţiilor electromagnetice în circuitul oscilant închis.** La momentul iniţial $t=0$ (fig. 145, *a*) condensatorul este încărcat; între armăturile lui tensiunea u are valoarea maximă $u=U_m$, iar energia circuitului este concentrată în cîmpul electric dintre armăturile condensatorului. Starea energetică a circuitului este analogă stării în care se află un pendul ridicat la o înălţime h: energia lui este numai potenţială.

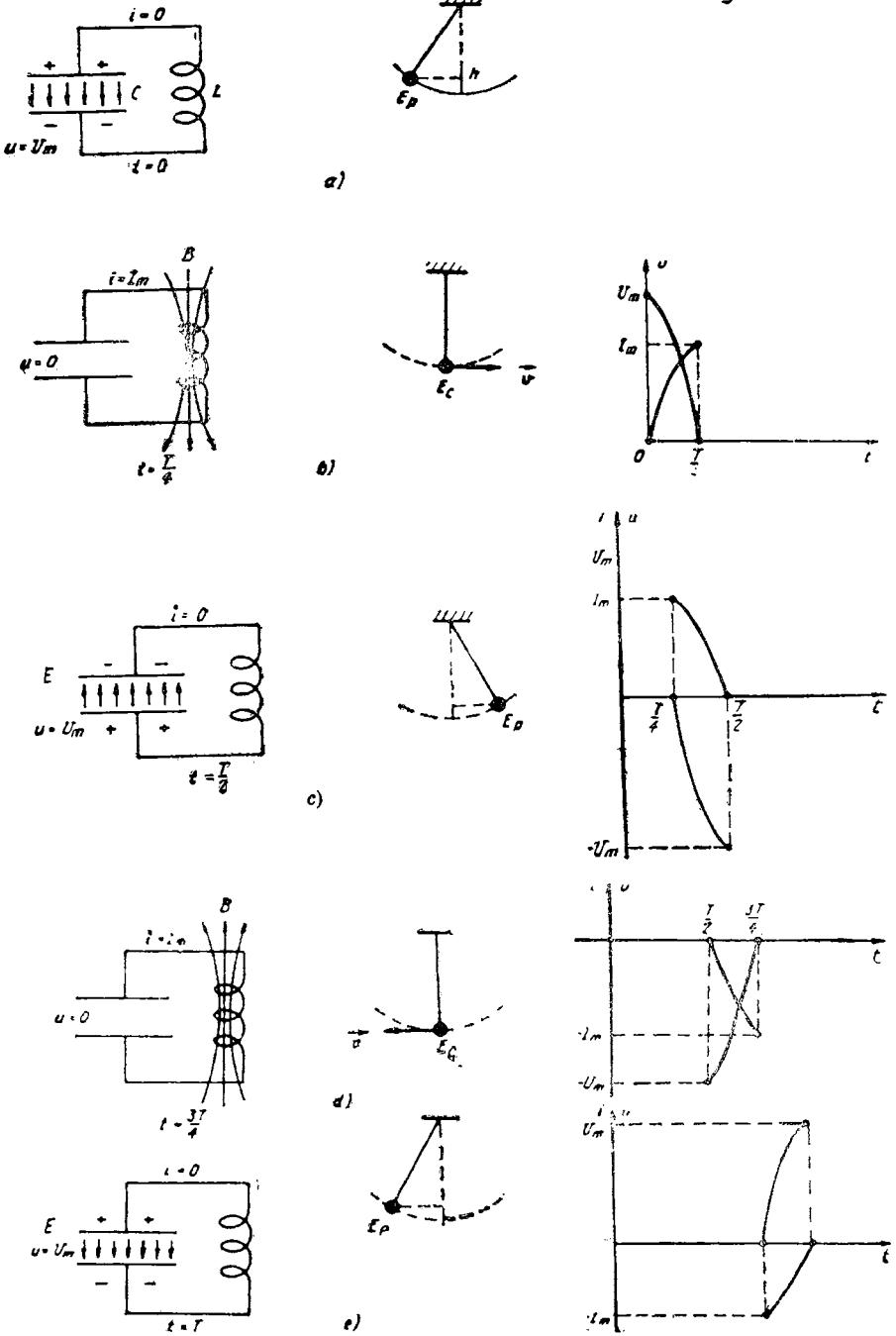
Electronii concentraţi pe o armătură a condensatorului încărcat, sînt acţionaţi de cîmpul electric şi se deplasează prin bobină către

cealaltă armătură a condensatorului. Cu alte cuvinte, prin bobină circulă un curent i care crește pînă la valoarea maximă $i=I_m$, în timp ce tensiunea condensatorului scade la valoarea zero, $u=0$. Curentul este defazat în urma tensiunii datorită fenomenului de autoinducție produs în bobina L, în care curentul crește. În momentul cînd tensiunea condensatorului a ajuns la zero, circuitul se află în starea b din figura 145. Cîmpul electric E a ajuns la zero în timp ce cîmpul magnetic B produs în bobina L de curentul de descărcare a atins valoarea maximă; în această stare energia circuitului este concentrată în cîmpul magnetic din bobină. Starea energetică a circuitului este analogă stării în care se află un pendul care trece prin poziția de echilibru: energia lui este numai cinetică. În timpul trecerii de la starea a (condensator încărcat) la starea b (condensator descărcat), tensiunea a scăzut la zero, iar curentul a crescut la valoarea I_m, cum indică graficul din figura 145, b. Această trecere reprezintă de fapt un sfert din perioada de oscilație.

La momentul $t=\frac{T}{4}$ (fig. 145, b) tensiunea e nulă, deci acțiunea cîmpului asupra electronilor a încetat; din această cauză curentul începe să scadă de la valoarea I_m către zero (fig. 145, c). Scăderea curentului din bobină are ca urmare producerea în bobină a unei tensiuni autoinduse de același sens cu tensiunea care a scăzut la zero. De aceea electronii din circuit sînt deplasați în continuare, în același sens ca și pînă acum, de către tensiunea autoindusă. În felul acesta electronii se concentrează pe armătura care anterior a fost pozitivă, iar acum devine negativă, din care cauză *condensatorul se reîncarcă*, dar în sens contrar ca la început. Cînd curentul a ajuns la zero, circuitul este în starea c (fig. 145) și s-a terminat o jumătate din perioada de oscilație. În acest moment cîmpul electric dintre armăturile condensatorului a atins valoarea maximă, iar cîmpul magnetic a ajuns la zero. Energia circuitului este din nou concentrată în cîmpul electric.

Începînd din această stare (fig. 145, c) fenomenele se succed ca mai înainte, dar în sens contrar. La trecerea din starea c în starea d condensatorul se descarcă, tensiunea scade, curentul crește (graficul din fig. 145, d), iar energia cîmpului electric se transformă în energia cîmpului magnetic.

Fig. 145


i = 0
C
L
u = Um
t = 0
h
Ep
a)
B
i = Im
u = 0
t = T/4
Ec
v
b)
U
Um
Im
0
T/4
t
E
c)
Ep
u
T/2
-Um
d)
3T/4
-Im
e)
T

Urmează apoi reîncărcarea condensatorului de către tensiunea autoindusă în bobină (graficul din fig. 145, *e*), adică se ajunge la situaţia iniţială a curentului (fig. 145, *e*). Concentrînd graficele succesive din figurile 145, *b*, *c*, *d*, *e* se obţine graficul oscilaţiei tensiunii şi curentului în cursul descărcării (fig. 146).

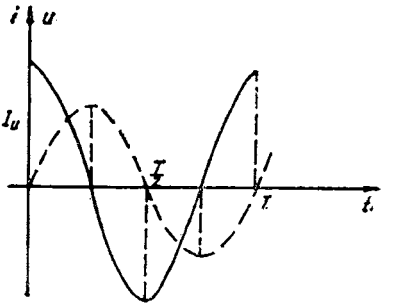


Fig. 146

Din toate cele spuse pînă aci rezultă cîteva concluzii:

în primul şi al treilea sfert de perioadă se produce descărcarea condensatorului, deci acţionează condensatorul; în al doilea şi al patrulea sfert de perioadă se produce reîncărcarea condensatorului prin autoinducţie, deci acţionează bobina;

În circuitul oscilant se produc oscilaţii electromagnetice; în timpul oscilaţiilor electromagnetice energia cîmpului electric şi energia cîmpului magnetic se transformă succesiv una în alta.

73. **Perioada circuitului oscilant.** Un pendul care a primit iniţial o cantitate de energie, pe care o înmagazinează sub formă de energie potenţială (fig. 145, *a*) oscilează apoi liber, fără intervenţie exterioară, această energie transformîndu-se în energie cinetică şi reciproc. Lucrurile se petrec analog cu circuitul oscilant, care este alimentat iniţial, înmagazinîndu-se în condensator energie electrică. Oscilaţia electromagnetică din circuit se produce apoi liber, prin transformarea reciprocă dintre energia electrică şi cea magnetică. *Oscilaţia fiind liberă*, se face cu o perioadă proprie, care depinde de valorile capacităţii C şi ale inducţiei L. Acest lucru se poate demonstra experimental. Circuitul oscilant CL_1 (fig. 147) este alimentat de o tensiune continuă $U = 100$ V, printr-un rezistor de protecţie de rezistenţă $R = 10$ kΩ. Oscilaţiile produse în circuitul oscilant CL_1 se transmit prin in-

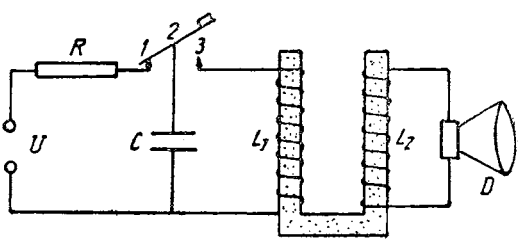


Fig. 147

ducție electromagnetică în bobina L_2 (300 spire), conectată la un difuzor D.

În prima experiență se ia bobina L_1 de 750 spire și $C=1\ \mu F$. Cînd comutatorul este adus în poziția *2—3*, în circuit se produc oscilații electromagnetice, iar în difuzor se aude un sunet (ne servim de un indicator de frecvență a sunetului). Se repetă experiența cu $C=4\,\mu F$, apoi cu $C=16\,\mu F$. Sunetul înregistrat este octava inferioară celui dintîi, cel de la urmă este octava inferioară celui de-al doilea. Deci *frecvența circuitului oscilant variază invers proporțional* cu rădăcina pătrată din valoarea capacității $\nu \sim \frac{1}{\sqrt{C}}$.

În adevăr, se arată în acustică faptul că raportul frecvențelor a două sunete aflate la un interval de o octavă, este 2. Deci avem, cu valorile capacităților date:

$$\frac{\nu_1}{\nu_2} = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} = 2.$$

În a doua experiență se menține constantă $C=4\ \mu F$, iar L_1 se ia succesiv egal cu 125 spire, 250 spire, 500 spire. Rezultatul este analog celui din prima experiență: *frecvența circuitului oscilant variază invers proporțional cu rădăcina pătrată, a inductanței* $\nu \sim \frac{1}{\sqrt{L}}$. Generalizînd se obține $\nu \sim \frac{1}{\sqrt{LC}}$ sau $T \sim \sqrt{LC}$, deoarece $\nu T = 1$. În Sistemul Internațional de unități factorul de proporționalitate este 2π, încît perioada proprie a circuitului oscilant *este dată de formula*, numită a lui Thomson:

$$\boxed{T = 2\pi\sqrt{LC}}$$

74. **Oscilații amortizate și neamortizate.** Oscilațiile libere produse într-un circuit oscilant închis sînt *oscilații amortizate*, adică *amplitudinea lor descrește în timp* (fig. 144, *b*). Amortizarea oscilațiilor este rezultatul transformării ireversibile de energie din circuit.

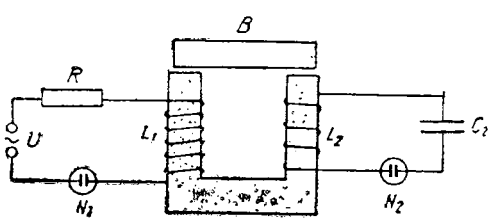


Fig. 148

Una din cauzele importante ale amortizării este

transformarea treptată a energiei electrice în energie termică în rezistențele active ale circuitului, prin fenomen Joule. Din această cauză amortizarea oscilațiilor electromagnetice este rapidă. Pentru a micșora pierderile de energie prin fenomenul Joule, conductoarele circuitelor oscilante se fac din sîrmă de cupru groasă, uneori argintată.

Dacă se transmite circuitului în mod periodic energia pierdută, se compensează amortizarea și se obțin *oscilații neamortizate* (cu amplitudine constantă) numite și *oscilații întreținute*. Întreținerea oscilațiilor electromagnetice se face cu ajutorul tuburilor electronice montate în circuite speciale, cum se va arăta mai departe.

75. **Rezonanța în circuitul oscilant.** Oscilațiile electromagnetice se pot transmite de la un circuit oscilant la altul prin **rezonanță.** Cele două circuite oscilante sînt cuplate prin cîmpul magnetic comun bobinelor lor (fig. 148).

Bobina L_1 de 1 500 spire, legată în serie cu un rezistor de rezistență $R=1$ kΩ și o lampă cu neon N_1, este alimentată la rețeaua de curent alternativ cu $U=220$ V. În bobina L_1 se produc oscilații cu frecvența $\nu=50$ Hz. Prin inducție electromagnetică aceste oscilații se transmit în circuitul C_2L_2 cu bobina L_2 de 1 500 spire și $C_2=4$ μF. Circuitul oscilant L_2C_2 *oscilează forțat,* adică e pus să oscileze cu o frecvență ($\nu=50$ Hz) *diferită de frecvența lui propie.* Lămpile cu neon N_1 și N_2 indică trecerea curentului electric oscilant. Pentru ca energia de oscilație să se transmită complet de la L_1 la L_2, trebuie ca cele două circuite să fie în rezonanță. În acest scop se deplasează bara de fier B înspre dreapta ori înspre stînga, ceea ce are ca urmare variația inductanței bobinei L_2. Pentru o anumită poziție a lui B este realizată rezonanța, adică frecvența circuitului oscilant L_2C_2 are 50 Hz. În acest caz lampa N_2 luminează intens, iar lampa N_1 luminează slab, ori chiar se stinge. Energia circuitului oscilant se transformă succesiv din forma electrică (în C_2) în forma magnetică (în L_2), iar circuitul L_1 îi transmite numai energia pierdută prin amortizare, de aceea N_1 luminează slab. În circuitul C_2L_2 se produc oscilații întreținute.

Fiind date două circuite oscilante LC condiția de rezonanță este următoarea:

$$T_1=T_2 \text{ deci } L_1C_1=L_2C_2.$$

În practică rezonanța se realizează variind capacitatea C_2 a unui condensator variabil.

Întrebări, exerciții

1. Din ce cauză descărcarea condensatorului printr-o bobină este oscilatorie?
2. Cum se explică faptul că odată descărcat condensatorul, oscilația electromagnetică totuși continuă?
3. Să se arate rolul condensatorului și rolul bobinei în procesul oscilației electromagnetice.
4. De ce se spune că descărcarea oscilatorie a condensatorului este o oscilație liberă?
5. Cum se explică amortizarea oscilațiilor?
6. Ce se înțelege prin oscilație forțată?
7. Un condensator cu capacitatea de 3 nF se descarcă printr-o bobină cu inductanță de 1,8 μ H. Ce perioadă au oscilațiile electromagnetice care se produc?

   Răsp. $4{,}6 \cdot 10^{-1}$ s.

8. Un circuit oscilant conține o bobină cu inductanța de 10 mH și are frecvența proprie de 10^5 Hz. Ce capacitate are condensatorul acestui circuit?

   Răsp. 255 pF.

9. Un circuit oscilant are bobina cu inductanță de 70 mH, iar condensatorul său plan are aria armăturilor de 0,45 m^2, separate la o distanță de 0,1 mm printr-un dielectric cu permitivitatea $17{,}7 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$. Se cere frecvența lui proprie.

   Răsp. $2{,}13 \cdot 10^3$ Hz.

10. Cum variază frecvența proprie a unui circuit oscilant dacă inductanța bobinei se dublează, iar distanța dintre armăturile condensatorului se reduce la jumătate? Dar dacă se dublează și distanța dintre armăturile condensatorului?

    Răsp. Se reduce la jumătate; neschimbată.

B. Cîmp electromagnetic

76. **Circuit oscilant deschis.** Dacă se îndepărtează una de alta, armăturile condensatorului dintr-un circuit oscilant, se obține un circuit oscilant deschis (fig. 149), care are o frecvență proprie de oscilație. Un fir conductor liniar, străbătut de curent de înaltă frecvență, reprezintă cel mai simplu circuit oscilant deschis, numit dipol

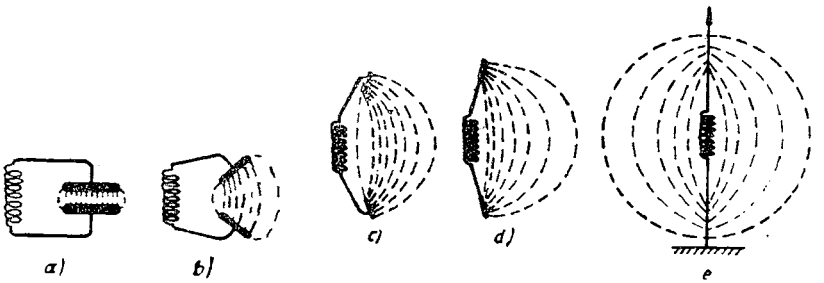


Fig. 149

electric. Capacitatea şi inductanţa acestui circuit sînt distribuite de-a lungul întregului fir.

Circuitul oscilant închis nu radiază energie în spaţiu, deoarece aceasta este concentrată în cîmpul electric şi cîmpul magnetic din condensator şi bobină. Dipolul electric radiază în spaţiu din energia oscilaţiilor sale electromagnetice o parte cu atît mai mare, cu cît frecvenţa oscilaţiilor este mai mare.

77. **Cîmp electromagnetic. Unde electromagnetice.** Cîmpul electric variabil generat de sarcinile electrice care oscilează într-un dipol electric, se va împrăştia în spaţiul din jurul dipolului. Teoria electromagnetismului arată că:

a) **un cîmp electric variabil generează în jurul său un cîmp magnetic variabil cu linii de cîmp închise (ipoteza curentului de deplasare)** şi b) **cîmpul magnetic variabil creează în jurul său un cîmp electric variabil cu linii de cîmp închise** (legea inducţiei electromagnetice).

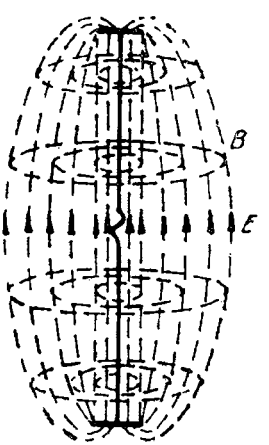


Fig. 150

În jurul dipolului vor exista concomitent atît cîmp electric variabil E cît şi cîmp magnetic variabil B, perpendiculare unul pe altul: liniile de cîmp electric E sînt în plane ce trec prin dipol, iar liniile de cîmp magnetic B sînt în plane perpendiculare pe axa dipolului (fig. 150).



Fig. 151

Ansamblul de două cîmpuri variabile în timp, unul electric și altul magnetic, care se generează unul pe altul poartă numele de **cîmp electromagnetic.**

Așadar, oscilațiile electromagnetice produse în circuitul oscilant deschis — dipol electric — generează cîmp electromagnetic în jurul dipolului. Esențial pentru cîmpul electromagnetic este că se propagă în spațiu: cîmpul electric variabil se înconjoară cu cîmp magnetic variabil, acesta produce și el în jurul său cîmp electric variabil ș.a.m.d. Din aceste fapte rezultă o propagare a cîmpului electromagnetic din aproape în aproape (fig. 151).

Forma de propagare a cîmpului electromagnetic, care variază periodic, poartă numele de **undă electromagnetică.**

Un circuit oscilant deschis — dipol — radiază deci în spațiu unde electromagnetice, care *transportă energie.*

La distanță mare de dipol, vectorul $\vec{E}$ care reprezintă intensitatea cîmpului electric și vectorul $\vec{B}$ care reprezintă intensitatea cîmpului magnetic oscilează în aceeași fază. De-a lungul unei direcții de propagare, unda electromagnetică are următoarea structură: *în fiecare punct vectorul cîmp electric* $\vec{E}$ *și vectorul cîmp magnetic* $\vec{B}$ *variază sinusoidal în funcție de timp, sînt perpendiculari între ei, precum și pe direcția de propagare* (fig. 152).

Vectorii $\vec{E}$, $\vec{B}$ și viteza de propagare $\vec{c}$ sînt legați între ei după regula burghiului: prin rotirea burghiului spre a se deplasa în sensul vitezei de propagare, vectorul $\vec{E}$ se suprapune peste vectorul $\vec{B}$ după o rotație de $\frac{\pi}{2}$ radiani (fig. 152). Unda electromagnetică este o undă transversală. Lungimea ei de undă λ este legată de frec-

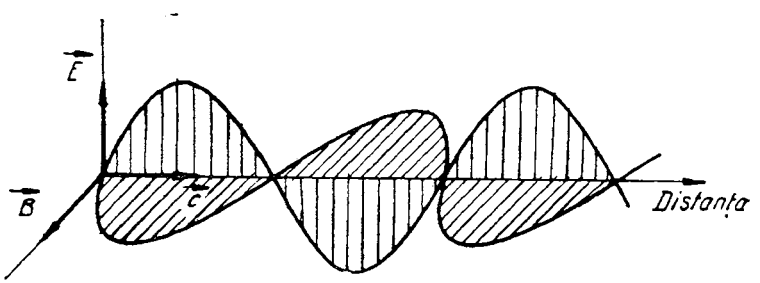


Fig. 152

venţa ν şi de viteza de propagare prin aceeaşi relaţie ca la undele mecanice:

$$\boxed{\lambda = \frac{c}{\nu}} \tag{47}$$

Ea reprezintă distanţa măsurată dealungul direcţiei de propagare, dintre două puncte în care la un moment dat intensităţile cîmpului magnetic (respectiv electric) sînt egale, cîmpurile avînd acelaşi sens.

78. **Proprietăţile undelor electromagnetice.** Undele electromagnetice au fost descoperite prin calcul de către *J. C. Maxwell* (1865). Mult mai tîrziu (1887) H. Hertz (1857—1894) a pus în evidenţă pe cale experimentală unde herţiene, folosite azi în radio-comunicaţii. După lungimea lor de undă sau după frecvenţa lor, undele herţiene au fost împărţite în mai multe grupe, ca în tabelul următor:

Lungimea de undă	Frecvenţa	Denumirea după λ
30 km la 2 km	10—150 kHz	unde foarte lungi
2 km la 750 m	150—400 kHz	unde lungi
750 m la 200 m	400—1 500 kHz	unde medii
200 m la 50 m	1 500—6 000 kHz	unde intermediare
50 m la 10 m	6—30 MHz	unde scurte
10 m la 1 m	30—300 MHz	unde ultrascurte (metrice)
1 m la 10 cm	300—3 000 MHz	unde decimetrice
10 cm la 1 cm	3 000—30 000 MHz	unde centimetrice
1 cm la aprox. 0,1 mm	peste 30 000 MHz	microunde

Undele electromagnetice se propagă cu viteza luminii. J. C. Maxwell a demonstrat că viteza de propagare c a undelor electromagnetice în vid este dată de relaţia:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}},$$

Înlocuind în relaţia de mai sus permitivitatea vidului ε_0 şi permeabilitatea magnetică a vidului μ_0, se obţine:

$$c = \frac{1}{\sqrt{8{,}9 \cdot 10^{-12} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}.$$

adică valoarea vitezei luminii în vid. Într-un mediu cu constante relative ε_r și μ_r viteza luminii este mai mică decît în vid, $v<c$ și este dată de relația:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} \tag{48}$$

La verificarea experimentală a acestei relații a contribuit și fizicianul român *D. Negreanu* (1858—1908). Raportul $n = \frac{c}{v}$ se numește indice de refracție absolut al mediului străbătut de undele electromagnetice. Din relația (48) deducem că $n^2 = \varepsilon_r \mu_r$.

În propagarea lor, *undele electromagnetice se pot reflecta sau refracta.* Sînt reflectate mai ales de suprafața corpurilor conductoare ca: metale, suprafața pămîntului, apa oceanelor etc.

În straturile superioare ale atmosferei se produc foarte mulți ioni de către radiațiile solare. Acolo se formează deci un strat conductor, numit ionosferă, care reflectă în special undele electromagnetice scurte. De aceea este posibilă propagarea la mare distanță a undelor scurte. La trecerea printr-un mediu, undele electromagnetice sînt parțial absorbite. Numai vidul este perfect transparent. Dacă undele electromagnetice sînt absorbite de un mediu, *energia lor se transmite mediului,* mai ales sub formă termică, de aceea mediul se încălzește.

Cînd unda electromagnetică este absorbită ori reflectată de un mediu, acesta suferă o presiune din partea undei, numită **presiune de radiație.** Acest fenomen a fost prevăzut teoretic de Maxwell și confirmat experimental de *P. N. Lebedev* (1901). Presiunea de radiație este o dovadă că unda electromagnetică, deci *cîmpul electromagnetic,* posedă impuls, deci și masă, măsură a inerției sale, deci *este o formă structurală a materiei.*

Proprietățile generale ale undelor electromagnetice confirmă ipoteza lui Maxwell că și *lumina este o undă electromagnetică.* Această concepție despre natura electromagnetică a luminii este un adevăr fundamental al fizicii actuale. S-a demonstrat experimental că trecerea de la undele herțiene la undele infraroșii și de aci la lumină se face continuu, fără a exista o graniță între ele. Astfel s-au obținut unde electromagnetice de 100 μm (Glagoleva-Arkadieva 1924) și chiar de 1,8 μm (V. Petrescu de la Iași). Pe de altă parte s-au găsit radiații infraroșii cu $\lambda = 314$ μm. Astfel undele electromagnetice conțin nu numai undele herțiene. Tot unde electro-

Denumirea undelor	Lungimea de undă în cm	Frecvența în Hz	Sursa de radiație
herțiene	$10^6 \ldots 2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^4 \ldots 1{,}5 \cdot 10^{14}$	Circuite oscilante
infraroșii	$3 \cdot 10^{-2} \ldots 7{,}5 \cdot 10^{-5}$	$10^{12} \ldots 4 \cdot 10^{14}$	oscilații atomo-moleculare
lumină	$7{,}5 \cdot 10^{-5} \ldots 4 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{14} \ldots 7{,}5 \cdot 10^{14}$	
ultraviolete	$4 \cdot 10^{-5} \ldots 10^{-6}$	$7{,}5 \cdot 10^{14} \ldots 3 \cdot 10^{16}$	mișcarea electronilor
Röntgen	$10^{-6} \ldots 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{16} \ldots 3 \cdot 10^{19}$	
gamma	sub 10^{-9}	peste $3 \cdot 10^{19}$	reacții nucleare

magnetice sînt și radiațiile infraroșii, luminoase, ultraviolete, Röntgen și γ. Din tabloul de mai sus se constată că schimbări continui cantitative în valoarea frecvenței radiațiilor electromagnetice duc la schimbări calitative în proprietățile lor.

79. **Antena.** Pentru a radia în spațiu (sau pentru a recepționa) unde electromagnetice, se folosește circuitul oscilant deschis, numit **antenă,** construită pentru prima dată de A. S. Popov. În mod simplificat antena poate fi reprezentată printr-un fir vertical (fig. 153) pus la pămînt în *P*. Oscilațiile electromagnetice din antenă se comportă analog oscilațiilor mecanice ale unei coloane de aer dintr-un tub închis la un capăt și deschis la celălalt: ele se prezintă sub formă de unde staționare. La capătul *A* al antenei se formează un ventru pentru tensiune și nod pentru curent; la pămînt *P* iau naștere un ventru pentru curent și un nod pentru tensiune. Repartiția tensiunii de-a lungul antenei este reprezentată de curba punctată *UP*, iar a curentului, de curba *AI*.

Lungimea proprie l a antenei va fi egală cu $\frac{\lambda}{4}$ a undei electromagnetice radiate de ea: $l = \frac{\lambda}{4}$. De aceea antena radiază în spațiu unde electromagnetice, cu $\lambda = 4l$, adică cu lungimea de undă de 4 ori mai mare decît lungimea ei proprie. Oscilațiile electromagnetice din antena radiantă sînt alimentate de

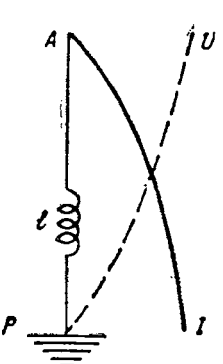


Fig. 153

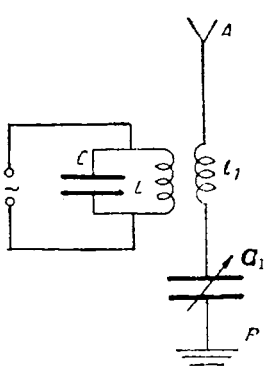


Fig. 154

un circuit oscilant LC. În acest scop antena este cuplată inductiv cu circuitul oscilant LC (fig. 154). Oscilațiile produse de circuitul LC induc oscilații electromagnetice în antena AP, care radiază unde electromagnetice în spațiu. Pentru ca energia transmisă antenei de către LC să fie maximă, trebuie să fie îndeplinită condiția de rezonanță între circuitul LC și circuitul deschis al antenei. Acordul între ele se realizează cu ajutorul condensatorului variabil C_1, care acționează ca și cum s-ar micșora lungimea proprie a antenei, iar cuplajul se face între L și L_1.

O bobină conectată în circuitul antenei are ca efect mărirea lungimii proprii a antenei.

Întrebări și exerciții

1. Ce proprietăți are circuitul oscilant deschis?
2. Ce este cîmpul electromagnetic?
3. Ce se înțelege prin undă electromagnetică și cum se reprezintă grafic?
4. Ce este și ce rol joacă antena?
5. Cum se explică faptul că antena poate recepționa unde de diferite lungimi de undă, deși are lungimea firului constantă?
6. Care sînt proprietățile generale ale undelor electromagnetice?
7. Ce dovezi se pot aduce pentru a arăta natura materială a cîmpului electromagnetic?
8. O navă cosmică transmite semnale cu frecvențele de 9,019 MHz și 144,625 MHz. Ce lungime de undă au aceste semnale?

   Răsp. 33,26 m; 2,07 m.

9. Un circuit oscilant are capacitatea $C=0{,}601\,\mu$ F și inductanța $L=10^{-4}$ H. Se cer:

   a. perioada proprie a circuitului;
   b. frecvența proprie;
   c. lungimea de undă la care intră în rezonanță.

   Răsp. $4{,}8\cdot10^{-5}$ s; $2{,}1\cdot10^{4}$ Hz; $1{,}45\cdot10^{4}$ m.

10. Ce viteză au undele electromagnetice printr-un mediu cu indice de refracție 1,5?

    Răsp. $2\cdot10^{8}\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

C. Tuburi electronice

80. **Dioda.** Tuburile electronice sînt dispozitive care funcţionează pe baza unui flux de electroni emişi de un catod incandescent şi colectaţi de un electrod pozitiv numit *anod*. În orice tub electronic se găseşte un electrod numit *catod*, care în unele cazuri este un fir metalic subţire, deobicei din tungsten, încălzit la incandescenţă. Asemenea catod se numeşte cu *încălzire directă* şi nu mai este folosit astăzi decît în cazuri speciale. Tuburile electronice actuale au *catod cu încălzire indirectă*. El constă dintr-un tub cilindric subţire din nichel sau cupru (fig. 155), acoperit cu *un strat de oxid de bariu şi stronţiu*. În interiorul tubului de nichel se află filamentul din tungsten, care este încălzit cu curent alternativ; filamentul e izolat de tubul metalic printr-o pastă de oxizi de aluminiu. Oxizii de bariu şi stronţiu emit termoelectroni mai intens şi la o temperatură mai mică decît metalele. De aceea pentru aceeaşi emisie de electroni, catodul cu încălzire indirectă necesită o temperatură mai mică de încălzire a filamentului, din care cauză are durată de funcţionare mai lungă, iar structura lui este mai robustă decît a celui cu încălzire directă.

Cel mai simplu tub electronic este *dioda*, care are doi electrozi. *catodul şi anodul* (fig. 156). Catodul *C* serveşte ca *sursă de electroni*,

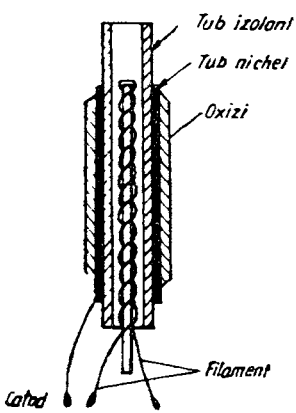


Fig. 155

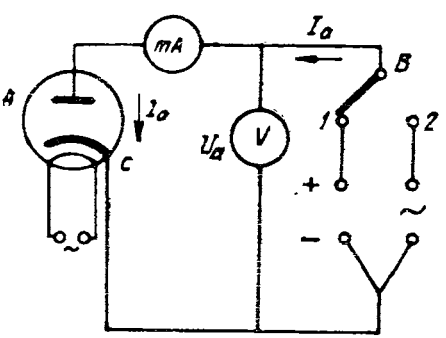


Fig. 156

anodul A servește drept *colector de electroni*. Catodul și anodul se găsesc într-un tub de sticlă, în care s-a făcut vid înalt (10^{-6}... 10^{-7} torr). În general catodul este cu încălzire indirectă, filamentul interior fiind alimentat de la o sursă de curent alternativ. Filamentul împreună cu sursa de încălzire formează *circuitul de alimentare* (încălzire) al filamentului. Circuitul $CABC$ formează *circuitul anodic*. Între C și A acest circuit se închide prin fluxul de electroni emiși de catod, care se deplasează către anod datorită diferenței de potențial dintre C și A. Curentul care trece prin circuitul anodic se numește *curent anodic* I_a. Tensiunea aplicată din exterior între C și A se numește *tensiune anodică* U_a. Să urmărim funcționarea diodei pentru diferite tensiuni anodice continue aplicate între A și C, la anod fiind plusul. Dacă $U_a=0$ și filamentul este încălzit, catodul emite electroni care se îngrămădesc în jurul catodului ca un nor ce formează o sarcină spațială. Dacă se aplică anodului o tensiune $U_a>0$, electronii emiși sînt dirijați spre anod și în circuitul anodic apare curentul anodic I_a. Pe măsură ce crește U_a, crește și I_a (fig. 157), iar sarcina spațială se micșorează. La o anumită valoare a tensiunii anodice sarcina spațială dispare complet, toți electronii emiși de catod fiind atrași de anod. Curentul anodic atinge o valoare maximă, numită curent de saturație. Cu cît este mai mare temperatura catodului, curentul de saturație are valori mai mari și apare la valori mai mari ale tensiunii anodice. Variația curentului anodic în funcție de tensiunea anodică se numește *caracteristica diodei* (fig. 157). Dacă se aplică diodei o tensiune anodică negativă (polul — la A și polul + la C) atunci anodul A respinge fluxul electronic emis de C și nu se obține curent anodic, $I_a=0$. Prin urmare *dioda are conductibilitate unilaterală:* permite trecerea curentului numai în sensul anod-catod prin circuitul exterior.

81. **Funcționarea diodei ca redresoare.** Proprietatea diodei de a permite trecerea curentului numai cînd A este pozitiv o face capabilă să redreseze curentul alternativ. În figura 156 se trece comutatorul din poziția B — *1* în poziția B — *2*. Între A și C este aplicată o tensiune anodică alternativă, pentru care anodul este succesiv pozitiv și negativ. Alternanțele pentru care A este pozitiv trec prin circuitul anodic (fig. 158), acelea pentru care A este negativ nu pot trece. La anod se aplică tensiunea de pe axa O_1U_a, dar prin circuit nu trece decît curentul redresat, reprezentat pe axele O_2I_a,

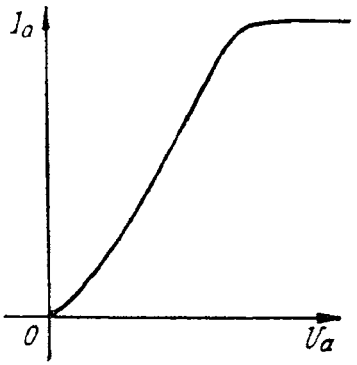


Fig. 157

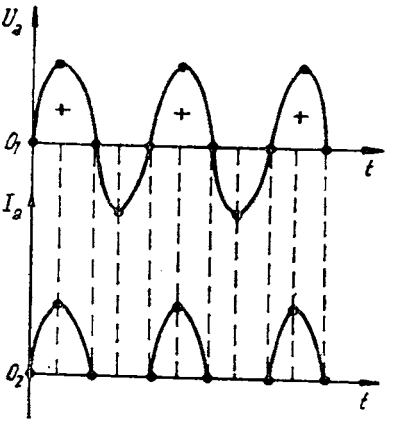


Fig. 158

O_2t din figura 158. O asemenea redresare o realizează dioda montată ca redresor pentru o alternanță. În practică se redresează ambele alternanțe cu ajutorul a două diode.

În loc de două diode se folosește de obicei o diodă dublă (fig. 159). Anodul A_1 și anodul A_2 din dubla diodă D sînt conectați la capetele bobinei L_1L_2 a unui transformator T_r alimentat de la rețea. De aceea în orice moment cei doi anozi sînt unul pozitiv și altul negativ: unul permite trecerea unei alternanțe, celălalt nu. După o semiperioadă semnele celor doi anozi se inversează: unul oprește alternanța următoare, celălalt nu. În felul acesta alternanțele curentului alternativ O_1 (fig. 160) trec toate, cînd printr-un anod, cînd prin celălalt și se ob-

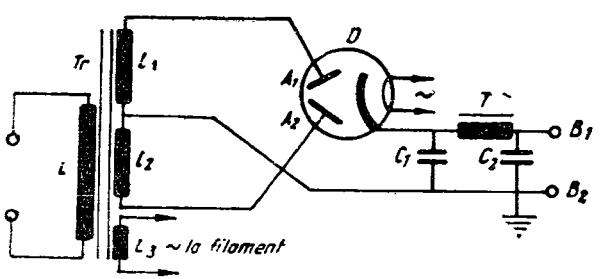


Fig. 159

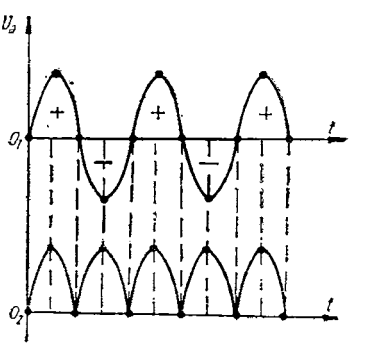


Fig. 160

ține curent redresat cu ambele alternanțe: O_2 (fig. 160); e o tensiune continuă pulsatorie.

Pulsațiile tensiunii sînt netezite cu ajutorul unui filtru, format din condensatoarele C_1 și C_2 și dintr-o bobină cu multe spire și miez din fier T. Prin C_1 și C_2 se scurge la pămînt componenta alternativă, iar prin T trece numai componenta continuă. La bornele redresorului B_1 B_2 se culege o tensiune continuă filtrată.

82. **Trioda.** Lee de Forest a introdus (1906) între catod și anod un al treilea electrod numit *grilă G* (fig. 161) deoarece este format dintr-o rețea metalică. Tubul electronic cu acești trei electrozi CGA se numește *triodă* sau *tub cu 3 electrozi.* Grila se găsește în cîmpul electric dintre A și C, de aceea un potențial aplicat grilei modifică acest cîmp și astfel poate regla și comanda fasciculul de electroni ce trece de la C la A. Prin urmare *catodul emite electroni, anodul colectează electroni,* iar *grila este un electrod de control și comandă* a intensității fluxului de electroni.

Funcționarea grilei necesită două circuite principale: *circuitul anodic* CAB_aC (fig. 161) prin care circulă curentul anodic I_a și e alimentat de bateria anodică B_a și circuitul de grilă CGPC. Ele au un punct comun, catodul. Încălzirea filamentului necesită un circuit auxiliar, alimentat cu o tensiune alternativă.

83. **Caracteristica de grilă.** Funcționarea triodei este asemănătoare cu a diodei; potențialul grilei reglează însă valoarea curentului anodic. Pentru a înțelege mai bine funcționarea ei se cercetează *variația curentului anodic în funcție de potențialul dintre grilă și catod, cînd tensiunea anodică rămîne constantă,* adică $I_a = f(U_g)_{Ua\ constant}$. Curba care reprezintă această variație se obține cu ajutorul montajului din figura 161. Filamentul are o temperatură constantă, deci

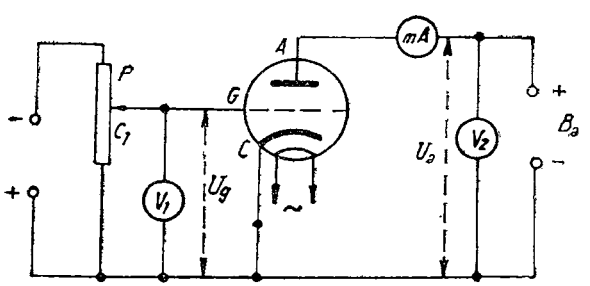


Fig. 161

emite un număr constant de electroni pe secundă. Bateria anodică B_a furnizează o tensiune anodică constantă, U_a.

Cu ajutorul potențiometrului P se poate aplica pe grilă o tensiune de grilă U_g care poate varia de la zero la valori negative și e măsurată de voltmetrul V_1. Curentul anodic I_a este măsurat de miliampermetrul mA. Plimbînd cursorul C_1 de la borna — la borna + a potențiometrului, grila primește potențiale de la valori relativ mari, negative pînă la valoarea zero. Ca potențial de referință nul se consideră potențialul catodului C.

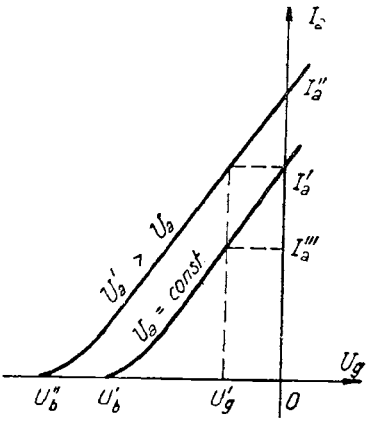


Fig. 162

La tensiuni de grilă puternic negative electronii sînt respinși, formînd sarcini spațiale în jurul catodului; curentul anodic este zero; se spune că tubul e blocat. Valoarea potențialului de grilă U_b' (fig. 162) care face $I_a=0$ se numește *potențial de blocare*. La valori ale tensiunii de grilă, cuprinse între 0 și potențialul de blocare U_b', electronii trec prin A și curentul crește de la 0 la I_a'. Cînd grila are potențialul zero curentul anodic este mare. Cînd grila devine pozitivă ea captează o parte din electronii emiși de catod, deci curentul anodic începe să scadă. De aceea trioda funcționează în general cu tensiune de grilă negativă; care se numește *tensiune de negativare*. Din această cauză *în circuitul de grilă nu apare curent*, iar grila are numai rol de reglare a fluxului electronic. Observînd curba caracteristică se constată că în limite largi, curentul anodic variază liniar în funcție de U_g. Numai la extremitatea inferioară curba caracteristică are o porțiune curbă. Dacă se trasează a doua caracteristică de grilă, pentru altă valoare $U_a' > U_a$ și constantă, se obține o curbă caracteristică $U_b'' I_a''$ asemănătoare cu prima, dar deplasată spre stînga (fig. 162). În acest caz potențialul de blocare U_b'' are o valoare mai negativă decît în primul caz. Pentru fiecare valoare constantă a lui U_a se poate trasa o curbă caracteristică; se obține astfel o familie de caracteristici de grilă.

Pentru a face să crească curentul anodic cu aceeași valoare ΔI_a, de la I_a''' la I_a' adică $\Delta I_a = I_a' - I_a'''$, există două posibilități: a) potențialul grilei crește de valoarea U_g' la valoarea 0, adică cu valoarea ΔU_g, menținînd U_a = constant; b) potențialul anodic crește de la valoarea U_a la valoarea U_a' adică cu $\Delta U_a = U_a' - U_a$, menținînd potențialul grilei la valoarea U_g' = const.

Raportul dintre variația tensiunii anodice ΔU_a și variația tensiunii de grilă ΔU_g care produc aceeași variație a curentului anodic ΔI_a se numește factor de amplificare și se notează cu litera μ (miu):

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}; \quad \Delta I_a = const. \tag{49}$$

84. **Trioda ca generatoare de oscilații întreținute.** În diferitele sale aplicații radiotehnice, trioda poate îndeplini trei funcții: *oscilatoare*, adică generatoare de oscilații întreținute, *amplificatoare* și *detectoare*.

Pentru ca trioda să funcționeze ca generatoare de oscilații întreținute, trebuie să aibă un circuit oscilant L_2C_2 (fig. 163) conectat în circuitul anodic. Bobina acestuia L_2 este cuplată inductiv cu grila prin bobina L_1. La închiderea circuitului de alimentare curentul anodic I_a încarcă condensatorul C_2, creind în același timp un cîmp magnetic crescător în L_2. În L_1 se va induce o tensiune electromotoare de sens opus lui I_a. Această tensiune va face grila mai negativă și va bloca trioda, adică I_a se va anula. Prin urmare trioda a încărcat condensatorul circuitului oscilant și apoi l-a separat de sursa de alimentare U_a. Se produc acum oscilațiile de descărcare a condensatorului C_2, după mecanismul cunoscut, adică în al doilea sfert de perioadă condensatorul este reîncărcat, și începe a doua jumătate a perioadei de oscilație. Prin L_2 va trece curent de sens opus celui inițial (linii întrerupte), care va induce în L_1 curent opus celui inițial (săgeata punctată). Grila își va micșora negativarea, trioda se va debloca și va trece iar curent anodic.

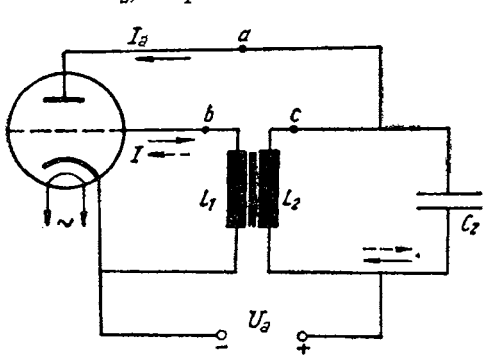


Fig. 163

Acesta va reîncărca condensatorul, se va bloca iar *tubul* etc. În felul acesta *oscilațiile electromagnetice din circuitul* L_2C_2 *vor fi întreținute*. În acest fenomen trioda transformă energia curentului continuu în energia unui *semnal sinusoidal*. După valorile pe care le au capacitatea C_2 și inductanța L_2, oscilațiile produse au frecvență mai mare sau mai mică, conform relației lui Thomson.

Experiență. Se realizează montajul (fig. 163) cu bobine care au cîteva mii de spire fiecare, puse pe un miez de fier cu circuit magnetic închis, iar condensatorul avînd 8 μF ... 16 μF. Un miliampermetru conectat în circuitul anodic, în punctul *a*, indică trecerea unui curent continuu pulsant (variază în jurul unei valori diferită de zero, fără să treacă prin valoarea zero). Un miliampermetru conectat în circuitul bobinei L_1, în punctul *b*, iar altul în punctul *c* al circuitului condensatorului C_2, indică trecerea unui curent alternativ, care oscilează în jurul valorii zero. Cele două oscilații sînt însă în opoziție de fază.

Experiența pune astfel în evidență procesul de oscilație electromagnetică.

85. **Trioda ca amplificatoare.** Amplificarea este procesul prin care se obține la bornele de ieșire a amplificatorului un semnal mai puternic decît semnalul aplicat la bornele lui de intrare. Amplificatoarele pot fi în genere de *amplificare a tensiunii* sau de *amplificare a puterii*. Vom vorbi numai de amplificarea de tensiune. Cel mai simplu este amplificatorul de tensiune *RC*, în care se face cuplajul între etajele de amplificare prin rezistență și condensator. Amplificatorul cu un singur tub se numește etaj amplificator. În figura 164 se dă schema unui etaj amplificator cu o triodă. Semnalul de amplificat se aplică prin bornele de intrare B_1B_2 la grila triodei. Semnalul fiind alternativ poate fi transmis grilei prin condensatorul C_g. În lipsa semnalului prin circuitul grilei nu există curent, deci grila *G* va avea tensiunea U_0 negativă față de catod. Punctul *A* de pe caracteristica de grilă (fig. 165), care corespunde potențialului U_0 a grilei în absența semnalului se numește *punct de funcționare*. Prin amplificare semnalele nu trebuie deformate. Acest lucru e posibil numai dacă trioda funcționează pe porțiunea rectilinie a caracteristicii de grilă. De aceea punctul de funcționare *A* trebuie să se găsească la mijlocul porțiunii rectilinii a caracteristicii.

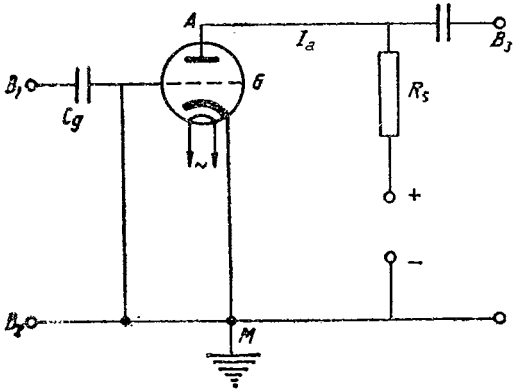


Fig. 164

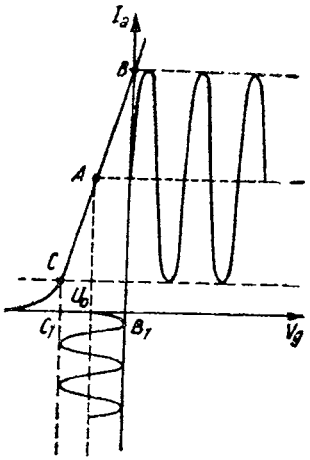


Fig. 165

Semnalul de amplificat reprezintă o variație de tensiune ΔU_i, aplicată la bornele de intrare B_1B_2, care provoacă variații ale tensiunii de grilă ΔU_i în jurul lui U_0 (fig. 165), între valorile potențialelor corespunzătoare punctelor C_1 și B_1. Aceste variații ale tensiunii de grilă provoacă variații de curent anodic între valorile corespunzătoare punctelor C și B de pe caracteristică. Variațiile de curent anodic provoacă în rezistența de sarcină R_s variații de tensiune $\Delta U_s = R_s \Delta I_a$, care pot fi culese la bornele rezistenței R_s. Raportul

$$A = \frac{\Delta U_s}{\Delta U_i}$$

reprezintă *amplificarea*. Tensiunea amplificată de la bornele de ieșire poate fi aplicată la bornele de intrare ale altui etaj de amplificare etc. Așadar: **semnalul electric de amplificat — variabil — se aplică pe grila triodei, iar în circuitul anodic se obține tensiunea amplificată.**

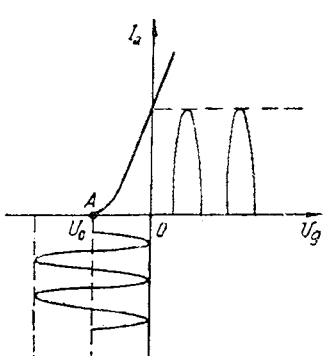


Fig. 166

86. **Trioda ca detectoare.** Trioda are și proprietatea de redresare. Pentru a funcționa ca redresoare punctul de funcționare se alege la valoarea potențialului de blocare (fig. 166). Montajul se face tot ca în

figura 164, dar se calculează în așa fel negativarea grilei încît să se ajungă exact la valoarea potențialului de blocare. Semnalul variabil aplicat grilei produce variații simetrice ale potențialului grilei în jurul lui U_0, care dau naștere la variații asimetrice ale curentului anodic. Alternanțele negative sînt suprimate și trec numai alternanțele pozitive.

D. Radiocomunicații

87. **Radioemisie.** Prin radiocomunicație se înțelege transmiterea și recepția la distanță a unor informații (sunet, imagine etc.) prin unde electromagnetice. Emisia undelor electromagnetice în vederea unei radiocomunicații se numește radioemisie sau transmisiune radio. Instalațiile de transmisiune radio se numesc **emițătoare.** Un emițător radio trebuie să producă oscilații de radiofrecvență, să le moduleze conform informației de transmis, să le transforme în unde electromagnetice modulate și să le radieze în spațiu. Radioemițătoarele pot lucra pe o gamă de unde foarte variată, de la undele lungi pînă la undele ultrascurte.

Pentru radiodifuziunea națională se folosesc emițătoarele de unde lungi, medii și scurte. Pentru televiziune se folosesc emițătoarele de unde metrice. În radiolocație (localizarea în spațiu a unui obiect cu ajutorul undelor electromagnetice) se folosesc emițătoare de unde scurte, foarte scurte sau ultrascurte.

Schema unui emițător de radiofonie este dată în figura 167. Oscilațiile de radiofrecvență sînt produse de triode oscilatoare, la care circuitul grilei e cuplat inductiv cu circuitul anodic prin bobinele L_1 și L_2. Oscilațiile generate sînt *modulate,* cu ajutorul curentului microfonic, produs de microfonul M și transmis grilei prin transformatorul de joasă frecvență T_r.

Prin modulație se înțelege **variația amplitudinii (sau a frecvenței) oscilațiilor de înaltă frecvență în concordanță cu semnalul care trebuie să transmită informația.** Dacă microfonul M (fig. 167) nu funcționează, emițătorul generează oscilații electromagnetice între-

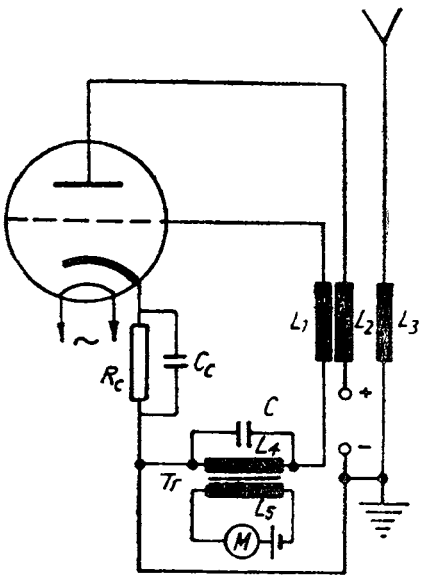


Fig. 167

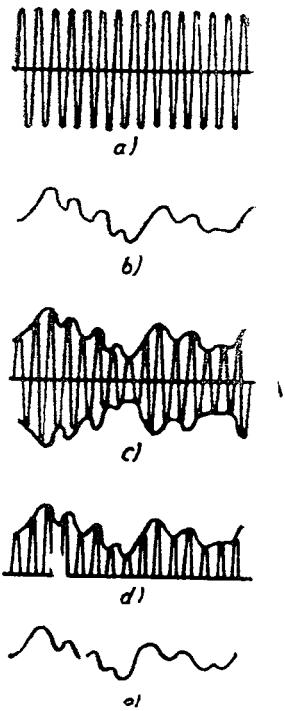


Fig. 168

ţinute, care se induc în antenă prin cuplajul inductiv L_2L_3. *Antena radiază în spaţiu o undă purtătoare* (fig. 168, *a*) sinusoidală, care nu poate transmite o informaţie, avînd amplitudinea constantă. Dacă microfonul funcţionează, el produce curent modulat în ritmul vorbirii (muzicii etc.). Modulaţiile curentului microfonic (fig. 168, *b*) induc variaţii de potenţial pe grilă prin transformatorul *Tr*. Din această cauză oscilaţiile generale au amplitudinea variabilă, iar *antena emite o undă modulată* în amplitudine (fig. 168, *c*) adică o undă de înaltă frecvenţă a cărei amplitudine variază în funcţie de frecvenţa semnalului sonor.

88. **Radiorecepţie.** Instalaţiile pentru recepţionarea semnalelor electromagnetice se numesc **radioreceptoare.** Radioreceptorul transformă semnalul de radiofrecvenţă modulat în semnale de audiofrecvenţă pe care le aplică unui difuzor sau unei căşti. Un receptor trebuie să îndeplinească mai multe condiţii.

În primul rînd să aibă **selectivitate:** din mulțimea undelor electromagnetice emise de diferite emițătoare, pe diferite frecvențe, să aleagă numai emisiunea dorită.

Să aibă **sensibilitate:** semnalele foarte slabe recepționate în antenă (milionimi sau miliardimi de watt) să fie foarte mult amplificate, pentru a putea acționa difuzorul sau casca telefonică.

Funcționarea unui radioreceptor simplu cu tub, se poate urmări pe figura 169. Antena captează undele electromagnetice de la diferite emițătoare; oscilațiile produse în antenă sînt induse prin cuplajul L_1L în circuitul de acord LC al aparatului receptor. Cu ajutorul condensatorului variabil C, se reglează frecvența proprie a circuitului LC pentru a corespunde frecvenței unuia din emițătoare. Trioda amplifică oscilațiile și le detectează tăind alternanțele negative (fig. 168, *d*). Condensatorul C_1 are rolul de a transforma alternanțele pozitive de înaltă frecvență, în oscilații de frecvență acustică (fig. 168, *e*). Acestea acționează casca telefonică sau difuzorul, transformîndu-se în sunete, care reproduc semnalul ce a acționat asupra microfonului. Sînt multe tipuri de radioreceptoare; fenomenele fundamentale sînt însă aceleași în toate.

89. **Importanța electronicii. Dezvoltarea ei în țara noastră.** *Electronica — ramură a tehnicii, care se ocupă cu producerea și aplicațiile undelor și oscilațiilor electromagnetice* — are astăzi din ce în ce mai multe aplicații în știință și tehnică:

Aparatura modernă de laborator în cele mai diverse domenii (fizică, medicină, biologie etc.) a devenit mult mai sensibilă și mai precisă prin folosirea dispozitivelor electronice. Un instrument de măsură electronic constă dintr-un traductor, un sistem de amplificare și un indicator. Traductorul transformă variațiile unei mărimi oarecare de măsurat (temperatură, presiune etc.), într-un semnal electric, ce este amplificat și prelucrat în sistemul de amplificare, iar rezultatul se citește pe scala indica-

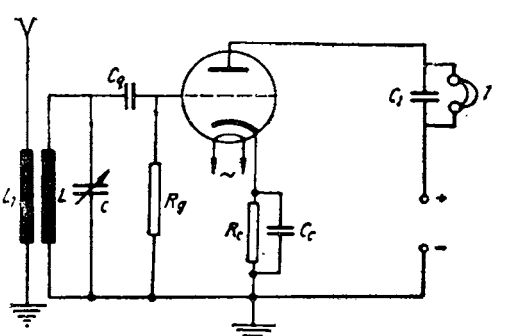


Fig. 169

torului. Instrumentele mai perfecționate permit înregistrarea pe benzi de hîrtie a variațiilor în timp a mărimilor măsurate, precum și acționarea asupra cauzelor care produce aceste variații. Este posibilă astfel *reglarea automată* a variațiilor unor mărimi. De exemplu, pentru reglarea temperaturii cuptoarelor se folosesc instrumente în care traductorul (termocuplu) transformă variațiile de temperatură în variații de tensiune electrică, ce sînt amplificate și acționează instrumentul indicator. Dacă variațiile depășesc anumite limite dinainte stabilite, se închid sau se deschid relee, ceea ce face să crească sau să scadă curentul de încălzire (la cuptoarele electrice), sau curentul de gaz combustibil (la cuptoarele cu arzătoare).

Electronica oferă posibilități practic nelimitate de *automatizare a producției,* contribuind în mod esențial la realizarea progresului tehnic. Prin introducerea *ciberneticii industriale,* formă complexă de automatizare, se realizează ansamblul de operații ale unui flux tehnologic, conform unui program stabilit anterior, precum și controlul îndeplinirii acestor operații și autoreglarea în cazul eventualelor abateri de la program. Atît dispozitivele de programare, cît și cele de control și reglare sînt dispozitive electronice.

Mașinile electronice de calcul, care permit efectuarea unui număr foarte mare de calcule într-un timp foarte scurt, constituie una din cele mai noi și mai complexe aplicații ale electronicii. Viteza mare de lucru a acestor mașini se datorește faptului că ele operează cu semnale electrice, care se propagă în intervale de timp foarte scurte dintr-un dispozitiv al mașinii în altul.

Radioalocația este determinarea poziției unui obiect. În principiu, un radiolocator constă dintr-un emițător care trimite în spațiu un fascicul de unde electromagnetice și dintr-un receptor, care recepționează undele reflectate de obstacolele întîlnite. Dezvoltată inițial în scopuri militare, radiolocația și-a găsit și alte aplicații: în meteorologie, pentru determinarea poziției navelor, în navigația aeriană și maritimă, care a devenit mult mai sigură prin folosirea radiolocației și a radiocomunicațiilor.

Electronica joacă un rol esențial și în domeniul realizării *zborurilor cosmice,* în ceea ce privește plasarea rachetelor pe traiectorie, telecomanda lor de pe Pămînt, efectuarea cercetărilor științifice în

spațiul cosmic și transmiterea pe Pămînt a rezultatelor acestor cercetări, a fotografiilor luate de pe Lună, Marte etc.

Datorită numeroaselor ei aplicații, electronica are un rol deosebit de important în crearea bazei tehnico-materiale a societății.

În țara noastră instalațiile electronice și-au găsit o utilizare tot mai largă în producția industrială, în multe întreprinderi a fost introdusă automatizarea proceselor de producție. Se realizează treptat introducerea automatizării în transporturile feroviare. S-a dezvoltat producția aparatelor de radiorecepție și a televizoarelor. S-a construit o fabrică de semiconductoare, cinescoape și piese de radio. În domeniul radiodifuziunii a crescut numărul posturilor de radioemisie, s-au instalat numeroase centre de radioficare, s-a înființat postul de televiziune.

Întrebări, exerciții

1. De ce este necesară încălzirea unui metal pentru a emite electroni?
2. Ce deosebiri sînt între catodul cu încălzire directă și cel cu încălzire indirectă?
3. Ce proprietate principală are dioda și ce funcție îndeplinește pe baza acestei proprietăți?
4. Ce rol are grila la triodă?
5. Ce deosebire este între funcționarea triodei ca amplificator și funcționarea ei ca detector?
6. Care sînt fenomenele principale care se petrec într-un radioemițător?
7. Care sînt fenomenele principale care se petrec într-un radioreceptor?
8. Din ce cauză catodul unui tub electronic se distruge imediat dacă tubul nu e golit de aer?
9. Într-o diodă viteza electronilor este cam de $10^6 \frac{m}{s}$, iar în firul metalic al circuitului anodic este o fracțiune de mm/s. Intensitatea curentului anodic are aceeași valoare în ambele porțiuni ale circuitului anodic? De ce?
10. Din filamentul unui tub electronic, la o temperatură dată, ies $1{,}5 \cdot 10^{18}$ electroni în 6 s. Ce valoare maximă are curentul anodic?

Răsp. 40 mA.

Anexa

Lucrări practice

Lucrarea 1

Măsurarea intensității curentului și măsurarea tensiunii electrice

Pentru măsurarea intensității curentului electric se utilizează galvanometre și ampermetre, iar pentru măsurarea tensiunii electrice, voltmetrele.

În general, cele mai frecvente aparate de măsură sînt aplicații ale efectului magnetic al curentului electric.

După cum știm, ampermetrul se leagă în serie, iar voltmetrul în derivație (fig. L.1).

Aparate și materiale. Elemente Leclanché, baterie electrică sau acumulatori, galvanometre de tip didactic, voltmetru, reostat cu cursor, sîrme de conexiuni.

Modul de lucru

1) *Măsurarea intensității.* Se constituie un circuit (fig. L.2) punînd în serie sursa de curent, un galvanometru, un reostat și un întrerupător *K*. Fixăm

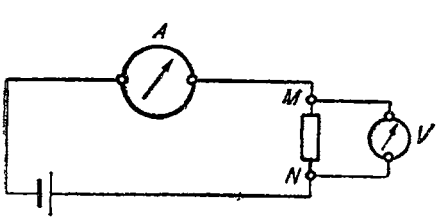


Fig. L.1.

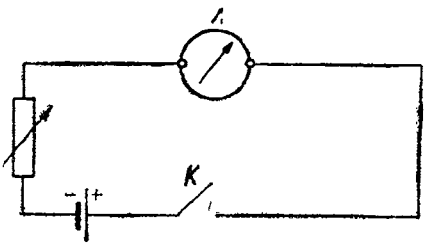


Fig. L.2.

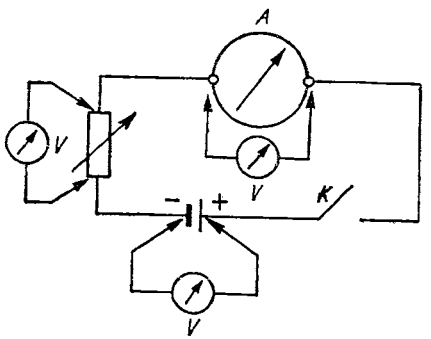


Fig. L.3.

poziția cursorului la reostat, închidem circuitul cu întreruptorul K și măsurăm intensitatea curentului. O notăm. Mutăm ampermetrul între reostat și sursa de curent, lăsînd restul neschimbat. Măsurăm din nou intensitatea curentului. O notăm. Mutăm din nou ampermetrul între întrerupător și sursa de curent fără a modifica restul instalației și măsurăm intensitatea curentului. O notăm.

Cum sînt intensitățile obținute? De ce?

2) *Măsurarea tensiunii electrice.* Folosind același circuit, să legăm un voltmetru pentru a măsura succesiv tensiunile la bornele reostatului, la bornele ampermetrului, la bornele generatorului (fig. L.3).

Notați tensiunile măsurate și comparați-le.

Modificăm poziția cursorului la reostat, făcînd ca intensitatea curentului să fie de două ori mai mare.

Se măsoară din nou tensiunile cu voltmetrul.

Se notează tensiunile măsurate și se compară cu cele precedente. Care este concluzia?

Punem în loc de un singur element, două elemente, și facem aceleași măsurători de tensiune, se notează tensiunile și se compară. Care este concluzia?

Lucrarea II

Verificarea legii lui Ohm

Legea lui Ohm se exprimă prin relația:

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

adică pentru un conductor dat intensitatea curentului este proporțională cu tensiunea aplicată conductorului.

Aparate și materiale utilizate: acumulator de 6 V (sau baterie de lanternă), un ampermetru, un voltmetru, un reostat, sîrme de conexiune, 2 m sîrmă de nichelină cu diametrul de 0,3 mm, 2 m sîrmă de cromnichel, 2 m sîrmă de fier, cu diametrul de 0,5 mm. Rezistoare etalonate de 1Ω, 2Ω, 3Ω.

Construim un circuit electric după schema din figura L. 4.

I. Se leagă între punctele M și N sîrmă de nichelină după ce a fost mai întîi spiralată, apoi cu întrerupătorul K se închide circuitul și se observă

Conductor la care se aplică tensiunea	I	U	$\frac{U}{I}$
sîrmă de nichelină			
sîrmă de nichelină			
sîrmă de nichelină			
sîrmă de crom-nichel			
sîrmă de crom-nichel			
sîrmă de crom-nichel			

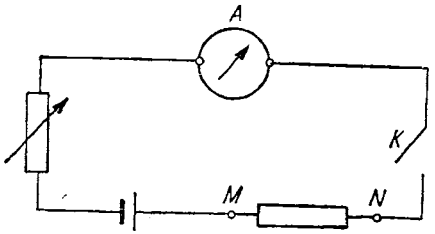


Fig. L.4.

deviația la ampermetru. Potrivim reostatul astfel ca intensitatea curentului să poată fi dublată fără a depăși limita de măsurare.

Cu voltmetrul măsurăm tensiunea între M și N. Păstrăm aceeași rezistență între M și N, și variind poziția cursorului la reostat facem 3 determinări. Notăm indicațiile ampermetrului și voltmetrului într-un tablou.

II. În a doua serie de experiențe punem între M și N un rezistor etalonat, spre exemplu de 2Ω și potrivim, de asemenea, reostatul pentru a avea o anumită intensitate de curent, spre exemplu 1 A. Măsurăm și tensiunea între M și N. Deplasînd cursorul reostatului facem 3 determinări și notăm într-un tablou valorile intensității curentului și tensiunii.

Repetăm operațiile cu un alt rezistor etalonat, spre exemplu 3 Ω.

Rezistență etalonată	I	U	U calculat
2 2 2			
3 3			

Lucrarea III

Determinarea tensiunii electromotoare a unui element galvanic

Principiul metodei. Fie un element galvanic cu tensiunea electromotoare E și rezistența interioară r.

R fiind rezistența exterioară scriem legea lui Ohm:

$$I=\frac{E}{R+r}.$$

Dacă o dată rezistența exterioară este R_1 și altă dată R_2, aplicarea legii lui Ohm ne dă:

$$I_1=\frac{E}{R_1+r} \quad \text{și} \quad I_2=\frac{E}{R_2+r};$$

din prima relație scoatem:

$$r=\frac{E}{I_1}-R_1 \text{ iar din a doua: } r=\frac{E}{I_2}-R_2;$$

egalînd, avem:

$$\frac{E}{I_1}-R_1=\frac{E}{I_2}-R_2$$

sau

$$E\left(\frac{1}{I_1}-\frac{1}{I_2}\right)=R_1-R_2 \text{ și } E=\frac{R_1-R_2}{\frac{1}{I_1}-\frac{1}{I_2}}$$

sau

$$E=\frac{I_1I_2(R_1-R_2)}{I_2-I_1}$$

Aparate și materiale necesare. Cutie cu rezistori decadici (sau rezistori etalonați). Un element Leclanché, un galvanometru sensibil a cărui rezistență este cunoscută.

Se face următorul montaj (fig. L.5.).

Alegem un rezistor din cutia cu rezistori spre exemplu, 3Ω , închidem circuitul și măsurăm cît mai precis posibil intensitatea curentului.

Luăm apoi un alt rezistor, spre exemplu 5Ω , închidem circuitul și măsurăm intensitatea.

Obținem astfel o determinare.

Luînd alte perechi de rezistori putem face mai multe determinări.

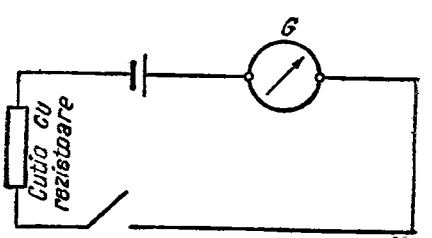


Fig. L.5.

Introducem valorile curentului și intensității într-un tablou.

Determinarea	R	I	E
1	R_1 R_2	I_1 I_2	E_1
2	R_1' R_2'	I_1' I_2'	E'
3	R_1'' R_2''	I_1'' I_2''	E''

Media aritmetică $E=\frac{E_1+E'+E''}{3}$.

Lucrarea IV

Determinarea variației rezistenței electrice cu lungimea conductorului, cu secțiunea lui și cu rezistivitatea

Se știe că rezistența electrică a unui conductor omogen și de secțiune constantă este proporțională cu lungimea conductorului, invers proporțională cu secțiunea și depinde de natura substanței din care este făcut, adică:

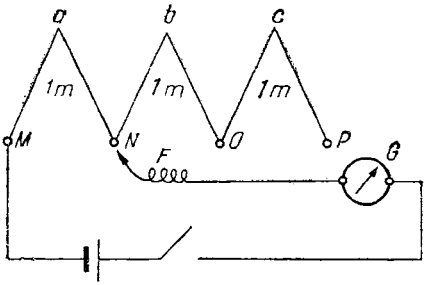
$$R=\rho\frac{l}{s}.$$

Pe de altă parte, legea lui Ohm ne dă $I=\frac{U}{R}$ sau, înlocuind:

$$I=\frac{U}{\rho\frac{l}{s}} \quad \text{sau} \quad I=\frac{U}{l\cdot\rho}\cdot s.$$

Dacă se menține U constant, atunci intensitatea curentului este proporțională cu secțiunea, invers proporțională cu lungimea și depinde de rezistivitate.

Fig. L.6.



În această lucrare se vor face deci măsurători de intensitate a curentului.

Aparate şi materiale necesare. Ampermetru, baterie electrică de 4,5 V, sîrmă de nichelină circa 6 m cu diametrul de 0,2 mm, sîrmă de fier cu diametrul de 0,2 mm. Facem următorul montaj (fig. L.6.).

I. Variaţia rezistenţei cu lungimea

Întindem 3 m sîrmă de nichelină pe o planşetă de lemn, astfel ca între *M* şi *N*, între *N* şi *O*, între *O* şi *P* să fie cîte 1 m. Ar fi bine ca în *M*, *N*, *O* şi *P* să fie nişte bucşe, iar în *a*, *b*, şi *c* simple cuişoare.

Procedăm apoi astfel: punem, pe rînd, fişa *F* în *N*, *O* şi *P*, măsurînd de fiecare dată intensitatea curentului.

Trecem valorile găsite într-un tablou.

Felul conductorului	Fişa în	*l*	*I*	*U*
sîrmă de nichelină	N O P	1 m 2 m 3 m	I_1 I_2 I_3	

Dacă lucrarea decurge bine, atunci trebuie ca $I_2 = \frac{I_1}{2}$,

$$I_3 = \frac{I_1}{3}.$$

II. Variaţia rezistenţei cu secţiunea

Modificăm montajul precedent suprapunînd peste porţiunea *NbO* încă o bucată identică, iar peste porţiunea *OcP* încă două bucăţi identice, astfel că porţiunea *MN* are secţiunea *s*, porţiunea *NbO* secţiunea 2 *s*, porţiunea *OcP* secţiunea 3 *s*.

Măsurătorile le facem punînd fișa F, pe rînd, în punctele N și O, apoi introducem în circuit numai porțiunea dublă NbO și, în fine, numai porțiunea triplă OcP. Rezultatele măsurătorilor le trecem într-un tablou.

Sîrmă de nichelină	I	U
s	I_1	
$2s$	I_2	
$3s$	I_3	

Rezultatele sînt bune dacă

$$I_2=2I_1$$

$$I_3=3I_1$$

III. Variația rezistenței cu natura substanței

Din montajul simplu se folosește numai porțiunea $MaNbO$ de 2 m nichelină.

Se măsoară intensitatea curentului. Fie această intensitate I_1. Apoi se scoate nichelina și se introduc în circuit numai 2 m de sîrmă de fier de aceeași grosime — 0,2 mm.

Valorile curentului se introduc într-un tablou.

Natura substanței conductorului	l	s	I
nichelină	2 m	s	I_1
fier	2 m	s	I_2

Cum este rezistivitatea fierului față de a nichelinei?

Lucrarea V

Studiul legării în derivație a rezistorilor

Lucrarea aceasta este de fapt o lucrare de verificare a legii I a lui Kirchhoff.

Verificarea poate fi făcută pe două căi:

1) *direct*, măsurînd curentul principal şi curenţii derivaţi (fig. L.7).

2) *indirect*, utilizînd rezistori etalonaţi, calculînd rezistenţa echivalentă a fasciculului şi a curentului principal cunoscînd prin măsurare tensiunea aplicată fasciculului, comparînd acest rezultat cu valoarea curentului principal măsurată cu ampermetrul.

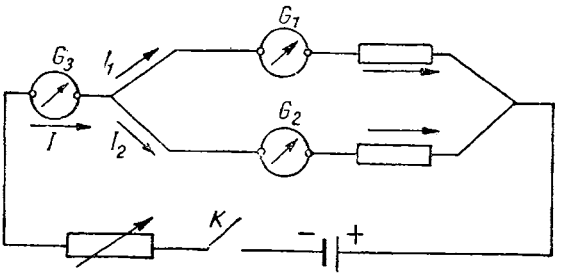


Fig. L.7.

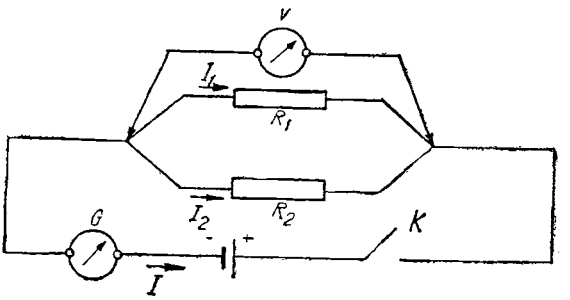


Fig. L.8.

Aparate şi materiale necesare:

3 galvanometre, sîrmă de nichelină cu diametrul de 0,2 mm; de fier cu diametrul de 0,2—0,3 mm; cromnichel, pentru confecţionarea a 2 rezistori diferiţi, 2 cutii cu rezistori, 1 voltmetru, un întrerupător, un reostat cu cursor, sîrme de conexiune, o baterie electrică sau 3 elemente Lachanché.

Modul de lucru

Metoda directă

Se spiralează 2 bucăţi de cîte 1 m aproximativ de sîrmă de nichelină şi de fier. Acestea se pun în circuit după schemă. Dacă rezistenţele sînt mai mari, atunci se folosesc 2 baterii electrice de cîte 4,5 V, care se leagă în serie. Pentru a face o determinare se procedează astfel:

Se închide circuitul şi se potriveşte cursorul reostatului, astfel ca curentul principal indicat de G să fie cel mult 2 A. Se citesc indicaţiile galvanometrelor G_1 şi G_2. Se notează totul într-un tablou.

Celelalte două determinări se efectuează variind poziţia cursorului de la reostat.

Metoda indirectă. Se constituie circuitul din figura L.8.

Se pun cutiile cu rezistori în circuit şi se scoate din fiecare cîte o fişă, introducîndu-se astfel doi rezistori în circuit R_1 şi R_2. Se închide circuitul, se măsoară tensiunea U. Se citeşte intensitatea I a curentului principal. Datele obţinute se trec în tabelul corespunzător.

Nr. de ordine al determinării	I_1 măs.	I_2 măs.	I_1+I_2 calculat	I măs.
1				
2				
3				

Tabelul 1

se vor compara

Nr. de ordine al determinării	R_1	R_2	R_e	U	$I = \frac{U}{R_{echiliv}}$ calc.	I măs.
1						
2						
3						

Tabelul 2

se vor compara

Lucrarea VI

Măsurarea rezistenţei filamentului unui bec electric, cu ajutorul punţii cu fir, la rece şi la incandescenţă

Pentru această lucrare, care utilizează metoda punţii cu fir pentru măsurarea unei rezistenţe este necesar să cunoaştem principiul punţii cu fir.

Schema este dată în figura L.9.

AB este o sîrmă de nichelină lungă de 100 cm. Notăm $AD=l_2$; $DB=l_3$. R_1 este un rezistor etalonat din cutia cu rezistori, R_x este rezistenţa de măsurat.

Ca sursă curent se foloseşte un acumulator sau o baterie de buzunar nouă.

Se mută cursorul D pînă ce se stabileşte echilibrul în punte, adică prin galvanometrul G nu trece nici un curent.

În această situaţie, curentul care trece prin R_1 trece şi prin R_x. Potenţialele punctelor C şi D sînt egale.

Urmează că: $V_A-V_C=V_A-V_D$

dar:

$$V_A-V_C=I_1R_1 \text{ şi } V_A-V_D=I_2R_2.$$

De aceea

$$I_1R_1=I_2R_2. \tag{1}$$

În mod analog, $V_C-V_B=V_D-V_B$

și fiindcă

$$V_C-V_B=I_1R_x \text{ și } V_D-V_B=I_2R_3,$$

urmează

$$I_1R_x=I_2R_3. \tag{2}$$

Împărțind relațiile (2) și (1) se obține:

$$\frac{R_x}{R_1}=\frac{R_3}{R_2},$$

de unde:

$$R_x=R_1\frac{R_3}{R_2},$$

însă

$$\frac{R_3}{R_2}=\frac{l_3}{l_2},$$

astfel că:

$$R_x=R_1\frac{l_3}{l_2}.$$

Pentru a măsura rezistența filamentului unui bec, se montează în locul rezistorului R_x un bec de 6,3 V cu dulia lui, iar în locul rezistorului R_1 cutia cu rezistori în decade. Montajul cuprinde și un reostat (fig. L.10).

Se utilizează o tensiune mică de la redresor 4—5 V, iar din cutia cu rezistori se iau circa 3 rezistori sau atît ca cursorul D să fie cît mai aproape de mijlocul firului AB.

Cu reostatul se micșorează cît mai mult tensiunea, astfel ca becul L să se încălzească cît mai puțin (filamentul becului să fie rece).

Se notează l_2, l_3 și R_1 într-un tablou.

Se fac mai multe determinări (cel puțin 3), variind rezistența rezistorului R_1 și a reostatului.

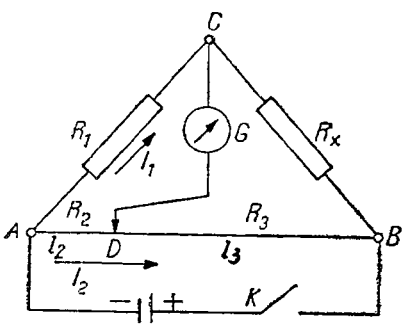


Fig. L.9.

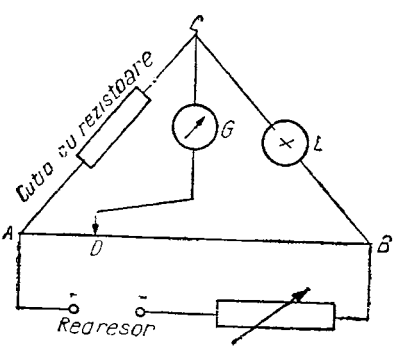


Fig. L.10.

Apoi se măsoară rezistența becului la incandescență, luînd de la redresor o tensiune de 10—12 V. Cu reostatul se face ca becul L să devină luminos Se determină R_1, l_2 și l_3.

la rece					*la incandescență*				
Determinarea nr.	R_1 măs.	l_2 măs.	l_3 măs.	R_x calc.	**Determinarea nr.**	R_1 măs.	l_2 măs.	l_3 măs.	R_x calc.
1					1				
2					2				
3					3				

se vor compara

Lucrarea VII

Măsurarea energiei și a puterii electrice

Puterea electrică dezvoltată într-un receptor de curent se calculează — după cum se știe — după formula $P=UI$.

Pentru măsurarea puterii va trebui să măsurăm în același timp tensiunea luată de receptor și intensitatea curentului care îl parcurge.

Schema de principiu se prezintă ca în figura L.11.

Putem măsura, de exemplu, puterea consumată de un bec electric de 6,3 V.

În acest scop avem nevoie de următoarele:

Aparate și materiale: 1 bec electric de 6,3 V, un ampermetru, un voltmetru, 1 reostat, 2 baterii electrice de 4,5 V, sîrme de conexiune.

Modul de lucru. Cu reostatul și voltmetrul se face ca tensiunea la bornele becului să fie de 6,3 V. Se citește intensitatea și tensiunea, se face produsul lor și se compară cu puterea marcată pe bec. De ce apare o diferență?

Se poate lucra și cu un bec de 110 V dacă se dispune de o tensiune de 120 V continuu.

Pentru măsurarea energiei consumate de un receptor se măsoară și timpul cît durează alimentarea receptorului. Se calculează după formula $W=P\cdot t$.

Lucrarea VIII

Verificarea legii Joule

Legea lui Joule stabilește că:

$$Q=RI^2t.$$

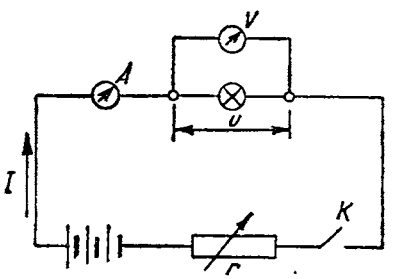


Fig. L.11.

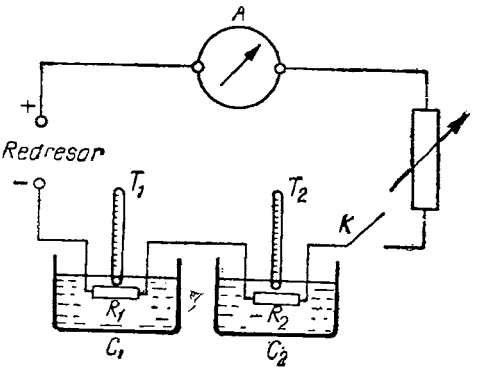


Fig. L.12.

În experienţele care vor fi făcute pentru verificarea acestei legi, trebuie să dovedim că:

1. Q este proporţional cu R;
2. Q este proporţional cu t;
3. Q este proporţional cu I^2.

Verificarea legii Joule comportă deci trei serii de experienţe.

Se construieşte un montaj după schema din figura L.12.

Aparate şi materiale: ampermetru, reostat (R), două termometre de laborator T_1 şi T_2, două calorimetre, un redresor cu seleniu, un întrerupător K, sîrmă de nichelină cu diametrul de 0,5 mm circa 2 m.

Modul de lucru. Se pune în calorimetrele C_1 şi C_2 aceeaşi masă m de apă sau petrol atît cît să acopere rezistenţele R_1 şi R_2. Rezistenţele R_1 şi R_2 se confecţionează din nichelină cu diametrul de 0,5 mm cu lungimile de 1/2 m şi 1 m.

Se ia o tensiune convenabilă de la redresor 8—12 V şi se face o încercare închizînd circuitul, pentru a potrivi cu reostatul o intensitate de 0,5—1 A.

Se trece la executarea experienţelor.

1. *Cantitatea de căldură este proporţională cu rezistenţa.*

Măsurăm temperaturile iniţiale t_0 şi t_0' ale lichidelor din calorimetre.

Închidem circuitul şi lăsăm să treacă curentul circa două minute. Agităm lichidul cu termometrele spre uniformizarea temperaturii. Întrerupem curentul, citim şi notăm imediat temperaturile t_1 şi t_1'.

Cantităţile de căldură primite de calorimetru sînt:

$$Q_1 = mc\,(t_1 - t_0)$$

$$Q_2 = mc\,(t_1' - t_0')$$

raportul lor ne dă:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{t_1 - t_0}{t_1' - t_0'}$$

Pe de altă parte, legea lui Joule ne dă:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

La verificare trebuie să avem:

$$\frac{t_1 - t_0}{t_1' - t_0'} = \frac{R_1}{R_2}.$$

2. *Cantitatea de căldură este proporţională cu timpul*

Este suficient un singur calorimetru. Curentul rămîne neschimbat. Se dublează timpul.

Temperatura iniţială fiind aceeaşi, se obţine o altă temperatură finală t_2. În acest caz, trebuie ca:

$$t_2 - t_0 = 2(t_1 - t_0).$$

3. *Cantitatea de căldură este proporţională cu pătratul intensităţii*

Se poate folosi unul din cele 2 calorimetre.

Păstrînd acelaşi timp ca şi în prima determinare, se măreşte intesitatea curentului.

Verificarea are loc dacă:

$$\frac{I_1^2}{I_2^2} = \frac{t_1 - t_0}{t_2 - t_0}.$$

Se trec datele într-un tabel.

Lucrarea IX

Verificarea legii lui Faraday şi electroliza

De la studiul electrolizei ştim că cele 2 legi ale lui Faraday se pot exprima prin relaţiile:

Legea I . . . . . $m = K \cdot I \cdot t$

Legea II . . . . . $\frac{m_1}{M_1} = \frac{m_2}{M_2} = \text{constant}$

Modul de lucru. Pentru verificarea legilor electrolizei alcătuim un circuit dintr-un redresor ca sursă, un reostat, 2 voltametre: unul cu $ZnCl_2$ soluţie 50%, altul cu $CuSO_4$ soluţie 50% puse în serie (fig. L.13).

Electrozii voltametrelor sînt o placă de Zn şi o placă de Cu pentru anozi şi cărbuni pentru catozi.

Cîntărim în prealabil catozii de cărbune cu o balanţă sensibilă la 10^{-1} mg. Potrivim cu reostatul un curent de 0,5 A.

Închidem circuitul şi notăm momentul.

Lăsăm să se producă electroliza circa 5—10 minute, spre a se depune o cantitate de metal apreciabilă.

Întrerupem curentul cu întrerupătorul K și notăm timpul t_1.

Scoatem cu grijă catozii de cărbune acoperiți cu Zn și Cu, îi uscăm cîtva timp și îi cîntărim din nou. Introducem datele obținute într-un tablou.

Reluăm fie experiența cu cărbuni curățiți de metal, fie cu altă pereche de cărbuni, modificînd intensitatea curentului, dar păstrînd același timp $I_2=2I_1$.

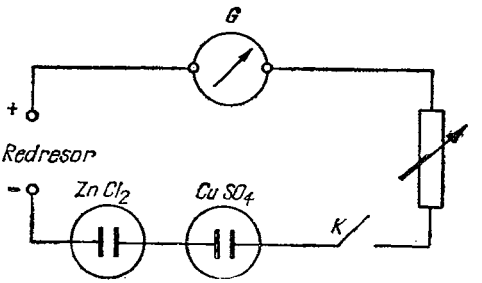


Fig. L.13.

Păstrînd aceeași intensitate de curent ca și în prima determinare, se dublează timpul $t_2=2\,t_1$.

Se trec toate datele în tablou

Legea care se verifică	I_1	I_2	t_1	t_2	m_{Zn}	m_{Cu}	Rezultatul verificării
1							
2							

Lucrarea X

Galvanotehnica. Nichelare

Obiectele din metale ușor corodabile pot fi protejate contra coroziunii prin acoperire — pe cale electrolitică — cu metale rezistente la coroziune, cum sînt cuprul și nichelul.

Obiectele de Cu pot căpăta un luciu strălucitor prin nichelare. În cazul nichelării unui obiect de fier se face mai întîi o cuprire și apoi se trece la nichelare.

Modul de lucru. Vom nichela o placă de cupru. În acest scop se curăță suprafața obiectului de nichelat, prin frecare cu tix, pînă se îndepărtează oxizii sau sărurile. Apoi se spală cu apă, se introduce într-o soluție de HNO_3, se spală cu apă, apoi într-o soluție de HCl și din nou se spală cu apă multă.

Se pregătește o soluție de sulfat dublu de nichel și amoniu, se mai pun cîteva picături de amoniac pentru ca soluția să fie alcalină.

Soluția se introduce într-un cristalizor. Anodul va fi o bucată de nichel, iar placa de Cu se folosește drept catod. Se leagă electrozii la o sursă de curent continuu, catodul la polul negativ, anodul la polul pozitiv.

Cu un reostat și un galvanometru puse în serie se stabilește un curent de aproximativ 0,5 A (fig. L.14).

În acest timp are loc depunerea Ni pe placa de Cu sub forma unui strat gri mat.

I se poate da un luciu prin frecare cu o bucată aspră de postav.

Lucrarea XI

Studiul tensiunii contraelectromotoare la voltametre

Din studiul fenomenului de polarizare a electrozilor se știe că produsele primare ale electrolizei depuse la electrozi creează o asimetrie a lor și generează o tensiune contraelectromotoare.

Pentru studiul tensiunii contraelectromotoare se folosește un voltametru cu plăci de Pb și acid sulfuric.

Se alcătuiește un circuit ca în figura L.15.

Cu acest montaj putem arăta existența tensiunii contraelectromotoare, sensul tensiunii contraelectromotoare, mărimea tensiunii contraelectromotoare.

Modul de lucru. Se face un voltametru dintr-un cristalizor (sau vas Berzelius) în care se introduce soluția de acid sulfuric 10%—20%. Electrozii sînt formați din 2 plăci de Pb cu suprafața curățată de oxizi.

Se folosește o tensiune de circa 4—6 V pentru electroliză. Închidem circuitul în K_1 și îl întrerupem în K_2. Lăsăm totul așa, circa 5 min. Observăm sensul curentului de electroliză și schimbarea aspectului electrozilor. Deschidem apoi circuitul în K_1 și închidem în K_2. Observăm sensul curentului la galvanometru.

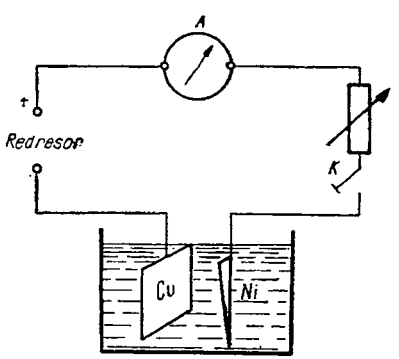


Fig. L.14.

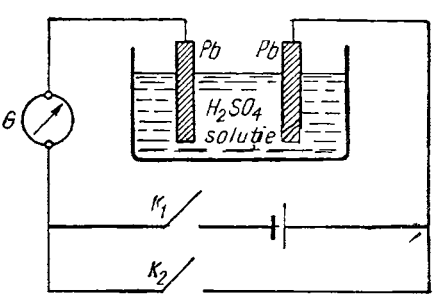


Fig. L.15.

Experiența pune în evidență fenomenul de polarizare și faptul că după terminarea electrolizei, sistemul electrozi-electrolit constituie un generator de curent continuu cu o tensiune electromotoare de polarizație de sens contrar tensiunii aplicată inițial pentru a face electroliza.

Repetăm din nou electroliza (circa 5 min) și cu voltmetrul măsurăm tensiunea la electrozi cînd circuitele sînt deschise în K_1 și K_2. Notăm valoarea tensiunii găsite U_0.

Știm că această valoare măsoară aproximativ tensiunea electromotoare a generatorului, adică tensiunea contraelectromotoare a voltametrului.

Variem experiența, făcînd ca timpul de electroliză să dureze 1 min, 2 min, 3 min etc. Măsurăm de fiecare dată tensiunea electromotoare. Ce se constată?

Înlocuim voltametrul cu plăci de Pb printr-un voltametru cu electrozi de cărbune și soluție de $ZnCl_2$ și repetăm experiența ca mai sus.

Cum este tensiunea contraelectromotoare? O notăm.

Ce concluzie se poate trage?

Lucrarea XII

Cîmpul magnetic produs de un curent liniar, circular, și de un solenoid

Experiența 1. **Studiul liniilor de cîmp din jurul unui curent liniar.** Lucrarea arată că un curent trecînd printr-un conductor creează în jurul său un cîmp magnetic care se manifestă prin forțe ce rotesc polul unui magnet.

Aparate, instrumente de măsură, piese necesare: un vas de sticlă, soluție de sulfat de cupru, un inel de cupru care se poate sprijini pe buza vasului. O tijă de cupru suspendată vertical pe un suport. O bară mică magnetizată sau un ac magnetic așezate pe un disc de plută convenabil lestat care plutește în soluția din vas.

Un acumulator 2—4 volți, 48 Ah. Un ampermetru 0—6 A. Un întrerupător, un reostat.

Modul de lucru. Cu elementele indicate mai sus se montează bara magnetizată pe discul de plută cu un pol în afara lichidului. Se echilibrează discul de plută astfel încît să plutească pe suprafața soluției din vas. Tija de cupru suspendată vertical are un capăt puțin introdus în soluția din vas. Celălalt capăt constituie un pol care se leagă la acumulatorul pus în serie cu ampermetrul și reostatul. Inelul care se sprijinea pe buza vasului constituie un al doilea pol al circuitului și se leagă la celălalt pol al acumulatorului. Vasul și dispoziția electrozilor și a barei magnetizate sînt arătate în figura L.16.

Reglăm reostatul în așa fel încît curentul care trece prin circuitul tije, soluție, inel, reostat, ampermetru, acumulatori să aibă o valoare potrivită, 3—4 A. Reglarea se face socotind că ceea ce limitează curentul dat de acu-

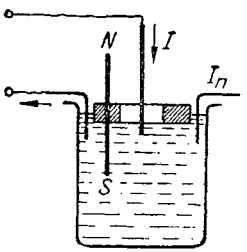


Fig. L.16.

mulatori este valoarea rezistenței reostatului, tija, soluția, inelul având rezistență electrică neglijabilă. Ne convingem de calculul făcut și încercăm punînd și ridicînd foarte repede întrerupătorul. Dacă ampermetrul nu arată valori prea mari putem apoi închide definitiv circuitul.

Trecînd un curent suficient de intens, bara magnetizată se rotește în jurul tijei. Sensul de rotire depinde de sensul curentului care traversează tija verticală.

Se va verifica sensul de rotație al polului nord, apoi al celui sud, față de sensul curentului.

Se va varia intensitatea curentului.

Concluzia care se trage din experiență este că forțele pe care le manifestă cuplul creat de curent sînt tangente la niște cercuri (liniile de cîmp), avînd centrul pe conductor (tijă) — liniile de cîmp sînt închise în jurul conductorului — sensul liniilor de cîmp se alege acela după care este mișcat polul nord al barei magnetizate.

Experiența 2. **Studiul cîmpului magnetic al unui curent circular.** *Obiectul experienței* este de a studia acțiunea cîmpului dat de un curent circular sau a unui multiplicator asupra unui ac magnetic, verificînd proporționalitatea dintre curentul care trece prin multiplicator și unghiul de deviere al acului magnetic. Se va compara fenomenul cu acela al devierii unui ac magnetic sau al unei spire alimentate cu curent în cîmpul magnetic pămîntesc.

Aparatura, instrumente de măsură necesare:

— un cadru circular cu Ø=20 cm, avînd înfășurate pe el 10—15 spire din fir de cupru cu diametrul 0,8—1 mm. Se poate folosi și una din bobinele transformatorului didactic din laboratorul de fizică;

— un ac magnetic care se poate roti în planul orizontal (o busolă);

— un acumulator 4—6 V, 48 Ah; un ampermetru, reostat, întrerupător inversor.

Modul de lucru. În interiorul cadrului (multiplicator) așezat vertical și în centrul său se așază acul magnetic care se poate roti în planul orizontal. Cadrul se poate roti în plan vertical. Îl orientăm în direcția luată de acul magnetic, adică în planul meridianului magnetic.

Facem legătura cadrului cu acumulatorul, ampermetrul, reostatul și cu întrerupătorul puse toate în serie. Reglăm curentul ca în experiența 1, la o valoare potrivită, și apoi închidem pe durată mai lungă întrerupătorul.

Acul magnetic va devia de un anumit unghi ϑ. Pentru măsurarea unghiului așezăm sub ac o hîrtie cu un cerc divizat în grade.

a) Se va nota valoarea unghiului ϑ în funcție de intensitatea curentului I care trece prin cadru.

b) Se va stabili că există o proporționalitate între I și $\operatorname{tg}\vartheta$ ($I=k\operatorname{tg}\vartheta$).

c) Se va stabili relația dintre intensitatea cîmpului magnetic produs și a curentului care trece prin cadru. De asemenea, cu acțiunea de orientare a

acului în cîmpul magnetic pămîntesc — sub influența componentei orizontale a cîmpului magnetic pămîntesc H_0. Cum acul magnetic se mișcă sub acțiunea cîmpului cadrului (H_C) și a componentei H_0 se poate deduce legătura dintre H_C și H_0, și anume $H_C = H_0 \operatorname{tg} \vartheta$. Componenta H_0 este bine cunoscută pentru țara noastră: ~19 A/m. Se poate deci măsura H_C cunoscînd $\operatorname{tg} \vartheta$.

Concluzie. Cîmpul creat de cadru este proporțional cu I și depinde de raza cadrului și de numărul de spire de pe cadru.

Experiența 3. **Cîmpul de inducție magnetică al unui solenoid și folosirea lui în acționările electromagnetice.**

În acționările electromagnetice, automatizări, semnalizatoare, întrerupătoare, acționarea macazelor etc. se folosește acțiunea cîmpului de inducție magnetică dat de un solenoid asupra materialelor magnetice. Se face în prezenta lucrare studiul comportării cîmpului de inducție al solenoidului.

Aparate, instrumente de măsură, materiale necesare:

— un solenoid sau o bobină de transformator. Un acumulator 6—8 V, 48 Ah sau rețeaua de c.c. 110 V a școlii; un ampermetru c.c. de 0—10 V, un întrerupător, un cilindru de fier moale, un dinamometru cu cadran, un reostat.

Modul de lucru. Alimentăm solenoidul de la rețeaua de curent continuu sau acumulator cu un curent de circa 5—8 A (firul cu care este bobinat solenoidul trebuie să nu se încălzească mult cînd trece prin el un curent cu o intensitate de 10—12 A), printr-un reostat în serie cu ampermetrul.

Deasupra solenoidului, intrînd o mică porțiune în interiorul său, suspendăm de un dinamometru cu cadran, un cilindru de fier moale care se poate mișca în direcția axului solenoidului așezat vertical. Pentru a trage cilindrul înapoi cînd solenoidul nu este alimentat cu curent, ne servim de resort pe care îl punem între dinamometru și cilindru de fier.

Înainte de a face să treacă curentul prin solenoid, citim diviziunea indicată de dinamometru. Stabilim, cu ajutorul reostatului, ca la început să treacă prin solenoid curentul minim pentru care se obține o atracție a cilindrului de fier. Notăm valoarea curentului și a diviziunii la dinamometru.

Variem apoi intensitatea curentului și notăm pentru fiecare valoare indicațiile dinamometrului.

Se va stabili relația dintre mărimea forței de atracție F și intensitatea curentului care trece prin solenoid:

$$F = f(I)$$

Se va trasa graficul variației forței cu intensitatea.

Lucrarea XIII

Studiul forței electromagnetice

Experiența studiază forța electromagnetică ce se exercită între cîmpul de inducție dat de un curent și un conductor parcurs de curent.

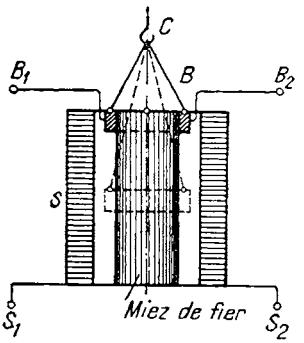


Fig. L.17.

Aparate, instrumente de măsură, piese, materiale etc. Un solenoid S făcut dintr-o carcasă de lemn sau alt izolant de diametru $D=3$ cm, iar înălțimea 8—10 cm. Pe carcasă se înfășoară 200 de spire în 3 straturi, din fir izolat cu diametrul 1—1,2 mm.

O bobină mobilă *B* care va putea să intre în solenoid va fi făcută pe o carcasă izolantă ușoară, de diametrul 2,5 cm, din 50—60 de spire cu fir izolat de diametru 0,3—0,4 mm.

Un miez de fier cilindric de diametrul 2 cm executat din fire de fier răsucite pînă se obține secțiunea corespunzătoare de 2 cm diametru, 2 acumulatori de 4 V, 48 Ah. Ampermetru 0—10 A, întrerupător inversor, 2 reostate; 1 acumulator 2 V, 1 ampermetru 0—1 A.

Modul de lucru. Se face montajul ca în figura L.17. Bobina mobilă poate fi suspendată printr-un fir care trece peste un scripete. Se realizează poziția de echilibru cu greutăți atîrnate de capătul celălalt al firului (se poate suspenda la un dinamometru sau brațul unei balanțe). După ce s-a realizat poziția de echilibru a bobinei mobile față de solenoid facem să treacă un curent de o anumită intensitate prin solenoid (circa 4—5 A) și altul de 0,4—0,5 A prin bobina mobilă.

Bobina va fi atrasă de solenoid.

— Se va căuta să se aprecieze forța de atracție a solenoidului în funcție de intensitatea curentului care trece prin solenoid.

Se va observa ce se întîmplă cînd se schimbă sensul curentului în solenoid, bobina mobilă sau cei doi curenți deodată.

— Se va lungi firul de suspensie al bobinei mobile așa încît să o ducem în porțiunea de mijloc a solenoidului. Cum va fi forța de atracție acum pentru același curent în solenoid și același curent în bobina mobilă?

— Introducînd miezul de fier în solenoid se vor face din nou măsurători ale forței de atracție.

Concluzie. Forța electromagnetică depinde de inducția magnetică creată de curentul din solenoid în prezența miezului de fier. Depinde și de curentul de bobina mobilă. Se va arăta cum intervine lungimea conductorului bobinei mobile în calculul forței electromagnetice.

Lucrarea XIV

Inducția electromagnetică

Experiența 1. **Producerea de tensiuni electromotoare de inducție electromagnetică.**

Scopul lucrării. Să se arate producerea t.e.m. de inducţie electromagnetică prin întreruperea şi restabilirea unui curent.

Materialul necesar: ca la lucrarea studiul forţei electromagnetice, avînd în plus un galvanometru cu şunt.

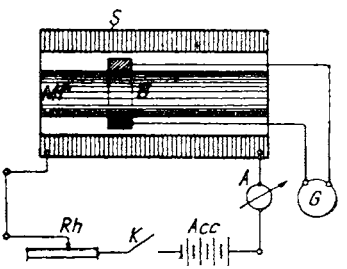


Fig. L.18.

Modul de lucru. Se realizează montajul din figura L.18. Alimentăm solenoidul de la sursa de curent printr-un reostat cu un curent de o anumită valoare. Solenoidul are în interior miezul de fier. La întreruperea sau la restabilirea curentului prin solenoid, prin bobina mobilă care nu este alimentată cu curent, ci este pusă în serie cu galvanometru, va trece un curent care va devia acul galvanometrului din poziţia de zero. După terminarea închiderii sau deschiderii circuitului, acul revine la zero.

— Se va observa sensul deviaţiei acului galvanometrului la închiderea şi deschiderea circuitului.

— Cu ajutorul reostatului se dau diferite valori curentului care trece prin solenoid şi se observă mărimea deviaţiei galvanometrului.

— Se repetă experienţa cu solenoidul fără miez de fier. Se vor nota sensul şi valoarea curentului în bobina mobilă pentru diferite intensităţi ale curentului prin solenoid.

— Se va căuta să se stabilească regula după care se poate afla sensul curentului în bobina mobilă, în cazul închiderii şi în cazul deschiderii circuitului solenoidului.

— Se va observa dacă se produce t.e.m. în bobina mobilă, cînd, după ce s-a închis întrerupătorul din circuitul solenoidului, variem repede mărimea rezistenţei reostatului, fără a ajunge la curenţi prea mari.

— Se va lucra cu bobina mobilă pusă: 1° la mijlocul solenoidului şi 2° aproape de capătul solenoidului.

Concluzie. Se va căuta să se explice cum au luat naştere tensiunile electromotoare de inducţie în bobina mobilă. De ce au scăzut acestea cînd s-a scos miezul de fier din solenoid. Care este dependenţa dintre t.e.m. induse şi curentul care trece prin solenoid.

Experienţa 2. **Verificarea regulii lui Lenz**

Obiectul lucrării este de a se arăta că sensul curentului indus este astfel încît prin acţiunea sa magnetică se opune cauzei care i-a dat naştere.

Materiale necesare sînt acelea din lucrarea de mai sus, sau în loc de solenoid, o bobină care are miezul de fier ceva mai lung decît bobina. În plus, un inel de aluminiu şi un suport pentru suspendarea inelului.

Modul de lucru. Se leagă în serie solenoidul cu un reostat, un ampermetru, un întrerupător inversor şi o sursă de curent.

Cu ajutorul reostatului potrivim valoarea curentului, care nu trebuie să fie prea mare, pentru a nu încălzi solenoidul în mod exagerat. Pe miezul de

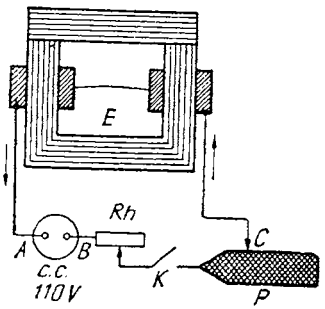


Fig. L.19.

fier al bobinei se pune inelul de aluminiu care înconjură miezul de fier. La închiderea curentului prin solenoid inelul este aruncat în sus.

— Să se explice fenomenul.

— Se repetă experiența după ce se inversează curentul ce trece prin solenoid.

Concluzie. Se va căuta să se arate care este sensul curentului din inelul de aluminiu și cum se explică fenomenele observate. Cum se poate ilustra, din cele observate legea lui Lenz.

Experiența 3. Rolul inductanței la producerea curenților de extraruptură.

Obiectul experienței este de a se arăta că la întreruperea circuitelor cu inductanțe mari, curenții de extraruptură devin foarte mari.

Materiale, aparate, instrumente de măsură: solenoidul cu miez de fier de la lucrarea studiul forței electromagnetice sau un electromagnet (*E*) alimentat de la rețeaua de curent continuu de 110 V a laboratorului, acumulator, întrerupător, ampermetru, fire flexibile izolate în cauciuc. O pilă *P*. Montarea lor se face ca în figura L.19.

Modul de lucru. Se reglează curentul care trece prin electromagnet sau solenoid cu ajutorul reostatului, așa încît intensitatea lui să nu fie dăunătoare înfășurării electromagnetului sau solenoidului.

După ce s-a stabilit curentul potrivit, închidem pe o durată mai lungă întrerupătorul și mișcăm un conductor (capătul dezizolat *C* al conductorului) pe partea aspră a pilei. Se observă scîntei foarte luminoase, care se produc ori de cîte ori firul trece de la o asperitate la alta a pilei și întrerupe astfel circuitul.

Se va repeta experiența fără miezul de fier al electromagnetului. Scînteile sînt mai puțin luminoase. Să se explice de ce?

Concluzia. Inductanțele mari din circuit măresc curenții de extraruptură.

Lucrarea XV

a. Tema. **Trasarea caracteristicii de grilă a unei triode.**

b. *Aparate și materiale necesare.* Alimentatorul IMD pentru curent continuu și alternativ, triodă în soclu fixat pe o scîndură; avînd bornele scoase la bucșe, potențiometru, miliampermetru de 100 mA, voltmetru de 100 V, voltmetru 300 V, fire de legătură cu fișe, hîrtie milimetrică. Se poate folosi de asemenea trusa electronică IMD.

Principiul metodei. Fixîndu-se tensiunea anodică U_a la o anumită valoare, se măsoară valorile curentului anodic I_a pentru valorile tensiunii de grilă U_g,

care variază între 0 și o tensiune oarecare negativă. Se reprezintă grafic $I_a=f(U_g)$ pentru $U_a=$const. obținînd curba caracteristică de grilă a triodei.

d. *Procedeu experimental.* Legarea la sursa electrică se face numai după ce montajul a fost verificat de conducătorul lucrării. Se face montajul din figura L.20. Filamentul se alimentează la 6,3 V curent alternativ. Tensiunea continuă anodică U_a se ia de la alimentatorul IMD, iar tensiunea de grilă U_g se ia tot de la alimentator, prin intermediul potențiometrului R.

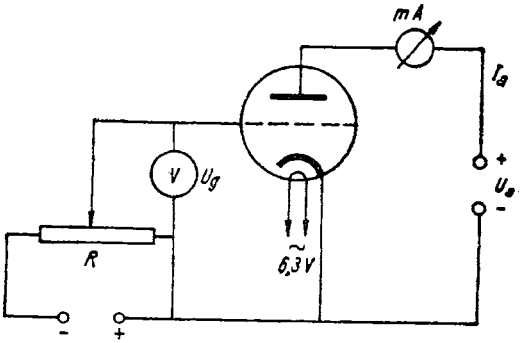


Fig. L.20.

Variantă. Același montaj se poate realiza cu trusă electronică IMD. În acest scop, pe placa de bază se prinde planșa șablon VI (fig. L.21) pe care se fixează în locașurile respective: suportul cu tubul electronic, avînd comutatorul lateral pe poziția T, miliampermetrul mA, voltmetrul V, potențiometrul de 0,5 MΩ, potențiometrul de 15Ω. Alimentarea se face la bornele și cu valorile de tensiuni indicate pe planșa șablon (fig. L.21).

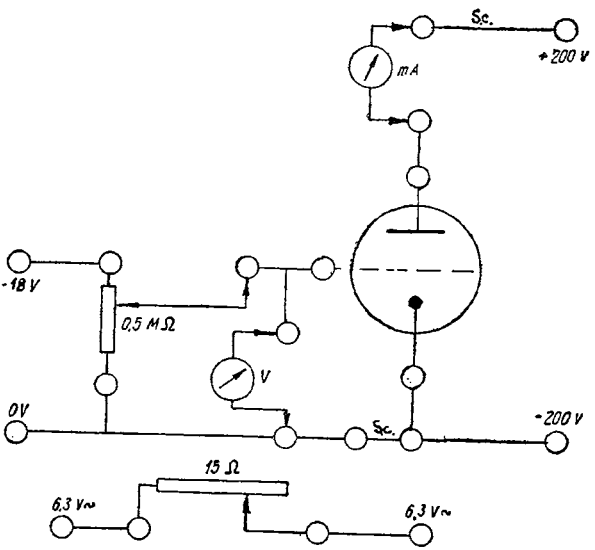


Fig. L.21.

Mersul experienței este același în ambele montaje. Se vor trasa trei curbe caracteristice: una pentru U_a=100 V, alta pentru U_a=150 V și alta pentru U_a=200 V. Se aplică la anod tensiunea continuă de 100 V, care *este menținută constantă*; la grilă se aplică tensiunea continuă de —20 V, iar la filament tensiunea alternativă de 6,3 V. Cu ajutorul potențiometrului se variază tensiunea de grilă U_g din volt în volt, citită la voltmetrul V, de la 0

pînă la o valoare care anulează curentul anodic I_a, citit la mA. Pentru același U_a se citește I_a care corespunde la fiecare U_g. Se repetă apoi experiența la fel, aplicînd la anod tensiunea U_a=150 V=const., apoi pentru U_a=200 V= =constant.

e. *Tabel de rezultate.* Toate rezultatele măsurătorilor făcute se trec în tabelul de rezultate:

U_g V	U_a V	I_a mA	U_a V	U_g V	I_a mA	U_a V	U_g V	I_a mA
100			150			200		

f. *Valorificarea rezultatelor obținute.* Curba caracteristică a triodei pentru cele trei tensiuni anodice se trasează pe același grafic, pe hîrtie milimetrică. Pe abscisă se reprezintă U_g, iar pe ordonată se reprezintă I_a. Ce particularitate prezintă curbele caracteristice? De ce nu prezintă curentul de saturație? El ar putea fi pus în evidență dacă încălzirea s-ar face numai cu tensiunea $\approx$ 2 V. De ce?

Cu ajutorul curbelor caracteristice trasate să se calculeze panta $S=\frac{\Omega\Delta I_a}{\Delta U_g}$ pentru U_a=constant, rezistența interioară a triodei $R_i=\frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$ pentru U_g= =constant și factorul de amplificare $\mu=\frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}$ pentru I_a=constant.

Lucrarea XVI

a. T e m a. **Funcționarea triodei ca amplificator.**

b. *Aparate și materiale necesare.* Alimentatorul IMD pentru curent continuu și alternativ, trusa electrică IMD, fire de legătură cu fișe, baterie de lanternă.

c. *Principiul metodei.* Se folosește trioda ca amplificator de oscilații de frecvență acustică, produse de un microfon. Schema generală este arătată în figura L.22. Negativarea grilei aduce punctul de lucru al triodei pe mijlocul porțiunii rectilinii a caracteristicii de grilă.

d. *Procedeu experimental.* Legătura cu alimentatorul se face numai după verificarea montajului de către conducătorul lucrării. Se realizează montajul (fig. L.23. partea din dreapta liniei întrerupte) indicat de planșa șablon VII din trusa electronică IMD. Pe planșă se introduc în locașurile corespunzătoare: suportul cu tubul electronic, avînd comutatorul lateral pe poziția T, difuzorul cu rezistență mare, potențiometrul de 100 kΩ ; rezistoarele de 0,5 MΩ, respectiv 120Ω , condensatoarele de 10 μF respectiv 50μ F, miezul de fier în U cu bobinele L_1 și L_2 de 2 500 spire și 12 000 spire. La bornele *DC*

se aplică semnalul de amplificat. Acesta se obține de la un microfon prin montajul din figura L. 23 (partea din stînga liniei întrerupte). Legătura se face prin fire cu fișe între *A—C* și *B—D*. Alimentarea se face cu bornele și cu valorile de tensiuni indicate pe planșele șablon, luate de la alimentatorul IMD.

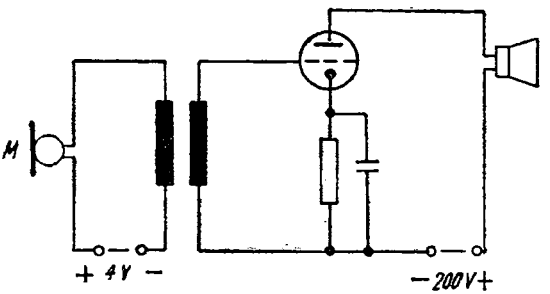


Fig. L.22.

Mai întîi, se leagă difuzorul la bornele *A—B*, fără legătură cu planșa VII. Sunetul unui diapazon, pus în fața microfonului, se aude slab în difuzor. Apoi se conectează difuzorul la locul său în circuitul anodic (planșa VII) și se unesc *A* cu *C* și *B* cu *D*. De data aceasta difuzorul redă puternic sunetul diapazonului recepționat de microfon.

e. *Valorificarea rezultatelor obținute.* Se observă efectul de amplificare produs de triodă.

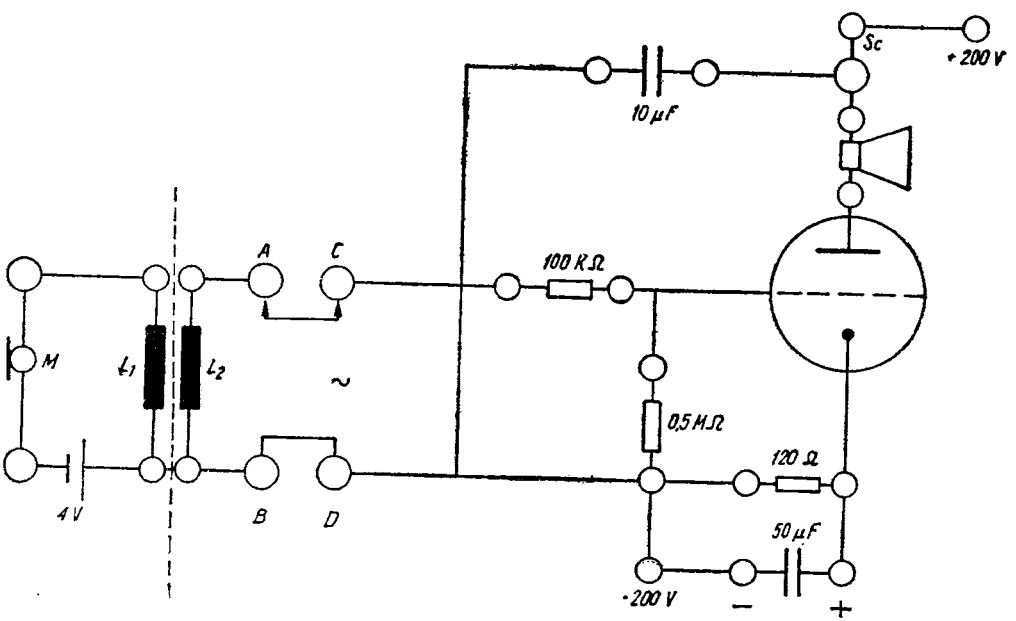


Fig. L.23.

Lucrarea XVII

a. Tema. **Radioemisia şi radiorecepţia.**

b. *Aparate şi materiale necesare.* Panourile realizate de IMD, fire de legătură cu fişe.

c. *Principiul metodei.* Primul panou conţine un aparat de radioemisie cu o triodă. Montajul este desenat pe panou. Pe acelaşi panou este montat alimentatorul. Panourile sînt fixate vertical pe suporturi. Oscilaţiile generate de triodă sînt modulate de un microfon.

Al doilea panou, fixat vertical pe suport, conţine un radioreceptor cu o dublă triodă detectoare-amplificatoare şi o triodă amplificatoare. Pe acelaşi panou este montat şi alimentatorul. Radioreceptorul poate recepţiona undele emise de panoul radioemiţător.

d. *Procedeu experimental.* Pentru a pune în funcţiune radioemiţătorul se conectează aparatul la reţeaua de curent alternativ 110 V sau 220 V. În prealabil comutatorul să fie adus la borna corespunzătoare reţelei oraşului. Se închide circuitul şi se aşteaptă pînă se încălzesc tuburile electronice. Se reglează capacitatea condensatorului variabil C_3 pînă ce lampa L_p luminează maxim, semn că oscilatorul oscilează.

Radioreceptorul se conectează de asemenea la priză şi se reglează capacităţile variabile C_2, C_3, C_4 pînă ce audiţia este maximă în difuzor. Se vorbeşte în faţa microfonului şi se ascultă în difuzor. Pentru a fi mai elocvent, radioreceptorul se poate aşeza în altă încăpere.

C u p r i n s u l

Electrocinetica

I. Legile curentului electric continuu 3

A. Curentul electric 3
B. Intensitatea curentului electric 8
C. Tensiunea şi rezistenţa electrică. Legea lui Ohm . . . 10
D. Legile lui Kirchhoff şi aplicaţiile lor 23
E. Energia şi puterea curentului electric 29
F. Aplicaţiile efectului termic al curentului electric 31

II. Curentul electric prin electroliţi 33

A. Electroliza şi legile ei 33
B. Aplicaţiile electrolizei în tehnică 40
C. Polarizarea electrozilor unui voltametru. Acumulatorii . 43

Electromagnetismul

I. Fenomene electromagnetice 47

A. Acţiuni electromagnetice 47
B. Cîmpul magnetic al curentului electric. Legea lui Biot şi Savart 55
C. Acţiunea reciprocă a curenţilor electrici. Forţa electrodinamică 59
D. Aplicaţii ale fenomenelor electromagnetice 62

II. **Inducţia electromagnetică** 76

A. Fenomenele de inducţie electromagnetică. Tensiuni electromotoare induse 76
B. Autoinducţia 87

Generatoare, motoare, transformatoare

I. **Curentul alternativ** 91

II. **Maşini electrice** 107

A. Maşini electrice de curent alternativ 108
B. Maşini de curent continuu 121

III. **Transportul energiei electrice la distanţă** 133

A. Transformatoare 135
B. Transformatoare speciale 139

IV. **Alte aplicaţii ale inducţiei electromagnetice şi curentului alternativ** 142

A. Telefonul 142
B. Magnetofonul 144

Electrificare

A. Planurile de electrificare 149
B. Bazele fizice ale electrificării. Producerea energiei electrice 151
C. Centrale electrice 155
D. Sistemul electroenergetic naţional 160
E. Transportul şi distribuţia energiei electrice 162

Curentul electric în gaze

A. Ionizarea gazelor 163
B. Descărcarea în gaze la presiune normală 167
C. Descărcări în gaze rarefiate 168

Oscilaţii şi unde electromagnetice
Tuburi electrice

A. Oscilaţii electromagnetice . . . 173
B. Cîmp electromagnetic 180
C. Tuburi electronice 187
D. Radiocomunicaţii 195

Anexă

Lucrări practice 200

Coli de tipar: 14.25
Tiraj 17 000+100
Anul de apariție: 1974

Tiparul executat sub comanda nr. 574.
al Întreprinderea poligrafică „Crișana", Oradea
str. Moscovei nr. 5.
Republica Socialistă România

Lei 5.15

